

Mehr Moor?

Zur Treibhausgasdynamik wiedervernässter Feuchtgebiete

Torsten Sachs¹, Franziska Koebsch¹, Daniela Franz¹, Eric Larmanou¹, Andrei Serafimovich¹, Katrin Kohnert¹, Gerald Jurasinski², Jürgen Augustin³

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Universität Rostock, Rostock

³ Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg

The Earth and its surface are tightly linked to the global climate system by turbulent exchange fluxes of energy and matter, e. g. greenhouse gases. This is true both for “deep Earth” geologically generated heat or gases reaching the surface and those of biogenic origin in the near-surface environment. For a better understanding of Earth-atmosphere interactions and in particular their feedbacks, the Helmholtz Young Investigators Group TEAM at GFZ studies the surface-atmosphere exchange of heat, water vapor, carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) on a range of temporal and spatial scales – from hours to years and from < 1m² to more than 10 000 km². A regional focus is on degraded peatlands. While natural peatlands play a central role in the climate system as major carbon sink storing twice the amount of carbon that is contained in the Earth’s forests, a large fraction of the world’s peatlands has been drained for agriculture and subsequently lost that carbon storage capacity. Drained and degraded peatlands are significant and longterm carbon dioxide sources and thus contribute to further climate warming. In NE Germany, up to 20 % of the overall carbon dioxide emissions are from drained peat and a tool in reducing national greenhouse gas emission is therefore the re-wetting of peatlands to restore their natural carbon sink capacity. TEAM monitors the long-term greenhouse gas dynamics in such re-wetted sites and investigates the underlying processes and spatiotemporal drivers of the dynamics.



Die voraussichtlich auf 9 Mrd. Menschen anwachsende Weltbevölkerung greift so massiv in natürliche Prozesse ein, dass anthropogen verursachte Umweltänderungen die Größenordnung natürlicher Variabilität im Erdsystem erreichen. Vor diesem Hintergrund gehört die Entwicklung von Anpassungs- und Minderungsstrategien und dazu ein umfassendes Verständnis der die Menschheit betreffenden natürlichen Prozesse und Dynamiken im Erdsystem zu den zentralen Herausforderungen („Grand Challenges“) der Gesellschaft. Schwerpunkte sind unter anderem Klimawandel, Ökosystemdynamik und Biodiversität sowie die Frage, wie die Erdoberfläche, unser Lebensraum, auf natürliche und anthropogene Veränderungen reagiert.

Moore spielen im Erdsystem eine signifikante Rolle als Stoffsenken ihrer jeweiligen Einzugsgebiete und erfüllen wichtige Funktionen in Landschaftswasserhaushalt, Mikro- und Regional Klima, Bodenschutz und Biodiversität. Aber selbst für das globale Klima stellen Moore erdgeschichtlich eine bedeutende Senke für Kohlenstoff (C) dar. Obwohl sie nur 3% der terrestrischen Erdoberfläche einnehmen, speichern Moore 25% des organischen Boden-C – dies entspricht 75% des gesamten in der Atmosphäre enthaltenen Kohlenstoffs und dem Doppelten dessen, was global in Wäldern gespeichert ist.

Im glazial geprägten Norddeutschland nahmen überwiegend grundwassergespeiste und gewässerbegleitende Niedermoore 10% (Brandenburg) bis 13% (Mecklenburg-Vorpommern) der Landfläche ein, bevor im Zuge immer intensiverer Landnutzung mehr als 95% dieser Flächen entwässert wurden. Entwässerung und Umwandlung in landwirtschaftliche Nutzflächen führt immer zum Verlust der Stoff- und Wasserspeicherfunktion der Moore und verwandelt effektive Senken für das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) in starke Quellen, die signifikant und langfristig zum Strahlungsantrieb der Erde beitragen können – und dies, obwohl mit der Entwässerung auch der natürliche Ausstoß des (bezogen auf 100 Jahre) 28 mal wirksameren Treibhausgases Methan (CH₄) abnimmt (Petrescu et al., 2015). Die CO₂-Emission aus landwirtschaftlich genutzten ehemaligen Moorflächen wird auf

bis zu 4,5% der Gesamt-CO₂-Emission Deutschlands geschätzt, für Mecklenburg-Vorpommern sogar auf 20%. Im Rahmen des Klima- und Gewässerschutzes werden national wie international Moore u. a. zur Wiederherstellung ihrer Stoff- und Wasserretentionsfähigkeit wiedervernässt, vor dem Hintergrund des CO₂-Emissionshandels teilweise auch im großen Maßstab. So ist in Mecklenburg-Vorpommern die Renaturierung von 37000 ha geplant oder bereits umgesetzt. Speziell im initialen Wiedervernässungsstadium treten jedoch hohe Emissionen biogenen Methans auf. In welchem Zeitraum und Umfang die Wiedervernässung dazu beitragen kann, degradierte Moore von einer anthropogenen Treibhausgasquelle wieder in eine klimakühlende Treibhausgassenke zu verwandeln, hängt daher wesentlich davon ab, wie lang die Phase erhöhter CH₄-Freisetzung anhält. Dieses ist Teil der Fragen, die die Nachwuchsgruppe TEAM am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ gemeinsam mit Partnern im TERENO-Verbund, weiteren Helmholtz-Zentren, Universitäten, Leibniz-Instituten und Wirtschaft an mehreren Standorten in Nordostdeutschland auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen untersucht.

Moor und Meer

Einer dieser Untersuchungsstandorte ist der Polder Zarnekow bei Dargun (Abb. 1). Hier wurde das die Peene begleitende Durchströmungsmoor bereits seit dem 18. Jahrhundert entwässert, aber erst mit der Intensivierung der Landwirtschaft zwischen 1960 und 1980 kam es zu massiver Degradation des Moorkörpers. Sackung (etwa 1 m) und Mineralisierung der oberen 0,3 m des bis zu 10 m mächtigen Torfkörpers führten teilweise zum Absinken der Geländeoberkante unter den Pegel der Peene und erforderten Eindeichung und Schöpfwerke zur weiteren Entwässerung. Der Schöpfwerksbetrieb wurde nach der Wende eingestellt; im Winter 2004/2005 wurde die Wiedervernässung eines 421 ha großen Areal durch Öffnung der Deiche forciert. Es bildete sich zunächst ein Flachwassersee, der nun über einen längeren Zeitraum verlanden muss, bevor sich wieder moortypische Vegetation einstellen kann. Begleitet wurde die Wiedervernässung seit 2004 durch intensive Studien zu Biogeochemie und Treibhausgasemissionen der Leibniz-Einrichtungen ZALF und IGB. Nach kurzer Unterbrechung wurde 2013 unter Führung des GFZ die Instrumentierung des Standorts im Rahmen der TERENO-Ausbauinvestitionen rund erneuert und intensiviert.

Eine in den letzten Dekaden ähnliche Landnutzung hat das bei Rostock gelegene Hütelmoor (Abb. 1) erfahren, die Genese und Geochemie dieses Standorts hingegen unterscheiden sich vom Peenetalmoor. Das Hütelmoor ist ein rund 490 ha großes Küstenversumpfungsmoor und bildete sich vor etwa 5400 Jahren auf den

Links: Messsysteme am Polder Zarnekow: im Vordergrund automatische Messhauben des Kooperationspartners ZALF, im Hintergrund der mikrometeorologische Eddy Kovarianz-Messturm der Nachwuchsgruppe TEAM am GFZ (Foto: D. Franz, GFZ)

Left: Measurement systems at Polder Zarnekow: automatic chambers of collaborators at ZALF in the foreground and a micrometeorological eddy covariance tower of the Young Investigators Group TEAM at GFZ



Kontakt: T. Sachs
(torsten.sachs@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Moor und Meer – links der Polder Zarnekow im Peenetal bei Dargun (Foto: T. Sachs, GFZ), rechts das an die Ostsee grenzende Küstenversumpfungsmoor Hütelmoor bei Rostock (Foto: L. Tiepolt, Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg, Rostock)

Fig. 1: Left: Polder Zarnekow in the Peene valley near Dargun (Photo: T. Sachs); right: coastal fen Hütelmoor near Rostock with the Baltic Sea in the background

weichselspätglazialen Becken-Feinsanden des Urrecknitz-Deltas. Der Torfkörper ist hier nur 0,5 bis 3 m mächtig, wobei speziell die oberen 0,3 bis 0,5 m stark vererdet bis schwach vermulmt sind. Auch das Hütelmoor wurde bereits seit dem 16. Jahrhundert extensiv genutzt und seit den 1970er Jahren mit Hilfe von Gräben und Schöpfwerken als Intensivgrünland bewirtschaftet. Die Wiedervernässung erfolgte 2010 und wie der Polder Zarnekow ist das Hütelmoor seitdem dauerhaft überstaut. Durch episodisches Eindringen von Ostseewasser bei Sturmfluten (zuletzt 1995) weist das Hütelmoor hohe Salinitäten auf. Seit 2009 untersucht die Universität Rostock den Austausch der Treibhausgase CO_2 und CH_4 zwischen Moor und Atmosphäre, seit 2014 wird das Hütelmoor als TERENO-Standort in Kooperation mit dem GFZ untersucht.

Wechselwirkungen zwischen Erdoberfläche und Klimasystem

Zu den unmittelbarsten und schnellsten Wechselwirkungen zwischen Geo-, Bio-, und Hydrosphäre mit der Atmosphäre und somit dem Klimasystem gehören die turbulenten Wärme- und Stoffströme zwischen der Erdoberfläche und der sogenannten planetarischen Grenzschicht, den unteren etwa 2 km der Troposphäre. Diese Wärme- und Stoffströme (hier: sensible Wärme, latente Wärme (Verdunstung), CO_2 - und CH_4 -Flüsse) sind mit Laserspektroskopie und hochfrequent messenden meteorologischen Sensoren je nach Trägerplattform kontinuierlich bzw. großflächig quantifizierbar (Abb. 2).

Am GFZ wird dazu an Messtürmen und auf verschiedenen Fluggeräten vor allem die mikrometeorologische Eddy-Kovarianz-Methode eingesetzt, die auf der schnellen und zeitgleichen Messung des 3D-Windvektors und skalarer Größen wie Feuchte, Temperatur, CO_2 - und CH_4 -Konzentration beruht. So lässt sich

der Masse- und Energieaustausch zwischen Ökosystem und Atmosphäre kontinuierlich und integriert über ein Einzugsgebiet von mehreren Hektar quantifizieren. Grundsätzlich lässt sich die Methode auf eine Vielzahl von Fragestellungen anwenden, wie etwa den Aufstieg geogener Gase bei rezenter Tektonik, Gasaustritte aus Hydraten und flachliegenden Lagerstätten oder Emissionen im Umfeld aktiver oder stillgelegter Rohstoffextraktionsflächen. Ergänzt werden diese mikro- bis mesoskaligen Untersuchungen durch kleinräumige Messungen diffusiver Stoffströme (Abb. 2). Durch die Erfassung der Gasemissionen auf verschiedenen räumlichen Ebenen und die Anwendung von Up- und Downscaling-Modellierungen können wir Skaleneffekte besser verstehen und so z. B. Regionalisierungsansätze zur Prognose der Rolle von Geoökosystemen für den Klimawandel entwickeln.

Die Festlegung von Kohlenstoff im Moor bzw. die C-Freisetzung in die Atmosphäre wird im Wesentlichen durch die geochemischen Bedingungen im Torf und damit verbundene mikrobielle Umsetzungsprozesse gesteuert. Nach Jahrzehnten der Entwässerung haben sich Vegetation und Bodenmikrobiologie in degradierten Mooren auf die trockeneren Bedingungen eingestellt. Ein rapider Anstieg des Wasserspiegels im Zuge der Wiedervernässung kann dann wie eine Störung wirken (Koebsch *et al.*, 2013); die so entstandenen eutrophen Flachwasserseen werden zu regelrechten „Schleudern“ für klimarelevante Gase und Nährstoffe (Zak *et al.* 2009). Neben den Treibhausgasbilanzen erforschen wir die Steuergrößen für die spezielle Stoffdynamik in der initialen Phase der Moorwiedervernässung. Mit quantitativen Analysen und stabilen Isotopen untersuchen wir Umsetzungsprozesse und versuchen z. B. die Herkunft bestimmter Stoffgruppen im Torf zu klären. Die Ergänzung der Gasemissionsmessungen mit biogeochemischen Untersuchungen wird mittelfristig zur besseren Generalisierbarkeit der Ergebnisse und zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger führen.

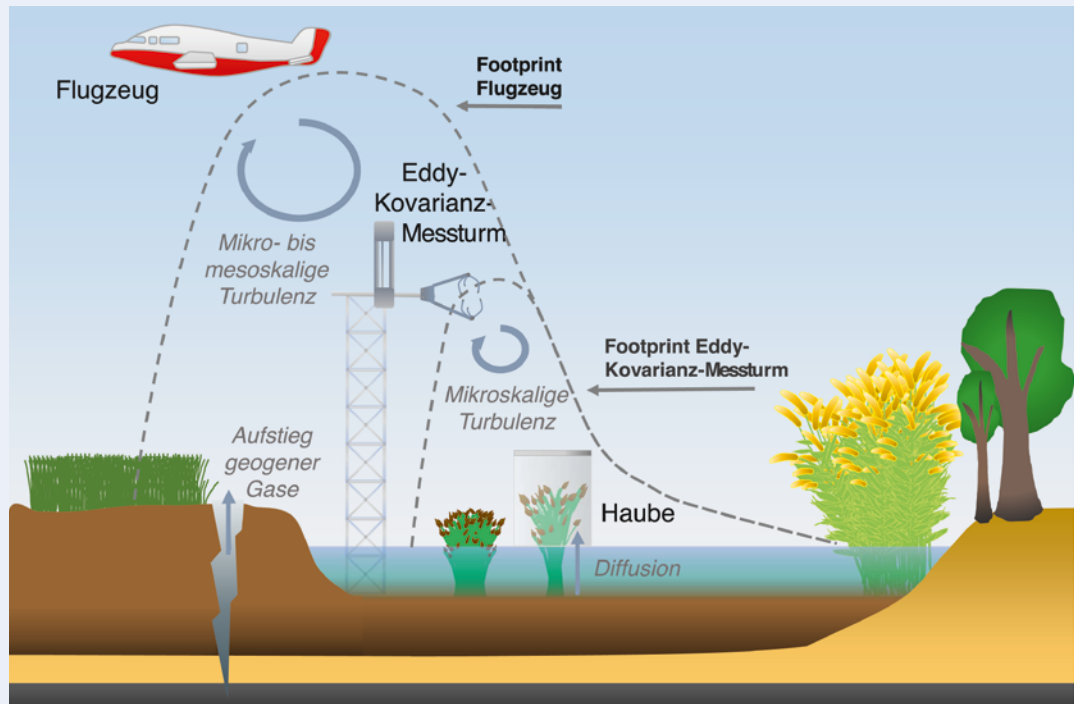


Abb. 2: Methoden zur Messung des Gasaustauschs zwischen Oberfläche und Atmosphäre auf verschiedenen räumlichen Skalen. Bei der Haubenmethode wird der diffusive Fluss über einer definierten Fläche ($< 1 \text{ m}^2$) gemessen und kann direkt dem eingeschlossenen Geoökosystemelement zugeordnet werden. Mit einem fest installierten Eddy-Kovarianz-Messturm wird kontinuierlich der turbulente Energie- und Stoffaustausch über einer Fläche von mehreren Hektar quantifiziert. Mit einem Flugzeug als Trägerplattform ist zwar keine zeitlich kontinuierliche Messung mehr möglich, dafür kann aber regional die räumliche Variabilität bestimmt werden. Die gestrichelten Linien symbolisieren die von der Messung „gesehene“ Fläche (sog. Footprint; Abb.: GFZ).

Fig. 2: Methods to determine the gas exchange between surface and atmosphere on different spatial scales. The closed chamber method is suitable for quantifying the diffusive flux from small defined surfaces ($< 1 \text{ m}^2$) and relate that flux directly to the enclosed element of the geocosystem. With a stationary eddy covariance tower, energy and gas exchange are continuously measured from an area of several hectares. Airborne eddy covariance does not allow for continuous measurements but is suited for quantifying regional spatial variability. The dotted lines symbolize the area “seen” by the measurement (so-called footprint).

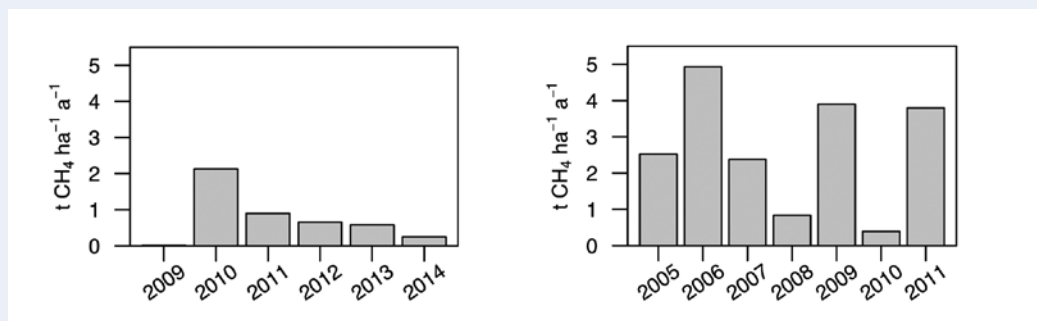


Abb. 3: Methanemissionen vor (2009) und nach (ab 2010) der Wiedervernässung des Hütelmoors (links) und nach der Wiedervernässung des Polders Zarnekow (rechts, Abb.: GFZ)

Fig. 3: Methane emissions before (2009) and after (starting 2010) re-wetting of the Hütelmoor (left) and after re-wetting of the Polder Zarnekow (right)

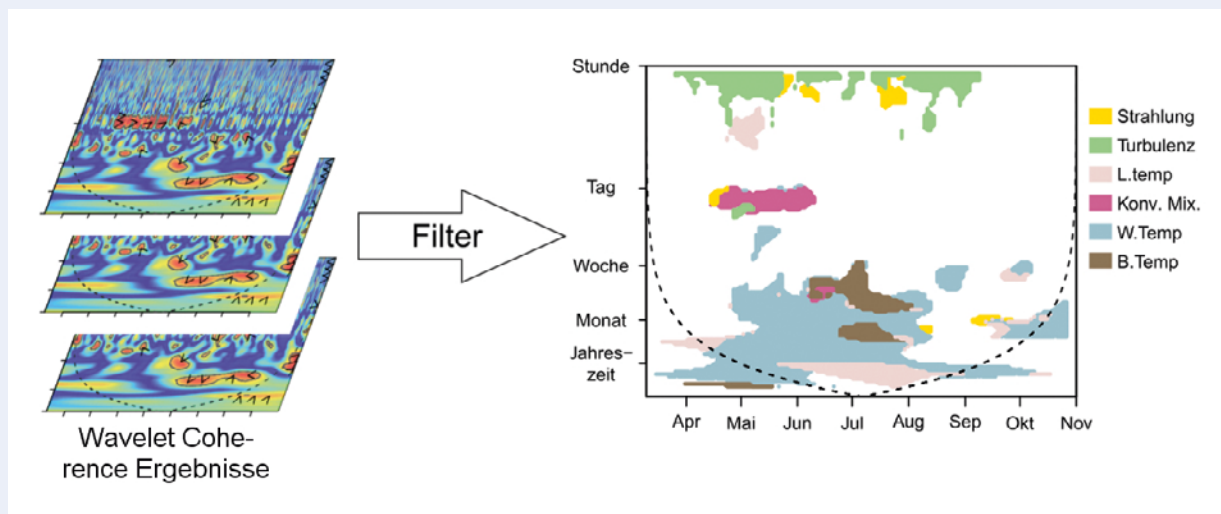


Abb. 4: Übersicht über das Zusammenwirken verschiedener Steuergrößen für die CH_4 -Emission auf verschiedenen Zeitskalen und im Jahresverlauf. Beispielsweise erzeugt die konvektive Durchmischung der Wassersäule (Konv. Mix.) – zumindest zeitweise – einen Tagesgang der CH_4 -Emissionen. (Abb.: GFZ)

Fig. 4: Overview of the interaction of different drivers for CH_4 emissions on various temporal scales within the course of a year. For example, convective mixing within the water column (Konv.Mix.) results – at least temporarily – in a diurnal cycle of CH_4 emissions.

Wiedervernässte Küstenmoore als unterschätzte Methanquelle

Im Hütelmoor zeigt sich, dass auch Küstenmoore entgegen der allgemeinen Vorstellung extrem hohe Mengen an CH_4 emittieren können. Während die CH_4 -Emissionen im entwässerten Zustand vernachlässigbar gering waren, erhöhten sie sich im ersten Jahr nach Wiedervernässung um den Faktor 100 auf $2,1 \text{ t ha}^{-1}$ (Abb. 3) – ein Wert, der in natürlichen Feuchtgebieten bisher kaum gemessen wurde. Großflächiges Absterben der Vegetation bietet leicht zersetzbares Substrat für CH_4 -bildende Mikroorganismen (Hahn-Schöfl et al., 2011). In den Folgejahren sinken die CH_4 -Emissionen im Hütelmoor kontinuierlich, bleiben aber weiterhin auf einem für natürliche Feuchtgebiete hohen Niveau.

Küstenmoore weisen aufgrund ihres brackigen Charakters in der Regel hohe Sulfatgehalte auf, die die mikrobielle CH_4 -Produktion limitieren (Lovley und Klug, 1983). Obwohl die letzte Intrusion von Ostseewasser ins Hütelmoor bereits 1995 stattfand, messen wir noch heute hohe Salinitäten. Allerdings wurde das ostseebürtige Sulfat insbesondere in den obersten Torfschichten nahezu komplett mikrobiell abgebaut. In den obersten Torfschichten kann also effektiv CH_4 produziert werden. Das CH_4 -Emissionspotential von degradierten Küstenmooren hängt wesentlich von der Mobilität bzw. der Nachlieferung von Sulfat im Torf ab.

Kein Ende in Sicht – hohe Treibhausgasemissionen im Polder Zarnekow

Die konsistente Abnahme der CH_4 -Emissionen im Hütelmoor in den Jahren nach der Wiedervernässung entspricht der gängigen Vorstellung über zunehmende Stofffestlegung in einem sich allmählich stabilisierenden System. Die Ergebnisse im Polder Zarnekow hingegen weichen deutlich von diesem Grundverständnis ab: auch zehn Jahre nach Wiedervernässung treten noch extrem hohe CH_4 -Flüsse auf, die zudem stark von Jahr zu Jahr schwanken und von ebenfalls weiterhin hohen CO_2 -Emissionen begleitet werden – hier wird der Bedarf für langjährige Beobachtungsreihen besonders deutlich. Während im Allgemeinen angenommen wird, dass der Klimaeffekt der hohen CH_4 -Emissionen nach Wiedervernässung langfristig durch C-Festlegung im Torfkörper kompensiert wird, müssen wir für den Polder Zarnekow auch mehrere Jahre nach Wiedervernässung noch von einer stark positiven Klimabilanz ausgehen, die zu einem wesentlichen Teil von hohen CO_2 -Emissionen bestimmt wird.

Von Stunden zu Jahren – zeitliche Variationen der Methanflüsse

Globale Modelle zur Abschätzung von CH_4 -Emissionen aus Mooren sind noch immer mit hohen Unsicherheiten behaftet. CH_4 gelangt durch verschiedene Freisetzungsmechanismen

in die Atmosphäre, die sich gegenseitig überlagern und so zu komplexen zeitlichen Mustern führen. Mit Zeitreihenanalysen kann man die hohe Gesamtvariation der CH₄-Emissionen spektral zerlegen und Korrelationen mit potentiellen Einflussfaktoren auf spezifischen Zeitskalen von Stunden bis Jahren untersuchen (Koebsch *et al.*, 2015) (Abb. 4).

So konnte in beiden untersuchten Mooren der Einfluss der konvektiven Durchmischung der Wassersäule als wichtige Steuergröße für hohe nächtliche CH₄-Emissionen identifiziert werden – ein Prozess, der als saisonale Zirkulation aus Seen bekannt ist, in Flachwasserseen aber auch innerhalb des Tagesverlaufs zu beobachten ist und als solcher bisher kaum detailliert beschrieben wurde.

Von Mecklenburg zum Polarkreis – und zurück

Die bisherigen Arbeiten in den Mooren Nordostdeutschlands konzentrierten sich auf die lokale Quantifizierung des Stoffhaushalts und Untersuchungen zum Prozessverständnis – für beide Aufgaben sind Langzeitmessungen unerlässlich und das TERENO-Konzept daher bestens geeignet. Künftig sollen diese Untersuchungen um eine flugzeugbasierte räumliche Komponente erweitert werden, so dass eine Einordnung und Bewertung der Standorte im regionalen Kontext möglich wird.

Die Mess- und Analysemethoden dazu wurden in den letzten drei Jahren im Rahmen zahlreicher Kampagnen in den arktischen Permafrostgebieten entwickelt. Neben wissenschaftlichem Interesse an Treibhausgasemissionen aus den hier weit verbreiteten permafrostbedingten Feuchtgebieten, aber auch Gashydraten und oberflächennahen Kohlenwasserstofflagerstätten eignete sich die Region insbesondere auch zur Etablierung und Perfektionierung der Methode. Dünne Besiedelung, weite Flächen und das Fehlen jeglicher Hindernisse wie Bäume, Mobilfunkmasten, Windkraftanlagen und Stromleitungen ermöglichten Messungen unter Idealbedingungen entlang tausender Kilometer in niedriger Flughöhe (<50 m). Die nunmehr ausgereifte Methode lässt sich leichter in unsere heimischen Gebiete übertragen, als wenn sie hier unter weniger idealen Bedingungen und bei entsprechend geringerer Datenausbeute hätte entwickelt werden müssen.

Diese regionalen Untersuchungen von Wärmequellen, Verdunstung und Treibhausgasemissionen in Nordostdeutschland sind für 2015/2016 an Bord des Do-128-Forschungsflugzeugs D-IBUF der Technischen Universität Braunschweig geplant.

Literatur

- Hahn-Schöfl, M., Zak, D., Minke, M., Gelbrecht, J., Augustin, J., Freibauer, A. (2011): Organic sediment formed during inundation of a degraded fen grassland emits large fluxes of CH₄ and CO₂. - *Biogeosciences*, 8, 6, p. 1539-1550.
- Koebsch, F., Glatzel, S., Hofmann, J., Forbrich, I., Jurasinski, G. (2013): CO₂ exchange of a temperate fen during the conversion from moderately rewetting to flooding. - *Journal of Geophysical Research*, 118, 2, p. 940-950.
- Koebsch, F., Jurasinski, G., Koch, M., Hofmann, J., Glatzel, S. (2015): Controls for multi-scale temporal variation in ecosystem methane exchange during the growing season of a permanently inundated fen. - *Agricultural and Forest Meteorology*, 204, p. 94-105.
- Lovley, D. R., Klug, M. J. (1983): Sulfate reducers can outcompete methanogens at freshwater sulfate concentrations. - *Applied and Environmental Microbiology*, 45, 1, p. 187-192.
- Petrescu, A. M. R., Lohila, A., Tuovinen, J.-P., Baldocchi, D. D., Desai, A. R., Roulet, N. T., Vesala, T., Dolman, A. J., Oechel, W. C., Marcolla, B., Friborg, T., Rinne, J., Matthes, J. H., Merbold, L., Meijide, A., Kiely, G., Sottocornola, M., Sachs, T., Zona, D., Varlagin, A., Lai, D. Y. F., Veenendaal, E., Parmentier, F.-J.-W., Skiba, U., Lund, M., Hensen, A., van Huissteden, J., Flanagan, L. B., Shurpali, N. J., Grünwald, T., Humphreys, E. R., Jackowicz-Korczyński, M., Aurela, M. A., Laurila, T., Grüning, C., Corradi, C. A. R., Schrier-Uijl, A. P., Christensen, T. R., Tamstorf, M. P., Mastepanov, M., Martikainen, P. J., Verma, S. B., Bernhofer, C., Cescatti, A. (2015): The uncertain climate footprint of wetlands under human pressure. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 112, 15, p. 4594-4599.
- Zak, D., Wagner, C., Payer, B., Augustin, J., Gelbrecht, J. (2010): Phosphorus mobilization in rewetted fens: the effect of altered peat properties and implications for their restoration. - *Ecological Applications*, 20, 5, p. 1336-1349.