

# Landwirtschaftliche Treibhausgasrechner im Praxistest: Möglichkeiten und Grenzen

Cyrill Zosso<sup>1</sup>, Esther Thiébaud<sup>2</sup>, Sibyl Huber<sup>3</sup>, Daniel Bretscher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agroscope, 8046 Zürich

<sup>2</sup>dss+ (Sofies-Emac AG), 8008 Zürich

<sup>3</sup>Flury&Giuliani GmbH, 8006 Zürich

Auskünfte: Cyrill Zosso, E-Mail: [cyrill.zosso@agroscope.admin.ch](mailto:cyrill.zosso@agroscope.admin.ch)

<https://doi.org/10.34776/afs15-145> Publikationsdatum: 19. April 2024



21 Betriebe mit unterschiedlichen Betriebsstrukturen wurden ab 2015 drei Mal im Abstand von drei Jahren bilanziert (Foto: AgroCO<sub>2</sub>ncept)

## Zusammenfassung

Treibhausgasrechner (THG-Rechner) sind Bilanzierungsinstrumente, die den landwirtschaftlichen Klimaschutz unterstützen können. Sie sind wertvolle Hilfsmittel für die Bewusstseinsbildung und Beratung und werden vermehrt auch als mögliche Hilfsmittel für die Evaluation von Reduktionsmassnahmen gehandelt. Hier zeigen wir anhand der Erfahrungen im Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen solcher Instrumente am Beispiel des Rechners AgriClimateChangeTool (ACCT) auf. Eine erste THG-Bilanzierung wurde im Projekt 2015 durchgeführt und eröffnete den Landwirt/-innen eine neue Perspektive auf ihre Betriebe («Klimabrille», Treibhausgas-zentrierte Perspektive). Eine begleitende ausführliche Beratung war jedoch unerlässlich, um von der Bilanzierung geeignete Massnahmen abzuleiten. Basierend auf den einzelbetrieblich definierten Massnahmen wurde im Vorher-ein (ex-ante) in der Summe der 21 Betriebe ein Reduktionspotenzial im Umfang von -3 % (entspricht  $-9 \pm 9$  t CO<sub>2</sub>eq pro

Betrieb) modelliert. Nach drei und sechs Jahren (2018/2021) wurde wiederholt bilanziert, um die Wirkung der Massnahmen zu überprüfen. Der Nachweis von Emissionsreduktionen durch wiederholte Bilanzierungen wurde jedoch durch die Variabilität der Emissionen zwischen den Bilanzierungsjahren erschwert, die nicht durch die Massnahmen zustande kam. Korrigiert um die strukturellen Veränderungen waren die Emissionen aller Betriebe nach drei Jahren um +1 % ( $+3 \pm 38$  t CO<sub>2</sub>eq pro Betrieb) höher als im Ausgangsjahr. Nach sechs Jahren waren sie um -5 % ( $-15 \pm 28$  t CO<sub>2</sub>eq pro Betrieb) tiefer. Hauptursache für diese Schwankungen waren einerseits sich ändernde Betriebsstrukturen (z.B. mehr Fläche/GVE) und andererseits äussere Einflüsse (z.B. Witterung). Von den Landwirt/-innen wurde zudem der Einfluss der Marktsituation oder politischer Rahmenbedingungen genannt, welche sich in unterschiedlichen Zeithorizonten auf die Emissionen auswirken. Viele dieser Prozesse können von den Landwirt/-innen nur am Rande beeinflusst werden und können positive Effekte der aktiv umgesetzten Massnahmen überlagern. Das Projektziel, eine Reduktion der Emissionen um 20 % pro Betrieb, wurde mit Ausnahme von 2 Betrieben, verfehlt. Die Erfahrungen aus dem Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept und der Bilanzierung mit ACCT weisen darauf hin, dass die Erwartungen an die Möglichkeiten von THG-Rechnern oft überhöht sind – vor allem bezüglich des exakten Nachweises der Wirkung von Reduktionsmassnahmen. THG-Rechner stellen vor allem dann ein wichtiges Hilfsmittel für den praktischen Klimaschutz dar, wenn sie in ein Gesamtkonzept mit kompetenter Fachberatung eingebettet sind und die Auswirkungen der einzelbetrieblichen Massnahmen im Kontext des gesamten Landwirtschafts- und Ernährungssystems berücksichtigt werden. Insbesondere wenn THG-Rechner als Basis für ergebnisorientierte Kompensationsleistungen genutzt werden, sind grundlegende konzeptuelle Überlegungen nötig. Dazu gehören der Umgang mit dynamischen Betriebsstrukturen und äusseren Einflüssen, die Wahl geeigneter Kenngrössen/Indikatoren die zur Evaluation genutzt werden, sowie der Umgang mit Systemgrenzen und überbetrieblichen Auswirkungen.

**Keywords:** greenhouse gas calculator, agriculture, practical test, result-based carbon farming, climate change, emissions.

## Einleitung

Die Landwirtschaft ist einerseits stark vom Klimawandel betroffen und trägt andererseits durch die Emissionen von Treibhausgasen zum Klimawandel bei (IPCC, 2022). Ambitionierte nationale Zielsetzungen zum Klimaschutz in der Schweiz erhöhen den Druck auf den landwirtschaftlichen Sektor, Treibhausgasemissionen zu reduzieren (BAFU, 2021; BLW et al., 2023). Für die Reduktion der Emissionen auf Landwirtschaftsbetrieben steht eine breite Auswahl an Massnahmen zur Verfügung (Bretscher et al., 2018; Osterburg et al., 2013; Rosa & Gabrielli, 2023). Die Praxistauglichkeit und das Potenzial vieler Massnahmen hängen jedoch stark von betrieblichen Rahmenbedingungen ab. Zudem ist nicht klar, wie man Landwirt/-innen am besten motiviert und unterstützt, auf ihren Betrieben Klimaschutz zu betreiben. Weiter ist eine allgemeingültige Quantifizierung von erfolgten Emissionsreduktionen aufgrund der grossen Diversität von landwirtschaftlichen Betriebsstrukturen herausfordernd, wodurch erbrachte Reduktionsleistungen nur begrenzt anerkannt und ausgelobt werden können (COWI et al., 2021).

THG-Rechner sind ein mögliches Hilfsmittel, um die Emissionen einzelner landwirtschaftlicher Betriebe abzubilden, Reduktionspotenziale zu identifizieren und allenfalls Reduktionsleistungen nach der Umsetzung von Massnahmen auszuweisen. Anwendungszwecke von THG-Rechnern reichen von Bewusstseinsbildung und Beratung, über die Exaktbilanzierung von Betrieben, hin zur Projektevaluation oder dem Einsatz als Fussbadruckrechner z.B. für die Produktkennzeichnung (Colomb et al., 2012; Kätsch & Osterburg, 2016). Solche Rechner sind zentrale Bestandteile von verschiedenen Treibhausgas-Reduktionsprogrammen im landwirtschaftlichen Klimaschutz (COWI et al., 2021; He Waka Eke Noa, 2022; Huber et al., 2022; KlimaStaR-Milch, 2023; Thiébaud et al., 2023). Vor allem die Nutzung solcher Rechner zum Nachweis von Emissionsreduktionen in der Praxis ist ein relativ neues Forschungsgebiet. Bei der Anwendung von THG-Rechnern und der Interpretation ihrer Resultate stellen sich verschiedene Herausforderungen, beispielsweise:

- werden die Treibhausgasemissionen nicht nur durch Entscheidungen der Landwirt/-innen, sondern auch durch natürliche Variabilität (Auswirkungen der Witterung), sowie Standort- und Umweltbedingungen (Topographie, Bodeneigenschaften, ökonomisches Umfeld) beeinflusst (Clavreul et al., 2017; Jones et al., 2014; Lam et al., 2018).

- können effizienzsteigernde Massnahmen zu Rebound-Effekten führen, indem die absoluten Emissionen durch eine Erhöhung der Produktion steigen (COWI et al., 2021; Paul et al., 2019). Diese werden nur ersichtlich, wenn neben der Emissionsintensität immer auch die absoluten Emissionen betrachtet werden (COWI et al., 2021).
- fokussieren einzelbetriebliche THG-Rechner primär auf die Prozesse innerhalb der unmittelbaren Systemgrenzen der Landwirtschaftsbetriebe. Betriebsübergeordnete systemische Zusammenhänge wie Koppelprodukte, indirekter Landnutzungswandel, überbetriebliches Herdenmanagement oder Flächen- und Nahrungsmittelkonkurrenz können häufig nur ansatzweise oder gar nicht abgebildet werden (z.B. Brander, 2022; Schader et al., 2014).

Aufgrund dieser Herausforderungen ist es wichtig, die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von einzelbetrieblichen THG-Rechnern in der Praxis genauer zu untersuchen.

Um landwirtschaftliche Klimaschutzmassnahmen in der Praxis zu testen, eingesparte Treibhausgasemissionen auszuweisen und Wissen zum praktischen Klimaschutz in der Schweiz zu generieren, wurde 2012 im Flaachtal (Zürich, Schweiz) der Verein AgroCO<sub>2</sub>ncept gegründet. Dieser initiierte das Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept, in welchem 21 landwirtschaftliche Betriebe Massnahmen zum Klimaschutz umsetzten. Zu drei verschiedenen Zeitpunkten (2015/2018/2021) wurden die Betriebe mit dem THG-Rechner AgriClimateChange-Tool (ACCT) (Solagro, 2013) bilanziert. Anhand der Anwendung von ACCT im Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept werden in diesem Artikel die folgenden Fragen diskutiert:

1. Wie zuverlässig können Reduktionserfolge von Klimaschutzmassnahmen auf Landwirtschaftsbetrieben mit ACCT evaluiert werden?
2. Was sind Möglichkeiten und Grenzen der einzelbetrieblichen Treibhausgasbilanzierung?
3. Unter welchen Umständen bringt die Bilanzierung mit einem THG-Rechner einen Mehrwert in landwirtschaftlichen Klimaschutzprojekten?

## Methoden

Ziel des Projekts AgroCO<sub>2</sub>ncept war, die Treibhausgasemissionen auf Betriebsebene um 20 % zu reduzieren, ohne grosse Veränderungen der Betriebsstrukturen und ohne Minderung der Produktivität. Im Projekt wurden

**Tabelle 1 | Charakterisierung der 21 bilanzierten Betriebe**  
(detaillierte Betriebsübersicht siehe Thiébaud *et al.*, 2023).

Fläche (ha)	Tiere (GVE)	Produktionsrichtlinie	Hauptbetriebszweig
12-63 (Mittel: 37)	0-114 (Mittel: 42)	15 ÖLN, 6 Bio	10 Milchvieh, 2 Rindermast, 1 Mutterkuh, 6 Ackerbau, 2 Gemüsebau

21 Betriebe mit unterschiedlichen Betriebsstrukturen zu drei verschiedenen Zeitpunkten (2015/2018/2021) bilanziert (Tab. 1; detaillierte Betriebsübersicht siehe Thiébaud *et al.*, 2023). Gleichzeitig wurden in wiederholten Klimaberatungen gemeinsam mit den Landwirt/innen betriebsspezifische Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen aus einem Massnahmenkatalog (Tab. 2; detaillierter Massnahmenkatalog siehe Thiébaud *et al.*, 2023) zur Umsetzung festgelegt.

Für die Treibhausgasbilanzierung wurde das Excel-basierte ACCT benutzt (Solagro, 2013). Als Grundlage für die Berechnungen dienen die Richtlinien des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, 2006, 2019). Das Tool erfasst jeweils die Emissionen in einem spezifischen Produktionsjahr von den Vorketten bis zum Hoftor. Die erfassten Quellen und Senken können in die folgenden Bereiche aufgeteilt werden: (i) Vorleistungen (Produktion von Mineraldüngern, zugekaufte Futtermittel etc.); (ii) Emissionen aus dem Energieverbrauch; (iii) Methanemissionen aus der Verdauung der Nutztiere (enterische Fermentation); (iv) Emissionen aus der Lagerung und Ausbringung von Hofdüngern; (v) direkte und indirekte Emissionen aus dem Stickstoffumsatz in Böden (N<sub>2</sub>O; insbesondere aus der Anwendung von Mineraldüngern); (vi) Produktion von erneuerbaren Energien und (vii) Veränderungen der Kohlenstoffspeicherung in Böden und Pflanzen. Die Veränderungen der Kohlenstoffspeicherung in Böden und Pflanzen werden aufgrund von Landnutzungsänderungen, vereinzelt landwirtschaftlichen Bearbeitungstechniken (Direktsaat, Zwischenfruchtanbau) und dem Zuwachs in Hecken oder Bäumen anhand von groben Kennzahlen abgeschätzt.

Zu Projektbeginn wurden in einer ersten Bilanzierung die Basisemissionen erhoben (B2015<sub>bas</sub>). Daraufhin wurden die Reduktionspotenziale der in der Klimaberatung ausgewählten Massnahmen ex-ante (im Voraus) modelliert. Nach drei und sechs Jahren wurden zwei ex-post (im Nachhinein; B2018 und B2021) Bilanzierungen durchgeführt. Alle Emissionen wurden sowohl gesondert nach den einzelnen Gasen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) als auch aggregiert als CO<sub>2</sub>-Äquivalente anhand der Globalen Erwärmungspotenziale über 100 Jahre (GWP<sub>100</sub>; IPCC,

2013) ausgewiesen. Für die Bilanzierungsjahre B2018 und B2021 wurden die absoluten Emissionen anhand der betrieblichen Wachstums- und Schrumpfungsprozesse korrigiert, respektive skaliert (Kenngrössen B2018<sub>korri</sub> und B2021<sub>korri</sub>; siehe dazu Thiébaud *et al.*, 2023). Diese Kenngrössen zeigen die Emissionen der Jahre B2018 und B2021 umgerechnet auf die Betriebsgrösse (Fläche) und Anzahl Tiere (GVE) im Basisjahr B2015<sub>bas</sub>. Die Emissionen aus flächenbezogenen Betriebszweigen (z.B. Acker-, Gemüsebau) wurden in allen Positionen mit der Fläche skaliert. Für die tierbezogenen Betriebszweige (Milchvieh, Rindermast, Mutterkuh) wurden die Emissionen mit der Anzahl Tieren (GVE) skaliert, wobei die Emissionen der Böden, Kohlenstoffflüsse (Senken), sowie spezifische Betriebsmittel (Mineraldünger, pflanzlicher Input und Kunststoffe) auch hier mit der Fläche skaliert wurden. Dadurch kann grob festgestellt werden, ob Treibhausgasreduktionen durch eine Veränderung der Bewirtschaftung oder durch Änderungen der Strukturen (Nutzfläche oder der Anzahl Tiere) erzielt wurden. Da für die einzelnen Betriebszweige auch die jeweiligen Mengen der erzeugten Produkte erfasst wurden, konnte für die Betriebszweige die Treibhausgasintensität in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro erzeugter Produktmenge berechnet werden.

Wie viele andere THG-Rechner weist auch ACCT keine Kenngrössen aus, die eine Aussage darüber treffen, inwiefern Ackerfutterflächen oder zugekaufte Futtermittel in Konkurrenz zur menschlichen Ernährung stehen. Mit den vorhandenen Daten aus dem Projekt wurde für diesen Artikel als stark vereinfachte Kenngrösse für mögliche Flächenkonkurrenz für das Basisjahr B2015<sub>bas</sub>

**Tabelle 2 | Übersicht der Massnahmenbereiche und ausgewählter Massnahmen** (detaillierter Massnahmenkatalog siehe Thiébaud *et al.*, 2023).

Tierhaltung	Fütterung	3 Massnahmen	z.B. Fütterungsplanung
	Herdenmanagement	1 Massnahmen	z.B. Erhöhung der Lebenstageistung
	Stallmanagement	3 Massnahmen	z.B. Reduktion verschmutzter Flächen
	Hofdüngermanagement	5 Massnahmen	z.B. Mistlagerung und -kompostierung
Energie	Energie- und Ressourceneffizienz	9 Massnahmen	z.B. verbrauchseffiziente Maschinen
	Energieerzeugung	4 Massnahmen	z.B. Biogasanlage
Pflanzenbau	Optimierung der Anbausysteme	7 Massnahmen	z.B. Sicherstellung Bodenbedeckung
	Reduktion der Bodenbearbeitung	3 Massnahmen	z.B. Reduktion Überfahrten
	Optimierung Pflanzenernährung	4 Massnahmen	z.B. Optimierung Düngeform/-menge

die für die Futtermittelproduktion genutzte Ackerfläche (ha; inkl. Kunstwiesen) pro GVE berechnet. Als Näherungswert für die Nahrungsmittelkonkurrenz wurde das zugekaufte Kraftfutter (GJ) pro GVE berechnet. Die Daten wurden mit deskriptiver Statistik ausgewertet und bezüglich der Fragestellungen untersucht.

## Resultate

### Ausgangsemissionen

Die Ausgangsemissionen (B2015<sub>bas</sub>) der 21 Betriebe variierten zwischen 11 t CO<sub>2</sub>eq/Jahr und 639 t CO<sub>2</sub>eq/Jahr. Die Diversität der Betriebsstrukturen spiegelte sich in den absoluten Emissionen und den Emissionsprofilen der Betriebe wider, wie in Abb. 1 exemplarisch für vier Betriebe illustriert. Auf den zwei Betrieben mit dem Hauptbetriebszweig Rindermast respektive Milchvieh machten die Emissionen aus der Tierhaltung (enterische Fermentation inkl. Hofdüngerlagerung) rund 50 % der Gesamtemissionen aus, zirka 15 % stammten aus den N<sub>2</sub>O-Emissionen der landwirtschaftlichen Böden und weniger als 10 % aus dem Verbrauch fossiler Energie. Emissionen in den Vorleistungen stammten auf diesen Betrieben primär aus der Bereitstellung von Futtermitteln und machten rund 25 % aus. Auf dem Gemüsebaubetrieb hingegen stellten die Vorleistungen (primär Herstellung Mineraldünger) mit ungefähr 40 % der Emissionen den grössten Anteil, gefolgt von N<sub>2</sub>O-Emissionen der landwirtschaftlichen Böden (35 %) und CO<sub>2</sub> aus fossi-

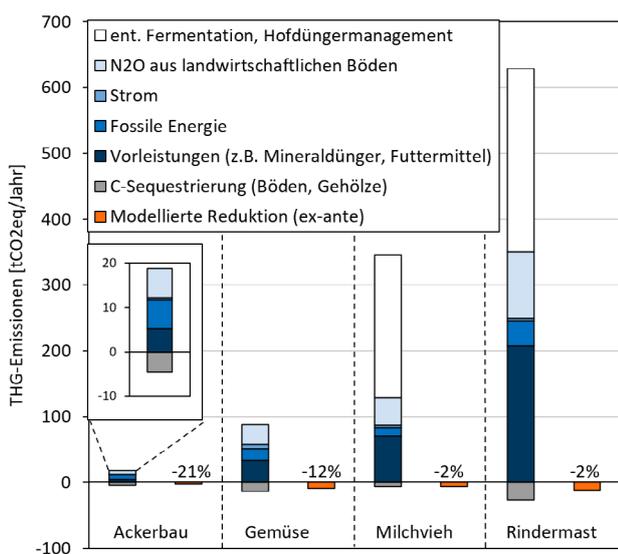
ler Energie (20 %). Ähnlich wie beim Gemüsebaubetrieb stammten auch beim Ackerbaubetrieb jeweils rund 35 % der Emissionen aus N<sub>2</sub>O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden sowie aus fossiler Energie und rund 30 % aus Vorleistungen (primär Mineraldüngerproduktion).

### Ex-ante Reduktionspotenziale

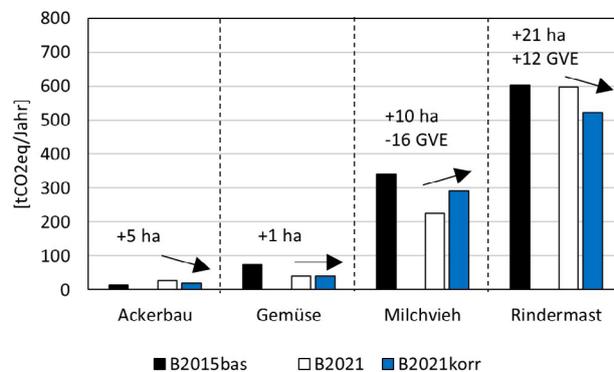
Anhand der in der Klimaberatung mit den Landwirt/-innen vereinbarten Massnahmen und der Ausgangsemissionen (B2015<sub>bas</sub>) wurde ex-ante für jeden Betrieb ein Reduktionspotenzial berechnet. In der Summe aller Betriebe ergab sich ein Reduktionspotenzial von -160 t CO<sub>2</sub>eq, was bei Ausgangsemission von 5874 t CO<sub>2</sub>eq einer Reduktion von -3% entspricht. Gemittelt über alle Betriebe ergibt dies ein ex-ante modelliertes Potenzial von  $-9 \pm 9$  t CO<sub>2</sub>eq (Abb. 3) pro Betrieb. Für den in Abb. 1 gezeigten Rindermast- und Milchviehbetrieb ergaben sich modellierte Reduktionspotenziale von je rund -2 % (-12 und -6 t CO<sub>2</sub>eq/Jahr), für den Gemüse- und Ackerbaubetrieb Reduktionspotenziale von -12 % und -21 % (-9 und -3 t CO<sub>2</sub>eq/Jahr).

### Veränderung Betriebsstrukturen

Über den Projektzeitraum von sechs Jahren veränderten sich die Betriebsstrukturen der Betriebe: Die bewirtschaftete Fläche veränderte sich im Mittel um 6 ha (zwischen -4 ha und +21 ha) und nahm total für die 21 Betriebe um +111 ha (+14 %) zu. Die Anzahl GVE veränderte sich im Mittel um 7 GVE pro Betrieb (zwischen -16 und +16 GVE) und nahm total für die 21 Betriebe um +16 GVE (+2 %) zu. Der Vergleich der Kenngrössen B2021 und B2021<sub>korr</sub> (Abb. 2) zeigt, wie sich solche strukturellen Veränderungen in den Emissionen niederschlagen.



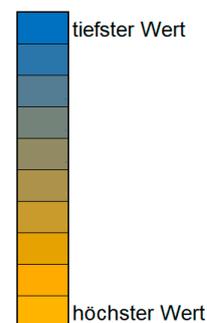
**Abbildung 1** | Die Grafik zeigt exemplarisch die Basisemissionen (B2015<sub>bas</sub>) und die ex-ante modellierte Reduktionspotenziale (inkl. relative Reduktionspotenziale in %) von vier Betrieben benannt nach Hauptbetriebszweig im Projekt AgroCO<sub>2</sub>cept.



**Abbildung 2** | Die Auswirkungen von strukturellen Änderungen auf die Emissionen können gross sein. Vergleich der Ausgangsemissionen (B2015<sub>bas</sub>) mit den Emissionen nach 6 Jahren ohne (B2021) und mit (B2021<sub>korr</sub>) Umrechnung auf die Betriebsgrösse (Fläche) und Anzahl Tiere (GVE) im Basisjahr B2015<sub>bas</sub> der vier Beispielbetriebe aus Abb. 1.

**Tabelle 3 |** Kenngrößen (absolute Emissionen pro Betrieb und Jahr; Emissionen pro Milchmenge; genutzte Ackerfutterfläche pro GVE; zugekauftes Kraftfutter pro GVE) für den Betriebszweig Milchvieh, geordnet nach den absoluten Emissionen B2015<sub>bas</sub>.

	t CO <sub>2</sub> eq/Jahr			kgCO <sub>2</sub> eq/ l Milch			Ackerfläche (ha) pro GVE	Zugekauftes Kraftfutter (GJ) pro GVE
	B2015 <sub>bas</sub>	B2018 <sub>korr</sub>	B2021 <sub>korr</sub>	B2015 <sub>bas</sub>	B2018	B2021	B2015 <sub>bas</sub>	B2015 <sub>bas</sub>
Nr.1	109	106	98	0.93	1.01	0.98	0.46	2.4
Nr.2	298	295	318	1.00	0.91	0.84	0.10	0.0
Nr.3	318	308	275	0.82	0.77	0.75	0.16	3.5
Nr.4	329	342	359	0.87	0.94	0.77	0.36	4.9
Nr.5	337	366	350	0.94	0.96	0.89	0.31	1.4
Nr.6	367	426	350	0.77	0.87	0.72	0.33	3.0
Nr.7	372	374	376	0.94	0.84	0.80	0.25	3.6
Nr.8	476	449	459	0.86	0.78	0.78	0.35	4.0
Nr.9	526	564	521	0.79	1.01	0.78	0.49	5.5
Nr.10	592	520	514	0.87	0.83	0.86	0.32	8.2



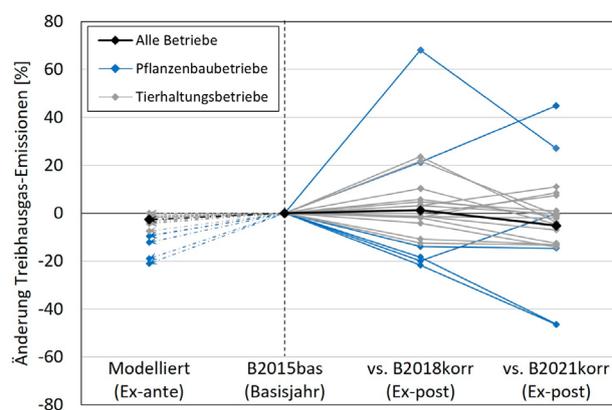
Beispielsweise wies der ausgewählte Rindermastbetrieb trotz zusätzlicher Fläche (+21 ha) und mehr Tieren (+12 GVE) eine Reduktion um  $-6\text{ t CO}_2\text{eq}$  in B2021 im Vergleich zu B2015<sub>bas</sub> aus (Abb. 2). Dies in erster Linie als Folge von zusätzlichem Dauergrünland, was bei diesem Betrieb zu einer höheren Stickstoffeffizienz (weniger indirekte Emissionen) führte und Dauergrünland in ACCT per se Kohlenstoffspeicherung in Böden zur Folge hat. Korrigiert um die strukturellen Veränderungen der Flächenzunahme und Zunahme der Anzahl Tiere in B2021<sub>korr</sub> waren die Emissionen nochmals deutlich tiefer ( $-79\text{ t CO}_2\text{eq}$ ) im Vergleich zu B2015<sub>bas</sub>. Als weiteres Beispiel waren beim ausgewählten Milchviehbetrieb die Emissionen im Jahr B2021 um  $-114\text{ t CO}_2\text{eq}$  tiefer im Vergleich zu B2015<sub>bas</sub>. Umgerechnet auf die ursprüngliche Fläche und Anzahl GVE waren die Emissionen in B2021<sub>korr</sub> nur noch um  $-48\text{ t CO}_2\text{eq}$  geringer als in B2015<sub>bas</sub> – was darauf hinweist, dass die Reduktion in B2021 zu einem grossen Teil auf die Abnahme der Anzahl Tiere um  $-16\text{ GVE}$  zurückgeführt werden kann.

### Wiederholung der Bilanzierungen

Wiederholte Bilanzierungen wurden für die Wirkungsüberprüfung durchgeführt. Dazu wurden die Ausgangsemissionen (B2015<sub>bas</sub>) den korrigierten ex-post Bilanzierungen nach drei Jahren (B2018<sub>korr</sub>) und sechs Jahren (B2021<sub>korr</sub>) gegenübergestellt (Abb. 3). In der Summe aller 21 Betriebe und korrigiert um die strukturellen Veränderungen waren die Emissionen nach drei Jahren um  $+69\text{ t CO}_2\text{eq}$  höher und nach sechs Jahren um  $-307\text{ t CO}_2\text{eq}$  tiefer, was einer Zunahme um  $+1\%$ , respektive einer Abnahme um  $-5\%$  im Vergleich zu den Ausgangsemissionen entspricht (Abb. 3). Gemittelt über alle Betriebe ergibt dies nach drei Jahren eine Zunahme um

$+3 \pm 38\text{ t CO}_2\text{eq}$  pro Betrieb und nach sechs Jahren eine Reduktion um  $-15 \pm 28\text{ t CO}_2\text{eq}$  pro Betrieb. Die prozentuellen Abweichungen lagen bei den einzelnen Betrieben zwischen  $+68\%$  und  $-47\%$  im Vergleich zu den Ausgangsemissionen (B2015<sub>bas</sub>). Nach drei Jahren erreichten 12 von 21 Betrieben eine Reduktion, nach sechs Jahren 15 der 21 Betriebe.

Während bei den tierhaltenden Betrieben die Emissionen von B2018<sub>korr</sub> und B2021<sub>korr</sub> zwischen  $-13\%$  und  $+21\%$  pro Betrieb von den Basisemissionen (B2015<sub>bas</sub>) abwichen (Abb. 3 graue Linien,  $n=15$ ), zeigten die Acker- und Gemüsebaubetriebe höhere Abweichungen im Bereich von  $-47\%$  und  $+68\%$  pro Betrieb (Abb. 3 blaue



**Abbildung 3 |** Die jährlichen Schwankungen zwischen den Bilanzierungsjahren bewegen sich in der gleichen Grössenordnung wie die ex-ante modellierten Reduktionspotenziale. Ex-ante modellierte Reduktionspotenziale (% gegenüber B2015<sub>bas</sub>), sowie die Änderungen der ex-post Bilanzierungen zwischen B2015<sub>bas</sub> und B2018<sub>korr</sub> sowie zwischen B2015<sub>bas</sub> und B2021<sub>korr</sub> (% Veränderung) in der Summe aller Betriebe (schwarze Linie,  $n=21$ ), der Betriebe mit Hauptbetriebszweig im Pflanzenbau (blaue Linien,  $n=6$ ) und der Betriebe mit Hauptbetriebszweig Tierhaltung (graue Linien,  $n=15$ ).

Linien,  $n=6$ ). Die Entwicklung der Emissionen zwischen den drei Bilanzierungszeitpunkten ist auf unterschiedliche Emissionskategorien zurückzuführen. Im Acker- und Gemüsebau variierten hauptsächlich die Emissionen aus dem Zukauf von Mineraldünger,  $N_2O$ -Emissionen aus den Böden und Emissionen aus der Verbrennung fossiler Treibstoffe für Maschinen. In der Tierhaltung variierten vor allem die Emissionen aus Futtermittelzukaufen, während auch gewisse Schwankungen der Emissionen durch die Verbrennung fossiler Treibstoffe für Maschinen, sowie der Emissionen aus dem Düngermanagement und  $N_2O$  aus den Böden bestanden.

### Flächen- und Nahrungsmittelkonkurrenz

Neben den absoluten Emissionen wurde im ACCT auch die Treibhausgasintensität der Produkte berechnet. Beispielsweise bewegten sich die Emissionen pro Liter Milch in  $B2015_{bas}$  zwischen 0,7–1,0 kg  $CO_2eq$  (Tab. 3). Die zusätzlich berechnete Kenngrösse zur Flächenkonkurrenz der Milchviehbetriebe (Ackerfutterfläche pro GVE) variierte zwischen 0,1–0,5 ha pro GVE und die Kenngrösse zur Nahrungsmittelkonkurrenz der Milchviehbetriebe (zugekauft Kraftfutter pro GVE) zwischen 0,0–8,2 GJ pro GVE (Tab. 3). Die tiefe Treibhausgasintensität gewisser Betriebe im Projekt Agro $CO_2ncept$  (Tab. 3, Nr. 10; kg  $CO_2eq/l$  Milch) kann auf den vergleichsweise hohen Einsatz von Kraftfutter und die tendenziell hohe Milchleistung zurückgeführt werden. Umgekehrt hängt die hohe Treibhausgasintensität anderer Betriebe (Tab. 3, Nr. 2; kg  $CO_2eq/l$  Milch) mit dem Verzicht auf die Fütterung von Kraftfutter und Verzicht auf Futter von ackerbaufähigen Flächen (z.B. Mais) zusammen.

## Diskussion

### Realistische Reduktionsziele definieren

Ein wichtiger Schritt zu Beginn von Klimaschutzprojekten ist die Definition von Reduktionszielen. THG-Rechner können Reduktionspotenziale von Klimaschutzmassnahmen auf Landwirtschaftsbetrieben ex-ante mehr oder weniger zuverlässig abbilden. Unter der Prämisse des Projekts, dass keine Veränderungen der Betriebsstrukturen und Produktivität stattfinden sollten, limitierten sich die Massnahmen auf technologische und organisatorische Aspekte. Im Projekt Agro $CO_2ncept$  wurde bei der ex-ante Modellierung der zur Umsetzung geplanten Massnahmen (modelliertes Reduktionspotenzial von  $-3\%$  ( $-9 \pm 9$  t  $CO_2eq$  pro Betrieb)) klar, dass die Zielerreichung (Reduktion der absoluten Emissionen um 20 % pro Betrieb) eine grosse Herausforderung darstellen würde. Weiter zeigte sich, dass absolut gesehen

höhere Reduktionen für die Tierhaltung modelliert wurden im Vergleich zu Acker- und Gemüsebaubetrieben. Dahingegen waren die modellierten relativen Reduktionen auf den Betrieben mit Tierhaltung geringer. Unterschiedliche Reduktionspotenziale verschiedener Betriebsstrukturen sollten demnach berücksichtigt werden, wenn Oberziele auf Ebene des Gesamtprojektes auf die einzelnen Betriebe heruntergebrochen werden. Die ex-ante Modellierung kann dabei aufzeigen, ob die Zielerreichung mit den geplanten Massnahmen realistisch ist.

### Modellierung $\neq$ Beobachtung: Dynamische Betriebsstrukturen

Ein zuverlässiger ex-post Nachweis von Reduktionserfolgen mittels ACCT erwies sich als Herausforderung. Im Projekt stimmte das ex-ante modellierte gemittelte Reduktionspotenzial selten mit den ex-post berechneten effektiven Reduktionen überein. Grund dafür war, dass die Inputdaten für die Modellierung über die Jahre nicht nur durch die Umsetzung von Reduktionsmassnahmen beeinflusst wurden, sondern auch durch anderweitige dynamische Entwicklungen. Die ex-ante abgeschätzten Reduktionspotenziale waren zudem mit rund  $-3\%$  eher gering und dadurch schwer nachzuweisen, wenn man diese Reduktion den Schwankungen zwischen  $-13\%$  und  $+21\%$  (tierhaltende Betriebe) und zwischen  $-47\%$  und  $+68\%$  (Gemüsebaubetriebe) zwischen den Bilanzierungsjahren gegenüberstellt.

Dynamische Entwicklungen betrafen insbesondere Änderungen in den Betriebsstrukturen: Nach 6 Jahren wurde insgesamt eine grössere bewirtschaftete Fläche und eine höhere Anzahl GVE durch die Bilanzierung abgedeckt. Solche Entwicklungen können beispielsweise vom Rindfleischpreis (Markt) als Grund für höhere Remontierungsraten (Rödiger & Home, 2023) oder durch generelle Veränderungen der ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen (längerfristig) beeinflusst werden. Dieser Strukturwandel hatte Auswirkungen auf die einzelbetrieblichen Emissionen, überlagerte die Wirkung von umgesetzten Massnahmen und erschwerte somit den einzelbetrieblichen Nachweis der Reduktionswirkung aufgrund der Massnahmen. Im Projekt Agro $CO_2ncept$  wurde mit den Kenngrössen  $B2018_{korr}$  und  $B2021_{korr}$  versucht, den Einfluss des Strukturwandels auf die Emissionen herauszurechnen. Die Korrekturen wirkten sich teilweise stark auf die ausgewiesenen Reduktionen aus (positiv und negativ) und waren hilfreich bei der Interpretation der Resultate. Auch die Treibhausgasintensität (Emissionen pro Produkt) kann helfen, verändernde Betriebsstrukturen zu berücksichtigen,

da sich mit der Fläche und Anzahl Tiere normalerweise gleichzeitig auch die Produktionsmenge ändert. Für eine qualifizierte Bewertung der erreichten Emissionsreduktionen sollten somit immer mehrere unterschiedlichen Kenngrößen in die Betrachtung miteinbezogen werden (COWI *et al.*, 2021).

### Modellierung ≠ Beobachtung: Äussere Einflüsse

Auch weitere Einflüsse, welche nicht mit dem Strukturwandel zusammenhängen, können grosse Schwankungen zwischen den Bilanzierungsjahren bewirken. Die relativen Schwankungen zwischen den Bilanzierungsjahren waren auf Acker- und Gemüsebaubetrieben höher als bei den Betrieben mit Rindviehhaltung. Es ist zu vermuten, dass sich die Witterung im Ackerbau stärker auf den Einsatz von Betriebsmitteln, die Bewirtschaftung und die Erntemengen auswirkte, wohingegen diese Einflüsse in der Tierhaltung weniger stark ins Gewicht fielen. Bei Betrieben mit Rindvieh fielen durch die enterische Fermentation und Hofdüngerlagerung relativ hohe und vor allem konstante Emissionen an, welche witterungsbedingte Schwankungen der Emissionen in anderen Betriebszweigen ausgleichen konnten.

Ein Verständnis wie sensitiv die Emissionen auf verschiedene Bewirtschaftungsänderungen und witterungsbedingte Schwankungen reagieren ist hilfreich, um den Umfang möglicher Schwankungen bereits im Voraus abzuschätzen (Clavreul *et al.*, 2017; Groen *et al.*, 2016; Lam *et al.*, 2018). Die Zuordnung der Schwankungen der Emissionen auf spezifische Einflussfaktoren ist theoretisch möglich, bedingt jedoch die Erhebung der detaillierten Bewirtschaftungsentscheidungen der Landwirt/-innen. Diese Gründe können sehr vielfältig sein und sind nicht primär auf die Reduktion von Treibhausgas-Emissionen ausgelegt. Viele der Einflussfaktoren, welche die Schwankungen verursachten, sind zudem gar nicht oder nur begrenzt durch die Landwirt/-innen kontrollierbar. Im Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept bewegten sich diese Schwankungen zwischen den Bilanzierungsjahren in der gleichen Grössenordnung wie die ex-ante modellierten Reduktionspotenziale. Dadurch gingen Emissionsreduktionen durch umgesetzte Massnahmen in anderweitig verursachten Schwankungen unter.

### Einzelbetriebe im Landwirtschafts- und Ernährungssystem

Die einzelbetriebliche Perspektive von THG-Rechnern wie ACCT hat zur Folge, dass Auswirkungen auf das gesamte Landwirtschafts- und Ernährungssystem nicht berücksichtigt werden. Dies ist eine wichtige Limitierung der allermeisten THG-Rechner, da dadurch nicht

alle Konsequenzen von getroffenen Massnahmen aufgezeigt werden (Brander, 2022). Beispielsweise kann einzelbetrieblich die Effizienz der Milchproduktion durch gesteigerten Kraftfuttereinsatz verbessert werden (Bargo *et al.*, 2003). Dadurch sinken die Treibhausgasemissionen pro Liter Milch. Die Produktion und der Einsatz von Kraftfutter können jedoch in Konkurrenz zur menschlichen Ernährung stehen. Durch die Verfütterung an Tiere kann so nur ein Bruchteil der Energie und der Proteine in der pflanzlichen Biomasse vom Menschen genutzt werden, was das gesamte Landwirtschafts- und Ernährungssystem sehr ineffizient macht (Mottet *et al.*, 2017; Schader *et al.*, 2014, 2015). Um eine möglichst hohe Effizienz im Landwirtschafts- und Ernährungssystem zu erreichen, wird daher vorgeschlagen, die Wiederkäuerhaltung primär auf das Futterangebot von Dauergrünlandflächen zu beschränken, das heisst auf Flächen, die aufgrund ihrer Topographie, Bodeneigenschaften oder aus anderen Gründen nicht ackerbaulich genutzt werden können (BLW *et al.*, 2023; Schader *et al.*, 2015).

Die Erweiterung von THG-Rechnern mit Kenngrößen, welche die Effizienz im Landwirtschafts- und Ernährungssystem mitberücksichtigen, wie z.B. die Flächen- und/oder Nahrungsmittelkonkurrenz, eröffnet eine umfassendere Beurteilung der Betriebsentwicklung. So ist die tiefe Treibhausgasintensität in Verbindung mit hohem Einsatz von Ackerfläche oder Kraftfutter auf manchen Betrieben im Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept nicht unbedingt gleichzusetzen mit einer Verbesserung auf Ebene des gesamten Landwirtschafts- und Ernährungssystems. Sollte in einem Projekt nur die Treibhausgasintensität optimiert werden ohne weitere Kenngrößen zu beachten, könnte sich dies unter Umständen insgesamt negativ auf die Effizienz des gesamten Landwirtschafts- und Ernährungssystem auswirken und andere negative Umweltauswirkungen haben. Die hier verwendeten Kenngrößen für die Flächen- und/oder Nahrungsmittelkonkurrenz sind stark vereinfacht und müssten für eine belastbarere Aussagekraft detaillierter ermittelt werden. Zumwald *et al.* (2019) und Ineichen *et al.* (2023) haben einen detaillierteren Indikator für die Flächen- und Nahrungsmittelkonkurrenz in der Schweizer Milchproduktion entwickelt, der im «Ressourcenprojekt KlimaStaR Milch» getestet wird (KlimaStaR-Milch, 2023). Werden Indikatoren für solche betriebsübergeordnete systemischen Aspekte bei der einzelbetrieblichen Bilanzierung und Beratung berücksichtigt, kann dies Fehlreize oder «Lock-in» Situationen sowie die Etablierung nicht nachhaltiger Strukturen vorbeugen (Brander, 2022; Salou *et al.*, 2017).

### Wirkungsnachweis und ergebnisorientierte Ansätze

Durch die dynamischen Betriebsstrukturen und das Ausmass von äusseren Einflüssen auf die Emissionen war es nach 6 Jahren im Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept nicht möglich, Reduktionen der Emissionen durch getroffene Massnahmen auf Betriebsebene ex-post mit ACCT nachzuweisen. Aus dem gleichen Grund ist es auch schwierig, ex-post eine Emissionsreduktion für das Gesamtprojekt zu quantifizieren. Je kleiner die externen Einflüsse und die Veränderungen der Betriebsstrukturen sind und je grösser die Wirkung der Reduktionsmassnahmen, desto eher ist ein Wirkungsnachweis möglich. Dabei spielt es auch eine Rolle, wie viele Betriebe bzw. Anzahl Jahre in einem Projekt bilanziert werden. Wie viele Betriebe/Jahre nötig sind, bis ein signifikanter Wirkungsnachweis möglich wird, kann allenfalls statistisch abgeschätzt werden (Clavreul *et al.*, 2017).

THG-Rechner werden als mögliche Instrumente diskutiert, an welche man ergebnisorientierte Kompensationsleistungen koppeln könnte (COWI *et al.*, 2021). In ergebnisorientierten Ansätzen werden Landwirt/-innen gemäss einer geleisteten und gemessenen Zielerreichung entgolten (z.B. eingesparte t CO<sub>2</sub>eq/Jahr) und nicht nach umgesetzten Massnahmen (COWI *et al.*, 2021). Im Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept wäre ein solches Auszahlungssystem mit den angesprochenen Herausforderungen (dynamische Strukturen, Schwankungen zwischen Bilanzierungsjahren) kaum umzusetzen gewesen und zum Nachteil der Landwirt/-innen ausgefallen: Nach drei respektive sechs Jahren hätten mehrere Betriebe aufgrund der ex-post Bilanzierung keine Zahlungen erhalten, da die beschränkte Reduktion durch die Massnahmen nicht von anderen Einflussfaktoren abgegrenzt werden konnten. Mehrausgaben / Mindereinnahmen durch die umgesetzten Massnahmen wären somit nicht entgolten worden. Besteht das Interesse in einem Projekt, eine ergebnisorientierte Kompensation anhand von THG-Rechnern zu verfolgen, sind demzufolge grundlegende konzeptuelle Überlegungen zum Umgang mit dynamischen Strukturen und Schwankungen durch äussere Einflüsse notwendig. Weiterhin muss der Umgang mit Systemgrenzen reflektiert werden und gegebenenfalls müssen, wie oben ausgeführt, zusätzliche Kenngrössen/Indikatoren in die Betrachtung miteinbezogen werden. Auch weitere Punkte, wie die Genauigkeit und Überprüfbarkeit von Eingangsdaten, sowie die Zusätzlichkeit, Permanenz oder Leckage sind zu bedenken (Clavreul *et al.*, 2017; COWI *et al.*, 2021). Solange diese Herausforderungen nicht gelöst sind, sollten alternative Anreizsysteme wie beispielsweise massnahmenbasierte Zahlungen, Punktesysteme oder Labels ebenfalls in

Betracht gezogen werden. Dabei können THG-Rechner bei solchen Ansätzen weiterhin als Hilfsmittel für die Bildung, Beratung, Planung von Massnahmen oder die ex-ante Abschätzungen von Reduktionspotenzialen genutzt werden.

### Nur mit Beratung und Eigenmotivation der Betriebe

Die Verflechtung der einzelbetrieblichen Emissionen mit dem gesamten Landwirtschafts- und Ernährungssystem, z.B. hinsichtlich der Flächen- und Nahrungsmittelkonkurrenz, zeigt beispielhaft die hohe Komplexität landwirtschaftlicher Klimaschutzbemühungen. Die Erfahrungen aus dem Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept zeigen, dass die Bilanzierung mit ACCT für die Betriebe nur eingebettet in eine Beratung zielführend war. Ein genügend breites Systemverständnis ist nötig, um die verschiedenen Kenngrössen aus den betriebspezifischen Emissionsprofilen gegeneinander abzuwägen und daraus die für den Betrieb geeigneten Massnahmen abzuleiten. Während die Berater/-innen Fachwissen zu einzelbetrieblichen Massnahmen und betriebsübergeordneten systemischen Zusammenhängen einbringen konnten, wurde von den Landwirt/-innen das nötige Praxisverständnis mitgebracht, welche Massnahmen im betrieblichen Kontext umgesetzt werden konnten.

Die Berater/-innen betonten, dass die Motivation der Landwirt/-innen ein zentraler Faktor für den einzelbetrieblichen Klimaschutz war. Die Motivation zur Umsetzung von Klimaschutzmassnahmen wurde massgeblich durch die Überzeugung der Landwirt/-innen bestimmt, selbst einen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten zu können (Kontrollüberzeugung) und die nötigen Fähigkeiten zur Umsetzung von Massnahmen zu besitzen (Selbstwirksamkeit; Kreft *et al.*, 2021). Diese Überzeugungen stehen unter anderem in Zusammenhang mit dem besseren Prozessverständnis, vermittelt durch die Bilanzierung («Klimabrille»), aber auch mit dem Wissens- und Erfahrungsaustausch unter den Landwirt/-innen zum Thema Klimaschutz (Kreft *et al.*, 2023; Vetter *et al.*, 2018). Somit kann eine Bilanzierung mittels THG-Rechnern die Landwirt/-innen vor allem dann im Handeln ermächtigen, wenn sie in ein umfassendes Gesamtkonzept mit Beratung und/oder Erfahrungsaustausch in einem Betriebsnetzwerk eingebettet ist.

### Einzelbetrieblicher Klimaschutz und gesellschaftliche Transformation

Im Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept wurden den Landwirt/-innen technische und organisatorische Reduktionsmassnahmen finanziell entgolten, während keine Veränderun-

gen der Betriebsstrukturen und Produktivität angestrebt wurden. Da die Wirtschaftlichkeit eines der ausschlaggebendsten Argumente für die Wahl einer Massnahme war, wurden auch primär die entsprechend finanziell abgegoltenen Massnahmen umgesetzt (Thiébaud *et al.*, 2023). Die Höhe der Kompensationszahlungen ist eine wichtige Stellschraube im landwirtschaftlichen Klimaschutz und muss aufgrund der finanziellen Aufwendungen und der eventuellen Mehr- oder Mindererträge sorgfältig abgewogen werden (Bamière *et al.*, 2023; Eory *et al.*, 2015; Lanigan *et al.*, 2019).

Trotz des beträchtlichen finanziellen und personellen Aufwandes hatten im Projekt AgroCO<sub>2</sub>ncept nur 2 Betriebe das Reduktionsziel von 20% erreicht. Die geringfügigen Reduktionserfolge im Projekt weisen darauf hin, dass das Reduktionspotenzial mit technischen und organisatorischen Massnahmen begrenzt ist (Bretscher *et al.*, 2018; Rosa & Gabrielli, 2023). Um weiterführende Emissionsreduktionen und die politisch gesetzten Klimaziele zu erreichen sind daher auch Veränderungen der Konsum- und Produktionsmuster notwendig (BLW *et al.*, 2023; Fesenfeld *et al.*, 2023). Dies kann durch Änderungen in persönlichen und gesellschaftlichen Wertesystemen, sowie in den politischen und gesellschaftlichen Strukturen erreicht werden (Fesenfeld *et al.*, 2023; Gosnell *et al.*, 2019; O'Brien & Sygna, 2013). Dabei sollten einerseits weitere Umweltaspekte wie die Nährstoff- oder Biodiversitätsproblematik («Klima-Tunnelblick»; Colomb *et al.*, 2012; Garnett *et al.*, 2022; Tuomisto *et al.*, 2013) und andererseits die soziale Verträglichkeit der Veränderungen für die Landwirt/-innen mitberücksichtigt werden.

## Schlussfolgerung

THG-Rechner können in der Praxis bei der Umsetzung von Klimaschutzmassnahmen einen Mehrwert bieten. In der praktischen Anwendung sollten die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

1. THG-Rechner können Reduktionspotenziale von Klimaschutzmassnahmen auf Landwirtschaftsbetrieben vorab nur zum Teil abbilden. Die Potenziale sind theoretischer Natur und stimmen nur begrenzt mit tatsächlich in der Praxis erreichten Emissionsreduktionen überein.
2. Für eine Evaluation im Nachhinein ist es unerlässlich, die sich verändernden Betriebsstrukturen und externe Einflussfaktoren zu beachten. Diese können die Wirkung von Reduktionsmassnahmen überlagern und einen Reduktionsnachweis durch wiederholte Bilanzierungen erschweren.
3. THG-Rechner bilden betriebsübergeordnete systemische Rahmenbedingungen (z.B. Flächen-/Nahrungsmittelkonkurrenz, standortangepasste Produktion, überbetriebliche Kooperation...) grossmehrerheitlich nicht ab. Diese Rahmenbedingungen müssen zusätzlich berücksichtigt werden, um nicht nur auf Einzelbetrieben, sondern im gesamten Landwirtschafts- und Ernährungssystem eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten.
4. Sollten ergebnisorientierte Ansätze (Entgelt gemäss gemessener Zielerreichung, z.B. eingesparte tCO<sub>2</sub>eq/Jahr) auf der Basis von THG-Rechnern weiterverfolgt werden, braucht es grundlegende konzeptuelle Überlegungen zum Umgang mit dynamischen Betriebsstrukturen und Schwankungen durch äussere Einflüsse, sowie zu Systemgrenzen und geeigneten Kenngrössen/Indikatoren.
5. Die Motivation der Landwirt/-innen ist ein zentraler Erfolgsfaktor im einzelbetrieblichen Klimaschutz. Das Aufsetzen der «Klimabrille» kann bei Landwirt/-innen das Prozessverständnis fördern und Handlungsoptionen aufzeigen. Realistisches Erwartungsmanagement ist nötig, um mögliche Ernüchterungen aufzufangen.
6. Eine Bilanzierung mittels THG-Rechnern kann die Landwirt/-innen vor allem dann im Handeln ermächtigen, wenn sie in ein umfassendes Gesamtkonzept mit Beratung, Weiterbildung und/oder Erfahrungsaustausch in einem Betriebsnetzwerk eingebettet ist. ■

### Dank

- Verein AgroCO<sub>2</sub>ncept: Vorstand und Mitglieder
- THG-Bilanzierung und Klimaberatung: Bodensee Stiftung
- Beratung: Strickhof und ZHAW
- Begleitforschungsgruppe: ETH Zürich, Agroscope
- Ressourcenprojekt AgroCO<sub>2</sub>ncept: Bundesamt für Landwirtschaft, Amt für Natur und Landwirtschaft, Kanton Zürich
- Die Arbeit von C.Z. wurde im Rahmen des Projekts «Klimaneutrale Landwirtschaft Graubünden» durch den Kanton Graubünden in Zusammenarbeit mit Agroscope finanziert.

## Literatur

- BAFU. (2021). Langfristige Klimastrategie der Schweiz. 1–65. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/mitteilungen.msg-id-82140.html>
- Bamière, L., Bellassen, V., Angers, D., Cardinael, R., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Delame, N., Diallo, A., Graux, A. I., Houot, S., Klumpp, K., Launay, C., Letort, E., Martin, R., Mézière, D., Mosnier, C., Réchauchère, O., Schiavo, M., ... Pellerin, S. (2023). A marginal abatement cost curve for climate change mitigation by additional carbon storage in French agricultural land. *Journal of Cleaner Production*, **383**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135423>
- Bargo, F., Muller, L. D., Kolver, E. S., & Delahoy, J. E. (2003). Invited Review: Production and Digestion of Supplemented Dairy Cows on Pasture. *Journal of Dairy Science*, **86**(1), 1–42. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73581-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73581-4)
- BLW, BLV, & BAFU. (2023). Klimastrategie Landwirtschaft und Ernährung 2050 – 1. Teil: Grundsätze, Ziele und Stossrichtungen. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/umwelt/klima0.html>
- Brander, M. (2022). The most important GHG accounting concept you may not have heard of: the attributional-consequential distinction. *Carbon Management*, **13**(1), 337–339. <https://doi.org/10.1080/17583004.2022.2088402>
- Bretscher, D., Ammann, C., Wüst, C., Nyfeler, A., & Felder, D. (2018). Reduktionspotenziale von Treibhausgasemissionen aus der Schweizer Nutztierhaltung. *Agrarforschung Schweiz*, **9**, 11–12.
- Clavreul, J., Butnar, I., Rubio, V., & King, H. (2017). Intra- and inter-year variability of agricultural carbon footprints – A case study on field-grown tomatoes. *Journal of Cleaner Production*, **158**, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.004>
- Colomb, V., Bernoux, M., Bockel, L., Chotte, J.-L., Martin, S., Martin-Phipps, C. C., Mousset, J. J., Tinlot, M., & Touchemoulin, O. O. (2012). Review of GHG Calculators in Agriculture and Forestry Sectors: A Guideline for Appropriate Choice and Use of Landscape Based Tools. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/ex\\_act/pdf/ADEME/Review\\_existingGHGtool\\_VF\\_UK4.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/ex_act/pdf/ADEME/Review_existingGHGtool_VF_UK4.pdf)
- COWI, Ecologic Institute, & IEEP. (2021). Technical Guidance Handbook – Setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/10acfd66-a740-11eb-9585-01aa75ed71a1/language-en>
- Eory, V., Macleod, M., Topp, C. F. E., Rees, R. M., Webb, J., McVittie, A., Wall, E., Borthwick, F., Watson, C., Waterhouse, A., Wiltshire, J., Bell, H., Moran, D., & Dewhurst, R. (2015). Review and update the UK Agriculture Marginal Abatement Cost Curve to assess the greenhouse gas abatement potential for the 5th carbon budget. *Final report submitted for the project contract «Provision of services to review and update the UK agriculture MACC and to assess abatement potential for the 5th carbon budget period and to, 2050».*
- Fesenfeld, L., Mann, S., Meier, M., Nemecek, T., Scharrer, B., Bornemann, B., Brombach, C., Beretta, C., Bürgi, E., Grabs, J., Ingold, K., Jeanneret, P., Kislig, S., Lieberherr, E., Müller, A., Pfister, S., Schader, C., Schönberg, S., Sonneveld, M., Zähringer, J. (2023). Wege in die Ernährungszukunft der Schweiz – Leitfaden zu den grössten Hebeln und politischen Pfaden für ein nachhaltiges Ernährungssystem. <https://doi.org/doi.org/10.5281/zenodo.7543576>
- Garnett, T., Godde, C., Muller, A., Rööß, E., Smith, P., De Boer, I., Zu Ermgassen, E., Herrero, M., Van Middelaar, C., Schader, C., Van Zanten, H., Conant, R., Ericsson, N., Falcucci, A., Henderson, B., Johansson, D., Mottet, A., Opio, C., Persson, M., ... Godfray, C. (2022). Grazed and confused?: ruminating on cattle, grazing systems, methane, nitrous oxide, the soil carbon sequestration question-and what it all means for greenhouse gas emissions. *FCRN*. [https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/reports/fcrn\\_gnc\\_report.pdf](https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/reports/fcrn_gnc_report.pdf)
- Gosnell, H., Gill, N., & Voyer, M. (2019). Transformational adaptation on the farm: Processes of change and persistence in transitions to «climate-smart» regenerative agriculture. *Global Environmental Change*, **59**, 101965. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101965>
- Groen, E. A., Van Zanten, H. H. E., Heijungs, R., Bokkers, E. A. M., & De Boer, I. J. M. (2016). Sensitivity analysis of greenhouse gas emissions from a pork production chain. *Journal of Cleaner Production*, **129**, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.081>
- He Waka Eke Noa. (2022). *Recommendations for pricing agricultural emissions – Report to Ministers*. <https://hewakaekenoa.nz/wp-content/uploads/2020/12/>
- Huber, S., Baumann, F., & Gilli, C. (2022). *Treibhausgase aus der Bündner Landwirtschaft – Resultate und Erkenntnisse aus der Klimabilanzierung von 52 Pilotbetrieben*. [https://cdn1.site-media.eu/images/document/5996045/KNL\\_ACCT-Bericht\\_2022\\_v12\\_web.pdf](https://cdn1.site-media.eu/images/document/5996045/KNL_ACCT-Bericht_2022_v12_web.pdf)
- Ineichen, S. M., Zumwald, J., Reidy, B., & Nemecek, T. (2023). Feed-food and land use competition of lowland and mountain dairy cow farms. *Animal*, **17**(12), 101028. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.101028>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (eds.)). IPCC.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, & S. Federici (eds.)). IPCC.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Jones, A. K., Jones, D. L., & Cross, P. (2014). The carbon footprint of lamb: Sources of variation and opportunities for mitigation. *Agricultural Systems*, **123**, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2013.09.006>
- Kätsch, S., & Osterburg, B. (2016). Treibhausgasrechner in der Landwirtschaft-Erfahrungen und Perspektiven. *Landbauforschung*, **66**(1), 29–44. <https://doi.org/10.3220/LBF1456905354000>
- KlimaStaR-Milch. (2023). *Ressourcenprojekt KlimaStaR Milch*. [www.klimastar-milch.ch/](http://www.klimastar-milch.ch/)
- Kreft, C., Huber, R., Schäfer, D., & Finger, R. (2024). Quantifying the impact of farmers' social networks on the effectiveness of climate change mitigation policies in agriculture. *Journal of Agricultural Economics*. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12557>
- Kreft, C., Huber, R., Wuepper, D., & Finger, R. (2021). The role of non-cognitive skills in farmers' adoption of climate change mitigation measures. *Ecological Economics*, **189**, 107169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107169>
- Lam, W. Y., Van Zelm, R., Benítez-López, A., Kulak, M., Sim, S., King, J. M. H., & Huijbregts, M. A. J. (2018). Variability of Greenhouse Gas Footprints of Field Tomatoes Grown for Processing: Interyear and Intercountry Assessment. *Environmental Science and Technology*, **52**(1), 135–144. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04361>
- Lanigan, G. J., Donnellan, T., Hanrahan, K., Paul, C., Shaloo, L., Krol, D., Forrester, P., Farrelly, N., O'Brien, D., Ryan, M., Murphy, P., Caslin, B., Spink, J., Finnan, J., Boland, A., Upton, J., & Richards, K. (2019). An Analysis of Abatement Potential of Greenhouse Gas Emissions in Irish Agriculture 2021-2030. *Teagasc*. <https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2018/An-Analysis-of-Abatement-Potential-of-Greenhouse-Gas-Emissions-in-Irish-Agriculture-2021-2030.pdf>

- Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, **14**, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>
- O'Brien, K., & Sygna, L. (2013). Responding to Climate Change: The Three Spheres of Transformation. *Proceedings of Transformation in a Changing Climate*, June, 16–23.
- Osterburg, B., Rüter, S., Freibauer, A., Witte, T. De, Elsasser, P., Kätsch, S., Leischner, B., Paulsen, H., Rock, J., Röder, N., Sanders, J., Schweinle, J., Steuk, J., Stichnothe, H., Stümer, W., Welling, J., & Wolff, A. (2013). *Thünen Rep 11: Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft*. [https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen-Report\\_11.pdf](https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen-Report_11.pdf)
- Paul, C., Techen, A. K., Robinson, J. S., & Helming, K. (2019). Rebound effects in agricultural land and soil management: Review and analytical framework. *Journal of Cleaner Production*, **227**, 1054–1067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.115>
- Rödiger, M., & Home, R. (2023). Systemic enablers and barriers to extending the productive life of dairy cows in Switzerland. *Journal of Rural Studies*, **100**, 103031. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103031>
- Rosa, L., & Gabrielli, P. (2023). Achieving net-zero emissions in agriculture: a review. *Environmental Research Letters*, **18**(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acd5e8>
- Salou, T., Le Mouél, C., & van der Werf, H. M. G. (2017). Environmental impacts of dairy system intensification: the functional unit matters! *Journal of Cleaner Production*, **140**, 445–454. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.019>
- Schader, C., Muller, A., El-Hage Scialabba, N., Hecht, J., Isensee, A., Erb, K. H., Smith, P., Makkar, H. P. S., Klocke, P., Leiber, F., Schwegler, P., Stolze, M., & Niggli, U. (2015). Impacts of feeding less food-competing feedstuffs to livestock on global food system sustainability. *Journal of the Royal Society Interface*, **12**(113), 20150891. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0891>
- Schader, C., Muller, A., Scialabba, N. E., Hecht, J., & Stolze, M. (2014). Comparing global and product-based LCA perspectives on environmental impacts of low-concentrate ruminant production. *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2014)*, San Francisco, California, USA, **8**, 1203–1209.
- Solagro. (2013). *Climate friendly agriculture – Evaluations and improvements for energy and greenhouse gas emissions at the farm level in the European Union*. [https://agriadapt.eu/wp-content/uploads/download-manager-files/Manual\\_English.pdf](https://agriadapt.eu/wp-content/uploads/download-manager-files/Manual_English.pdf)
- Thiébaud, E., Hafner, D., Huber, S., Giuliani, G., Meier, T., Ringger, C., Stüssi, M., Liebisch, F., Leifeld, J., Oberholzer, H., Kreft, C., Huber, R., Finger, R., Bertschi, M., Meili, J., Koller, C., Kromrey, V., & Reich, A. (2023). *CO<sub>2</sub>-Endbericht Ressourcenprojekt «AgroCO<sub>2</sub>ncept Flaachtal»*. <https://www.agroco2ncept.ch/post/co2-endbericht-ressourcenprojekt>
- Tuomisto, H. L., Angileri, V., De Camillis, C., Loudjani, P., Nisini, L., Pelletier, N., & Haastrup, P. (2013). *Final technical report: Certification of low carbon farming practices*. <https://doi.org/10.2788/46851>
- Vetter, S. H., Malin, D., Smith, P., & Hillier, J. (2018). The potential to reduce GHG emissions in egg production using a GHG calculator – A Cool Farm Tool case study. *Journal of Cleaner Production*, **202**, 1068–1076. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.199>
- Zumwald, J., Nemecek, T., Ineichen, S., & Beat, R. (2019). Indikatoren für die Flächen- und Nahrungsmittelkonkurrenz in der Schweizer Milchproduktion: Entwicklung und Test zweier Methoden. *Agroscope Science*, **85**, 1–66. <https://doi.org/10.24451/arbor.8229>