Publizierbarer Endbericht

gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	PANGAS
Langtitel:	Greenhouse gas fluxes in arable soils under conditions of drought and heavy rain in the Pannonian area
Zitiervorschlag:	
Programm inkl. Jahr:	ACRP – 6th Call (2013)
Dauer:	01.04.2014 bis 31.12.2017
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	DI Dr. Barbara Kitzler/Doz. Dr. Kerstin Michel
Kontaktperson Name:	Doz. Dr. Kerstin Michel
Kontaktperson Adresse:	Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1131 Wien
Kontaktperson Telefon:	0043-1-87838-1421
Kontaktperson E-Mail:	kerstin.michel@bfw.gv.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherung (AGES), Wien Karlsruher Institut für Technologie – Institut für Meteorologie und Klimaforschung (KIT-IMK), Deutschland
Schlagwörter:	Treibhausgasemissionen, Landwirtschaft, Niederschlag, Bodenökologie
Projektgesamtkosten:	284.321,- €
Fördersumme:	284.321,- €
Klimafonds-Nr:	KR13AC6K11069
Erstellt am:	22.12.2017

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

1.1 Hintergrund

Die Freisetzung klimarelevanter Gase (THG) wie Kohlendioxid (CO_2), Distickstoffoxid (N_2O) und Methan (CH_4) aus Böden ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Ein wichtiger Faktor ist das Feuchtigkeitsregime im Boden, das die Sauerstoffverfügbarkeit und somit die Respiration bzw. die Prozesse, die zur Bildung von N_2O (Nitrifikation, Denitrifikation) und CH_4 (Methanogenese) führen, beeinflusst. Das Feuchtigkeitsregime wird unter anderem von den klimatischen Bedingungen und der Textur kontrolliert. In bezug auf mögliche Rückkopplungsmechanismen zwischen Klimaänderung und der Freisetzung klimarelevanter Gase lag der Schwerpunkt der bisherigen Untersuchungen auf der Bedeutung steigender Temperaturen. Veränderungen des Feuchtigkeitsregimes wurden seltener berücksichtigt.

1.2 Ziele des Projektes

Die Ziele des Projektes waren (i) den Einfluss veränderter Niederschlagsmuster auf gasförmige N-Emissionen und THG-Flüsse in landwirtschaftlich genutzten Böden des pannonischen Raumes genauer zu untersuchen; (ii) Steuerfaktoren insbesondere der Denitrifikation und somit der N_2O-Emissionen zu identifizieren und die IPCC-Emissionsfaktoren für aktuelle und zukünftige Niederschlagsbedingungen zu überprüfen; (iii) durch den Klimawandel ausgelöste Veränderungen im C- und N-Kreislauf und damit verbundene THG-Austuschprozesse unter Verwendung von LandsapeDNDC vorherzusagen und (iv) Empfehlungen für die Verminderung der THG-Emissionen aus den untersuchten Böden zu erarbeiten.

1.3 Verwendete Methoden

Das Methodenspektrum umfasste Feldmessungen, Laboranalysen und –experimente sowie prozessbasierte Modellierung mit LandscapeDNDC. Als Versuchsstandort diente die Lysimeteranlage der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES) in Hirschstetten im Nordosten Wiens. Von den insgesamt 18 grundwasserfreien Lysimetern werden pro Bodentyp [sandiger Tschernosem (S), tiefgründiger Tschernosem (T), Feuchtschwarzerde (F)] jeweils drei Lysimeter den zu erwartenden Trockenperioden und Starkregenereignissen unterworfen (prognosticated rain, „prog.rain“). Die Beregnungsmenge und -verteilung für die übrigen Lysimeter (Kontrolle) werden am langjährigen Niederschlagsdurchschnitt orientiert (current rain, „curr.rain“). Die Freisetzung von Kohlendioxid (CO_2), Distickstoffoxid (N_2O) und Methan (CH_4) wurde seit März 2011 (einschließlich Messungen im Rahmen des Vorläuferprojektes LYSTRAT) mittels der „closed-chamber“-Methode in zweiwöchigem Abstand bzw. im Rahmen mehrerer Intensivmessphasen täglich

erfasst. Zeitgleich wurden Bodentemperatur und Wassergehalt in 0-5 cm Tiefe bestimmt. Ausgewählte Basis- und mikrobielle Parameter wurden vier- bis fünfmal pro Jahr bestimmt [z.B. pH-Wert, mikrobieller Biomassekohlenstoff (C_{mik}) und –stickstoff (N_{mik}) mittels Chloroform-Fumigation-Extraktion sowie die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft anhand von Phospholipidfettsäureprofilen (PLFA)]. Ergänzend wurde 2015 zur Evaluierung der IPCC-Emissionsfaktoren ein Laborexperiment mit ungestörten Stechzylinderproben durchgeführt.

1.4 Wesentliche Ergebnisse

Die Aufnahme von CH_4, die Ökosystemrespiration, die N_2O- und NO-Flüsse waren unabhängig vom Bodentyp. Andere Prozesse und Parameter, beispielsweise die Bodenatmung oder – geringerem Maße – mikrobielle Bodeneigenschaften zeigten hingegen bodentypenabhängige Veränderungen. Veränderungen im Niederschlagsmuster wirkten sich in erster Linie auf Prozesse des C-Kreislaufs aus. So nahm die Ökosystemrespiration unter „prog.rain“-Bedingungen signifikant ab. Dies ist wahrscheinlich auf Veränderungen im Wurzelsystem der Pflanzen sowie geringere Pflanzenbiomasse zurückzuführen. Zudem gab es Anzeichen, dass die Aufnahme an CH_4 in bestimmten Böden abnehmen könnte. In Labormessungen und –versuchen zeigte sich zudem, dass Proben aus den beiden Beregnungsbehandlungen unterschiedlich auf Manipulationen wie Düngung oder Wasserzugabe reagierten. Dies deutet auf Änderungen in N-Transformationsprozessen wie der Denitrifkation hin. Die ermittelten Emissionsfaktoren für die „prog.rain“-Variante überstiegen die der Kontrolle deutlich. Die wichtigsten Steuerfaktoren der THG-Flüsse waren Boden- und Lufttemperatur. Die gemessenen mikrobiellen Parameter standen nicht oder nur sehr eingeschränkt zu den THG-Flüssen in Beziehung.

Die Modellsimulationen ergaben niedrigere N_2O-Emissionen unter zukünftigen Niederschlagsbedingungen verglichen mit den aktuellen. Im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen wurden zudem höhere Emissionsfaktoren für die heutigen Verhältnisse ermittelt (1,09 bis 10,07 % im Vergleich zu 1,59 bis 2,26 %). Die Abschätzung des Mitigationspotentials ergab eine potentielle Reduktion der N_2O-Emissionen um 30 % und der Nitratverluste um bis zu 50 % bei Aufrechterhaltung der landwirtschaftlichen Produktion. Die unter Berücksichtigung von Klimaprojektionen simulierten NO_3-Verluste für 2050 überstiegen die für 2000 errechneten um 30 %.

2 Executive Summary

2.1 Initial situation / motivation of the project

The release of greenhouse gases (GHG) such as carbon dioxide (CO_2), nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) from soils depends on several biotic and abiotic factors. One important factor is the soil moisture regime which is controlled amongst others by climatic conditions and soil texture. There is a lack of understanding of how altered precipitation and soil moisture conditions affect

GHG emissions and underlying processes. This is also true for the Pannonian region for which marked effects on the soil moisture regime have to be expected due to an increasing number of climate-induced drought and heavy rainfall events.

2.2 Objectives of the project

The objectives of the project were (i) to determine the impacts of altered precipitation patterns on N gas and GHG fluxes in arable soils of the Pannonian area in greater detail; (ii) to identify the controlling factors especially of denitrification and thus N_2O emissions to test the applicability of the IPCC default emission factor approach under current and under changed climatic conditions; (iii) to predict climate change induced alteration of C and N cycling and associated exchange of GHGs using LandscapeDNDC and (iv) to elaborate recommendations for mitigation of GHG emissions from the investigated soils.

2.3 Project structure and methodology

A combination of field experiments, laboratory analyses and process-based modelling (LandscapeDNDC) is applied. Soil sampling and field measurement were carried out at the lysimeter station of AGES in Hirschstetten, Vienna, Austria which consists of 18 lysimeters containing the three major soil types of the Pannonian production area [gleyic phaeozem (Feuchtschwarzerde, F); calcaric phaeozem (sandiger Tschernosem, S); calcic chernozem (tiefgründiger Tschernosem, T)]. The lysimeter station was covered with a roof to exclude precipitation in 2011 to allow controlled watering of the lysimeters. Two treatments were established: the control, i.e. current precipitation conditions ("curr.rain"; three soil types in three replicates), and simulation of future precipitation patterns for 2071 to 2100 including drought periods and heavy rain events ("prog.rain"; three soil types in three replicates). Bi-weekly measurements of GHG (CO_2, CH_4 and N_2O), of nitric oxide (NO) and of soil respiration have been carried out since April 2014. Additionally, N gas, and CH_4 fluxes, ecosystem and soil respiration were determined in higher resolution during three to five one-week-measurement campaigns per year. Soil samples for the physicochemical and microbiological analyses were taken in the middle of each one-week-measurement campaign. Undisturbed soil samples were used for lab experiments and measurements to evaluate the applicability of N_2O emission factors for the three soils investigated and to determine the endproduct of denitrification (N_2). Various chemical and microbial parameters such as enzyme activities and microbial biomass were determined regularly. Process based modelling was applied to the lysimeter systems amongst others to study the impact of climate change – by using RCP 4.5 and 8.5 regional climate input data – for the modelling of the strength and distribution of the N_2O emission and NO_3 leaching of the study area.

2.4 Results and conclusions of the project

Uptake of CH_4, ecosystem respiration rates, i.e. CO_2 fluxes measured in the field, N_2O and NO fluxes did not show any significant difference between the three soils investigated. In contrast, soil respiration rates, labile organic C fractions, mineral N concentrations and – to a minor degree – microbial properties varied

depending on soil type. The effects of altered precipitation patterns were most pronounced for processes of the C cycle. Ecosystem respiration rates showed a significant decrease under future precipitation conditions probably due to changes in the root system of crops and a reduction of aboveground biomass as demonstrated for buckwheat. Soil respiration and CH_4 uptake rates were also lower in the “prog.rain” treatment especially for soil T. Changes in precipitation patterns may thus decrease the sink function for CH_4 of some soils. Samples of the two precipitation treatments responded differently to manipulations in the lab. Increasing the water content resulted in markedly higher N_2 emissions only from samples of the control treatment. The effect was most pronounced for soil T. Fertilization caused a shift in the main product of denitrification from N_2 to N_2O and led to distinctly higher N_2O emissions from the “prog.rain” samples suggesting that N transformation processes, especially denitrification, might be altered by changes in precipitation patterns. Emission factors were below the current default factor of 1.25 % for current precipitation conditions, but reached this value if future precipitation patterns were applied. Soil and air temperature were identified as most important controlling factors of GHG fluxes in the investigated soils. According to model results mean annual N_2O emissions will be lower under future precipitation conditions. In contrast to the results of the fertilization experiment lower emission factors for the “prog.rain” treatment were obtained ranging from 1.59 to 2.26 % compared to 1.09 to 10.07 % for the control. Assessment of the mitigation potential showed a reduction potential of 30 % of N_2O emissions and up to 50% of NO_3 leaching losses while keeping crop production up by deploying optimized “smart agriculture” management. For 2050, an increase in NO_3 losses by 30 % compared to 2000 was simulated according to the climate projections.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Die Produktion der Treibhausgase (THG) Kohlendioxid (CO_2), Stickstoffdioxid (N_2O) und Methan (CH_4) in Böden hängt stark von biotischen und abiotischen Faktoren ab. Ein sehr wichtiger Faktor ist die Bodenfeuchte und somit auch die Sauerstoffverfügbarkeit im Boden. Die Bodenfeuchte beeinflusst die Produktion und Aufnahme von THG z.B. Atmung, Nitrifikation, Denitrifikation und Methanbildung und Methanabbau und wird durch den Niederschlag und unter anderem durch den Bodentyp beeinflusst. In der pannonischen Region wird erwartet, dass eine Klimaänderung eine große Auswirkung auf die Bodenfeuchteverhältnisse haben wird. Trockenperioden und Starkniederschlagsereignisse werden voraussichtlich zunehmen.

Die meisten Studien, die sich mit möglichen Auswirkungen von Klimaänderung auf die Treibhausgasproduktion aus Böden beschäftigt haben, waren konzentrierten sich auf die Auswirkung von erhöhter Temperatur. In deutlich weniger Studien wurden bisher Folgen eines geänderten Bodenfeuchteregimes untersucht. Die Auswirkungen von trockeneren Bedingungen und Starkregenereignissen auf die Produktion von Boden-THG und die zugrundeliegende Prozesse sind daher kaum abschätzbar.

Die Zielsetzungen der vorliegenden Studie waren:

(i) Eine detaillierte Bestimmung des Einflusses von veränderten Niederschlagsmustern auf die THG-Flüsse aus landwirtschaftlich genutzten Böden der Pannonischen Tiefeben.

(ii) Die Identifizierung der Faktoren, welche die Denitrifikation und die Produktion von N_2O-Emissionen am stärksten beeinflussen, einschließlich der Überprüfung der IPCC-Emissionsfaktoren unter derzeitigen und zukünftigen Klimabedingungen.

(iii) Abschätzung der Änderungen im Kohlenstoff (C)- und Stickstoff (N)-Kreisluuf und der Produktion und Aufnahme von THG unter sich ändernden klimatischen Bedingungen unter Verwendung des biogeochemischen Modells LandscapeDNDC.

(iv) Ausarbeitung von Empfehlungen für die Vermeidung von THG-Emissionen aus den untersuchten Böden.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Als Versuchsstandort diente die Lysimeteranlage der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES) in Hirschstetten im Nordosten Wiens. Von den insgesamt 18 grundwasserfreien Lysimetern werden pro Bodentyp [sandiger Tschernosem (S), tiefgründiger Tschernosem (T), Feuchtschwarzerde (F)] jeweils drei Lysimeter den zu erwartenden Trockenperioden und Starkregenereignissen unterworfen (prognosticated rain, „prog.rain“). Die Beregnungsmenge und -verteilung für die übrigen Lysimeter (Kontrolle) werden am langjährigen Niederschlagsdurchschnitt orientiert (current rain, „curr.rain“). Die Lysimeter wurden mit landwirtschaftlichen Kulturen nach guter fachlicher Praxis bepflanzt.

Die Freisetzung von Kohlendioxid (CO_2), Distickstoffoxid (N_2O) und Methan (CH_4) wurde seit März 2011 (einschließlich Messungen im Rahmen des Vorläuferprojektes LYSTRAT) mittels der „closed-chamber“-Methode erfasst. Die Probenahme erfolgt jeweils im Zeitraum April bis Oktober im Abstand von zwei Wochen, ansonsten einmal pro Monat. Um die zeitliche Dynamik der Gasflüsse besser erfassen zu können, wurden seit Mai 2014 in regelmäßigen Abständen einwöchige Meßkampagnen durchgeführt. Zeitgleich zur Gasprobenahme wird die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe gemessen sowie Bodenproben (0-5 cm) zur Ermittlung des gravimetrischen Wassergehaltes entnommen. Zudem wurde seit 2014 parallel zu den Gasflussmessungen die Bodenatmung mit Hilfe eines tragbaren CO_2-Meßgerätes sowie die Freisetzung an Stickstoffmonoxid (NO) mittels NO_x-Analysator (Durchflusssystem) erfasst. Zur Interpretation der Gasmessungen wurden für mindestens vier Termine pro Jahr ausgewählte Basis- und mikrobielle Parameter bestimmt [z.B. pH-Wert, mikrobieller Biomassekohlenstoff (C_{mik}) und –stickstoff (N_{mik}) mittels Chloroform-Fumigation-Extraktion sowie die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft anhand von Phospholipidfettsäureprofilen (PLFA)]. Ergänzend wurde 2015 zur Evaluierung der IPCC-Emissionsfaktoren ein Laborexperiment mit ungestörten

Stechzylinderproben durchgeführt. Hierbei wurden ungedüngte und gedüngte Proben hinsichtlich der Freisetzung von NO, N_2O und CO_2 gemessen. Um die Bedeutung eines geänderten Niederschlagsregimes für Kulturpflanzen abschätzen zu können, wurden sowohl 2014 als auch 2015 verschiedene Pflanzenparameter erhoben (Ober- und unterirdische Biomasseproduktion, Blütenbildung und Ertrag). Zusätzlich wurden in agrarökologischen Erhebungen die Unkrautabundanz, Blütenbesucher (Frequenz) und oberirdische Arthropoden miteinbezogen. In der letzten Phase des Projektes wurden auf Basis der Gasflussmessungen Modellierungen durchgeführt, unter anderem, um Minderungsmöglichkeiten aufzeigen zu können.

WP1: Treibhausgasflüsse unter veränderten Niederschlagsbedingungen – Feld- und Laborexperimente

Anmerkung: Die Treibhausgasmessungen von Jänner bis März 2014 stammen aus dem Vorprojekt LYSTRAT (ACRP 2nd call) und dienen zur Verbesserung der Datenbasis. (Lystrat; ACRP 2nd call).

Bodencharakterisierung, Kohlenstoffflüsse und – pools:

Die drei untersuchten Böden sind kalkhältig mit pH-Werten um 7.6 (Tabelle 1).

Table 1 Basic properties of the threes soils investigated (C_{org}, organic C content; N_t, total N content; mean ± SD; n = 6 except for texture analysis; further abbreviations see Table A3)

Soil	pH_{CaCl_2}	C_{org} [%]	N_t [%]	Texture [%]		
				Sand	Silt	Clay
F	7.6	2.3 ± 0.2	0.20 ± 0.01	22	49	28
S	7.6	1.2 ± 0.1	0.09 ± 0.00	69	20	11
T	7.7	2.6 ± 0.2	0.22 ± 0.01	23	51	26

Die Böden F und T haben eine ähnliche Textur mit einem hohen Anteil an Schluff. Der Boden S wurde nach der Österreichischen Bodenklassifizierung als lehmiger Sand klassifiziert. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) beläuft sich auf 1.3 ± 0.1 % im Boden S und 2.6 ± 0.1 % im Boden T. Die C/N Werte liegen bei 11 (Böden F und T) beziehungsweise 13 (Boden S). Am Ende des Freilandexperimenteskonnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Beregnungsvarianten hinsichtlich der allgemeinen Bodeneigenschaften gefunden werden.

Methanflüsse (CH_4)

Unabhängig von den Beregnungsvarianten zeigten alle Böden bis zum Ende des Experiments negative CH_4-Flüsse, d.h. CH_4-Aufnahme. Die mittleren Aufnahmeraten reichten von -55.3 ± 9.2 µg C m^{-2} h^{-1} (“curr.rain”, Boden T) bis -28.2 ± 6.7 µg C m^{-2} h^{-1} (“prog.rain”, Boden T). Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Beregnungsvarianten gefunden, aber in den Jahresaufnahmeraten. Im Jahr 2016 wurden z.B für die Böden S und T geringere

CH_4-Aufnahmen gemessen als 2014. Die höchsten mittleren Aufnahmeraten wurden im Boden F im Jahr 2014 gemessen und waren viermal höher als in den Jahren 2015 und 2016. Der Bodentyp hatte keinen signifikanten Effekt. Die unterschiedlichen Niederschlagsmuster hatten keine Auswirkung, wenn alle Jahre und alle Bodentypen in die statistische Analyse miteinbezogen wurden. Betrachtet man die Bodentypen einzeln, konnten jedoch Unterschiede festgestellt werden. Hier hatten die Kontrollböden (T) („curr.rain“) signifikant höhere Aufnahmeraten als die T Böden, die einer reduzierten Niederschlagsmenge ausgesetzt waren („prog.rain“).

Ökosystematmung und Bodenatmung (CO_2)

Von April 2014 bis November 2016 lagen die mittleren Ökosystemrespirationsflüsse (Pflanzenatmung + Bodenrespiration) zwischen 21.3 ± 2.5 mg C m^{-2} h^{-1} (Boden S, “prog.rain”) und 32.3 ± 3.0 mg C m^{-2} h^{-1} (Boden T, “curr.rain”). In den drei Messjahren zeigten die Raten lediglich geringe Schwankungen. Der Bodentyp hatte ebenfalls keine Auswirkung auf die Ökosystematmung, allerdings wurden in der verringerten Niederschlagsvariante („prog.rain“) signifikant geringere Flüsse gemessen (Figure 1).

In den Böden S und T waren die Flüsse in der “prog.rain” Variante signifikant niedriger als in der Kontrollvariante. Nur im Boden F kam es zu keiner Änderung.

Die Bodenatmung (CO_2-Emission von der Bodenoberfläche zu der mikrobielle, pilzliche und Wurzelatmung zählen) variierten sehr stark im Laufe eines Jahres. Die höchsten Raten wurden im Mai 2015 aus allen drei Böden gemessen (max: 1 g CO2 m^{-2} h^{-1}). Der Boden S emittierte signifikant weniger CO_2 (0.31 ± 0.01 g CO2 m^{-2} h^{-1}) als der Boden T (0.39 ± 0.01 g CO2 m^{-2} h^{-1}). Die mittlere Bodenatmung war im Jahr 2015 höher als in den Jahren 2014 und 2016, und ist wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Kulturen zu erklären. Desweiteren besteht ein Zusammenhang zwischen dem CO_2-Fluss und den unterschiedlichen Wachstumsstadien (Sey et al. 2010).

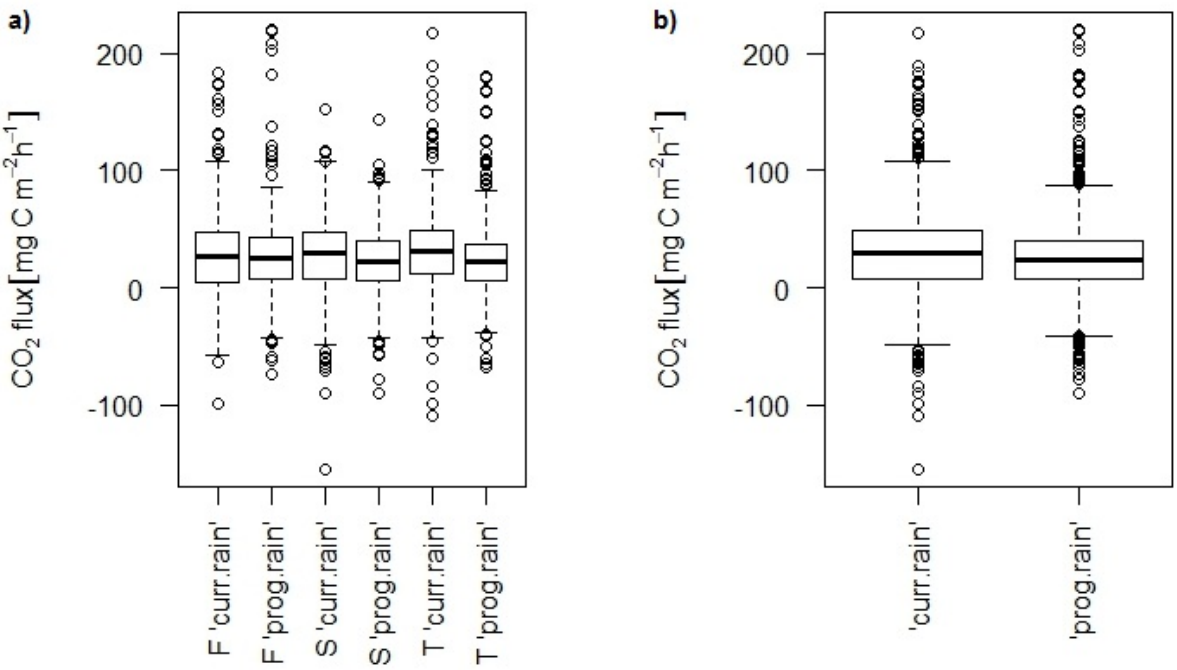


Figure 1 Fluxes of CO_2 a) from the three investigated soils and b) for the two precipitation patterns (fluxes from the three soils combined) in the time period April 2014 to November 2016. The differences between the two precipitation treatments of the soils S and T and between the two precipitation treatments in general are significant (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$). For further explanation of the box plots see caption of Figure A.1.

Das Niederschlagsmuster hatte einen Einfluss auf die mittlere Bodenatmung. Im Kontrollboden T wurden über die gesamte Zeit des Experiments höhere CO_2-Raten gemessen. In den Böden S und T der Variante „prog.rain" waren die CO_2-Emissionen in allen drei Jahren niedriger als in der Kontrollvariante. Jedoch konnten nur im Jahr 2014 statistisch signifikante Unterschiede festgestellt werden (t-Test, $p < 0.05$).

Pflanzenbürtige Parameter:

Im Gegensatz zu den mikrobiellen Parametern zeigten sich bei den untersuchten Kulturpflanzen signifikante Auswirkungen. Bei Buchweizen führte „prog.rain" beispielsweise zu einer signifikanten Reduktion der oberirdischen Biomasse, des Blattflächenindexes sowie des Kornertrages (auf Quadratmeter bezogen). Auch Wurzellänge und –durchmesser unterschieden sich signifikant zwischen den beiden Niederschlagsvarianten (längere und dünnere Wurzeln in der Variante „prog.rain"). Neben einer höheren Abundanz an Unkraut wurde zudem eine geringere Frequenz an Bestäubern in der Variante „prog.rain" festgestellt.

Stickstoffgase und Stickstoffpools

Stickoxidflüsse (NO)

Um die Auswirkungen der geänderten Niederschlagsverhältnisse auf die Denitrifikation abschätzen zu können, wurden die bodenbürtigen Stickstoffgase NO, N_2O und N_2 im Feldversuch und im Labor bestimmt.

Im Feldversuch waren die NO-Emissionen sehr niedrig. Die Hintergrundemissionen waren oft nahe bei Null. Im Gegensatz zur Bodenatmung zeigten die NO-Flüsse lediglich eine geringe Schwankungsbreite im Laufe des Jahres. Die Düngung hatte jedoch einen großen Einfluss auf die NO-Produktion. Die N-Düngung im März 2015 verursachte einen signifikanten Anstieg des Stickoxides. In der Variante „curr.rain“ (Boden S) wurden Maximalwerte von 239 µg N m^{-2} h^{-1} gemessen. In der „prog.rain“-Variante wurden 50 Tage nach der Düngung noch bis zu 402.1 µg N m^{-2} h^{-1} (Boden F) freigesetzt. Der aufgebrachte Dünger war ein „slow-release“-Granulat und zersetzte sich erst nach längerer Zeit vollständig. In den drei Messjahren wurden unabhängig von der Beregnungsvariante in den drei Bodentypen ähnliche Flüsse gemessen und reichten von 1.8 µg N m^{-2} h^{-1} (Boden S), “prog.rain”, bis 3.5 µg N m^{-2} h^{-1} (Boden T, “curr.rain”). Im Jahr 2015 waren die NO-Flüsse aufgrund der Düngung höher. Für den Boden T wurden ähnlich hohe Verluste gemessen. Die unterschiedlichen Beregnungsvarianten hatten keinen generellen Einfluss auf die NO-Produktion, jedoch wurden an manchen Messzeitpunkten auf den Kontrollplots höhere NO-Flüsse gemessen (Boden S und F).

Auch im Laborversuch wurden sehr geringe Hintergrundemissionen gemessen (zwischen 0.4 und 0.8 µg N m^{-2} h^{-1}). Eine N-Düngung ließ die NO-Emissionen ebenfalls markant ansteigen. In den ersten vier Tagen nach der Düngung wurden bis zu 90 mal höherer Werte erreicht. Im Gegensatz zu dem applizierten Dünger im Feld wurde der Dünger im Labor vor der Aufbringung zerkleinert und demzufolge auch schneller zersetzt und von den Mikrooganismen aufgenommen. In allen Böden war der Anstieg nach der Düngung in den „curr.rain“ Böden höher.

Distickstoffoxid-Flüsse (N_2O)

Die mittleren N_2O-Flüsse lagen im Feld zwischen 2.0 µg N m^{-2} h^{-1} (Boden S, “curr.rain”) und 10.8 µg N m^{-2} h^{-1} (Boden F, “prog.rain”) und variierten von Jahr zu Jahr. Der Boden F emittierte im Mittel mehr N_2O als die anderen zwei Böden, allerdings waren die Unterschiede nicht signifikant. Die höchsten Flüsse wurden im Jahr 2014 aus den Böden F und T gemessen. Für den Boden F lag der Mittelwert im Jahr 2014 sogar 4-5 mal höher als in die folgenden Jahre.

In der Trockenvariante (“prog.rain”) aller Böden konnten erhöhte N_2O-Emissionen festgestellt werden, allerdings war das Ergebnis nicht signifikant. In der Variante „prog.rain“ wurde - verglichen mit der Kontrollvariante - in den Böden F und S ungefähr dreimal so viel N_2O produziert. Die Unterschiede waren für den Boden S signifikant.

Molekularer Stickstoff (N_2)

Vorversuche zeigte, dass der Boden S und F höhere Verluste an N_2 aufweisen als der Boden T. Bei 20 °C (Bodentemperatur bei der Probenahme im Feld) wurde die höchste N_2-Freisetzung von 116 µg N m^{-2} h^{-1} aus dem Boden F (“prog.rain“) und die niedrigste Rate (36.5 µg N m^{-2} h^{-1}, “curr.rain) aus dem Boden T gemessen. Die N_2-Emissionsraten waren bei einer Bodentemperatur von 25 °C immer niedriger als bei 20 °C. Der gleiche Trend – weniger N_2 aus dem Boden T-

konnte auch bei den Bodenproben, die im November 2014 entnommen wurden, festgestellt werden. Bei feldfrischen Böden und einer Temperatur von 5 °C wurde signifikant mehr N_2 freigesetzt als bei 12 °C (im Boden S, „prog.rain“ z.B 75 % weniger). Im Boden T waren die N_2-Flüsse bei 12 °C so niedrig, dass sie unter dem Detektionslimit lagen. Bei 5 °C konnte kein Beregnungseffekt festgestellt werden.

Bei einer Erhöhung des Wassergehaltes der Proben auf 40 % (Boden S) bzw. 60% WFPS (water-filled pore spce, wassergefüllter Porenraum) stieg die N_2-Produktionsrate in den Kontrollböden um das bis zu Achtfache an. Der Anstieg war bei den Böden F und S geringer als beim Boden T. Bei 12 °C Bodentemperatur waren auch hier die N_2-Raten niedriger. Kein Effekt konnte bei den „prog.rain“-Varianten festgestellt werden. Aufgrund technischer Probleme konnten die Ergebnisse bisher nicht statistisch abgesichert werden. Die inkubierten Böden wurden auch auf den Verlust von N_2O untersucht. Es zeigte sich, dass bei allen Varianten N_2O unter dem Detektionslimit liegt und somit nicht erfasst werden konnte.

Nach N-Düngung und einer Erhöhung des Bodenwassergehaltes änderte sich das Verhältnis von N_2O zu N_2 deutlich. Bei 5 °C wurden aus den noch nicht gedüngten Böden fast 50 µg N m^{-2} h^{-1} in Form von N_2 emittiert, aus gedüngten T Böden z.B nur mehr 9 µg N m^{-2} h^{-1}. Bei höheren Temperaturen stieg die N_2-Freisetzung aus den gedüngten Proben jedoch wieder an. So wurde z.B bei 18°C achtmal mehr N_2 nach der Düngung gebildet. Es wurde zudem signifikant mehr N_2O (bis zu 9000 µg N m^{-2} h^{-1}) produziert. Wie bereits oben erwähnt, konnten aufgrund von technischen Problemen nicht alle geplanten N_2/N_2O-Analysen durchgeführt werden, weshalb eine generelle Aussage zu den Auswirkungen von Düngung, Bodentyp, Temperatur und Wassergehaltsänderung derzeit noch nicht möglich ist.

Mineralischer Stickstoff (N_{min})

Die mittleren Konzentrationen an N_{min} variierten zwischen 8-15 µg N g^{-1}. Nitrat war die dominante Form des mineralischen Stickstoffs und erreichte 69 % (S), 77 % (T) und 83 % (F). Die mittleren NH_4-Konzentrationen waren mit rund 3 µg N g^{-1} niedrig und wurden durch die Niederschlagsänderung in den Böden T und F nicht beeinflusst. Im Boden S kam es zu signifikant höheren NH_4-Konzentrationen in der trockeneren Variante. Auf die NO_3-Konzentrationen hatte der Bodentyp, nicht jedoch die Beregnung, einen signifikanten Einfluss.

Emissionsfaktoren

Auf Basis eines Kurzzeit-Inkubationsexperimentes konnte eine eine grobe Abschätzung der Emissionsfaktoren (Verhältnis von N_2O-N-Emission zur Dünger-N-Gabe) unter jetzigen und zukünftigen Niederschlagsbedingungen vorgenommen werden. Generell wurde Grundlegend nach Düngung in der „prog.rain“-Variante mehr N_2O gebildet als in der Kontrolle. Allerdings war nach der ersten, niedriger dosierten Düngung die N_2O-Emission höher als nach der zweiten höher, dosierten.

Die Emissionsfaktoren der Kontrollböden lagen unter 0.2%. Unter der Prognose einer Niederschlagsverringerung („prog.rain“) wird mehr N_2O emittiert. Der Emissionsfaktor für den Boden F steigt beispielsweise auf 1.13% an. Somit liegt der von IPCC angewendete Standardemissionsfaktor (1%) unter der „prog.rain“-Variante, aber über dem für die Kontrolle ermittelten. Die Ergebnisse deuten an, dass sich unter reduzierten Niederschlagsverhältnissen die Denitrifikationsaktivitäten in der pannonischen Region ändern könnten.

Potentielle Steuerfaktoren der THG-Flüsse

Die Bildung der THG CO_2, N_2O and CH_4 in Böden hängt stark von unterschiedlichen biotischen und abiotischen Faktoren ab. Neben der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte haben auch andere Faktoren wie der pH-Wert oder die Substrat- und Nährstoffverfügbarkeit einen Einfluss auf die Prozesse, die zur Bildung und/oder dem Abbau von THG beitragen, beispielsweise Atmung, Nitrifikation, Denitrifikation, Methanbildung und Methanoxidation. Wie erwartet hatten die unterschiedlichen Niederschlagsregime keine Auswirkung auf den pH-Wert (7.6 und 7.7).

Unter Berücksichtigung aller Bodentypen, aller Jahre und beider Niederschlagsvarianten hatte die Bodenfeuchte einen signifikant positiven Einfluss auf die N_2O-Emissionen und auf die CH_4-Flüsse. Kein Zusammenhang konnte mit der Ökosystematmung gefunden werden.

Im Gegensatz zu der Bodenfeuchte hatte die Luft- und Bodentemperatur einen signifikant positiven Einfluss auf die N_2O-Flüsse (alle Daten) und auf die CO_2-Flüsse (bei Bodentypen). Die CH_4-Flüsse waren nicht korreliert mit den Temperaturen.

Ein sehr wichtiger Einflussparameter auf die Denitrifikation ist die Verfügbarkeit von NO_3. Nitrat war die dominante Form des mineralischen Stickstoffs. Es zeigten sich allerdings keine Zusammenhänge zu den N_2O-Flüssen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Boden- und Lufttemperatur die am meisten beeinflussenden Parameter für die Bildung bzw. den Abbau von THG waren. Diese Zusammenhänge wurden sowohl für die Niederschlagsregime als auch die drei Bodentypen gefunden. Andere potentielle Einflussparameter wie Wassergehalt, verfügbarer Stickstoff und mikrobielle Biomasse zeigten keinen Einfluss auf die THG-Flüsse.

Mikrobielle Parameter

Mikroorganismen spielen im C und N Kreislauf eine bedeutende Rolle und sind in unterschiedlichsten Bodenprozessen beteiligt die unter anderem auch zur Bildung und zum Abbau von bodenbürtigen Teibhausgasen beitragen. Aufgrund dieser Tatsachen haben wir innerhalb des Projektes die Auswirkungen von veränderten Niederschlagsereignissen in den 3 Böden auf unterschiedliche mikrobielle Parameter untersucht.

Mikrobielle Biomasse

Auf die Konzentrationen an C_{mik} und N_{mik} war ein signifikanter Einfluss des Bodentyps, aber kein signifikanter Einfluss des Niederschlagsmusters zu verzeichnen. Die Konzentrationen stieg mit der Dauer der Untersuchungen. Generell waren die C_{mik}- und N_{mik}-Konzentrationen im Boden S niedriger als im in den Böden T und F. Im Gegensatz hierzu zeigten sich lediglich geringe Unterschiede in den Konzentrationen an N_{mik} in den unterschiedlichen Böden. Die ebenfalls signifikanten Unterschiede im C_{mik}/N_{mik}-Verhältnis der beiden Niederschlagsvarianten deuten auf Änderungen der mikrobiellen Gemeinschaft, z.B. des Pilz/Bakterien-Verhältnisses, hin, das geringe Verhältnis auf eine Dominanz von Bakterien.

Mikrobielle Gemeinschaft

Die PLFA Analyse zeigte, dass die mikrobielle Gemeinschaft in allen drei Böden von Bakterien dominiert wird (Verhältnis von Bakterien zu Pilzen ca. 3). Die Abundanz der gramnegative (gram-) Bakterien war etwa doppelt so hoch wie die der grampositiven (gram+). Eine Dominanz von gram- Bakterien an der Bodenoberfläche wurde auch in anderen Studien gefunden und ist durch den Eintrag von frischer organischer Substanz zu erklären (z.B. Fierer et al. 2003). Die drei Böden unterschieden sich teilweise stark voneinander. Die Gesamtmenge an PLFA, die Pilze, das Verhältnis Bakterien/Pilze und die Aktinomyzeten waren im Boden S signifikant niedriger als in den Böden F und T. Nur die Protozoen waren im Boden S höher.

Eine Auswirkung der verringerten Niederschlagsmenge konnte auf den Stressfaktor (cy17:0/16:1ω9; Grogan & Cronan 1997) mit der Dauer des Experimentes gesehen werden. Das Verhältnis der beiden Fettsäuren stieg von 2014 bis 2016 in allen drei Böden leicht.

Enzymaktivitäten

Bodenenzymaktivitäten dienen oft als Indikator für Bodenfruchtbarkeit und Bodenqualität, da sie an Bereitstellung von Nährstoffen beteiligt sind und sehr rasch auf Änderungen reagieren (Nannipieri et al. 2002). Die Enzymaktivitäten zeigten keine ausgeprägte zeitliche Dynamik mit Ausnahme der Enzyme des Kohlenstoffkreislaufs. Die Cellulaseaktivität war 2015 im Frühjahr und Spätherbst gegenüber den Probenahmeterminen im Sommer in allen drei Böden um das Zwei- bis Fünfzehnfache erhöht. Im Gegensatz hierzu wurden für die Xylanaseaktivität die höchsten Werte im Sommer 2015 registriert. Im Frühjahr 2014 war die Xylanaseaktivität in den Proben der „prog.rain“-Variante nicht nachweisbar. Das Niederschlagsregime hatte kaum Auswirkungen auf die gemessenen Enzymaktivitäten. Von einzelnen Probenahmeterminen abgesehen, konnte für keinen der drei Böden Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Der Bodentyp beeinflußte die Aktivtäten der unspezifischen Enzyme Peroxidase und Phenoloxidase. Beide Enzyme zeigten im Mittel höhere Aktivitäten in den Proben des Boden T als in denen der Böden F und T. Die vorliegenden Ergebnisse liefern keinen Hinweis darauf, daß die für den Pannonischen Raum erwarteten Modifikationen des Niederschlagsregimes die enzymatische Aktivität landwirtschaftlich bedeutsamer Böden verändern werden.

Pflanzenwachstum

Im Gegensatz zu den mikrobiellen Parametern zeigten sich bei den untersuchten Kulturpflanzen signifikante Auswirkungen. Bei Buchweizen führte „prog.rain“ beispielsweise zu einer signifikanten Reduktion der oberirdischen Biomasse, des Blattflächenindexes sowie des Kornertrages (auf Quadratmeter bezogen). Auch Wurzellänge und –durchmesser unterschieden sich signifikant zwischen den beiden Niederschlagsvarianten (längere und dünnere Wurzeln in der Variante „prog.rain“). Neben einer höheren Abundanz an Unkraut wurde zudem eine geringere Frequenz an Bestäubern in der Variante „prog.rain“ festgestellt.

WP2: Modellierung

Model Konfiguration, Kalibrierung und Validierung

In der ersten Phase von PANGAS wurde das LandscapeDNDC Model (Haas et al. 2013) getestet und gegen verfügbare Datensätze validiert (Molina et al. 2016, Molina et al. 2017). Die Modellkalibrierung berücksichtigte Pflanzenbiomasse (Stroh- und Kornerträge) sowie N_2O- and NO-Emissionen und der gewählte Kalibrierungsansatz beruhte auf der Software Spotpy (Houska et al, 2015).

Das LandscapeDNDC Ökosystemmodell wurde in PANGAS zur Simulation der Lysimeter eingesetzt um a) die Modellierungsqualität zur Vorhersage von Treibhausgasemissionen und Nitrataustrag zu evaluieren und b) zur Bestimmung der Gesamtstickstoffbilanz der Lysimeter sowie der Quantifizierung der Jahresemissionen aller gasförmigen Emissionen, Austräge durch Wasserflüsse sowie aller Änderungen in den Bodenstickstoffvorräten.

Aufgrund der Erhebung der Messdaten während des PANGAS Projektes wurde zur initialen Validierung auf vorhandene Beobachtungsdaten aus den EU Projekten NitroEurope and CarboEurope zurückgegriffen. Die Modellvalidierungen für N_2O-Emissionen (Molina et al. 2016) und NO-Emissionen (Molina et al. 2017) zeigten sehr gute Übereinstimmungen der Modellergebnisse mit den Beobachtungsdaten.

Die Modellkalibrierung mit projekteigenen Beobachtungsdaten fokussierten dabei zum einen auf der exakten Wiedergabe des beobachteten Pflanzenwachstums und zum anderen auf der Kalibrierung sensitiver Modellparameter zur simultanen Vorhersage von N_2O- und NO-Emissionen (Beobachtungsdaten in wöchentlicher zeitlicher Auflösung). Die Herausforderung an die Kalibrierung einer möglichst exakten simultanen Vorhersage von N_2O- und NO-Emissionen stellt wesentlich höhere Anforderungen an das prozessorientierte Modellsystem als sämtliche Kalibrierungen für nur eine Spezies. Ziel der Kalibrierung war es seine gebietsspezifische Modellparameterisierung (sowohl für das Pflanzenwachstum, als auch für die bio-geochemischen Prozesse zu erstellen und anschließend für die Modellregion zur Berechnung eines Inventars für N_2O-Emissionen und des Nitrataustrages zu erstellen.

Tabelle 1 zeigt die für die drei Böden zusammengestelle N-Balance.

Table 2 Zusammenfassung der mittleren (2011-2016) gasförmigen N Emissionen, Nitratausträge, N-Pflanzenaufnahme and mineralischer N-Düngung für die Lysimetersysteme

	NO [kg N / ha]	N_2O [kg N / ha]	N_2 [kg N / ha]	NH_3 [kg N / ha]	NO_3 [kg N / ha]	N-uptake [kg N / ha]	N-fertilizer [kg N / ha]
Control F-Boden	0.11	0.68	31.45	0.01	8.47	53.14	61.67
Control S-Boden	1.52	4.36	18.72	0.00	0.01	98.33	43.33
Control T-Boden	0.18	0.62	13.51	0.01	12.56	68.56	60.00
Dry F-Boden	0.16	1.28	29.55	0.01	6.79	55.77	61.67
Dry S-Boden	1.16	0.98	0.82	0.01	0.03	77.39	43.33
Dry T-Boden	0.27	0.95	9.71	0.01	6.56	73.87	60.00

Unsicherheitsanalyse

Zur Quantifizierung von Parameterunsicherheiten bei der prozessorientierten Modellierung von N_2O-Emissionen und NO_3-Austrag wurde auf die Methodik der “Bayesian Model Calibration” (BC) (Rahn et al. 2012, Cressie et al. 2009, Lehuger et al. 2009) zurückgegriffen. Die Methode hat sich in zahlreichen Studien zur Quantifizierung der Parameterunsicherheiten bewährt und dient über eine Fortpflanzung der Parameterunsicherheiten durch das LandscapeDNDC Modell zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeiten von prozessorientierten Modellierungsansätzen (Cressie et al. 2009, Lehuger et al. 2009).

Eine Sensitivitätsanalyse aller Prozessparameter in der biogeochemischen Prozessbeschreibung von LandscapeDNDC mit Hilfe der “Morris methodology” (Rahn et al. 2012) identifizierte die 20 sensitivsten Prozessparameter welche für die Bildung / Konsum von N_2O, NO sowie NO_3 in der Bodenmatrix verantwortlich sind. Die Unsicherheitsanalyse wurde dann auf einen geeigneten Testdatensatz angewandt. Da in PANGAS simultane N_2O- und NO-Emissionen nur in geringer zeitlicher Auflösung und für einen kurzen Zeitraum zur Verfügung standen, wurde ein Datensatz von INRA Grignon (Loubet et al. 2011) benutzt der sich zur Unsicherheitsanalyse für ein prozessbasiertes Modell bereits als geeignet zeigte (Lehuger et al. 2009), während Lehuger lediglich die Parameterunsicherheiten für die N_2O-Emissionen untersucht hat.

Die BC-Methode zur Unsicherheitsabschätzung basiert auf der Methodik von ‘Markov-Ketten’ (MCMC Simulation, Cressie et al. 2009) zur Abschätzung der Parameterunsicherheiten für die Modellierung der zugrundeliegenden Beobachtungsdaten und liefert letztlich eine zusammengehörende Verteilung für alle untersuchten (sensitiven) Prozessparameter. Eine Markov-Kette ist ein sequentieller Prozess bei dem bis zu 100 000 Modellsimulationen mit zufällig gestörten Prozessparametern gerechnet und auf ihre Trefferwahrscheinlichkeit bezüglich der Beobachtungsdaten analysiert werden.

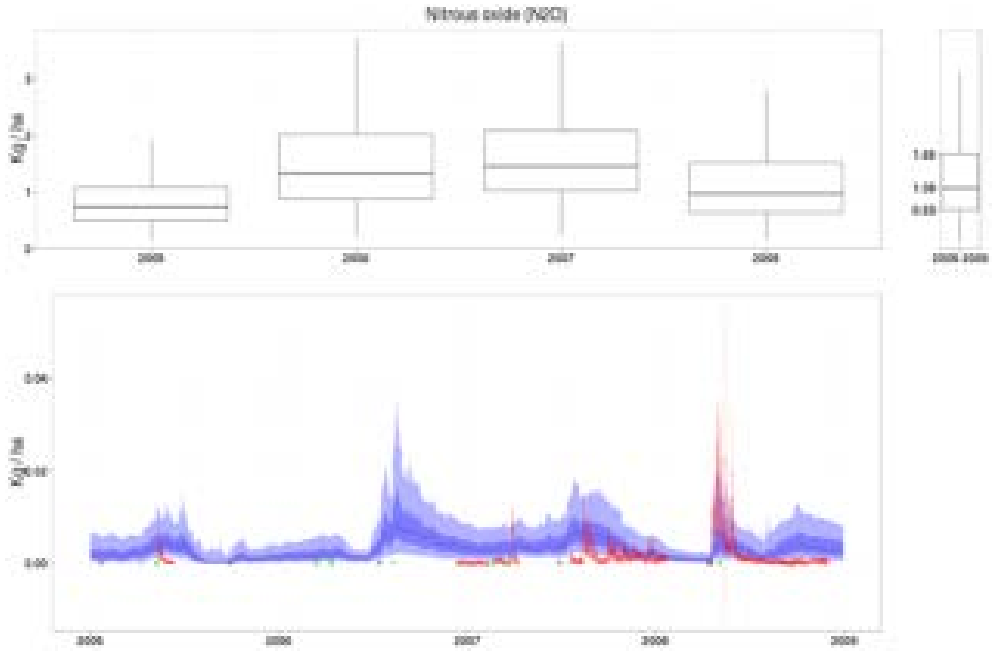


Abbildung 2 Abschätzung der Modelierungsunsicherheiten bei der Simulation von N2O Emissionen am Beispiel von INRA Grigonon (Loubet et al, 2009).

Die simultane Analyse der Parameterunsicherheiten bei der Simulation von N_2O- und NO-Emissionen und die anschließende Fortpflanzung der gekoppelten Parameterverteilungen durch das LandscapeDNDC Modell liefert letztlich Simulationsergebnisse im stochastischen Sinn, also anstatt eines Ergebnisses eine Verteilung der Ergebnisse. Eine stochastische Betrachtung liefert letztlich Aussagen über den Erwartungswert für das Simulationsergebnis und den Unsicherheitsbandbreite als Ergebniskorridor (siehe Unsicherheitsbänder in den täglichen Simulationsergebnisse gegen Beobachtungsdaten sowie die Boxplots / Whisker Plots für die Jahresemissionen von N_2O und NO.

Mitigation von N_2O-Emissionen und Nitratausträgen

Biogeochemische Prozessmodelle können zur Abschätzung von Einsparungspotentialen von N_2O-Emissionen und Nitratausträgen durch eine entsprechende Optimierung des landwirtschaftlichen Managements eingesetzt werden. Dabei sollten fundamentale Systemkomponenten wie die Erhaltung der Ertragskraft gewährleistet bleiben. In PANGAS wurde deshalb eine Methode erarbeitet um solche Einsparungspotentialen von N_2O-Emissionen und Nitratausträgen zu berechnen. Die Methode wurde in der ersten Phase von PANGAS bereits entwickelt und aufgrund der zu dem Zeitpunkt geringen Datengrundlage bezüglich Emissionsdaten wurden zum Test und Evaluierung hochaufgelöste Emissionsdaten herangezogen (Molina et al. 2016).

Die Methode wurde anschließend auf die Lysimetersysteme angewandt. Dabei wurden mehrere Monte-Carlo Simulationen von zufällig veränderten Managementoptionen simuliert. Das zugrundeliegende Optimierungsmaß war eine balancierte Reduktion von N_2O-Emissionen und des NO_3-Austrages bei

Beibehaltung der Ertragskraft. Die Optimierung basiert auf der Minimierung der Kostenfunktion (Gleichung 1).

$$N_{eff} = \frac{N2O + \frac{NO3}{10}}{Kornertrag} \qquad \text{(Gleichung 1)}$$

Die Kostenfunktion N_{eff} gewichtet dabei die N_2O-Emissionen gegen die NO_3-Austräge im Verhältnis 1:10. Die NO_3-Austräge in landwirtschaftlichen Systemen sind in etwa eine Größenordnung höher als die N_2O-Emissionen (Stenberg et al. 2012, Webb et al. 2000). Berücksichtigten Managementoptionen waren dabei Veränderungen in den Aussaatzeitpunkten und der Ernte, sowie Zeitpunkte von Düngung und Pflügen, sowie Veränderungen in den N-Düngergaben sowie das Aufteilen von großen N-Düngergaben, Anpassungen der Pflugtiefe und Änderungen im Anteil des auf dem Feld belassenen Strohs. Dies ist lediglich eine Untermenge aller möglichen Mitigationsmaßnahmen. Diese wurden gewählt, weil sie einfach in das LandscapeDNDC Modell eingebaut werden konnten. Durch die Skalierung der N-Verluste durch die Ertragskraft, kann die Methode auch zu einer Zunahme der N-Düngung führen sofern dies zu einer wesentlich größeren Steigerung der Ertragskraft führt so dass letztlich die je Einheit Ertrag skalierten N-Verluste trotzdem verringert werden. Zeiten wurden in der Regel um ±10 Tage verändert, Düngegaben um +10/-50%, alle Düngergaben größer als 50 kg N/ha wurden optional in zwei Gaben aufgeteilt, welche zeitlich innerhalb von ±30 Tagen gewählt wurden. Aufgeteilte Düngergaben wurden ebenfalls nochmals um +10/-50% angepasst. Die Optimierung wurde sukzessiv für jedes Jahr der Rotation durchgeführt und dabei wurden pro Jahr 2000 alternative Management Optionen zufällig gewählt, simuliert und evaluiert. Diese Prozedur wurde für jedes Jahr in der Rotation wiederholt, wobei das optimale Management der zuvor liegenden Jahre bereits berücksichtigt wurde. In Abbildung 3 ist das berechnete Mitigationspotential zur Reduzierung von N_2O-Emissionen und NO_3-Austrag für das das Kontrolllysimeter des Bodens F dargestellt.

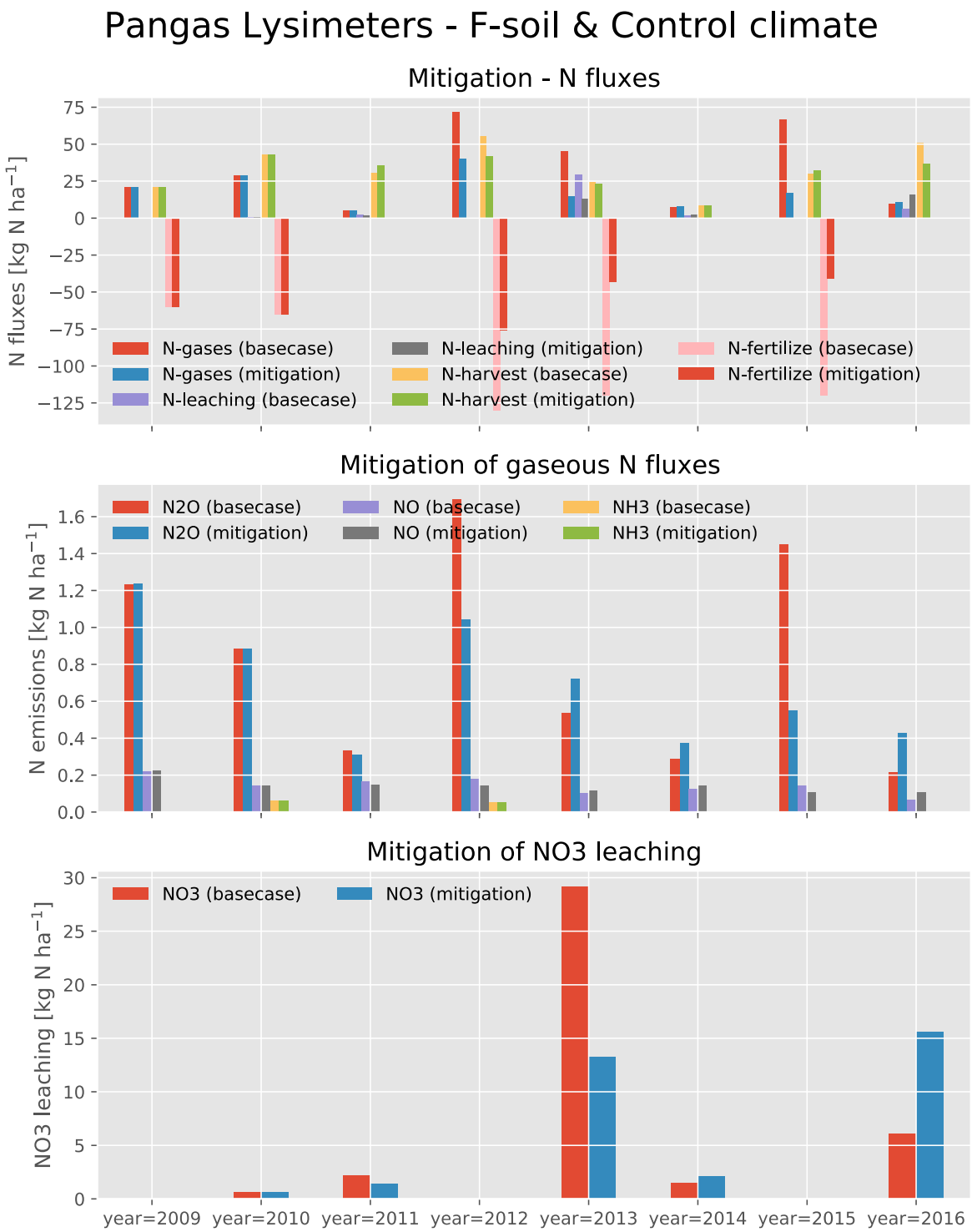


Abbildung 3 Mitigationspotential für die Reduktion von N_2O-Emissionen und Nitrataustrag

Regionales Inventar bodenbürtiger N_2O-Emissionen und des Nitrataustrags für das Modellgebiet

Auf der Basis der regionalen Eingangsdaten zu Landnutzung, Bodentypen und Eigenschaften, regionals Klima und Management wurde ein Inventar von N_2O-Emissionen und Nitrataustrag für das pannonische Becken berechnet. Die regionale Bodenkarte für das Modellgebiet mit eine Ausdehnung von ca. 50 km (in Ost-West) und 30 km (in Nord-Süd Richtung) wurde dabei mit einem 5 km

Raster mit Klimadaten verschnitten. Das Klimaraster wurde durch den ÖKS15 (Endbericht ÖKS15 o.J.) Datensatz zur Verfügung gestellt und beinhaltet regionalisierte Beobachtungsdaten von ZAMG-Messstationen auf 1 km Auflösung. Ein Verschneiden der Bodendaten mit dem Klimaraster auf 1km Auflösung hätte zu einer räumlichen Darstellung des Modellgebietes durch ca. 30 000 unterschiedliche Polygone geführt. Um den Rechenaufwand zu reduzieren wurden die Klimadaten auf ein 5km Raster aggregiert. Die Aggregierungsmethode hat dabei nicht die Mittelwerte aus dem 5x5km Raster berechnet um Glättungen zu Vermeiden sondern es wurden die Werte aus dem 1km Raster entnommen, welche dem Zellmittelpunkt des 5km Rasters am nächsten gelegen sind (Zhao et al. 2016, spatial sampling schemes). Nach Zhao et al. (2016) liefert diese Aggregation einen repräsentativen Datensatz ohne wesentlichen Verlust an Klimavariabilität. Der Verschnitt der Klimarasterdaten in der räumliche 5 km Auflösung mit der Bodenkarte ergaben 318 eindeutige Polygone für das Modellgebiet. Der gerasterte Klimadatensatz zeigt eine sehr moderate Temperaturvariabilität innerhalb des Gebietes von weniger als einem Grad Unterschied im Jahresdurchschnitt, wobei die Unterschiede im mittleren Jahresniederschlag im Gebiet innerhalb der Simulationsspanne von 8 Jahren (2 Jahre Vorlauf 1998-2999 und 6 Jahre Simulationszeitraum 2000-2005) zwischen 580mm und 720mm variierte. Die Ausgeprägte Varianz in der Verteilung des Niederschlags zeigte sich auch in der Verteilung der mittleren Nitratausträge im Modellgebiet.

Derselbe Ansatz wurde zur Aufbereitung der Klimaeingangsdaten aus den regionalen Klimaänderungsszenarien (ÖKS15-Datensatz) gewählt.

Die Inventarberechnungen ergaben für das Modellgebiet eine mittlere N_2O-Emission von 0,66 kg-N/ha/Jahr (siehe Abbildung 2) und eine mittlere Jahresgesamtemission von 40.698,38 kg N_2O-N sowie einen mittleren jährlichen Nitrataustrag von 29,06 kg NO_3-N/ha (siehe Abbildung 3) und somit einen mittleren Jahresnitrataustrag von 1.779.546,76 kg NO_3-N verteilt auf die 61 227,18 ha landwirtschaftliche Fläche.

Tabelle 3 Zusammenfassung der Inventarberechnung für die mittleren jährlichen N2O Emission und den mittleren jährlichen Nitrataustrag für das Modellgebiet

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Mittelwert	Standardabw.
N_2O	0.18	1.25	1.20	0.13	0.90	0.10	0.66	0.62
NO_3	4.79	53.70	48.28	6.34	58.29	5.00	29.06	27.75

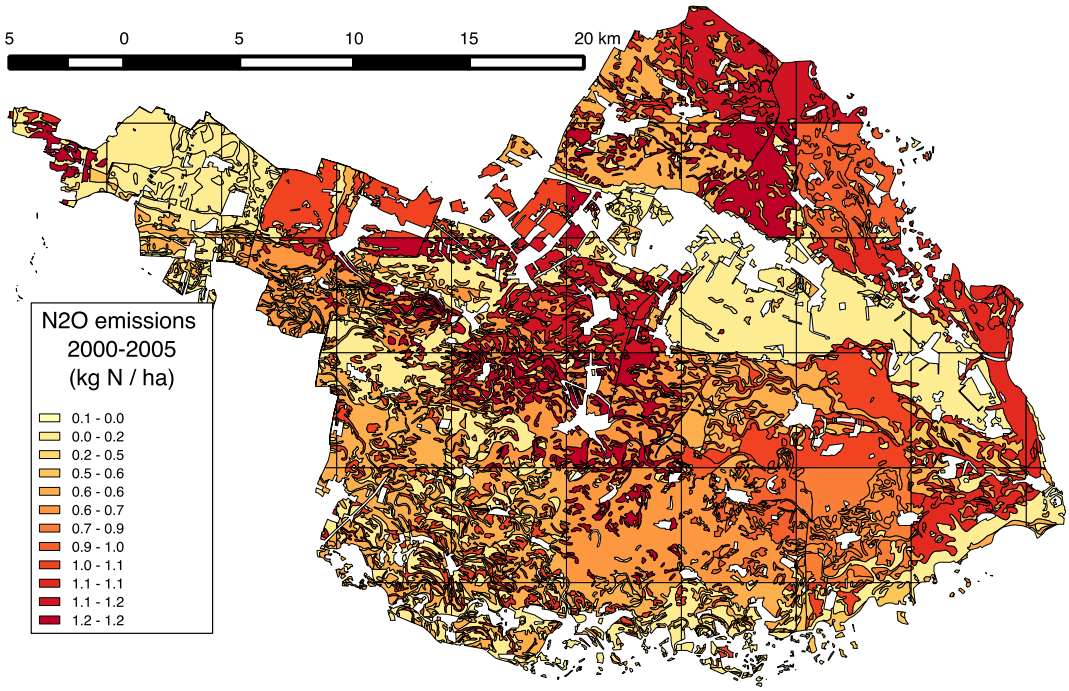


Abbildung 4 Mittlere jährliche N_2O-Emissionen für den Zeitraum 2000-2005 (Klimaszenario: Beobachungsdaten ZAMG 2000-2005).

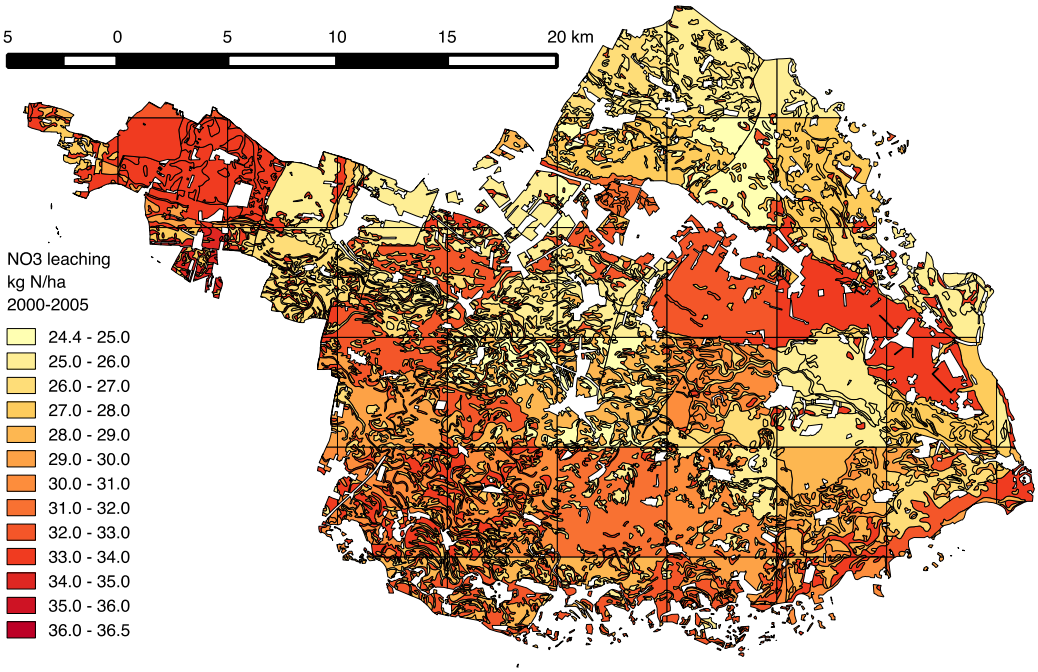


Abbildung 5 Mittlerer jährlicher Nitrataustrag für den Zeitraum 2000-2005 (Klimaszenario: Beobachungsdaten ZAMG 2000-2005)

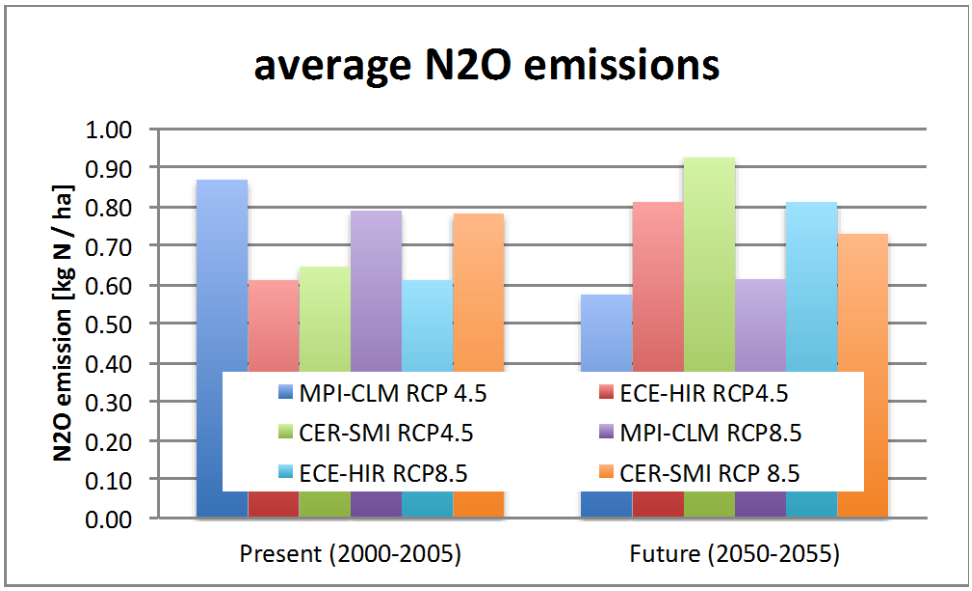
Auswirkungen verschiedener Klimaänderungsszenarien (RCP 4.5 und 8.5) auf die bodenbürtigen N_2O-Emissionen und den Nitrataustrag

Zur Analyse der Auswirkungen verschiedener Klimaänderunsszenarien auf die Emissionsstärke der bodenbürtigen N_2O-Emissionen und des Nitrataustrags im Modellgebiet wurden Ergebnisse von Klimaänderungssimulationen für die Emissionsszenarien (RCP 4.5 and 8.5) herangezogen. Der Gesamtdatensatz ÖKS15 Climate Change Dataset (2016) beinhaltet 15 Realisierungen von Simulationsrechnungen von globalen und lokalen Klimamodellen für Europa. Im Rahmen der Studie wurden lediglich drei Datensätze willkürlich ausgewählt und auf deren Auswirkungen auf die bodenbürtigen N_2O-Emissionen und den Nitrataustrag für RCP 4.5 und RCP 8.5 untersucht. Im Vorfeld der Studie waren lediglich Ensemble Statistiken aus dem Gesamtdatensatz analysiert und veröffentlicht. Die Auswahl war somit zufällig und ohne Präferenz getroffen. Die gewählten Realisierungen waren die Modellrechnungen MPI-CLM: MPI-ECHAM global und CCLM regional, ECE-HIR: EC-Earth global und HIRLAM5 regional und CER-SMI: CERFACS global und SMHI regional.

Die Studie analysiert die Differenzen der regionalen Mittelwerte für die Zeitscheiben Zukunft (2050-2055) gegen Gegenwart (2000-2005). Die Baseline Simulation benutzt die ZAMG Beobachtungsdaten vom Zeitraum 2000-2005.

Table 4 Zusammenfassung der Auswirkungen des regionalen Klimawandels (RCP 4.5 und RCP 8.5) auf die mittleren jährlichen N_2O-Emissionen und den Nitrataustrag für das Modellgebiet

Model & Scenario	Gegenwart (2000-2005)	Zukunft (2050-2055)	Unterschied kg N / ha	rel. Unterschied %
mittlere jährliche N_2O Emission [kg N / ha]				
Baseline	0.66			
MPI-CLM RCP 4.5	0.87	0.57	-0.29	-33.95
ECE-HIR RCP4.5	0.61	0.81	0.20	32.88
CER-SMI RCP4.5	0.65	0.93	0.28	43.26
MPI-CLM RCP8.5	0.79	0.61	-0.18	-22.30
ECE-HIR RCP8.5	0.61	0.81	0.20	32.92
CER-SMI RCP 8.5	0.78	0.73	-0.05	-6.64
Mittlerer jährlicher Nitrataustrag [kg N / ha]				
Baseline	29.06			
MPI-CLM RCP 4.5	23.96	33.92	9.96	41.57
ECE-HIR RCP4.5	29.01	32.92	3.91	13.48
CER-SMI RCP4.5	22.79	31.96	9.17	40.25
MPI-CLM RCP8.5	27.90	34.84	6.95	24.90
ECE-HIR RCP8.5	29.01	32.92	3.91	13.48
CER-SMI RCP 8.5	27.41	34.30	6.88	25.11



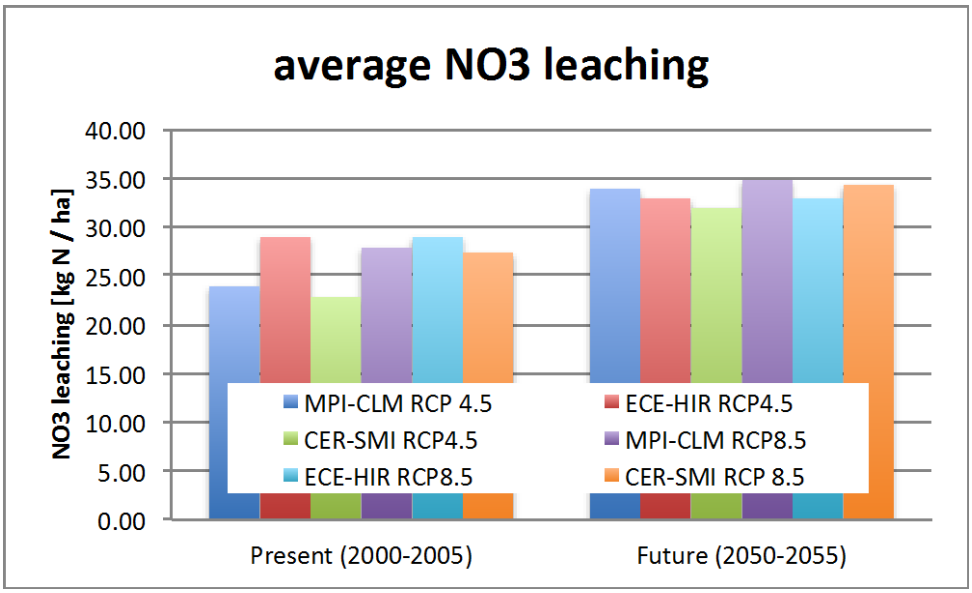


Abbildung 6 Auswirkungen des Klimawandels auf die regionalen N2O Emissionen und den Nitrataustrag für die Emissionsszenarien RCP 4.5 und 8.5 für die Zeitscheiben 2000-2005 gegen 2050-2055 (Klimawandelszenarien: ÖKS15 Climate Change for Austria Dataset, 2016).

Referenzen

Butterbach-Bahl,K., Willibald,G. & Papen,H. 2002. Soil core method for direct simultaneous determination of N-2 and N_2O emissions from forest soils. *Plant and Soil*, **240,** 105-116.

Cressie,N., Calder,C.A., Clark,J.S., Hoef,J.M.V. & Wikle,C.K. 2009. Accounting for uncertainty in ecological analysis: the strengths and limitations of hierarchical statistical modeling. *Ecological Applications*, **19,** 553-570.

Endbericht ÖKS 15. o.J. Klimaszenarien für Österreich | Daten – Methoden – Klimaanalyse. https://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik_national/anpassungsstrategie/klimaszenarien.html (abgerufen am 20. Dezember 2017)

Fierer,N., Schimel,J.P. & Holden,P.A. 2003. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, **35,** 167-176.

Grogan,D.W.& Cronan,J.E. 1997. Cyclopropane ring formation in membrane lipids of bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **61,** 429-441.

Haas,E., Klatt,S., Frohlich,A., Kraft,P., Werner,C., Kiese,R., Grote,R., Breuer,L. & Butterbach-Bahl,K. 2013. LandscapeDNDC: a process model for simulation of biosphere-atmosphere-hydrosphere exchange processes at site and regional scale. *Landscape Ecology*, **28,** 615-636.

Houska,T., Kraft,P., Chamorro-Chavez,A. & Breuer,L. 2015. SPOTting Model Parameters Using a Ready-Made Python Package. *Plos One*, **10**, Article No.: e0145180.

Lehuger,S., Gabrielle,B., van Oijen,M., Makowski,D., Germon,J.C., Morvan,T. & Henault,C. 2009. Bayesian calibration of the nitrous oxide emission module of an agro-ecosystem model. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **133,** 208-222.

Loubet,B., Laville,P., Lehuger,S., Larmanou,E., Flechard,C., Mascher,N., Genermont,S., Roche,R., Ferrara,R.M., Stella,P., Personne,E., Durand,B., Decuq,C., Flura,D., Masson,S., Fanucci,O., Rampon,J.N., Siemens,J., Kindler,R., Gabrielle,B., Schrumpf,M. & Cellier,P. 2011. Carbon, nitrogen and Greenhouse gases budgets over a four years crop rotation in northern France. *Plant and Soil*, **343,** 109-137.

Molina-Herrera,S., Haas,E., Grote,R., Kiese,R., Klatt,S., Kraus,D., Kampffmeyer,T., Friedrich,R., Andreae,H., Loubet,B., Ammann,C., Horvath,L., Larsen,K., Gruening,C., Frumau,A. & Butterbach-Bahl,K. 2017. Importance of soil NO emissions for the total atmospheric NOX budget of Saxony, Germany. *Atmospheric Environment*, **152,** 61-76.

Molina-Herrera,S., Haas,E., Klatt,S., Kraus,D., Augustin,J., Magliulo,V., Tallec,T., Ceschia,E., Ammann,C., Loubet,B., Skiba,U., Jones,S., Brummer,C., Butterbach-Bahl,K. & Kiese,R. 2016. A modeling study on mitigation of N2O emissions and NO3 leaching at different agricultural sites across Europe using LandscapeDNDC. *Science of the Total Environment*, **553,** 128-140.

Nannipieri,P., Kandeler,E. & Ruggiero,P. 2002. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: Enzymes in the Environment: Activity, Ecology and Applications (eds R.G.Burns & R.P.ick), pp. 1-33. Marcel Dekker, New York.

Rahn,K.H., Werner,C., Kiese,R., Haas,E. & Butterbach-Bahl,K. 2012. Parameter-induced uncertainty quantification of soil N(2)O, NO and CO(2) emission from Hoglwald spruce forest (Germany) using the LandscapeDNDC model. *Biogeosciences*, **9,** 3983-3998.

Sey,B.K., Manceur,A.M., Whalen,J.K., Gregorich,E.G. & Rochette,P. 2010. Root-derived respiration and nitrous oxide production as affected by crop phenology and nitrogen fertilization. *Plant and Soil*, **326,** 369-379.

Stenberg,M., Ulen,B., Soderstrom,M., Roland,B., Delin,K. & Helander,C.A. 2012. Tile drain losses of nitrogen and phosphorus from fields under integrated and organic crop rotations. A four-year study on a clay soil in southwest Sweden. *Science of the Total Environment*, **434,** 79-89.

Webb,J., Harrison,R. & Ellis,S. 2000. Nitrogen fluxes in three arable soils in the UK. *European Journal of Agronomy*, **13,** 207-223.

Zaller,J.G., Simmer,L. Santer,N., Tabi Tataw,J., Formayer,H., Murer,E., Hösch,J. & Baumgarten,A. 2014. Future rainfall variations reduce abundances of aboveground athropods in model agroecosystems with different soil types. *Frontiers in Environmental Science*, **2**, 1-12.

Zhao,G., Hoffmann,H., Yeluripati,J., Xenia,S., Nendel,C., Coucheney,E., Kuhnert,M., Tao,F.L., Constantin,J., Raynal,H., Teixeira,E., Grosz,B., Doro,L., Kiese,R., Eckersten,H., Haas,E., Cammarano,D., Kassie,B., Moriondo,M., Trombi,G., Bindi,M., Biernath,C., Heinlein,F., Klein,C., Priesack,E., Lewan,E., Kersebaum,K.C., Rotter,R., Roggero,P.P., Wallach,D., Asseng,S., Siebert,S., Gaiser,T. & Ewert,F. 2016. Evaluating the precision of eight spatial sampling schemes in estimating regional means of simulated yield for two crops. *Environmental Modelling & Software*, **80,** 100-112.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bodenbürtige Prozesse und Parameter unterschiedlich auf Niederschlagsveränderungen reagieren. Die Auswirkungen veränderter Niederschlagsmuster waren am ausgeprägtesten bei Prozessen des C-Kreislaufs. Diese legen unter anderem nahe, dass derartige Veränderungen die Senkenfunktion bestimmter Böden für CH_4 vermindern könnten. Andere beobachtete Effekte wie die Verminderung der Ökosystemrespiration rücken die Interaktion zwischen Boden und Pflanzen in den Vordergrund. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen weisen daraufhin, dass es zu Änderungen in N-Transformationsprozessen, vor allem der Denitrifkation kommen könnte. Beispielsweise lagen die für die Kontrolle ermittelten Emissionsfaktoren unter

dem derzeitig angenommenen Wert von 1 % des ausgebrachten N. Unter zukünftigen Niederschlagsmustern sind hingegen Emissionen in diesem Bereich zu erwarten. Boden- und Lufttemperatur waren die bedeutsamsten Steuerfaktoren der THG-Flüsse. Im Gegensatz hierzu stand die mikrobielle Gemeinschaft in einer stärkeren Beziehung zum Bodenfeuchteregime.

Analog zur Beregnung wurden die untersuchten Prozesse und Parameter auch durch den Bodentyp in unterschiedlichem Maße beeinflusst. Beispielsweise zeigten weder die CH_4-Aufnahmeraten noch die N_2O-Flüsse eine Beziehung zu diesem. Bodenatmung und in geringerem Maße die mikrobiellen Parameter variierten hingegen in Abhängigkeit vom Bodentyp. Dieser Aspekt sollte berücksichtigt werden, wenn experimentelle Ergebnisse von der Plotskala auf die Landschaftsebene übertragen werden sollen.

Verglichen mit dem Vorläuferprojekt Lystrat zeigten sich im PANGAS-Projekt deutlichere Auswirkungen der Niederschlagsbehandlungen. Dies betont die Notwendigkeit, die Konsequenzen möglicher Klimaänderungen in längerfristigen Experimenten zu untersuchen. Deutlichere Manipulationen könnten zudem rascher zu eindeutigen Ergebnissen führen.

Die prozessbasierte Modellierung des Stickstoffumsatzes in Ökosystemen hat sich als adäquate Methode zur Erarbeitung von Wissenslücken hinsichtlich verschiedener Fragestellungen gezeigt. Durch die Modellierung konnte die Schließung der Stickstoffbilanz für die betrachteten Lysimeter Systeme erfolgen, welche durch die im Projekt angewandten methodisch experimentellen Ansätze nicht vollständig oder nur in grober zeitlicher Auflösung abgedeckt sind. Die Prozessmodellierung konnte hier maßgeblich zur Ermittlung der Kohlenstoff und Stickstoffbilanz in zeitlich hochaufgelöster Form beitragen. Aufgrund der Kalibrierung der Modellparameter auf die zugrundeliegenden Systeme und die hohe Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Beobachtungsdaten kann das Modellsystem einen Beitrag zur Vorhersage verschiedenster Szenarien liefern, welche ansonsten nur durch extrem hohen experimentellen Aufwand erbracht werden können. Die dazu notwendige Vertrauensbasis in die Robustheit der Modellergebnisse wurde im Rahmen des Projektes durch die Modellvalidierung aufgebaut. Aufgrund der erarbeiteten Betrachtung der Ergebnisse im Rahmen von Wahrscheinlichkeiten und Erwartungswerten durch die Unsicherheitsanalysen wird diese Vertrauensbasis gestärkt.

Die Methodik zur Erarbeitung von potentiellen Mitigationsoptionen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Nitrataustrag, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurde, konnte erfolgreich auf Testdatensätze angewandt werden. Die dabei erarbeitete Mitigation konnte substantielle Reduzierungen von Treibhausgasemissionen und Nitrataustrag bei gleichzeitigem Erhalt der Ertragskraft aufzeigen. Da die gewählten und im Modell umgesetzten Mitigationsmassnahmen nur einen kleinen Teil aller gängigen Maßnahmen abdeckt, kann von einer großen Vertrauensbasis für die aufgezeigten Mitigationsergebnisse ausgegangen werden. Die Ergebnisse sind dahingehend auf die Gesamtregion übertragbar da das zugrundeliegende landwirtschaftliche System in der Region sich über die Lysimeterexperimente abbilden lässt und eine

große Übereinstimmung aufzeigt. Somit kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die Mitigationspotentiale auf die Region skalierbar sind. Die gezeigten Mitigationsergebnisse sollen dabei Richtwerte sein für den Mitigationskorridor welcher durch ‚Smart Agriculture' möglich ist.

Die im Projekt erarbeitete Regionalisierung der Spurengasemissionen und Nitrataustrag für die Modellregion zeigt durch die räumlich explizite und zeitlich hochaufgelöste Modellierung die Hostspots und Hotmoments der N_2O Emissionen und des Nitrataustrags. Diese Ergebnisse sind Grundlage zur Erarbeitung und Ableitung von Änderungsmaßnahmen. So können in der Modellregion die Regionen und Böden mit den größten Nitratausträgen identifiziert werden und den Landwirten geeignete Maßnahmen zur Reduktion der Nitratausträge vorgeschlagen werden. Die gezeigten mittleren jährlichen Nitratausträge sind außerordentlich wichtige Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung des Modellgebietes durch die Akteure (Umweltbundesamt, Gemeinden, Wasserwerke, Trinkwasserversorger etc.) im Bereich des Trinkwasserresourcenschutzes. Hier zeigen sich vor allem Potentiale einer regionalen Mitigationsmodellierung auf um die Frage nach kostengünstigen geeigneten Maßnahmen zur Reduzierung des Nitrateintrags in den Grundwasserkörper abzuschätzen.

Die Untersuchung der Auswirkungen den prognostizierten Klimawandels auf die regionalen Änderungen in den N_2O Emissionen und im Nitrataustrag zeigte für die Modellregion eine Korrelation der prognostizierten Zunahme im Jahresniederschlag von ca. 5-10% mit einer signifikanten Zunahme im mittleren jährlichen Nitrataustrag von ca. 30% für die Klimawandelszenarien RCP4.5 und 8.5 beim Vergleich der Zeitscheiben, nahe Zukunft' (2050-2055) gegen ‚Gegenwart' (2000-2005). Die Korrelation war grundsätzlich zu erwarten aber nur die prozessorientierte Modellierung ist in der Lage die Reaktion des landwirtschaftlichen Systems qualitativ und räumlich explizit zu quantifizieren. Die erarbeiteten Auswirkungen des Klimawandels auf mögliche Änderungen in Stärke und Verteilung der N2O Emissionen aufgrund der drei gewählten Realisierungen waren nicht eindeutig. Eine geplante Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden 15 Klimaänderungsdatensätze für RCP4.5 und 8.5 aus dem ÖKS15 Datensatz für regionale Inventarberechnungen für mehrere Zeitscheiben sollen dazu Aufschluss ergeben.

C) Projektdetails

6 Methodik

Lysimeterstation Hirschstetten:

Als Versuchsstandort diente die Lysimeteranlage Hirschstetten im Nordosten Wiens, die aus 18 grundwasserfreien Lysimetern besteht. Je drei Lysimeter pro Bodentyp (sandiger Tschernosem, tiefgründiger Tschernosem, Feuchtschwarzerde) werden Trockenperioden und Starkregenereignissen unterworfen (prognosticated rain, „prog.rain“). Diese Behandlung richtet sich nach den Niederschlagsmustern, die für die Jahre 2017-2100 vorhergesagt werden und ist mit 25% weniger Niederschlag berechnet. Die Beregnungsmenge und -verteilung für die übrigen Lysimeter, die als Kontrolle dienen, werden am langjährigen Niederschlagsdurchschnitt (der letzten 30 Jahre der Klimastation Grossenzersdorf, Marchfeld) orientiert (current rain, „curr.rain“). Die Lysimeterstation existiert seit dem Jahr 1995 und wurde im Jahr 2011 im Zuge des Projektes LYSTRAT mit einem 5 m hohen Folientunnel bedeckt. Zwei unterschiedliche Niederschlagsregime wurden mit einem automatischen Sprinklersystem (Zaller et al. 2014) jedes Jahr von Ende März/Anfang April bis Ende November durchgeführt. Während der Wintermonate wurde der Folientunnel abgebaut sodass die Lysimeter dem tatsächliche Winterniederschlag ausgesetzt waren.

Die kultivierten Feldfrüchte sind typisch für die Marchfeldregion. Die Fruchtfolge war wie folgt: Buchweizen, Wintergerst, Senf als Zwischenfrucht und Sojabohne. Es wurde mit Kalkammonsalpeter (27% N) gedüngt. Die Ausbringungsrate war bodentypspezifisch und variierte zwischen 40 und 65 kg N ha^{-1}.

Freiland: Treibhausgasmessung: Die Freisetzung von Kohlendioxid (CO_2), Distickstoffoxid (N_2O) und Methan (CH_4) wurde im Freiland seit März 2011 (einschließlich Messungen im Rahmen des Vorläuferprojektes LYSTRAT) mittels der „closed-chamber“-Methode erfaßt. Die Probenahme erfolgte jeweils im Zeitraum April bis Oktober im Abstand von zwei Wochen, ansonsten einmal pro Monat. Um die zeitliche Dynamik der Gasflüsse besser erfassen zu können, werden seit Mai 2014 in regelmäßigen Abständen einwöchige Meßkampagnen durchgeführt, während denen mindestens einmal pro Tag Gasproben gezogen werden. Zeitgleich zur Gasprobenahme wurde die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe gemessen sowie Bodenproben (0-5 cm) zur Ermittlung des gravimetrischen Wassergehaltes entnommen. Zudem wurde seit 2014 parallel zu den Gasflußmessungen die Bodenatmung mit Hilfe eines tragbaren CO_2-Meßgerätes bestimmt sowie die Freisetzung an Stickstoffmonoxid (NO) mittels NO_x-Analysator (Durchflußsystem) erfaßt.

Laboranalysen:

Zur Interpretation der Gasmessungen werden für mindestens vier Termine pro Jahr ausgewählte Basis- und mikrobielle Parameter bestimmt [Ammonium- und

Nitratkonzentrationen, pH-Wert, mikrobieller Biomassekohlenstoff (C_{mik}) und –stickstoff (N_{mik}), potentielle Enzymaktivitäten, sowie die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft anhand von Phospholipidfettsäureprofilen (PLFA)].

Probenaufbereitung: Das zur Bestimmung von N_2, des C und N in der mikrobiellen Biomasse (C_{mik}, N_{mik}) und der extrahierbaren mineralischen N-Spezies (Ammonium, NH_4^+; Nitrat, NO_3^-) benötigte Material wurde bis zur Analyse bei -18 °C tiefgefroren gelagert. Zur Messung des pH-Wertes und der Gehalte an Karbonat, Gesamt-C (C_{tot}) und Gesamt-N (N_{tot}) wurde bei 40 °C getrockneter Boden verwendet. Alle Bestimmungen erfolgten jeweils in mindestens zweifacher analytischer Wiederholung. Alle Gehalte und Konzentrationen wurden auf ofentrockenes Material (105 °C) bezogen.

pH-Wert: Die Messung des pH-Wertes erfolgte elektrochemisch mittels pH-Elektrode (pH-Meter 71, Metrohm AG, Herisau, Schweiz) gemäß ÖNORM L 1083 in 0,01 M Calciumchloridlösung ($CaCl_2$) bei einem Boden:Lösungsverhältnis von 1:5 (m/v).

C/N: Die C_{tot}- Gehalte wurden gemeinsam mit den Gehalten an N_{tot} gemäß ÖNORM L 1080 bzw. L 1095 unter Verwendung eines CN-Analysators gemessen (LECO TruMac CN, Leco Instrumente GmbH, Mönchengladbach, Deutschland).
Der **Karbonatgehalt** wurde mittels Scheibler-Appartur (Calcimeter) nach ÖNORM L 1084 bestimmt. Der Gehalt an organischem C (C_{org}) wurde aus der Differenz des C_{tot}- und des Karbonatgehaltes errechnet. Die Konzentrationen an verfügbarem NH_4^+ und NO_3^- wurden nach Extraktion mit 1 M Kaliumchloridlösung bei einem Boden:Lösungsverhältnis von 1:10 kolorimetrisch mit Hilfe eines Mikrotiterplattenlesegerätes (µQuant, Bio-Tek Instruments GmbH, Bad Friedrichshall, Deutschland) gemessen. Die Bestimmung des extrahierbaren NH_4^+ erfolgte mittels modifizierter Indophenolreaktion, die des extrahierbaren NO_3- mittels Vanadium(III)chlorid/Griess-Reaktion.

PLFA Analyse: Für die Analyse der (Boden-) Mikroorganismen-Gemeinschaften eignen sich speziell die Fettsäuren der Phospholipide (PLFA) sehr gut, weil ihre effiziente Extraktion / Isolation aus praktisch allen Umweltproben möglich ist und weil bei der Analyse nur Fettsäuren aus intakten Zellen (cytoplasmatischen Membranen), also aus lebenden Organismen erfasst werden. Mit dieser Methode wurden Gruppen von Mikroorganismen bestimmt die im Kohlenstoff und Stickstoffkreislauf eine bedeutende Rolle spielen. Mit dieser Methode können auch Stressfaktoren (z.B. Trockenheit) bestimmt werden.

Enzymaktivitäten: Die mikrobiellen Eigenschaften in landwirtschaftlichen Böden wurden erfasst, um insbesondere Aussagen über (i) die Bedeutung der Textur und (ii) die Folgen von Niederschlagsveränderungen auf extrazelluläre Enzymaktivitäten in Böden des Pannonischen Raumes treffen zu können. Von ausgewählten Proben die im Jahr 2014 und 2015 geworben wurden, wurden potentielle Enzymaktivitäten von Cellulase, Xylanase, Protease, Peroxidase und

Phenoloxidase bestimmt. Zudem wurde spezifische Enzymaktivitäten . bezogen auf C_{org} und C_{mik} – berechnet.

Labiler Kohlenstoff: Der labile Kohlenstoffes wurde mithilfe von KMnSO4 oxidierbarer C gemessen. Diese Methode eignet sich dafür um Aussagen über den Bodenkohlenstoff zu machen und gibt Auskunft über Bewirtschaftungseffekte, wie zum Beispiel Bodenbearbeitungen und Fruchtfolgen oder der Auswirkung auf Trockenheit auf den Bodenkohlenstoff.

FTIR-Analyse: Für ausgewählte Proben wurde Spektren mittels Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) erstellt, um Informationen über die molekulare Struktur der organischen und anorganischen Bestandteile des Bodens zu erhalten.

Mikrobielle Biomasse und extrahierbarer organischer Kohlenstoff (EOC): Die Mikrobille Biomasse hängt eng mit der Produktion von THG zusammen. Die Konzentrationen an C_{mik} und N_{mik} wurden nach der Chloroform-Fumigation-Extraktionsmethode ermittelt. Mit Chloroform fumigierte und unfumigierte Proben wurden mit 0,5 M Kaliumsulfatlösung extrahiert. In den Extrakten wurden die Konzentrationen an nicht ausblasbarem organischem C (non purgeable organic C, NPOC) und Gesamtstickstoff (TN) mit Hilfe eines TOC Analysators mit TN-Einheit (TOC-L mit TNM-L, Shimadzu, Kyoto, Japan) gemessen. Die Konzentrationen an C_{mik} und N_{mik} wurden jeweils aus der Differenz der fumigierten und unfumigierten Proben errechnet. Zur Berücksichtigung nicht-extrahierbarer Anteile wurde das Ergebnis durch einen Korrekturfaktor (0,45 für Cmik und 0,54 für Nmik) dividiert . Die Konzentrationen an NPOC und TN in den Extrakten der unfumigierten Kontrollproben wurde als Maß für den extrahierbaren organischen C (EOC) und Gesamt-N (ETN; Summenparameter für den extrahierbaren organischen und mineralischen N) und damit die leicht verfügbare Fraktion herangezogen.

Bestimmung von N_2: Um die N_2-Freisetzungsraten durch Denitrifikationsaktivitäten im Boden abschätzen zu können, wurde am Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) eine Meßanlage entwickelt und gebaut, die es ermöglicht, die N_2-Ausgasung aus Bodenproben direkt zu messen. Das zugrundeliegende Prinzip ist die sogenannte Heliumsubstitution, bei der der in einer Probe enthaltene N_2 in einem absolut gasdichten System durch ein Gemisch aus Helium (He) und Sauerstoff (O_2) ersetzt wird. Die computergesteuerte Anlage, die eine Modifikation des von Butterbach-Bahl et al. (2002) beschriebenen Meßsystems ist, besteht aus zwei Inkubationsgefäßen aus rostfreiem Stahl, die in einem Wasserbad gelagert sind. Hierdurch wird Gasdichtheit gewährleistet und zudem die Möglichkeit geboten, Bodenproben unterschiedlichen Temperaturen auszusetzen. Um die Diffusion von atmosphärischem N_2 in die Gefäße möglichst vollständig zu unterbinden, sind beide Gefäße mit zweifachen Polyurethan (PU)-O-Ringen versehen, die permanent mit He 6.0 gespült werden. Die Bestimmung von N_2 und N_2O erfolgt

mittels eines Gaschromatographen (6890 GC, Agilent Technologies, Palo Alto, USA), der mit einem Heliumionisationsdetektor (PDHID; Vici AG, Schenkon, Schweiz) zur Erfassung von N_2 und einem Mikroelektroneinfangdetektor (μECD; Agilent Technologies, Palo Alto, USA) zur Messung von N_2O ausgestattet ist. Im Labor wurde das Endprodukt der bis zum Ende ablaufenden Denitrifikation, das N2, mit Hilfe der Gasstrom-Bodenkerntechnik bestimmt (modifiziertes System nach Butterbach-Bahl et al. 2002). In einem ersten Schritt wurde ein Screening der N_2-Emissionen der verwendeten Proben durchgeführt. Die Proben wurden bei 20 und 25 °C und Feldfeuchte gemessen, um eine Vorstellung über die Größenordnung der N_2-Emissionen der untersuchten Böden zu erhalten. Proben die im November 2014 genommen wurden, wurden bei 5°C und 12°C inkubiert. Darüber hinaus wurden die entnommenen Proben zwei Feuchtegehalten [Feldfeuchtegehalt und ca. 40 % (Boden S) bzw. 60 % des wassergefüllten Porenraums (WFPS)] gemessen. Böden die im September 2016 geworben wurden und auch für die Bestimmung des IPCC Emissionsfaktors herangezogen wurden, wurden bei 5, 12 und 18°C und bei zwei WFPS gemessen.

Treibhausgasanalysen: Die Freisetzung von Kohlendioxid (CO_2), Distickstoffoxid (N_2O) und Methan (CH_4) wurde mittels der „closed-chamber"-Methode erfaßt. Die Probenahme erfolgt jeweils im Zeitraum April bis Oktober im Abstand von zwei Wochen, ansonsten einmal pro Monat. Um die zeitliche Dynamik der Gasflüsse besser erfassen zu können, wurden seit Mai 2014 in regelmäßigen Abständen einwöchige Meßkampagnen durchgeführt. Die Gasproben wurden im Zeitpunkt von 0, 5, 15 und 30 min genommen und im Labor am Gaschromatographen analysiert. Für die Detektion von N_2O wurde ein ECD (Elektroneinfangdetektor) verwendet, für die Bestimmung von CO_2 und CH_4 ein FID (Flammenionisationsdetektor).

Zeitgleich zur Gasprobenahme wird die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe gemessen sowie Bodenproben (0-5 cm) zur Ermittlung des gravimetrischen Wassergehaltes entnommen. Zudem wird seit 2014 parallel zu den Gasflußmessungen die Bodenatmung mit Hilfe eines tragbaren CO_2-Meßgerätes sowie die Freisetzung an Stickstoffmonoxid (NO) mittels NO_x-Analysator und O_3 mit einem Ozonanalysator im Durchflußsystem erfaßt.

Inkubationsexperiment: Ergänzend wurde 2015 zur Evaluierung der IPCC-Emissionsfaktoren ein Laborexperiment mit ungestörten Stechzylinderproben aus den 3 unterschiedlichen Bodentypen durchgeführt. Hierbei wurden ungedüngte und gedüngte Proben hinsichtlich der Freisetzung von NO, N2O und CO2 gemessen. N_2O wurde einen Tag vor der Düngung, 1, 2 und 3 Tage nach der Düngung gemessen. Die Verluste von NO und N_2O wurden über die Zeit erfasst. Düngung und Bewässerung wurden an die Feldgaben angepasst.

Modellierung: Auf Basis des erarbeiteten Datensatzes werden mit dem biogeochemischen Modell LandscapeDNDC unter anderem Vorhersagen für die Emissionen klimarelevanter Gase und gasförmiger Stickstoffverbindungen für verschiedene Klimaszenarien erstellt. Das LandscapeDNDC Ökosystemmodell wurde in PANGAS zur Simulation der Lysimeter eingesetzt um a) die Modellierungsqualität zur Vorhersage von Treibhausgasemissionen und Nitrataustrag zu evaluieren und b) zur Bestimmung der Gesamtstickstoffbilanz der Lysimeter sowie der Quantifizierung der Jahresemissionen aller gasförmigen Emissionen, Austräge durch Wasserflüsse sowie aller Änderungen in den Bodenstickstoffvorräten.

In der ersten Phase von PANGAS wurde das LandscapeDNDC Model getestet und gegen verfügbare Datensätze validiert. Die Modellkalibrierung berücksichtigte Pflanzenbiomasse (Stroh- und Kornerträge) sowie N_2O and NO Emissionen und der gewählte Kalibrierungsansatz beruhte auf der Software Spotpy.

Die Modellkalibrierung mit projekteigenen Beobachtungsdaten fokussierten dabei zum einen auf der exakten Wiedergabe des beobachteten Pflanzenwachstums und zum anderen auf der Kalibrierung sensitiver Modellparameter zur simultanen Vorhersage von N_2O und NO Emissionen (Beobachtungsdaten in wöchentlicher zeitlicher Auflösung). Die Herausforderung and die Kalibrierung einer möglichst exakten simultanen Vorhersage von N2O und NO Emissionen stellt wesentlich höhere Anforderungen an das prozessorientierte Modellsystem als sämtliche Kalibrierungen für nur eine Spezies. Ziel der Kalibrierung war es seine gebietsspezifische Modellparameterisierung sowohl für das Pflanzenwachstum, als auch für die bio-geochemischen Prozesse zu erstellen und anschließend für die Modellregion zur Berechnung eines Inventars für N_2O-Emissionen und des Nitrataustrages zu erstellen.

7 Arbeits- und Zeitplan

Tasks	2014									2015													2016													2017												
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sampling, field work (One-week measurement campaigns)																																													
Fertilization experiments																																													
N_2 measurements																																													
Lab analysis (gases, microbiological properties, etc.)																																													
Calculation of N_2O emission factors, identification of controlling factors																																													
Reports (WP3)																																													
Coordination (WP3																																													
Data collection for model initialization																																													
Development , validation of LandscapeDNDC																																													
Application of LandscapeDNDC																																													
GHG mitigation studies (site, regional scale)																																													
Uncertainty quantification of GHG emissions																																													

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Tabellarische Angabe von wissenschaftlichen Publikationen, die aus dem Projekt entstanden sind, sowie sonstiger relevanter Disseminierungsaktivitäten.

Präsentationen

- 3./4. April 2014: Posterpräsentation (+ Tagungsbeitrag), 15. Österreichischer Klimatag, Innsbruck (Postertitel: Bedeutung der Niederschlagsverteilung für die Flüsse klimarelevanter Gase aus Böden des Pannonischen Raumes)
- 29. September bis 2. Oktober 2014: Posterpräsentation, TERENO conference, Bonn, Deutschland (Postertitel: Soil greenhouse gas fluxes under conditions of climate-induced drought and heavy rain from agricultural soils in the Pannonian area)
- 29./30. April 2015: Posterpräsentation (+Tagungsbeitrag), 16. Österreichischer Klimatag, Vienna (Postertitel: Bedeutung der Niederschlagsverteilung und des Bodentyps für Gasflüsse und mikrobielle Parameter im Pannonischen Raum)
- 6. bis 10. September 2015: Posterpräsentation, Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, München, Germany (Postertitel: Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft in Schwarzerden des Pannonischen Raumes: Bedeutung von Niederschlagsregime und Bodentyp)
- 7./8. April 2016: Vortrag (+Tagungsbeitrag), 17. Österreichischer Klimatag, Graz (Postertitel: Zunehmende Trockenheit und Starkregenereignisse im Pannonischen Raum: Welche Auswirkungen auf Agrarökosysteme sind zu erwarten?)
- 20. bis 22. September 2016: Präsentation der Ergebnisse der Enzymbestimmungen, Methodenworkshop Bodenenzyme, Bochum, Deutschland
- 2. bis 7. September 2017: Posterpräsentation, Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Göttingen, Deutschland (Postertitel: Enzymaktivitäten in Schwarzerden des Pannonischen Raumes: Bedeutung von Niederschlagsregime und Bodentyp)

Publikation (nicht peer-reviewed)

Michel, K. (2017): PANGAS – Treibhausgasflüsse aus landwirtschaftlich genutzten Böden des Pannonischen Raumes unter veränderten Niederschlagsbedingungen. In: ACRP in essence. Berichte zur Klimafolgenforschung: Bodenforschung; 5-13.

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin / der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechtinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin / der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.