



Executive Stakeholder Summary

Projektnummer	406840_143026
Titel	Einfluss des Klima- und Landnutzungswandels auf den Bodenkohlenstoff in Schweizer Böden
Projektleiter	Samuel Abiven, Universität Zürich
Weitere Projektverantwortliche	Pascal A. Niklaus, Universität Zürich

Beitrag zur thematischen Synthese:

<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: Zürich, 22.12.2016

Hintergrund

Die organische Substanz ist einer der Hauptbestandteile des Bodens. Sie entsteht durch die Zersetzung von Streu, Wurzeln und anderen organischen Verbindungen wie Kohle aus Waldbränden. Die organische Substanz übernimmt zahlreiche Aufgaben im Boden. So ist sie in weiten Teilen für dessen physikalische, chemische und biologische Fruchtbarkeit verantwortlich. Organische Moleküle enthalten per Definition Kohlenstoff (C). Entsprechend sind im Boden grosse Mengen an Kohlenstoff vorhanden – drei Mal mehr als in der pflanzlichen Biomasse oder in der Atmosphäre. Böden spielen deshalb eine grosse Bedeutung im Zusammenhang mit dem Klimawandel. Sie sind der wichtigste Speicher für Kohlenstoff und somit für das Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) in den terrestrischen Ökosystemen. Allerdings kann die Veränderung der Umweltbedingungen, zum Beispiel aufgrund klimatischer Faktoren, zu einer erhöhten Mineralisierung (Zersetzung) der organischen Substanz und somit zu einer Zunahme der CO₂-Emissionen aus dem Boden führen. Wie sensibel die organische Bodensubstanz tatsächlich auf Klimaänderungen reagiert, ist aber bisher nur wenig bekannt. Für die Prognose potenzieller Freisetzungen von Kohlenstoff aus dem Boden und für den Schutz der empfindlichsten Zonen spielt die Klimaanfälligkeit jedoch eine wesentliche Rolle.

Ziel

Ziel dieses Projektes war es, die Anfälligkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) in Schweizer Waldböden auf Klimaänderungen darzustellen. Dabei kamen mehrere methodologische Ansätze zum Einsatz. Die Anfälligkeit der OBS kann als potenzielle Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Boden bei Änderung der Umweltbedingungen definiert werden. Mehrere Merkmale können dazu verwendet werden: beispielsweise die freigesetzte Kohlenstoffmenge durch Atmung von Mikroorganismen oder durch Auswaschung im Vergleich zur ursprünglich im Boden vorhandenen Kohlenstoffmenge, das Alter des freigesetzten Kohlenstoffs im Vergleich zum Alter des Kohlenstoffs im Boden, die Menge der Kohlenstofffreisetzung, wenn der Boden einem exogenen Stress unterliegt.

Waldböden sind in Bezug auf OBS besonders interessant. Ihre OBS-Speicher sind häufig sehr umfangreich. Allerdings variiert die Qualität (immanente Merkmale) dieser OBS in Abhängigkeit von den Baumarten, dem Bodentyp und den klimatischen Bedingungen, wobei die Art der Waldbewirtschaftung die Umweltbedingungen markant beeinflussen kann – und somit die Kohlenstoffmengen in den Böden. In dieser Hinsicht weist der Schweizer Wald eine besonders grosse Vielfalt auf – klimatisch (vom Kontinentalklima der Genferseeregion bis hin zum mediterranen Klima des Tessin), pedologisch (sehr unterschiedliche Bodenverhältnisse) oder orografisch (Ebene und Gebirge).

Für die Prognose der Anfälligkeit der OBS auf nationaler Ebene haben wir einen Ansatz entwickelt, der von gross angelegten ökologischen Studien inspiriert wurde. Auf Basis einer sehr umfangreichen Datenbank der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) über Schweizer Waldböden mit knapp 1300 archivierten Bodenprofilen und -proben haben wir 54 Standorte ausgesucht, deren Merkmale für das Klima (Temperatur und Niederschläge), für den Boden (Säuregehalt und Tonanteil) und für das Gelände (Orientierung und Steigung) repräsentativ sind. Die Standorte wurden so ausgewählt, dass die verschiedenen Parameter keine Wechselwirkung aufweisen. So kann anschliessend definiert werden, welcher dieser Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Beobachtungen hat, ohne dass sich die Bedeutung der Variablen überlagert.

An den gewählten Standorten haben wir erneut Bodenproben entnommen und verschiedene Parameter, die mit der Anfälligkeit der OBS zusammenhängen, analysiert: die durch Atmung und Auswaschung freigesetzte Kohlenstoffmenge bei optimalen Bedingungen (Inkubationssystem), bei höheren Temperaturen (+5°C) und für Böden, die einem Wechsel von Frost und Tauwetter unterlagen, das Alter dieses freigesetzten Kohlenstoffs (durch Messung des ¹⁴C) und die physikalische Lokalisierung dieser organischen Substanz im Boden (frei oder mit der mineralischen Phase des Bodens verbunden). Um ein Modell der Kohlenstoffdynamik dieser 54 Böden zu erarbeiten, haben wir die seit annähernd 20 Jahren bei der WSL archivierten Proben erneut analysiert und die gewonnenen Ergebnisse zusammen mit den Analysen der frischen Bodenproben auf einer Zeitachse positioniert.

Resultate

Das erste wesentliche Ergebnis dieser Arbeit ist die spezifische Definition zweier Arten von Anfälligkeit: die *potenzielle* Anfälligkeit, die auf der Dynamik des Bodenkohlenstoffs beruht (Mineralisierung, Solubilisierung, Alter des Kohlenstoffs), unter gleichbleibenden und für die Zersetzung optimalen Bedingungen (Bodenfeuchte, die der Kapazität im Feld nahekommt, und Temperatur von 25°C) und die *aktuelle* Anfälligkeit, die auf der Reaktion dieser Kohlenstoffdynamik auf die Bodenbehandlungen beruht (Temperaturanstieg, Frost-Tauwetter-Zyklen, Einbringung von Pflanzen in den Boden). Mit diesem Ansatz lassen sich Böden, die von Natur aus mehr Kohlenstoff freisetzen, von Böden unterscheiden, die zukünftig Kohlenstoff freisetzen könnten. Diese beiden Arten von Anfälligkeit werden durch die Kohlenstoffspeicherung und durch die durchschnittliche Verweildauer dieses Kohlenstoffs im Boden bestimmt. Diese beiden Definitionen der Anfälligkeit fallen nicht systematisch zusammen.

Im Falle der *potenziellen* Anfälligkeit wird die durchschnittliche Verweildauer hauptsächlich mit der Feuchtigkeit und dem pH-Wert der Böden erklärt. Die Temperatur und der Tongehalt spielen erstaunlicherweise nur eine geringe Rolle bei der Bestimmung dieses Parameters. Die Böden in den Alpen und im Tessin zeichnen sich durch die grösste potenzielle Anfälligkeit aus.

Die Studien über die *aktuelle* Anfälligkeit sind noch nicht abgeschlossen. Erste Ergebnisse zeigen, dass ein Temperaturanstieg von 5°C hauptsächlich Böden mit einer geringen Atmung bei für die Zersetzung optimalen Bedingungen betrifft (Bodenfeuchte, die der Kapazität im Feld nahekommt und Temperatur von 25°C) und weniger Böden, die eine sehr hohe Atmung aufweisen. Für Böden, die einem Wechsel von Frost- und Tauwetter unterlagen, ist das Ergebnis uneinheitlicher, wobei diese Böden jedoch generell weniger atmen. Dieses Ergebnis ist insofern erstaunlich, als die Frost-Tauwetter-Mechanik den Boden zersetzt und somit den von den Mineralstoffen geschützten Kohlenstoff zugänglicher macht.

Die Modellbildung der OBS-Dynamik für die verschiedenen Böden – durch den Vergleich der Kohlenstoffspeicherung in den seit 20 Jahren archivierten Proben und den im Laufe dieses Projektes gewonnenen Proben – hat gezeigt, dass es möglich ist, Modelle wie RothC zu parametrisieren, insbesondere durch Verwendung von ¹⁴C-Werten, um die durchschnittliche Verweildauer in den verschiedenen Pools des Modells festzulegen. Die Modellbildung hat insbesondere ergeben, dass bei Böden mit stark eingeschränkter OBS-Zersetzung (kalte und trockene Bedingungen) das ¹⁴C-Signal, das aus den in den 1950er-Jahren durchgeführten Atomtests stammt, in den verschiedenen Bodenteilen noch stark wahrnehm- und identifizierbar

ist, während dieses Signal in Böden unter anderen Bedingungen nicht mehr feststellbar ist. Dank diesem Ergebnis können diese ¹⁴C-Daten für die OBS unter einem neuen Aspekt betrachtet werden.

Die Rolle der Pflanzen bei der OBS-Anfälligkeit ist ebenfalls bemerkenswert. Die Wurzelatmung der für unsere Studien ausgewählten Pflanzen verdoppelte sich unter den für 2070 vorhergesagten klimatischen Bedingungen, während die Bodenatmung um 25 bis 40 Prozent anstieg. Diese Auswirkung ist auf die Zunahme der Blattoberfläche (+20%) und der Wurzelbiomasse (+40%) zurückzuführen. Böden mit einer grösseren potenziellen Anfälligkeit haben im Übrigen auf das Klimaszenario 2070 stärker reagiert.

Bedeutung für die Forschung

Unsere Ergebnisse haben vielfältige Implikationen für die Forschung. Einer der wichtigsten Aspekte unserer Studie ist die grossräumige Gegenüberstellung verschiedener Parameter, die bei der Kohlenstoffdynamik eine Rolle spielen können. Im Gegensatz zu den meisten OBS-Studien, bei denen Parameter wie Klima oder Bodenmerkmale separat, das heisst, Parameter für Parameter getestet wurden, haben wir eine Versuchsanordnung erarbeitet, mit deren Hilfe die in der Literatur als wichtig angesehenen Parameter statistisch getrennt werden konnten. Mit diesem Ansatz lassen sich die verschiedenen Parameter nach ihrer Bedeutung klassifizieren und somit eine einfache und breit angelegte Modellbildung dieser verschiedenen Bestandteile des Ökosystems in Betracht ziehen.

Ein anderes bedeutsames Ergebnis ist der Nachweis eines stark unterschiedlichen Verhaltens von Variablen wie der durchschnittlichen Verweildauer je nach verwendeter Berechnungsmethode. Unser Datenpool ermöglicht einen systematischen Vergleich dieser verschiedenen Methoden und somit einen rationaleren und systematischeren Einsatz dieser Werkzeuge für die Zukunft. Die Modellbildung aufgrund der ¹⁴C-Werte von frischen und archivierten Proben ermöglicht es zudem, die Verwendung der Radiokohlenstoffdatierung für Böden zu überdenken.

Schliesslich stellt unsere Studie die Rolle des Systems Boden-Pflanze und die Interaktionen zwischen diesen beiden Bestandteilen der terrestrischen Ökosysteme in den Vordergrund. Die Reaktivität dieser Kohlenstoffpools ist unterschiedlich, aber voneinander abhängig, insbesondere bei Veränderung der äusseren Bedingungen.

Bedeutung für die Praxis

Unsere Studie hat für die Praxis vielfältige Bedeutung. Zunächst macht sie deutlich, wie stark die Dynamiken und Anfälligkeiten der OBS je nach geographischer Lokalisierung und Faktoren wie Klima oder Boden variieren. Eine künftige Bodenschutzpolitik muss deshalb den lokalen Bedingungen und in gewissem Masse dem Einzelfall Rechnung tragen.

Aufgrund des Datenpools können wir Prognosewerkzeuge für die Anfälligkeit von Böden vorschlagen – entweder aufgrund statistischer Modelle oder einfacher Messungen (wie die Infrarotmessung von organischer Substanz). Dank unserer Methode bei der Auswahl von Standorten können wir in der Zukunft ein Werkzeug erarbeiten, das die Klassifizierung der Anfälligkeit eines Bodens aufgrund seines Kohlenstoffgehalts ermöglicht. Es ist jedoch wichtig, dass wir im Vorfeld die Definition für (potenzielle, aktuelle) Anfälligkeit auswählen, die am besten für die Praxis geeignet ist – und zwar mit ebenfalls angepassten Werkzeugen (zum Beispiel Auswahl der Methode für die Berechnung der durchschnittlichen Verweildauer).

Unsere Studie kann ferner in Treibhausgasinventare integriert werden, insbesondere durch Verwendung der von uns entwickelten Modelle und Modellergebnisse. Ein Teil dieser Daten, zum Beispiel die extensive Verwendung von ^{14}C , ist für einen umfassenden Gebrauch nicht direkt einsetzbar. Die Parametrisierung der Modelle lässt sich hingegen für Berechnungen der Massenbilanzierung direkt verwenden.

Empfehlungen

Aufgrund unserer Studie haben wir die folgende Empfehlungen formuliert:

- **Berücksichtigung auf gleicher Ebene von verschiedenen Parametern, die die Kohlenstoffdynamik beeinflussen können.** Dank unserer Methode bei der Auswahl von Standorten konnten wir die verschiedenen Parameter vergleichen, bei denen üblicherweise davon ausgegangen wird, dass sie die Kohlenstoffdynamik beeinflussen. Werden diese unterschiedlichen Faktoren auf dieselbe Vergleichsebene gestellt, so ergeben sich unterschiedliche Tragweiten. Ein Beispiel: Trotz einer sehr umfangreichen Literatur über die Bedeutsamkeit des Tongehaltes auf die OBS-Zersetzung scheint dieser Faktor im Vergleich zu anderen Parametern nicht massgeblich zu sein. Eine derartige Studie und umfassende Betrachtung scheinen uns bei der Berücksichtigung ausgedehnter Landflächen von grösster Bedeutung.
- **Kombination umfassender Datenbanken mit den speziellen OBS-Messungen.** Dank der Grösse der WSL-Datenbank war es uns möglich, Standorte gemäss unserer Hypothesen auszuwählen und anschliessend die Anzahl der Analysen so zu reduzieren, dass sie unserer Fragestellung entsprechen. Diese Verbindung ermöglicht eine effizientere Analyse als Untersuchungen zu Einzelfällen oder Analysen allgemeiner und nicht-spezifischer Datenbanken. Deshalb sollte dieser doppelte Ansatz bevorzugt zur Anwendung kommen.
- **Berücksichtigung der Dynamiken auf lange Sicht.** In unserer Studie bilden wir die durchschnittliche Verweildauer über mehrere Jahrzehnte ab. Auch in dem Teil unserer Arbeit, die den Vergleich von archivierten, zirka 20-jährigen und frischen Proben betrifft, sind Veränderungen bei der Kohlenstoffspeicherung nur schwer festzustellen. Ähnlich sieht die Situation bei der Analyse von OBS aus. Auch hier sind Veränderungen, insbesondere bei der Zunahme der Kohlenstoffspeicherung, langsam. Deshalb ist zu berücksichtigen, dass zukünftige Massnahmen sich eher innerhalb von Jahrzehnten als von Jahreszeiten auswirken.
- **Berücksichtigung der Anfälligkeit der OBS für bestimmte Böden.** Wenn wir aktuell die Anfälligkeit der OBS auch nur schwer vorhersagen können (die Prognosewerkzeuge werden gegenwärtig ausgearbeitet), können wir geographische Zonen und Böden, die besonders gefährdet sind, bereits identifizieren. Hierzu gehören die Böden der Alpenregion, insbesondere jene mit einem hohen pH-Wert. Diesen Böden sollte bereits zum aktuellen Zeitpunkt besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.
- **Berücksichtigung des Systems Boden-Pflanze.** Die mit dem Wurzelsystem zusammenhängenden Änderungen des Kohlenstoffzyklus sind mindestens gleichwertig mit denen von den Böden ausgehenden Änderungen. Dies zeigten unsere Untersuchungen ausgewählter Böden mit eingebrachten Pflanzen, die demselben Klimaszenario unterworfen wurden wie die Böden. Es ist daher sehr wichtig, das System Boden-Pflanze im Rahmen künftiger Prognosen zur Kohlenstoffentwicklung in terrestrischen Ökosystemen zu betrachten.