

Abschlussbericht zum Promotionsstipendium

Klimabilanz von integrierter low-input Weidemilchproduktion in Schleswig-Holstein

Gefördert durch die Gesellschaft für Energie- und Klimaschutz Schleswig-Holstein



30. November 2024

Stipendiatin: Marie Eismann

Betreuer: Prof. Dr. Friedhelm Taube

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der CAU Kiel,
Abteilung Grünland und Futterbau/ Ökologischer Landbau

Stipendiumdauer: 1. August 2021 - 31. Juli 2024

Rahmen

Der vorliegende Bericht beschreibt die zentralen Forschungsarbeiten, die im Rahmen des Projektes „Klimabilanz von integrierter low-input Weidemilchproduktion in Schleswig-Holstein“ mittels eines Promotionsstipendiums der Gesellschaft für Energie- und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) vom 01.08.2021 bis zum 31.07.2024 gefördert wurden. Das Promotionsstipendium wurde vom Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Abteilung Grünland und Futterbau /Ökologischer Landbau, gemeinsam mit Marie-Sophie Rose Eismann für ihr Promotionsvorhaben beantragt. Zentrales Anliegen dieses Promotionsvorhabens ist die Analyse der Klimabilanz von Weidemilch, produziert unter low-input Bedingungen im landwirtschaftlichen Gemischtbetrieb, eingefasst in einer kumulativen Dissertation. Zu den Schwerpunkten der Arbeit gehört die Erfassung der Methan (CH₄)-Emissionen von Milchkühen während der Beweidung, die Analyse der Bodenkohlenstoffakkumulation in intensiv beweidetem Wechselgrünland und der Erfassung der quantitativen Differenzen von Stickstoffverlusten über Nitratauswaschung und Lachgas (N₂O)-Emissionen bei dem Anbau von Sommer- und Winterweizen.

Hintergrund

Die Nachhaltigkeit der derzeitigen Agrarwirtschaft ist von der aktuellen Klimakrise stark gefährdet. Während einige Einflüsse des Klimawandels, wie steigende Temperaturen, verlängerte Vegetationsperioden und höhere Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Konzentrationen in der Atmosphäre, auch positive Auswirkungen haben können (Stokes und Howden 2010), wirken sich reduzierte Wasserverfügbarkeit, Hitzewellen und Wetterextreme negativ auf die landwirtschaftliche Produktion aus (Alcamo et al. 2007; Arnell 2004; Easterling et al. 2000). Der Agrarsektor steuerte im Jahr 2023 einen Anteil von 7,7% zu den deutschen Treibhausgas (THG)-Emissionen bei (Umweltbundesamt 2023). Dargestellt werden die THG-Emissionen in CO₂-

Äquivalenten, eine Maßeinheit, welche den quantitativen Beitrag eines Gases und dessen Treibhauseffekt berücksichtigt. Methan-Emissionen machen mit 64,7% den größten Anteil aus. Zu den Quellen gehören die Verdauungsprozesse von Wiederkäuern, das Wirtschaftsdüngermanagement und die Lagerung von Gärresten aus Biogasanlagen. Lachgas macht 30,1% der Emissionen aus und entstehen größtenteils bei der Ausbringung von organischem und mineralischem Dünger, beim Wirtschaftsdüngermanagement und ebenfalls bei der Lagerung von Gärresten aus Biogasanlagen. Kohlendioxid-Emissionen steuern mit 4,4% nur einen geringen Anteil zu den Gesamtemissionen bei. Kalkung, Düngung mit Harnstoff und anderen kohlenstoffhaltigen Düngern gehören zu den primären Quellen (Umweltbundesamt 2023). Das aktuelle Klimaschutzgesetz zielt eine Reduktion der THG-Emissionen von -55% auf Bundesebene bis 2030 an. Die Ziele des Agrarsektors werden mit großer Wahrscheinlichkeit in diesem Zeitraum erreicht. Die damit verbundenen THG-Reduktionen sind vor allem auf den Rückgang der Tierbestände und die Verschärfung der Düngerverordnung zurückzuführen. Um die auf 2045 angesetzte Klimaneutralität zu erlangen, bedarf es jedoch weiterer Anstrengungen. Da sich die Emissionen aus dem Agrarsektor nicht vollständig reduzieren lassen, da diese beispielsweise Teil von biologischen Prozessen sind, müssen neben effektiven Reduktionsmaßnahmen auch die Stärkung von CO₂-Senken erfolgen.

In Schleswig-Holstein ist seit diesem Jahr das Ziel der Klimaneutralität für das Jahr 2040 angesetzt. Das landwirtschaftlich geprägte Bundesland weist mit rund 22% wesentlich höhere Emissionsanteile aus dem Agrarsektor auf als der Bundesdurchschnitt (MEKUN, 2024). Der Agrarsektor in Schleswig-Holstein zeichnet sich durch eine starke räumliche Aufteilung in von Ackerbau und Milchvieh dominierte Regionen aus. Das Östliche Hügelland ist geprägt von Ackerbau mit engen Fruchtfolgen und hohen Erträgen im Marktfruchtanbau. Die Geestregion zeichnet sich durch hohe Viehdichten aus. Die dort wirtschaftenden Milchviehbetriebe betreiben meist ganzjährige Stallhaltung und weisen hohe Nährstoffüberschüsse auf. In Kombination mit überwiegend sandigen, leichten Böden, welche Nährstoffe

schlechter speichern, kommt es in der Geestregion zu einer erhöhten Nitratbelastung des Grundwassers. Die Landesfläche in Schleswig-Holstein besteht zu rund 10% aus Moorböden, davon werden etwa 81% landwirtschaftlich genutzt. Der Großteil dieser Flächen wird als Grünland für die Grundfuttererzeugung genutzt und liegt in Regionen mit hohen Viehdichten. Durch die ungünstige Überschneidung von Moorböden und Milchviehdichten hat diese Region und dessen Bewirtschaftung eine hohe Klimarelevanz. Die Landwirtschaft in Schleswig-Holstein ist durch die verstärkten Klimaschutzziele und die Nutzungsbedingungen im besonderen Maße gefordert, Anpassungen vorzunehmen.

Treibhausgas Mitigationsstrategien

Im Zuge der Intensivierung landwirtschaftlicher Produktion haben spezialisierte high-input Tierhaltungs- und Ackerbausysteme an Verbreitung gewonnen. Diese stehen in Verbindung mit negativen Umweltauswirkungen wie erhöhte THG-Emissionen, Nährstoffüberschüssen, Wasserverschmutzung durch beispielsweise Pflanzenschutzmittel, die Erschöpfung der organischen Bodensubstanz und der Bodenfruchtbarkeit, sowie dem Wegfall von Ökosystemdienstleistungen (Leterme et al. 2019). Ein Gegenpol zu den spezialisierten Betrieben und ein Ansatz, Emissionen zu reduzieren, bilden die Gemischtbetriebe welche, Ackerbau und Tierhaltung gleichermaßen praktizieren (Rockström et al. 2009; Ryschawy et al. 2012). Gemischtbetriebe bilden nach jahrzehntelangem Rückgang heutzutage die Minderheit unter den Betriebssystemen, weisen jedoch eine Vielzahl an Vorteilen auf. So können diese Systeme zum Teil höhere Erträge aufweisen als spezialisierte Betriebe (Peterson et al. 2020). Die Implementierung von mehreren Einkommensquellen kann ökonomische Vorteile haben (Ryschawy et al. 2012). Eine Vielzahl an Studien beschreibt, dass Gemischtbetriebe einen positiven Effekt auf die Nachhaltigkeit haben (Ryschawy et al. 2012; Peterson et al.2020). Zu diesen gehört ein geringer Überschuss von Phosphat und Stickstoff, sowie die damit einhergehend geringeren Verluste

(Lemaire et al. 2015). Darüber hinaus weisen diese Betriebssysteme oft einen stärker geschlossenen Kreislauf der Rohstoffe im System auf, welcher den Bedarf an externen Ressourcen reduziert. Dies wirkt sich positiv auf die Nachhaltigkeit dieser Systeme aus. Eine verbesserte Kohlenstoffdynamik, mit erhöhter Kohlenstoff-Sequestration, erhöhten Werten an organisch gebundenen Kohlenstoff (SOC) und verbesserten Bodeneigenschaften können diesen Systemen ebenfalls zugeschrieben werden. Gefördert werden diese Bodeneigenschaften durch die Aufbringung von Wirtschaftsdünger, oder durch den Anbau von Klee gras in der Ackerfruchtfolge (Lemaire et al. 2015; Loges et al. 2018; Nyameasem et al. 2024). Die Integration von Klee gras in die Ackerfruchtfolge, als Weidefutter, Schnittnutzung oder Gründüngung wird als Ley-Phase bezeichnet. Dieses System hat eine Vielzahl positiver Auswirkungen, wie die bereits erwähnten positiven Effekte auf die Bodeneigenschaften, die mit der Dauer der Ley-Phase positiv korrelieren. Durch den Anbau von Leguminosen kommt es zur biologischen Fixierung von Stickstoff aus der Luft, wodurch sich der Stickstoffgehalt im Boden mehrt und teilweise auf Stickstoffdünger verzichtet werden kann. In der Ley-Phase wurden des Weiteren geringere N₂O-Emissionen und Nitratauswaschung dokumentiert (Reinsch et al. 2021).

Der Anbau von Ackerkulturen erfordert die Bearbeitung des Bodens. Durch Pflügen oder andere Boden bearbeitende Maßnahmen, kann es zu erheblichen Kohlenstoff- und Stickstoffverlusten in die Atmosphäre oder in Gewässer kommen (Smith et al. 2007, Acharya et al. 2012). Der Zeitpunkt der Bodenbearbeitung ist eine wichtige Stellschraube, um Emissionen zu reduzieren. Beispielsweise kann eine intakte Grasnarbe die Verluste an Kohlenstoff und Stickstoff über das Winterhalbjahr reduzieren, weshalb ein Umbruch des Bodens im Frühjahr eine sinnvolle Maßnahme sein kann (Vellinga et al. 2004).

In den letzten Jahrzehnten sind high-input Stallhaltungssysteme die konventionelle Norm in der Milchviehhaltung geworden. Diese haben den Fokus auf einer hohen

Milchleistung in Kombination mit Futterrationen, welche nur noch geringe Anteile an frischem Gras und erhebliche Mengen an Maissilage sowie Kraftfutter beinhalten (Reinsch et al. 2021). Die Reintegration von weidebasierten Milchproduktionssystemen als umweltfreundliche und resiliente Alternative, steht inzwischen wieder zur Diskussion in Wissenschaft und Praxis (Schils et al. 2019). Neben klimarelevanten Vorzügen werden diesem System noch weitere Vorteile zugeschrieben. Zum einen gilt die Weidehaltung als natürlichere Lebensform für Kühe und kann positive Auswirkungen auf die Gesundheit der Tiere haben. Zum anderen wächst die Nachfrage nach weidebasierten Milchprodukten. In der Milchviehhaltung zählt Weide als kostengünstigste Futterquelle (Dillon et al. 2008). Die Futteraufnahme der Kühe direkt auf der Weide ist mit einem geringeren Energieaufwand verbunden, im Vergleich zur Futterwerbung für im Stall gehaltene Kühe (Rotz et al. 2019). Werden Milchkühe geweidet, kann es in allen Teilen der Prozesskette des Wirtschaftsdüngermanagements zu geringeren NH_3 -Verlusten kommen (Misselbrook et al. 2000).

Ziel eines weidebasierten Systems ist es, eine maximale Milchleistung aus dem Weidefutter zu generieren und dies mit einem möglichst geringen Kraftfuttereinsatz. Dafür müssen zum einen Qualität und Angebot stimmen, aber auch die Eignung der Kühe für die Weidehaltung. Das von der britischen Kanalinsel stammende Jersey Rind weist eine sehr hohe Eignung für die Weidehaltung auf. Dazu gehören ein geringes Körpergewicht (400-450 kg), hohe Futtermittelverwertungseffizienz, gute Klauengesundheit, sowie eine hohe Fruchtbarkeit mit kurzen Kalbungsintervallen. Die Fruchtbarkeitseigenschaften der Milchkühe sind besonders wichtig, um eine saisonale Kalbung im Frühjahr zu gewährleisten. Denn mit einer Abkalbung zwischen Februar und März, lässt sich das Futterangebot auf der Weide optimal mit dem Futterbedarf der laktierenden Kühe synchronisieren (Humphreys 2016). So kann ein möglichst hoher Anteil der Milch aus dem Weidefutter generiert werden. Eine weitere wichtige Stellschraube ist die Futterqualität, um eine möglichst hohe Milchleistung und Futteraufnahme auf der Weide zu generieren. Eine intensive Rotationsweide mit

8-10 Beweidungen stellt sicher, dass der Bestand in einem hoch verdaulichen (83%) und energiereichen (7 MJ NEL/ kg DM) Zustand beweidet wird (Eismann et al. 2024). Durch die Integration von Klee im Bestand kann die Schmackhaftigkeit des Weideaufwuchses zusätzlich gefördert und ein Großteil des benötigten Rohproteins auf der Weide generiert werden. Mit diesem System kann so ca. 90% der benötigten Energie der Milchkühe ab dem 60sten Laktationstag auf der Weide generiert und größtenteils auf Kraftfutter verzichtet werden (Taube et al. 2023). Ein weiterer positiver Effekt des Klees ist die Förderung der Agrobiodiversität, da ein solcher Bestand beispielsweise Wildbienen einen Lebensraum bietet (Beye et al. 2022). Die im weidebasierten Gemischtbetrieb gemessenen CH₄-Emissionen weidender Kühe liegen weit unter den Werten anderer Studien (Loza et al. 2021; Eismann et al. 2024).

Versuchsgut Lindhof

Auf dem Lindhof, einem Versuchsgut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, werden unter dem Projekt „Ökoeffiziente Weidemilcherzeugung“ THG reduzierende Maßnahmen integriert, um ein Betriebsmodell für klimafreundliche Milch zu entwickeln. Der Ansatz beinhaltet die Integration von Milchviehhaltung in einem Ackerbaubetrieb „Gemischtbetrieb“, ein weitestgehender Verzicht auf externe Produktionsmittel „low-input“, Wechselgrünland in der Ackerfruchtfolge „Ley-Phasen“, angepasste Umbruchzeiträume und weidebasierte Milchproduktion. So sollen eine hohe Qualität und Quantität von Agrarprodukten, geringe Nährstoffüberschüsse, ein minimierter CO₂-Fußabdruck, die Förderung der Agrobiodiversität, Tierwohl und -gesundheit sowie zahlreiche Ökosystemdienstleistungen mit einer ökonomisch rentablen Milcherzeugung vereint werden (Loges et al. 2018). Durch die Vielzahl an THG reduzierenden Maßnahmen, die auf dem Lindhof umgesetzt werden, kann ein CO₂-Fußabdruck generiert werden, der mit 0,6 kg CO₂-Äq./ kg ECM deutlich unter dem von konventioneller Stallhaltung

(1,1 kg CO₂-Äq./ kg ECM), und sogar traditionellen Weidesystemen (0,9 kg CO₂-Äq./ kg ECM) liegt (Reinsch et al. 2021).

Die Effizienz der weidebasierten Milcherzeugung lässt sich an einem Vergleich ablesen. Der Lindhof wurde mit 356 anderen Milchbetrieben in Schleswig-Holstein verglichen. In diesem Vergleich wurde deutlich, dass die kleineren Jerseys (470 vs. 670 kg) mit 7007 kg ECM/Kuh Jahr zwar weniger produzieren als der Durchschnitt der anderen Betriebe (9433 kg ECM/ Kuh Jahr). Vergleicht man jedoch die Milchleistung pro kg Körpergewicht (BW), weist der Lindhof mit 14,9 kg ECM/kg BW sogar eine höhere Effizienz, als der Durchschnitt der anderen Betriebe auf (14,08 kg ECM/kg BW). Zusätzlich dazu generiert der Lindhof geringere totale Futterkosten, was unter anderem durch höhere Weidefutteraufnahme und geringere Kraftfuttermengen zustande kommt. Mit einer geringeren Stickstoffbilanz der Futterflächen zeigt dieser Vergleich neben der ökonomischen Rentabilität auch die Umweltfreundlichkeit der auf dem Lindhof praktizierten Weidemilchproduktion auf (Taube et al. 2023).

Forschungsdesign

Der praktische Teil des Promotionsvorhabens umfasste einen Zeitraum von zwei Jahren (Sommer 2021-2022). Die methodische Arbeit der Promotion soll zu der datenbasierten Systembewertung des Gemischtbetriebs beitragen. Dies ist von großer Bedeutung, da die geringe Verbreitung des Gemischtbetriebs im Agrarsektor dazu geführt hat, dass dieser auf wissenschaftlicher Ebene unterrepräsentiert und folglich auch die Datenlage für dieses System stark limitiert ist.

Die Basis der praktischen Arbeit bildeten die Messungen der Weideleistung und Futteraufnahme der weidenden Kühe, während der Weidezeiträume in den Jahren 2021 und 2022. Zu jeder Beweidung wurden Aufwuchs-Messungen und Hand-Beprobungen vor und nach der Beweidung vorgenommen. Ein Rising-Plate-Meter kam zum Einsatz, welcher durch die Messung der komprimierten Bestandshöhe die

verfügbare Biomasse berechnet. Des Weiteren wurden mittels Hand-Beprobung dem Grünland Aufwuchsproben entnommen. Um die botanische Zusammensetzung des Weideaufwuchses zu bestimmen, wurden diese Proben nach Pflanzenarten fraktioniert. Durch die Ofentrocknung der Pflanzenproben erfolgte die Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes. Die Bestimmung der Weidefutterqualität erfolgte an gemahlenem Probenmaterial mittels Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS). Um die Milchleistung und Milchqualität des auf den Versuchsflächen bereitgestellten Grundfutters zu ermitteln, wurden Milcherträge und Daten der Milchleistungsprüfung erfasst.

Ein weiterer Bestandteil der praktischen Phase bildeten die N_2O -Messungen mittels statischer Messkammer Methode. Die Messkammern wurden in einem einwöchigen Rhythmus auf in den Boden eingelassene Ringe gesetzt und gasdicht verschlossen. Durch die Entnahme von vier Gasproben innerhalb einer Messung konnte durch die veränderte N_2O -Konzentration der N_2O -Fluss bestimmt werden. Die Bestimmung der N_2O -Konzentration erfolgte durch Gaschromatographie. Durch lineare Interpolation erfolgte die Ermittlung der N_2O -Jahresbilanzen. Diese Methode kam zum Einsatz, um den Effekt der Beweidung auf die N_2O -Freisetzung des Bodens zu bestimmen, den Unterschied der N_2O -Emissionen von einem Frühjahrs- und Herbstumbruch für den Anbau von Sommer- und Winterweizen zu quantifizieren und um eine zweijährige N_2O -Bilanz darzustellen.

Um die Nährstoffverluste über den Sickerwasser-Pfad auf den Versuchsflächen zu bestimmen, wurden keramische Saugkerzen eingesetzt. Diese wurden über die zwei Winterzeiträume (Oktober bis März) im Boden installiert, um Sickerwasserproben zu gewinnen. Die wöchentlich entnommenen Proben wurden auf die Stickstoffkonzentrationen photometrisch untersucht. Durch den Einsatz dieser Methode im Klee gras und Winterweizen konnte zum einen die über den Winter versickerte Stickstoffmenge bestimmt werden, zum anderen konnte der quantitative Unterschied der Verluste zwischen Klee gras und Winterweizen bestimmt werden.

Der bedeutendste Bestandteil des methodischen Vorgehens waren die EC-Stationen. Die mikrometeorologische Methode misst den turbulenten Austausch von Energie, Wasserdampf und Spurengasen zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre.



Mit dieser Methode konnte eine kontinuierliche Messung von CO_2 und CH_4 über den gesamten praktischen Zeitraum hinweg erfolgen. So konnte auf dem Lindhof erstmalig die CH_4 -Emissionen der weidenden Kühe auf Herdenlevel erhoben werden. Die kontinuierliche Messung der Kohlenstoffdynamik über einen Zeitraum von zwei Jahren ermöglichte die Ermittlung der Differenz entstandener Emissionen zwischen

Klee gras und Winterweizen und zwischen den Umbruchzeitpunkten für Sommer- und Winterweizen. Durch die hochfrequente Datenerfassung dieser Methode war auch die Dokumentation kurzzeitiger Ereignisse, wie der Abfall der photosynthetischen Kohlenstoffassimilation des Bestandes nach einer Beweidung möglich.

Erfolgte und geplante Publikationen

P1: Publiziert

P1: Combining the Eddy Covariance Method and Dry Matter Intake Measurements for Enteric Methane Emission Estimation from Grazing Dairy Cows

Zusammenfassung

Methan und seine Auswirkungen auf das Klima spielen eine wichtige Rolle in den aktuellen Bemühungen, die mit der Landwirtschaft verbundenen THG-Emissionen zu reduzieren. Enterisches CH₄, ein Nebenprodukt der Pansenverdauung, trägt mit rund 49 % [1] zu den landwirtschaftlichen Emissionen in Deutschland und 44 % auf globaler Ebene bei (Gerber 2013, Tubiello et al. 2013). Eine genaue Messung der CH₄-Emissionen ist unerlässlich, um THG-Bilanzen und Modellierungsansätze zu verbessern und zu aktualisieren (Prajapati und Santos 2017, 2018; Todd et al. 2019). Trotz anhaltender Bemühungen weisen die aktuellen Messmethoden für CH₄-Emissionen erhebliche Unsicherheiten auf, insbesondere in weidebasierten Milchsystemen (Hiller et al. 2014; Prajapati und Santos 2017). Abgesehen von methodischen Problemen, ist dies auf die große Variation der Emissionsintensitäten in der Rinderhaltung zurückzuführen (Gerber 2013). Die EC-Methode ist ein mikrometeorologischer Ansatz zur Messung von u.a. THG-Emissionen aus Ökosystemen (Dabberdt et al. 1993; Baldocchi 2003). Diese Technik integriert Messungen von Gasen oder Energie über große Gebiete mit hoher zeitlicher Auflösung und über lange Zeiträume (Aubinet et al. 2012; Denmead 2008). Im letzten

Jahrzehnt wurde diese Methode für die Messung der CH₄-Emissionen von weidenden Kühen angepasst (Dengel et al. 2011; Baldocchi et al. 2012; Tallec 2012; Felber et al. 2015; Coates et al. 2018; Stoy et al. 2021).

Ziel dieser Studie war es, den Einsatz der EC-Methode als Instrument zur Erfassung von enterischen CH₄-Emissionen weidenden Milchkühen zu untersuchen. Dies geschah im Zeitraum September bis November 2022 in vier Messkampagnen. Die Genauigkeit dieser Daten wurde getestet, indem sie mit tierbasierten Emissionsbestimmungsfaktoren, DMI- und Futterqualitätsparameter basierten Gleichungen und den IPCC Tier 2 Standardwerten in Beziehung gesetzt wurden. Der neuartige Ansatz, umfassende Daten zur Trockenmasseaufnahme und zu Futterqualitätsparametern mit einzubeziehen, zielte darauf ab, die Ergebnisse für einen besseren Vergleich zwischen Studien zu kontextualisieren. In dieser Studie wurde die EC-Methode in Kombination mit einem Footprint-Modell und Informationen über den Beitrag verschiedener Bereiche im Footprint aus einem speziellen Zaundesign verwendet, um die Position der Kühe innerhalb des FP genau zu bestimmen.

Die mittels EC-Methode gemessenen tägliche Emissionen von 205 g CH₄ pro Kuh pro Tag befinden sich in einem sehr niedrigen Bereich und liegen damit unter den Schätzungen, die auf den IPCC Tier 2 Standardwerten und anderen Gleichungen basieren, welche wiederum auf Futteraufnahme und Futterqualitätsparametern stützen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass die EC-Methode in Kombination mit einem speziellen Zaundesign eine geeignete Methode zur Messung der enterischen CH₄-Emissionen von Milchkühen in Weidesystemen ist. Darüber hinaus zeigte die Studie, dass ein umfassender Datensatz tierbezogener Daten, ein praktisches Werkzeug zur Kontextualisierung der Ergebnisse ist. Die gemessenen CH₄-Emissionen und Intensitäten lagen im Vergleich zu anderswo erhobenen Werten in einem niedrigen Bereich. Die hohe Futterqualität, das sehr hohe genetische Potenzial der Jerseys für die Milchproduktion, dessen hohe Verträglichkeit für Weidesysteme

und die optimierte Nutzung der Kleegrasaufwüchse waren zumindest teilweise ursächlich für die geringen CH₄-Emissionen und Intensitäten. Daher sollte das integrierte low-input Milchproduktionssystem als praktikable THG-Minderungsstrategie angesehen werden, da es die Vereinbarkeit einer intensiven Weidemilchproduktion und einer klimafreundlichen Landwirtschaft unterstreicht.

P2: In Vorbereitung (Submission innerhalb der nächsten drei Monate)

P2: Spring Ploughing as an Option to Mitigate N₂O Emissions of Grass-clover Leys in an Integrated Crop Livestock System

Zusammenfassung

Auf globaler Ebene machen landnutzungsbedingte Emissionen rund ein Viertel der anthropogenen THG-Emissionen aus. In Deutschland stammen rund 85,5% der N₂O-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung von Böden (Umweltbundesamt 2022). Die Höhe der Emissionen steht im direkten Bezug zu der Menge an Stickstoff und anderen Faktoren wie die Verfügbarkeit des Stickstoffs, Temperatur, mikrobieller Aktivität, Bodenfeuchte und Sauerstoffverfügbarkeit (Mirzaei et al. 2022). Die Integration von Grasgemengen in die Ackerfruchtfolge (Ley-System) hat viele positive Effekte wie ein verbesserter Stickstoff und Kohlenstoffkreislauf bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer hohen Produktivität, (Lemaire et al. 2014) sowie verbesserte Bodeneigenschaften und eine vielfältigere Agrarlandschaft (Cooledge et al. 2022). Oft wird dem Ackergras Klee beigemischt, welches durch die Fixierung von Stickstoff aus der Luft zur Anreicherung der Stickstoffkonzentration im Boden beisteuert. Die Bearbeitung von Böden führt zu einem zeitlich begrenzten Anstieg der N₂O-Emissionen (Buchen et al. 2017; Seiz et al. 2019; Biernat et al. 2020). Die Auswahl des Zeitpunktes ist eine wichtige Stellschraube, um Umbruch bedingte Emissionen zu reduzieren. Studien zeigen, dass durch eine Bodenbearbeitung im Herbst höhere Emissionen entstehen, als wenn der Bearbeitungszeitraum in den Frühling verlegt

wird (Reinsch et al. 2018; Biernat et al. 2020). Auch andere Stickstoffverluste wie die Nitratauswaschung ins Grundwasser können sich durch einen Umbruch im Frühjahr reduzieren lassen (Ball et al. 2007; Biernat et al. 2020).

Diese Studie untersucht, welche Auswirkung des Zeitpunktes des Pflügens in einer Klee-gras-Weizenfruchtfolge auf die N₂O-Emissionen hat. In einem zweijährigen Feldexperiment wurden N₂O-Messungen mittels statischer Messkammer-Methode durchgeführt, welche das Klee-gras sowie den Sommerweizen- und Winterweizenanbau abdecken. Lineare Mixed-Effekt-Modelle wurden eingesetzt, um den kumulativen Unterschied der N₂O-Emissionen zwischen Sommer- und Winterweizen zu bestimmen. Das Pflügen von Klee-gras im Frühjahr führte zu geringeren Emissionen als das Pflügen im Herbst. Dieser Unterschied wurde auf höhere N₂O-Spitzen nach dem Pflügen im Herbst und eine kürzere Periode erhöhter Werte nach dem Pflügen im Frühjahr zurückgeführt. Die Unterschiede können mit höheren wassergefüllten Porenräumen im Winter und höheren Bodentemperaturen im Herbst zusammenhängen. Diese Bedingungen fördern Denitrifikationsprozesse, was nach der Freisetzung und Mineralisierung von organischen Verbindungen aufgrund des Klee-gras-Umbruchs, zu höheren Emissionen führt. Die gesamten Emissionen von Winter und Sommerweizen lagen in einem sehr niedrigen Bereich. Das Pflügen von Klee-gras im Frühjahr vor dem Weizenanbau wurde dennoch als eine Option zur Minderung der N₂O-Emissionen identifiziert.

P3: In Vorbereitung (Submission innerhalb der nächsten drei Monate)

P3: Carbon Dynamic of a Grass-Clover and Wheat Crop Sequence in an Integrated Crop-Livestock System.

Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hat sich seit der Industriellen Revolution verdoppelt. Während der Energie- und Industriesektor die primären Emittenten von CO₂ sind, spielt die Landnutzung und Landnutzungsänderung eine große Rolle bei

den landwirtschaftlich bezogenen CO₂-Emissionen. Der Umbruch von Dauergrünland zur Neuansaat oder für die Umwandlung in Ackerfläche, sowie der Anbau von Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil an bodenzehrenden Feldfrüchten wie beispielsweise Mais, führen zu erheblichen Verlusten an im Boden gebundenen Kohlenstoff. Dieser organisch gebundene Kohlenstoff im Boden ist jedoch eine wichtige Senke für CO₂ und ein essenzieller Bestandteil im Boden, der sich positiv auf Bodeneigenschaften und Produktivität auswirkt (Nyameasem et al. 2024). Die Integration von Klee grasbeständen in der Fruchtfolge, welches zu Futterproduktion oder Gründüngung genutzt werden kann, ist eine Möglichkeit, um gegen den Verlust von Bodenkohlenstoff gegenzusteuern. Die Kohlenstoff Sequestration Kapazität dieses Systems liegt zwischen dem von Dauergrünland und reinem Ackerland (Soussana et al. 2004) und ist somit eine effektive Lösung, um bodengebundene Kohlenstoffverluste in einer Ackerfruchtfolge zu mindern.

Forschungsdesign:

Mittels der EC-Methode werden die CO₂-Flüsse zwischen Atmosphäre und Bestands oberfläche über einen Zeitraum von zwei Jahren (März 2021-März 2023) kontinuierlich erfasst. Die Messungen finden im Klee gras sowie im Sommer- und Winterweizen statt. Für die Kohlenstoffbilanz werden alle relevanten Kohlenstoffflüsse auf Feldebene erfasst. Diese umfassen den Netto-Ökosystem-Austausch und Kohlenstoffimporte wie die Düngung mit Gülle und die anfallenden Exkreme nte der weidenden Kühe. Zu den Exporten gehören die während der Beweidung aufgenommene Biomasse, Siloschnitte sowie der Weizenkörner- und Strohertrag. Die Erfassung des Netto-Ökosystem-Austausch des beweideten Klee grasbestands wird mittels einer Software generiert. Zum einen findet eine Footprintallokations-Analyse statt um die CO₂-Flüsse des beweideten Klee grasses definieren zu können. Des Weiteren findet eine Aufteilung des Netto-Ökosystem-Austausches in Bruttoprimärproduktion und Ökosystematmung statt. Dieses dient

dazu, den Produktionseinbruch des Bestandes nach einer Beweidung darstellen zu können.

Forschungsfragen:

- Kann die Akkumulation von Kohlenstoff unter Klee gras im zweiten Nutzungsjahr die darauffolgenden Kohlenstoffverluste, verbunden mit dem Anbau von Weizen ausgleichen?
- Welcher Umbruchzeitraum (Frühjahr vs. Herbst) führt zu geringeren Kohlenstoffverlusten?
- Führt eine Überwinterung des Klee grasbestandes mit anschließendem Umbruch im Frühjahr zu geringeren Kohlenstoffverlusten als ein Herbstumbruch mit anschließender Aussaat des Winterweizenbestandes?
- Wie verhält sich der Netto Ökosystem Austausch nach einer Beweidung?

Wissenstransfer

Im Rahmen der Promotion konnte das Projekt auf einer Vielzahl von Kanälen vorgestellt und die Wichtigkeit dieser klimafreundlichen landwirtschaftlichen Produktionsweise vermittelt werde.

TV Präsentation:

Odysso - Wissen im SWR: Das Märchen von der bösen Kuh

Planet Wissen: Die Klimafreundliche Kuh – Eine Frage der Haltung

Planet Wissen: Stoßen Kühe wirklich so viel Methan aus?

Artikel:

Elite Magazin für Milcherzeuger „Low cost-Weide: 16 Cent Futterkosten“

Vorträge:

25. März 2023

Vortrag im Rahmen der Mitgliederversammlung des Verband Deutscher Jerseyzüchter e.V..

5. Juli 2023

Vortrag im Rahmen der Eröffnung des Kompetenzzentrums „Klimaeffiziente Landwirtschaft mit Werner Schwarz, Minister für Landwirtschaft in Schleswig-Holstein.

12. Juli 2023

Vorstellung von Weidebasierter Milchproduktion in einem low-input Gemischtbetrieb im Rahmen eines fachlichen Austausches über den Umbau der Nutztierhaltung mit Agora-Agrar

22. November 2024

Referentin bei der Tagung „Beiträge zu ruraler Vorstellung und Wirklichkeit vom 18. Jahrhundert bis heute - Ländliche (T)Räume in Nordelbien“.

Fazit

Das Promotionsvorhaben ist in den drei Jahren, von der intensiven Datenerhebung in den ersten zwei Jahren, über die Verarbeitung der Daten bis hin zur Veröffentlichung der ersten Publikation fortgeschritten. Ziel ist es, die sich in der Bearbeitung befindenden Publikationen bis Anfang 2025 einzureichen und die kumulative

Dissertation fertigzustellen. Der Abschluss in Form der Disputation ist für spätestens Juli 2025 anvisiert.

Die ganzheitliche Erfassung aller wesentlicher THG-Quellen der Klimaberichterstattung für die Quellengruppe 3, welche die produzierten Emissionen auf Betriebsebene beinhaltet, und Quellgruppe 4, welche die vermiedenen Emissionen berücksichtigt, konnte während der praktischen Phase durch die Anwendung der verschiedenen Messmethoden vorgenommen werden. In Kombination mit einer intensiven Erfassung von Produktionsdaten wurde eine komplexe Darstellung von THG-Dynamiken auf Feldebene möglich. Die Forschungsergebnisse dieses Promotionsvorhabens sowie die assoziierten Publikationen der Abteilung Grünland und Futterbau demonstrieren das Potenzial des integrierten Gemischtbetriebs. Durch die THG reduzierende, ökonomisch rentable, Tierwohl und Biodiversität in Agrarlandschaften fördernde Produktionsweise ist dieser Betriebstyp eine Möglichkeit, hochproduktive und klimafreundliche Landwirtschaft miteinander zu vereinen.

Ausblick

Der betriebliche Ansatz eines low-input Gemischtbetriebs bildet eine Perspektive, wie sich die Landwirtschaft in den kommenden Jahrzehnten an die veränderten Gegebenheiten anpassen kann, um Klimazielen, klimatischen Veränderungen und gesellschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden. Mit der steigenden Weltpopulation und dem Rückgang der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu Gunsten von beispielsweise Infrastruktur, wird neben der Ertragsleistung der Fläche auch immer bedeutender, was angebaut wird. In Deutschland wird rund 60% der landwirtschaftlich genutzten Fläche für die Produktion von Futtermitteln genutzt. In einer herkömmlichen Futtermittelration für Milchkühe kommt nur noch 20-30% der Energie von Grünlandflächen. Um die Konkurrenz von Nahrungs- und Futtermittelproduktion zu reduzieren, ist einer der effektivsten Ansätze, neben der Reduktion des

Tierbestandes, die Rinderhaltung wieder weidebasiert zu gestalten und somit eine für die menschliche Ernährung irrelevante Energiequelle zu nutzen. Der Anbau von Wechselgrünland auf dem Acker, hat bei dieser Betrachtung seine Berechtigung durch die Verbesserung der Bodeneigenschaften wie die Bodenauflockerung, Humusakkumulation und die Weiterung der Fruchtfolge, was positive Auswirkungen auf die Produktivität hat. Im Hinblick auf Schleswig-Holstein hat die Integration von Grünland in der Fruchtfolge zu Futtererzeugungszwecken für Milchviehkühe den weiteren Vorteil, dass so die in der Geest vorhandenen Moor-Grünlandstandorte entlastet werden könnten und durch die Wiedervernässung zu THG-Reduktion führen können.

Ein weiterer Ansatz, der die Vorzüglichkeit dieses Betriebssystems deutlich werden lässt, ist die Berücksichtigung von Umweltkosten, welche durch die Landwirtschaft anfallen. Diese entstehen beispielsweise durch Phosphor und Stickstoffüberschüsse in Gewässern, welche zu Algenblüte und Fischsterben führen können. Diese Kosten sind in Bezug auf die Landwirtschaft externalisiert. Der Landwirt, als auch der Konsument von landwirtschaftlichen Produkten, muss aktuell nicht für diese Kosten aufkommen. Auf dem Lindhof kommt es durch die umweltfreundliche Bewirtschaftungsweise zur Vermeidung solcher Kosten. Dies führt zu finanziellen Vorteilen, was low-input Gemischtbetriebssysteme als vorzügliche Bewirtschaftungsweise erkennen lässt, im Falle einer Internalisierung solcher Kosten.

Des Weiteren befassen sich Molkereien mit der Klimafreundlichkeit der Milchlieferanten. So könnte Milch mit einem geringen CO₂-Fußabdruck bevorzugt oder mit einem besseren Milchpreis honoriert werden. Dies würde zu einem ökonomischen Vorteil von weidebasierter Milcherzeugung in einem Gemischtbetrieb führen. Ein weiterer Einblick in die Zukunft ermöglicht der Blick nach Dänemark, welches als erstes Land eine CO₂-Steuer auf Agrarprodukte bis 2030 einführen will. Bedenkt man, dass das Betriebssystem des Lindhofs seinen CO₂-Fußabdruck um die Hälfte reduzieren kann, bedeutet dies in einem Szenario der Besteuerung, dass die

Kosten dafür um 50%, gegenüber herkömmlichen Produktionsweisen reduziert werden können.

Ein weiterer Betrachtungswinkel, der für ein integriertes Betriebssystem spricht, ist die Tatsache, dass für eine Klimaneutralität im Agrarsektor die Senkenfunktionen unserer Landwirtschaft ausgebaut werden müssen. Neben der Wiedervernässung von Moorböden, und Erhaltung von Dauergrünland sind die Integration von Wechselgrünland in der Fruchtfolge und die Nutzung von Wirtschaftsdünger, welches beide praktische Ansätze eines Gemischtbetrieb sind, geeignete Praktiken um die Senkenfunktion auf Betriebsebene auszubauen. Das integrierte low-input System ist aus vielerlei Hinsicht ein für die Zukunft der Landwirtschaft wichtiges Betriebssystem, dessen Vorzüglichkeit mit dem Heranschreiten des Klimawandels und der Anpassung darauf verdeutlicht werden wird.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlichst bei der EKSH bedanken, welche mir mit dem Promotionsstipendium die Möglichkeit gegeben haben, in einem höchst aktuellen Forschungsfeld Erfahrung und Expertise zu sammeln. Ein besonderer Dank gilt Dr. Thies Popp der mit Interesse, Engagement und einem stetig offenen Ohr das Promotionsvorhaben begleitet und nicht selten für Aufmunterung in schwierigen Phasen gesorgt hat.

Quellen

Alcamo, J.; Floerke, M.; Maerker, M. (2007) Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences* 52(2):247–275

Arnell, N.W. (2004) Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Glob Environ Chang* 14(1):31–52

Aubinet, M.; Vesala, T.; Papale, D. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012; ISBN 978-94-007-2350-4.

Baldocchi, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Glob. Chang. Biol.* 2003, 9, 479–492.

Baldocchi, D.; Detto, M.; Sonnentag, O.; Verfaillie, J.; Teh, Y.A.; Silver, W.; Kelly, N.M. The challenges of measuring methane fluxes and concentrations over a peatland pasture. *Agric. For. Meteorol.* 2012, 153, 177–187.

Ball, B.; Watson, C. A.; Crichton, I. (2007): Nitrous oxide emissions, cereal growth, N recovery and soil nitrogen status after ploughing organically managed grass/clover swards. In *Soil Use & Management* 23 (2), pp. 145–155. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2006.00072.x.

Beye, H.; Taube, F.; Lange, K.; Hasler, M.; Kluß, C.; Loges, R., Diekötter, T. (2022). Species-enriched grass-clover mixtures can promote bumblebee abundance compared with intensively managed conventional pastures. *Agronomy*, 12, 1080. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051080>

Biernat, L.; Taube, F.; Loges, R.; Kluß, C.; Reinsch, T. (2020): Nitrous Oxide Emissions and Methane Uptake from Organic and Conventionally Managed Arable Crop Rotations on Farms in Northwest Germany. In *Sustainability* 12 (8), p. 3240. DOI: 10.3390/su12083240.

Buchen, C.; Well, R.; Helfrich, M.; Fuß, R.; Kayser, M.; Gensior, A. et al. (2017): Soil mineral N dynamics and N₂O emissions following grassland renewal. In *Agriculture, ecosystems & environment* 246, pp. 325–342. DOI: 10.1016/j.agee.2017.06.013.

Coates, T.W.; Benvenuti, M.A.; Flesch, T.K.; Charmley, E.; McGinn, S.M.; Chen, D. Applicability of Eddy Covariance to Estimate Methane Emissions from Grazing Cattle. *J. Environ. Qual.* 2018, 47, 54–61.

Coolidge, E. C.; Chadwick, D. R.; Smyth, L.M.J.; Leake, J. R.; Jones, D. L. (2022): Agronomic and environmental benefits of reintroducing herb- and legume-rich multispecies leys into arable rotations: A review. In *Front. Agr. Sci. Eng.* 9 (2), pp. 245–271. DOI: 10.15302/J-FASE-2021439.

Dabberdt, W.F.; Lenschow, D.H.; Horst, T.W.; Zimmerman, P.R.; Oncley, S.P.; Delany, A.C. Atmosphere-Surface Exchange Measurements. *Science* 1993, 260, 1472–1481.

Dengel, S.; Levy, P.E.; Grace, J.; Jones, S.K.; Skiba, U.M. Methane emissions from sheep pasture, measured with an open-path eddy covariance system. *Glob. Chang. Biol.* 2011, 17, 3524–3533.

Denmead, O.T. Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. *Plant Soil* 2008, 309, 5–24

Dillon, P.; Hennessy, T.; Shalloo, L.; Thorne, F.; and Horan, B. (2008). Future outlook for the Irish dairy industry: a study of international competitiveness, influence of international trade reform and requirement for change. *Int. J. Dairy Technol.* 61, 16–29. doi: 10.1111/j.1471-0307.2008.00374.x

Easterling, D.R.; Meehl, J.; Parmesan, C.; Chagnon, S.; Karl, T.R.; Mearns, L.O. (2000) Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science* 289:2068–2074

Eismann, M.-S.R.; Smit, H.P.J.; Poyda, A.; Loges, R.; Kluß, C.; Taube, F. Combining the Eddy Covariance Method and Dry Matter Intake Measurements for Enteric Methane Emission Estimation from Grazing Dairy Cows. *Atmosphere* 2024, 15, 1269. <https://doi.org/10.3390/atmos15111269>

Felber, R.; Münger, A.; Neftel, A.; Ammann, C. Eddy covariance methane flux measurements over a grazed pasture: Effect of cows as moving point sources. *Biogeosciences* 2015, 12, 3925–3940.

Gerber, P.J.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J.; Faluccci, A.; Tempio, G. Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. In *A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 2013; ISBN 978-92-5-107920-1.*

Hiller, R.V.; Bretscher, D.; DelSontro, T.; Diem, T.; Eugster, W.; Henneberger, R.; Hobi, S.; Hodson, E.; Imer, D.; Kreuzer, M.; et al. Anthropogenic and natural methane fluxes in Switzerland synthesized within a spatially explicit inventory. *Biogeosciences* 2014, 11, 1941–1960.

Lemaire, G.; Franzluebbbers, A.; Carvalho, P.C.d.F.; Dedieu, B. (2014): Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural VI production and environmental quality. In *Agriculture, ecosystems & environment* 190, pp. 4–8. DOI: 10.1016/j.agee.2013.08.009.

Lemaire, G.; Gastal, F.; Franzluebbbers, A.; Chabbi, A. (2015). Grassland– cropping rotations: an avenue for agricultural diversification to reconcile high production with environmental quality. *Environ. Manage.* 56, 1065–1077. doi: 10.1007/s00267-015-0561-6

- Leterme, P.; Nesme, T.; Regan, J.; Korevaar, H. (2019). "Environmental benefits of farm- and district-scale crop-livestock integration," in *Agroecosystem Diversity* (Elsevier), 335–349. doi: 10.1016/B978-0-12-811050-8.00021-2
- Loges, R., Bunne, I., Reinsch, T., Malisch, C., Kluß, C., Herrmann, A., Taube, F. (2018). Forage production in rotational systems generates similar yields compared to maize monocultures but improves soil carbon stocks. *European Journal of Agronomy*, 97, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.010>
- Loza, C., Reinsch, T., Loges, R., Taube, F., Gere, J. I., Kluß, C., Hasler, M., Malisch, C. S. (2021). Methane emission and Milk production from Jersey cows grazing perennial ryegrass–white clover and multispecies forage mixtures. *Agriculture*, 11, 175. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020175>
- Mirzaei, M.; Gorji A.M.; Taghizadeh-Toosi, A.; Zaman, M.; Saronjic, N.; Mohammed, S. et al. (2022): Soil Nitrous Oxide Emissions Following Crop Residues Management in Corn-Wheat Rotation Under Conventional and No-Tillage Systems. In *Air, Soil and Water Research* 15, 1-12. DOI: 10.1177/11786221221128789
- Misselbrook, T. H., Van Der Weerden, T. J., Pain, B. F., Jarvis, S. C., Chambers, B. J., Smith, K. A., et al. (2000). Ammonia emission factors for UK agriculture. *Atmos. Environ.* 34, 871–880. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00350-7
- Nyameasem, J. K.; De Los Rios, J.; Kluß, C.; Reinsch, T.; Poyda, A.; Taube, F.; Loges, R. (2024), Incorporating leys in arable systems as a mitigation strategy to reduce soil organic carbon losses during land-use change. *Front. Environ. Sci.* 12:1399197. doi: 10.3389/fenvs.2024.1399197
- Reinsch, T.; Loges, R.; Kluß, C.; Taube, F. (2018): Renovation and conversion of permanent grass-clover swards to pasture or crops: Effects on annual N₂O emissions in the year after ploughing. In *Soil and Tillage Research* 175, pp. 119– 129. DOI: 10.1016/j.still.2017.08.009.
- Reinsch, T.; Loza, C.; Malisch, C. S.; Vogeler, I.; Kluß, C.; Loges, R.; Taube, F. (2021). Toward specialized or integrated Systems in North west Europe: On-farm eco-efficiency of dairy farming in Germany. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 614348.
- Peterson, C. A.; Deiss, L.; Gaudin, A. C. M. (2020). Commercial integrated crop-livestock systems achieve comparable crop yields to specialized production systems: a meta-analysis. *PLoS ONE* 15:e0231840. doi: 10.1371/journal.pone.0231840
- Prajapati, P.; Santos, E.A. (2017). Estimating methane emissions from beef cattle in a feedlot using the eddy covariance technique and footprint analysis. *Agric. For. Meteorol.* 258, 18–28.

- Prajapati, P.; Santos, E.A. (2018). Comparing methane emissions estimated using a backward-Lagrangian stochastic model and the eddy covariance technique in a beef cattle feedlot. *Agric. For. Meteorol.* 256–257, 482–491.
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, Å.; Chapin, F. S.; Lambin, E.; et al. (2009). Planetary boundaries exploring the safe operating space for humanity. *Ecol. Soc.* 14, 1–32. doi: 10.5751/ES-03180-140232
- Rotz, C. A.; Montes, F.; Chianese, D. S. (2010). The carbon footprint of dairy production systems through partial life cycle assessment. *J. Dairy Sci.* 93, 1266–1282. doi: 10.3168/jds.2009-2162
- Ryschawy, J.; Choisis, N.; Choisis, J. P.; Joannon, A.; Gibon, A. (2012). Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental friendly way of farming? *Animal* 6, 1722–1730. doi: 10.1017/S17517311120 00675
- Schils, R.; Philipsen, B.; Hoekstra, N.; Holshof, G.; Zom, R.; Hoving, I.; et al. (2019). amazing grazing: a public and private partnership to stimulate grazing practices in intensive dairy systems. *Sustainability* 11:5868. doi: 10.3390/su11205868
- Seiz, P.; Guzman-Bustamante, I.; Schulz, R.; Müller, T.; Ruser, R. (2019): Effect of Crop Residue Removal and Straw Addition on Nitrous Oxide Emissions from a Horticulturally Used Soil in South Germany. In *Soil Sci. Soc. Am. j.* 83 (5), pp. 1399–1409. DOI: 10.2136/sssaj2018.11.0448
- Stokes, C.J.; Howden, M. 2010. *Adapting Agriculture to Climate Change: Preparing Australian agriculture, forestry and fisheries for the future.* CSIRO Publishing, Melbourne.
- Stoy, P.C.; Cook, A.A.; Dore, J.E.; Kljun, N.; Kleindl, W.; Brookshire, E.N.J.; Gerken, T. Methane efflux from an American bison herd. *Biogeosciences* 2021, 18, 961–975.
- Talleg, T.; Klumpp, K.; Hensen, A.; Rochette, Y.; Soussana, J.-F. Methane emission measurements in a cattle grazed pasture: A comparison of four methods. *Biogeosci. Discuss.* 2012, 9, 14407–14436.
- Taube, F.; Nyameasem, J. K.; Fenger, F.; Alderkamp, L.; Kluß, C.; Loges, R. (2023): Eco-efficiency of leys—The trigger for sustainable integrated crop-dairy farming systems. In: *Grass and Forage Science*, Artikel gfs.12639. DOI: 10.1111/gfs.12639.
- Tubiello, F.N.; Salvatore, M.; Rossi, S.; Ferrara, A.; Fitton, N.; Smith, P. The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environ. Res. Lett.* 2013, 8, 15009.
- Todd, R.W.; Moffet, C.; Neel, J.P.S.; Turner, K.E.; Steiner, J.L.; Cole, N.A. Enteric Methane Emissions of Beef Cows Grazing Tallgrass Prairie Pasture on the Southern Great Plains. *Trans. ASABE* 2019, 62, 1455–1465.