



Executive Stakeholder Summary

Projektnummer: 40FA40_154247

Projekttitel: COMET-Global: Bilanzierung von Treibhausgas-Emissionen

Projektleiter: Prof. Johan Six, ETH Zürich

Beiträge zu den thematischen Synthesen:

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

Ort / Datum: Zürich, 31. Mai 2017

Hintergrund

Der Anstieg des Gehalts von Treibhausgasen (THG) in der Atmosphäre – insbesondere von Kohlendioxid (CO₂), Stickstoffoxid (N₂O) und Methan (CH₄) – und ihre Auswirkungen auf das Klima lösen weltweit Beunruhigung aus. Der technologische Fortschritt führte zwischen 1970 und 2010 zu einer Intensivierung der Landwirtschaft und einer Verdoppelung der Ernten, aber auch zu gravierenden Umweltproblemen. Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung bewirkte einen historisch einzigartigen Verlust von 50 Gt (1 Gigatonne = 1'000'000'000 Tonnen) organischen Bodenkohlenstoffs in Form von CO₂. In zahlreichen ackerbaulich genutzten Gebieten ist der Kohlenstoffgehalt der Böden aufgrund der intensiven Landwirtschaft und des Klimawandels weiterhin rückläufig. Die Boden- und Düngewirtschaft, die enterogene Fermentation der tierischen Verdauung, das Verbrennen von Biomasse und der Reisanbau sind inzwischen die grössten anthropogenen Quellen von N₂O und CH₄. Je nach Region ist der Stellenwert dieser Emissionsquellen unterschiedlich. Im Jahr 2010 verursachte die Landwirtschaft 5,0–5,8 Gt CO₂-Äquivalente pro Jahr, das heisst 10–12 Prozent der gesamten anthropogenen THG-Emissionen. Zudem beanspruchte die Land- und Forstwirtschaft rund 2 Prozent des weltweiten Energieverbrauchs. Mit einer effizienteren und nachhaltigeren Verwendung der Ressource dürfte sich der ökologische Fussabdruck der Landwirtschaft beträchtlich senken lassen. Insbesondere in Gebieten mit Pflanzenproduktion besteht Interesse an Anbaupraktiken, die die Vorräte an organischen Substanzen im Boden erhöhen und zugleich den Abbau essenzieller Nährstoffe und die THG-Emissionen aus dem Boden verringern.

Die Forschung hat eine Reihe von möglichen Anbausystemen vorgeschlagen, die dazu beitragen können, die THG-Emissionen aus Böden markant zu verringern, beispielsweise der effizientere Einsatz von Düngemitteln, der Biolandbau, eine weniger intensive Bodenbearbeitung oder der vollständige Verzicht auf Bodenbearbeitung, die Belassung der Rückstände auf den Feldern, das Anpflanzen von Bodendeckungen für den Winter (Gründüngung) oder Verbesserungen der Wassernutzung im Reisanbau. Das biophysikalische Potenzial zur Reduktion des Abbaus und damit der Emissionsreduktion dieser Massnahmen muss für die einzelnen Anbausysteme unter spezifischen Boden- und Klimaverhältnissen, historischen Landnutzungs- und Anbaumethoden evaluiert werden.

Bio-geochemische prozessbasierte Ökosystem-Modelle stellen die effizienteste Möglichkeit dar, die Auswirkungen landwirtschaftlicher Anbausysteme auf THG-Emissionen in kleineren und grösseren räumlichen und zeitlichen Dimensionen zu quantifizieren. In jüngster Zeit wurden solche Modelle und darin integrierte umfassende Entscheidungsfindungsinstrumente eingesetzt, um nachhaltige Ansätze zur Reduktion der THG-Emissionen sowie ihre biologische und ökonomische Durchführbarkeit in der Landwirtschaft zu identifizieren und zu evaluieren. Zudem unterstützten sie die Umsetzung Massnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen in der Landwirtschaft, die in den regionalen und landesweiten Klimawandelstrategien eine bedeutende Rolle spielen.

Sollen THG-Reduktionsstrategien in der Landnutzung erfolgreich umgesetzt werden, ist es unabdingbar, Zugang zu haben zu zuverlässigen und leicht zugänglichen Folgeabschätzungen verschiedener Landnutzungen und Anbausysteme auf die THG-Emissionstätigkeit. Zudem ist der Informationsbedarf dort abzudecken, wo effektiv Anbauentscheidungen gefällt werden, das heisst für jedes einzelne Feld. Daher sollten Informations- und Entscheidungsfindungssysteme folgende Eigenschaften aufweisen: 1) leicht und universell abrufbar, 2) nutzbar für Laien, 3) technologisch auf dem neuesten Stand und 4) leicht an grössere Massstäbe anpassbar.

Ziel

Ziel des Projekts COMET-Global war es, ein benutzerfreundlichen und modernsten Möglichkeiten entsprechendes COMET-Global-Instrument zu entwickeln und einzuführen, das eine umfassende Bilanzierung von Treibhausgas Emissionen für die einzelnen Betriebseinheiten (z. B. Bauernhof, Nutztier-Betrieb) in den verschiedenen Partnerstaaten erlaubt, einschliesslich mehrerer EU-Länder, der USA und Australiens.

Das COMET-Global-Instrument basiert auf einem bereits bestehenden umfassenden, gesamtbetrieblichen und vollumfänglichen web-basierten THG-Instrument, das unter dem Namen «COMET-Farm» für den Einsatz in den USA entwickelt wurde (<http://cometfarm.nrel.colostate.edu>). COMET-Farm quantifiziert auf Einzelbetriebsebene alle wichtigen Kategorien von THG-Quellen und -Senken samt aus dem Boden stammendem CO₂, N₂O und CH₄, enterischem CH₄ der Viehbestände, CH₄ und N₂O aus der Düngewirtschaft und CO₂ aus dem betrieblichen Energieverbrauch. COMET-Farm verwendet eine umfassende räumliche Schnittstelle, die es vereinfacht, diverser Datenbanken zu verschiedenen Standorten, von den Benutzern erfassten standortspezifischen Bewirtschaftungsdaten und einer Reihe von Modellen zur Abschätzung von THG-Quellen und -Senken zu integrieren. Zu diesen Modellen zählt beispielsweise ein weitverbreitetes prozessbasiertes DayCent-Modell zur Quantifizierung von THG-Emissionen aus dem Boden sowie mehrere weitere empirisch gestützte Emissionsmodelle für andere Kategorien von landwirtschaftlichen THG-Quellen.

Der Beitrag der ETH an das Projekt COMET-Global bezweckte Folgendes:

- a) Zusammenstellung von Langzeit-Experimentaldatensätzen aus der Schweiz mit Zeitreihenmessungen von Ernteerträgen, Bodenkohlenstoffgehalt und den THG-Emissionen aus dem Boden, wobei zur Parametrisierung der Modelle und zur Evaluation verschiedener Bewirtschaftungsfaktoren (z.B. Düngung, Art der Kulturpflanzen, Bodenbearbeitung, Einsatz von Gülle) verwendet wurden.
- b) Parametrisierung des DayCent-Modells für gebräuchliche Nutzpflanzen und Anbausysteme mit Hilfe empirischer Langzeitdaten zu unterschiedlichen Boden- und Klimaverhältnissen an vier Versuchsstandorten in der Schweiz sowie Evaluation der Eignung des Modells zur Prognose der langfristigen Ernteproduktivität, der Dynamik des Bodenkohlenstoffs sowie der N₂O-Emissionen aus dem Boden in verschiedenen Schweizer Anbausystemen;
- c) Zusammenstellung und Konfiguration von Geodatensätzen für die ganze Schweiz als Treibervariablen für das DayCent-Modell innerhalb des COMET-Global-Instruments.
- d) Zusammenstellung spezifischer schweizerischer und Standard-Emissionsfaktoren und -Parameter für andere als bodenbezogene THG-Emissionsquellen für die länderspezifische Anwendung von COMET-Global.
- e) Zusammenstellung/Kategorisierung von Landbewirtschaftungspraktiken in der Schweiz, um innerhalb des COMET-Global Instruments relevante Bewirtschaftungsmöglichkeiten zur Verfügung zu stellen.
- f) Evaluation der langfristigen Folgen von Bewirtschaftungsmethoden und der Kombination dieser Methoden für THG-Emissionen aus Schweizer Landwirtschaftsbodenflächen in standortbezogenem, regionalem und landesweitem Massstab.

Ergebnisse

Die empirischen Daten stammen aus vier schweizerischen Langzeit-Feldversuchen in Therwil (DOK-Versuch Anbausysteme; 1977–2013), Frick (biologischer Landbauversuch Frick; 2002–2013), Changins (P29C Bodenbearbeitungsversuch; 1969–2013) und Reckenholz (FAST-Versuch; 2009–2013). Diese Langzeitversuche dienten zur Evaluation verschiedener Anbausysteme und Bodenbewirtschaftungsmethoden. Die Anzahl der Versuchsfelder, der Aufbau und der Langzeitcharakter der Experimente ergaben einen soliden Datensatz als Grundlage für die Parametrisierung und Evaluation des DayCent-Modells unter Berücksichtigung einer Reihe von Anbaumethoden und unter verschiedenen Boden- und Klimaverhältnissen in der Schweiz. Die Parameter für das DayCent-Modell beziehen sich auf in der Schweiz angebaute Hauptkulturen. Die Tauglichkeit des Modells für die Prognose der Ernteerträge, des vorhandenen Bodenkohlenstoffs, der Emissionen von N₂O aus dem Boden und mineralischem Stickstoff unter verschiedenen Input- und Bodenbearbeitungssystemen wurde auf Standortebene evaluiert. Zudem wurde die modellierte Produktivität der einzelnen Kulturen mit den regionalen und landesweiten Ernteertragsdaten des schweizerischen Bundesamts für Statistik verglichen.

Im Anschluss an die DayCent-Parametrisierung und die Evaluation wurde das Modell auf Standortebene sowie regional zur Prüfung der langfristigen Auswirkungen verschiedener einzelner und kombinierter Anbaumethoden und auf THG-Emissionen aus dem Boden eingesetzt. Der Einsatz des Modells auf Standortebene ermöglichte die Evaluation zahlreicher einzelner und kombinierter Anbaumethoden im Verlauf ihrer Anwendung in schweizerischen Langzeitversuchen, während der Einsatz auf regionaler Ebene zur Evaluation von ausgewählten Kombinationen der Anbaumethoden unter grösseren räumlichen Verhältnissen diente und schweizweit sämtliche Kombinationen von Fruchtfolgen, Klimaverhältnissen und Bodenarten abdeckte.

Auf regionaler Ebene wurden folgende Anbaumethoden und ihre Kombinationen evaluiert: organische Düngung, reduzierte Bodenbearbeitung und der Anbau von Winterleguminosen als Bodendeckung und Gründüngung. Kultursysteme mit einer typischen kulturspezifischen mineralischen Düngung und konventionelle Bodenbearbeitung ohne Bodendeckung dienten als Vergleichsbasis. Es wurden zwei Möglichkeiten zur Zufuhr von organischem Material einbezogen: a) Einstreu oder Gülle mit hoher Abbaufähigkeit; b) teilweise abgebautes organisches Material (z.B. Kompost). Für die Erstellung von Regionalmodelle wurden zunächst Geodatensätze zum Anbau, den Kulturen, dem Boden (European Soil Database) und tägliche Klimadaten (MeteoSwiss) für die Landwirtschaft in der Schweiz zusammengestellt. Für die Jahre 1991–2013 wurden Rastersimulationen (Auflösung 2,2 km) durchgeführt und regional aggregiert. Schliesslich wurden die Veränderungen der THG-Emissionen aus dem Boden und der Produktivität der einzelnen Kulturen unter ausgewählten Methoden ermittelt.

Modellierung von Ergebnissen auf regionaler Ebene

Die konventionelle Bewirtschaftung und Bearbeitung der Böden führte zu Netto-THG-Emissionen, die über Kantone und Jahre hinweg mit $1,59 \pm 1,25$ (Durchschnitt \pm Standardabweichung) mg CO₂-Äquivalent pro Hektar und Jahr veranschlagt wurden. Im Zeitverlauf zeigte sich ein signifikanter Trend zur Abnahme des Bodenkohlenstoffs im Umfang von rund 0,24 mg C pro Hektar und Jahr. Die durchschnittlichen N₂O-Emissionen aus dem Boden schwankten zwischen 1,42 und 2,13 kg N pro Hektar und Jahr. Der abnehmende Kohlenstoff- und Distickstoffmonoxid (N₂O) - Gehalt im Boden gilt als massgebliche Quelle für die Netto-THG-Emissionen aus dem Boden; er trägt 56 beziehungsweise 44 Prozent an das globale Treibhauspotenzial bei.

- Der Einsatz von Einstreu oder Gülle mit hoher Abbaufähigkeit sowie von teilweise kompostierten organischen Düngemitteln führte zu einer Reduktion der THG-Emissionen gegenüber konventionell bebauten Böden um $0,34 \pm 0,38$ bzw. $1,10 \pm 1,16$ mg CO₂-Äquivalent pro Hektar und Jahr. Die geringeren Emissionen werden in erster Linie auf den Anstieg des Kohlenstoffgehaltes des Bodens um 104 ± 92 und 259 ± 314 kg C pro Hektar und Jahr zurückgeführt. Bei Zufuhr von organischem, hoch abbaufähigem Dünger steigen die Ernteerträge im Vergleich zu konventionell erzielten Erträgen um bis zu 28,7 Prozent. Bei teilweise abgebauten organischen Zusätzen nahmen die Erträge der einzelnen Kulturen dagegen um 5,4 bis zu 43,2 Prozent ab.
- Die Anwendung organischer Dünger in Kombination mit einer weniger intensiven Bodenbearbeitung führte im Endeffekt zu einem Anstieg des Bodenkohlenstoffs. Die Kombination von Düngungen mit teilweise abgebautem organischem Material und einer Reduktion der Bodenbearbeitung weist das grösste Reduktionspotenzial für N₂O auf. Die Schwankungen der Ernteerträge waren allerdings tendenziell markanter. Der Grund dafür liegt in negativen Interaktionen mit der Reduktion der Bodenbearbeitung.
- Die Kombination organischer Düngung und dem Anbau von Winterleguminosen als Gründüngung führte zu geringfügigeren durchschnittlichen Gewinnen beim Bodenkohlenstoff (36 kg C pro Hektar und Jahr). Das N₂O-Emissionsreduktionspotenzial erwies sich ebenfalls als beschränkt. Der Einsatz von äusserst abbaufähigen organischen Düngern mit oder ohne Gründüngung führte zu einer Steigerung der N₂O-Emissionen aus dem Boden im Vergleich zu konventionellen Anbaumethoden. Andererseits hatte diese Kombination von Anbaumethoden die grösste Steigerung der Ernteerträge (rund 38,0%) im Vergleich zu konventionell erzielten Erträgen zur Folge. Im Vergleich zeigte sich, dass die Ertragsrückgänge bei einem ausschliesslichen Einsatz von teilweise kompostierten organischen Düngern durch den Einsatz von Gründüngung ausgeglichen werden können.
- Die Einführung einer organischen Düngung in Kombination mit weniger intensiver Bodenbearbeitung und der Verwendung von Gründünger führte zu einem Anstieg des durchschnittlichen Bodenkohlenstoffgehalts von bis zu 433 kg C je Hektar und Jahr. Die Methodenkombination von hochgradig abbaufähiger organischer Düngung, Gründüngung und weniger intensiver Bodenbearbeitung führte allerdings zu einem Anstieg der N₂O-Emissionen aus dem Boden um 0,16 kg N je Hektar. Die Kombination von Düngungen mit teilweise kompostiertem organischem Dünger, Gründüngung und weniger intensiver Bodenbearbeitung hatte im Vergleich zu konventionellen Methoden das höchste THG-Reduktionspotenzial (1,77 mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr) und könnte den grössten Teil der THG-Emissionen aus dem Boden kompensieren, sodass diese Böden wiederum THG-neutral sind oder gar als THG-Senken wirken.

Anders als die Änderungen des Bodenkohlenstoffs in der Grössenordnung von 83 bis 100 Prozent wirkten sich die Änderungen der N₂O-Emissionen bei alternativ bewirtschafteten Böden vergleichsweise wenig auf Netto-THG-Emissionen aus. Die grosse räumliche Variabilität der N₂O-Emissionen dürfte allerdings zu Unsicherheiten im Zusammenhang mit den Netto-THG-Emissionen aus dem Boden geführt haben.

Modellierung von standortspezifischen Ergebnissen

- Eine im Vergleich zur konventionellen Bewirtschaftung weniger intensive Bodenbearbeitung minderte den langfristigen C-Verlust und somit die CO₂-Emissionen am

Standort Changins um bis zu 50 Prozent. Diese Reduktion war allerdings nicht signifikant. Der Verzicht auf Bodenbearbeitung führte am Standort Reckenholz zu einer signifikanten Reduktion der langfristigen CO₂-Emissionen um 76 Prozent. Ein (teilweiser) Verzicht auf Bodenbearbeitung reduzierte zudem die langfristigen N₂O-Emissionen um 11 (Teilverzicht) beziehungsweise 22 Prozent. Dies führte im Verlauf von 30 Jahren zu einer Reduktion der Netto-THG-Emissionen um 31 (Teilverzicht) beziehungsweise 58 Prozent (Verzicht auf Bodenbearbeitung). Die Ernteerträge fielen als Folge dieser Methoden um 5 Prozent geringer aus.

- Die Gründüngung bewirkte keine signifikante langfristige Reduktion der CO₂-Emissionen; am Standort Reckenholz tendierten die CO₂-Emissionen aus dem Boden aber gelegentlich nach unten. Mit Gründüngung und konventionellem Pflügen liess sich eine CO₂-Reduktion von 35 Prozent erzielen. Bei einem Verzicht auf Bodenbearbeitung bewirkte die Gründüngung keinen zusätzlichen Effekt auf die CO₂-Emissionen. Eine Gründüngungsmischung aus Senf und Bienenweide (Phacelia) führte bei konventionellen Pflugeinsätzen zu einer CO₂-Reduktion von bis zu 15 Prozent; bei einem Verzicht auf Pflugeinsätze erhöhte diese Gründüngung die CO₂-Emissionen um 12 Prozent. Möglicherweise führt ein Verzicht auf Bodenbearbeitung zu einer langsameren Einarbeitung von Rückständen von der Oberfläche in den Boden. Die N₂O-Emissionen veränderten sich bei einer Gründüngung mit Senf und Bienenweide langfristig nicht. Mit Gründüngung fielen signifikant mehr N₂O-Emissionen an (+10%). Der Grund hierfür liegt möglicherweise in der zusätzlichen Stickstoffzufuhr durch biologische Stickstoff-Fixierung. Der Anbau von Bodendeckern hatte keine signifikante Reduktion der Netto-THG-Emissionen aus dem Boden zur Folge, bei Gründüngung ergab sich dagegen eine tendenzielle Reduktion solcher Emissionen. Dies legt die Vermutung nahe, dass die biologische Stickstoff-Fixierung zum Reduktionspotenzial von Bodendeckern beiträgt. Insgesamt stiegen die Ernteerträge beim Einsatz von Bodendeckern.

Nicht alle Optionen zur Reduktion der THG-Emissionen deckten sich mit den für die Versuchsstandorte modellierten Ernteerträgen. Biolandbau führte insbesondere in Kombination mit weniger intensiver Bodenbearbeitung zu substanziell geringeren THG-Emissionen und zugleich geringeren Ernteerträgen. Die Kompostierung von organischen Düngern, die Verringerung der Bodenbearbeitung und der Verzicht auf Bodenbearbeitung führten dagegen effektiv zu einer Reduktion der Netto-THG-Emissionen aus dem Boden ohne spürbare Ernteeinbussen, das heisst maximal 5 Prozent).

Bedeutung für die Forschung

Prozessbasierte Ökosystem-Modelle sind effiziente und robuste Instrumente zur Überbrückung von Datenlücken sowie für das Verständnis und die Quantifizierung der Auswirkungen von Änderungen der Anbausysteme auf die THG-Emissionen aus dem Boden. Zudem lassen sich diese Modelle für die Identifikation und die Evaluation der Langzeiteffekte und der Vorteile bestimmter THG-Reduktionsmöglichkeiten nutzen und somit zur Stützung von Strategien für den Klimawandel. Bei DayCent handelt es sich um ein dominantes Boden-Pflanzen-gekoppeltes Modell, das häufig zur Simulation der Langzeitreaktionen des Ökosystems auf Änderungen der Anbaumethoden und Klimaänderungen in den USA zum Einsatz gekommen ist. Auf europäische Anbausysteme wurde es bis anhin jedoch nur in beschränktem Ausmass angewendet. Im COMET-Global-Projekt wurde das Modell mit Parametern für neue Kulturen und Anbaupraktiken bedient

und es wurden Evaluationen aufgrund verschiedener Anbaupraktiken sowie Boden- und Klimaverhältnisse in der Schweiz durchgeführt. Die robuste Parametrisierung dürfte auf weitere DayCent-Modellierungsstudien unter vergleichbaren Boden- und Klimaverhältnissen anwendbar sein und breitere Einsatzmöglichkeiten zur THG-Reduktion in der Landwirtschaft mit Auswirkungen auf Klimawandelstrategien und umweltpolitische Ansätze schaffen.

Frühere Untersuchungen von Anbausystemen in der Schweiz waren darauf ausgelegt, die Einflüsse verschiedener Anbaupraktiken auf die Anbauleistungen, den Bodenkohlenstoff-Gehalt und die Bodenfruchtbarkeit zu untersuchen. Die Langzeiteffekte dieser Praktiken auf die THG-Emissionen aus dem Boden sind bis anhin relativ unbekannt. Dasselbe gilt für das biophysikalische Einflusspotenzial der genannten Praktiken auf THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden bei einer Einführung auf regionaler Ebene. Das COMET-Global-Projekts schliesst diese Forschungslücke mittels Identifikation und Quantifizierung der THG-Reduktionspotenziale bei einer langfristigen Einführung zahlreicher verschiedener Anbaupraktiken auf Standort- und regionaler Ebene. Das Projekt hat das Verständnis der Auswirkungen von Anbaupraktiken auf THG-Emissionen aus dem Boden in grösseren zeitlichen und räumlichen Zusammenhängen vertieft. Erkenntnisse aus den COMET-Global-Analysen können als Leitlinien für das Design künftiger THG-Studien unter Feldbedingungen dienen.

Das COMET-Global-Projekt schliesst sich eng an das Climate-CAFE-Projekt (Anpassung an den Klimawandel: Optionen für Anbau- und Produktionssysteme in Europa) an. Beide Projekte nutzten dieselben schweizerischen Langzeitversuchsdatensätze sowie dieselben räumlichen Boden- und Klimadatensätze. Wurden im Rahmen des COMET-Global-Projekts die Anbaupraktiken und Kombinationen dazu auf ihr biophysikalisches Potenzial zur Reduktion von THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden in der Schweiz evaluiert, untersuchte das Projekt «Climate Café» das biophysikalische Potenzial der Anbaupraktiken zur Anpassung an den Klimawandel unter den RCP-Szenarien 4.5 und 8.5. Gemeinsame Bemühungen, die Nachhaltigkeit schweizerischer Anbausysteme zu untersuchen, boten eine gute Gelegenheit, die Auswirkungen von Anbaupraktiken auf THG-Emissionen aus dem Boden sowie auf Ernteerträge an den Standorten und auf regionaler Ebene zu verstehen und zu quantifizieren.

Wissenschaftliche Publikationen aus dem COMET-Global-Projekt sind in Vorbereitung.

Praktische Bedeutung

Das COMET-Global-Projekt untersuchte die Langzeitfolgen von Anbaumethoden und der Kombination davon auf die THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden in der Schweiz an verschiedenen Standorten und in verschiedenen Regionen. Die Ergebnisse der Modellierungen liefern Schätzungen der THG-Reduktionspotenziale zahlreicher verschiedener Anbaupraktiken.

Das Reduktionspotenzial der einzelnen, für alle Kombinationen von Fruchtfolgen, Klima- und Bodenarten in der Schweiz (d.h. auf regionaler Ebene) untersuchten Anbaumethoden gestaltete sich in absteigender Ordnung wie folgt:

- a) Einsatz von teilweise kompostierten organischen Düngern kombiniert mit einer weniger intensiven Bodenbearbeitung und dem Anbau von Winterleguminosen als Bodendeckung und Gründüngung ($1,77 \pm 0,24$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr);

- b) Einsatz von teilweise kompostierten organischen Düngern kombiniert mit einer weniger intensiven Bodenbearbeitung ohne Anbau von Bodendeckern und Gründüngung ($1,66 \pm 0,24$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr);
- c) Einsatz von teilweise kompostierten organischen Düngern kombiniert mit einer konventionellen Bodenbearbeitung und dem Anbau von Winterleguminosen als Bodendeckung und Gründüngung ($1,19 \pm 0,24$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr);
- d) Einsatz von teilweise kompostierten organischen Düngern kombiniert mit einer konventionellen Bodenbearbeitung ohne Anbau von Bodendeckern und Gründüngung ($1,11 \pm 0,17$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr);
- e) Einsatz von hochgradig abbaubarer Einstreu oder Gülle kombiniert mit einer weniger intensiven Bodenbearbeitung und dem Anbau von Winterleguminosen als Bodendeckung und Gründüngung ($0,92 \pm 0,23$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr).

Der blosse Anbau von Winterleguminosen als Bodendeckung und Gründüngung brachte das geringste Reduktionspotenzial mit sich ($0,07 \pm 0,05$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr) und lag somit noch unter dem blossen Einsatz von hochgradig abbaubarer Einstreu oder Gülle ($0,34 \pm 0,10$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr) und der blossen Verringerung der Intensität der Bodenbearbeitung ($0,42 \pm 0,15$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr).

Schätzungen des Reduktionspotenzials von Anbaupraktiken, die ausschliesslich auf Standortebeine an den Standorten der Langzeitversuche untersucht wurden:

- a) Güllendüngung kombiniert mit weniger intensiver Bodenbearbeitung und Senf-/Bienenweide-Mischung oder Winterleguminosen als Bodendeckung und Gründüngung am Standort Reckenholz (von $1,67 \pm 0,28$ auf $2,00 \pm 0,28$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr, je nach Art der Bodendecker);
- b) Güllendüngung kombiniert mit konventioneller Bodenbearbeitung und Senf-/Bienenweide-Mischung oder Winterleguminosen als Bodendeckung und Gründüngung am Standort Reckenholz (von $0,56 \pm 0,28$ auf $0,74 \pm 0,28$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr, je nach Art der Bodendecker);
- c) Güllendüngung kombiniert mit einer weniger intensiven Bodenbearbeitung ohne Anbau von Bodendeckern und Gründüngung am Standort Reckenholz ($1,78 \pm 0,28$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr);
- d) Verzicht auf Bodenbearbeitung gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung am Standort Reckenholz ($0,8 \pm 0,28$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr);
- e) Einsatz von Rototillern gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung am Standort Changins (von $0,37 \pm 0,30$ auf $0,56 \pm 0,30$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr, je nach Bodenstruktur);
- f) Einsatz von Lockerungsscharen oder Grubbern gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung am Standort Changins (von $0,11 \pm 0,30$ auf $0,26 \pm 0,30$ mg CO₂-Äquivalent je Hektar und Jahr, je nach Bodenstruktur).

Zusätzlich zu den Schätzungen der THG-Reduktionspotenziale der einzelnen Anbaupraktiken liefern die Ergebnisse auch Schätzungen der Auswirkungen dieser Praktiken auf die Ernteerträge. Diese Angaben unterstützen möglicherweise Anbaupraktiken, die eine effektive Reduktion der THG-Emissionen nach sich ziehen, ohne die Ernten entsprechend zu beeinträchtigen.

Die Ergebnisse des COMET-Global-Projekts sind für Landwirte, andere Landbewirtschafter, Agrarfachpersonen und Entscheidungsträger von Bedeutung. Zudem stellen THG-Schätzungen für die einzelnen Regionen Risikoinformationen für Politiker und Entscheidungsträger dar, die es ihnen ermöglichen, prozessbasierte Emissionsbudgets zu erstellen und realistische Ziele für die Reduktion der THG-Emissionen zu setzen. Sie wirken sich somit auf die regionalen und landesweiten Klimawandelstrategien und umweltpolitischen Ansätze in der Schweiz aus.

Das COMET-Global-Instrument ist webbasiert, kostenlos und über jeden Internetanschluss zugänglich. Zu seinen wesentlichen Eigenschaften gehören unter anderem:

- 1) Nutzung moderner Methoden, Fähigkeit zur Integration von auf robuste Weise evaluierten, prozessbasierten Modellen zur Schätzung des Bodenkohlenstoff -Gehalts und der THG-Emissionen aus dem Boden (z. B. DayCent, ECOSSE, RothC). Derzeit dient das System nur als Host für das biogeochemische Ökosystemmodell DayCent. Die Modelle werden in Echtzeit mit hoher räumlicher Auflösung betrieben. Sie verwenden standortspezifische Daten zu Bodeneigenschaften, Klima und Landnutzung sowie Anbaupraktiken. Die dynamischen Modellierungsfähigkeiten für THG-Emissionen aus dem Boden und THG-Abbau können potenziell präzisere und lokal relevante Schätzungen der Emissionen liefern und die feldspezifischen Interaktionseffekte von Umwelt- und Anbauvariablen abbilden. Die räumliche Schnittstelle ermöglicht die Nutzung zahlreicher geographisch verteilter Datenbanken, die Angaben für die THG-Berechnung an spezifischen Standorten umfassen. Sie ermöglicht dem Nutzer eine visuelle Wahrnehmung der Standorte, an denen die Schätzungen erfolgen. Da die paneuropäischen Datenbanken für Böden, Klima und Landnutzung/Anbau als Standard im System zur Verfügung stehen, kann COMET-Global auch von Nicht-Partnerstaaten in der EU genutzt werden, wobei die Ergebnisse allerdings weniger spezifisch ausfallen.
- 2) Flexibilität, so dass die Nutzer gegebenenfalls die aktuellsten länderspezifischen THG-Ansätze und Buchführungsverfahren, Emissionsfaktoren und Parameter für THG-Emissionen aus anderen Quellen als dem Boden wählen können, ohne auf die Option zur Nutzung eines einheitlichen Satzes von Methoden und Normen für alle Länder zu verzichten.
- 3) Benutzerfreundliche Gestaltung, sodass Bewirtschafter und andere Personenkreise das System in ihrer eigenen Sprache nutzen können, ohne Fachwissen zum Verlauf von THG-Emissionen aufbauen zu müssen; und
- 4) Fähigkeit zur Berechnung von Unsicherheitsschätzungen auf statistischer Basis mithilfe robuster, ausgefeilter Methoden. Daher spielt das Instrument eine wesentliche Rolle in der Ergebnisanalyse von THG-Reduktionsmassnahmen im Rahmen von politischen Ansätzen oder Anreizprogrammen.

Die Benutzerschnittstelle steht in mehreren Sprachen zur Verfügung (Englisch, Französisch, Spanisch, Deutsch und Italienisch), um der multinationalen Nutzergemeinde die Verwendung nach Möglichkeit zu erleichtern.

Dies weist darauf hin, dass das COMET-Global-Instrument eine verbesserte Methodologie für eine vollumfängliche Beurteilung der THG-Emissionen aus landwirtschaftlichen Ressourcen bietet und somit Landwirten und Entscheidungsträgern das Studium von THG-Reduktionsmassnahmen auf Einzelbetriebsebene ermöglicht, ohne dass sie Fachwissen zum Verlauf von THG-Emissionen aufbauen müssten. Derzeit ist der Prototyp des Instruments funktionsfähig. Wir sind aber auf der Suche nach weiteren Mitteln, um das System auf einer öffentlich zugänglichen Website zu hosten und Webserver sowie wenigstens ein Minimum an Wartung und Benutzersupport zu finanzieren.

Empfehlungen

Wir empfehlen sämtlichen Stakeholdern in den einzelnen Partnerländern die Verwendung des COMET-Global-Instruments zur vollumfänglichen THG-Erfassung auf Ebene der Einzelbetrieb vor jeder Umsetzung von Änderungen in der Landnutzung oder dem Anbau.

Die Ergebnisse der Modellierungen legen den Schluss nahe, dass die meisten der evaluierten Anbaupraktiken einen Beitrag zur Reduktion der Netto-THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Schweizer Böden liefern können, der allerdings nicht permanenter Natur ist, sondern vor allem auf den Aufbau des Bodenkohlenstoff-Gehalts zurückgeht. Die Herausforderung besteht daher in der permanenteren Reduktion von THG-Emissionen aus dem Boden durch Kombinationen von alternativen Praktiken und komplexen Fruchtfolgen und der gleichzeitigen Minimierung der Ernteeinbussen.

Es hat sich gezeigt, dass die nachstehenden Anbaupraktiken eine substanzielle Reduktion der Netto-THG-Emissionen aus dem Boden bewirkten, zugleich aber die Produktion insgesamt verringerten: Einsatz von teilweise kompostierten organischen Düngemitteln, insbesondere wenn zugleich die Bodenbearbeitung weniger intensiv gestaltet wurde. Die Kompostierung von organischen Düngern, die Verringerung der Bodenbearbeitung und der Verzicht auf Bodenbearbeitung führten dagegen effektiv zu einer Reduktion der Netto-THG-Emissionen aus dem Boden ohne spürbare Ernteeinbussen (Einbussen bis maximal 5%).

Die modellbasierten Schätzungen sind bekanntlich mit Unsicherheiten behaftet. Die wesentlichen Unsicherheitsquellen innerhalb des Modells gehen auf die Modellstruktur, die Parametrisierung und die Inputdaten (z.B. Stickstoffdüngungsrate, Wahl des Zeitpunkts für Anbaumassnahmen, Bodeneigenschaften, Klimadaten) zurück. Die von Modellparametern oder Inputdaten verursachte Unsicherheit lässt sich mittels des Monte-Carlo-Ansatzes abschätzen, während die Unsicherheit aufgrund der übergreifenden Modellstruktur (Gleichungen innerhalb des Modells zur Abbildung von Prozessen in der realen Welt) sowie mangelhafter Parametrisierung und mangelhafter Ausgangswerte sich mithilfe empirischer Modelle schätzen lässt, welche die Abweichung der modellbasierten Prognosen von unabhängigen Beobachtungen quantifizieren. Im Rahmen des COMET-Global-Projekts wurde noch keine Beurteilung der Auswirkungen von Unsicherheiten in einigen Modellkomponenten auf die Unsicherheiten der Modellergebnisse vorgenommen. Es sind zusätzliche Arbeiten erforderlich, um die Auswirkungen zentraler Unsicherheitsquellen auf die modellierten THG-Emissionen aus dem Boden und die Ernteerträge auf standortspezifischer und regionaler Ebene zu charakterisieren.

Einige Anbaupraktiken (z.B. der Einsatz verschiedener Bodendecker, die Intensität der Bodenbearbeitung, die Verringerung des Düngereinsatzes) wurden nur an einigen Versuchsstandorten sowie ausschliesslich standortspezifisch untersucht. Sie sind nicht repräsentativ für sämtliche Boden- und Klimaverhältnisse in der Schweiz. Da nicht nur der Anbau, sondern auch die Boden- und Klimaverhältnisse massgeblich für THG-Emissionen aus dem Boden sind, sollten weitere Untersuchungen zum potenziellen Ausmass des Reduktionseffekts dieser Anbaupraktiken und ihrer Kombinationen auf regionaler Ebene für eine Reihe verschiedener Boden- und Klimaverhältnisse stattfinden.

Möglicherweise haben einige Anbaupraktiken ein substanzielles Potenzial zur Reduktion von THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden in der Schweiz, während sie ausserhalb des Standorts vermehrte THG-Emissionen nach sich ziehen (z.B. Kompostierung oder organische Dünger). Zukünftige Studien sollten daher auf eine umfassendere THG-Beurteilung der schweizerischen Anbaumethoden hinarbeiten und dabei sämtliche weiteren Emissionen im

Zusammenhang mit der Düngemittelproduktion, dem Energieverbrauch, der Lagerung von Mist, der Kompostierung und Viehbeständen einbeziehen.