

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 40 (1999)
Heft: 3

Artikel: CO₂-Flüsse beim Herbst-Winter-Übergang in einem Jura-Hochmoor
Autor: Weber, Markus / Wührich, Christoph
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088518>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

CO₂-Flüsse beim Herbst-Winter-Übergang in einem Jura-Hochmoor

Markus Weber und Christoph Wüthrich

Zusammenfassung

Im Winter 1997/1998 wurden die CO₂-Flüsse in einem Jura-Hochmoor gemessen. Das Verhalten von Respiration und Photosynthese während des Herbst-Winter-Überganges sowie die Veränderung der CO₂-Flüsse mit den sich verändernden Temperatur- und Wassertafelverhältnissen im Moor waren dabei von besonderem Interesse. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass im Winter selbst bei tiefen Bodentemperaturen eine deutlich messbare mikrobielle Aktivität aufrechterhalten wird und zu einer relevanten CO₂-Abgabe an die Atmosphäre führt. Sowohl Zeitpunkt und Intensität der Schneedeckenentwicklung wie auch Wassertafelschwankungen im winterlichen Moor spielen eine grosse Rolle für die Intensität der winterlichen CO₂-Austräge. Winterliche CO₂-Flüsse von Moorökosystemen sind somit keinesfalls zu vernachlässigen und müssen bei der Modellierung von Kohlenstoffbilanzen auch global miteinbezogen werden.

1 Einleitung

In der Schweiz sind nur noch 1460 ha Hochmoorfläche zu verzeichnen, was rund 10-20 % der ursprünglichen Fläche entspricht (Grünig et al. 1986). Davon sind heute zwei Drittel vom Menschen stark beeinträchtigt und nur ein Drittel befindet sich in naturnahem Zustand. Diese Hochmoorreste sind durch landwirtschaftliche Meliorationen, Torfausbeutung, bauliche Eingriffe sowie Nähr- und Schadstoffe in der Luft und im Regenwasser akut gefährdet. Global gesehen bedrohen v.a. die

Adresse der Autoren: Markus Weber und Christoph Wüthrich, Geographisches Institut der Universität Basel, Abteilung Physiogeographie und Landschaftsökologie, Spalenring 145, CH-4055 Basel

fortschreitende Klimaveränderung und grossflächige Entwässerungen den Bestand der Mooregebiete. Die Hochmoore wurden in ganz Europa vor allem durch anthropogene Eingriffe zerstört und sind in Mitteleuropa grösstenteils verschwunden, womit ihre Pflanzen- und Tierwelt auf inselartig verteilte Reste zurückgedrängt wurde und es zu einer intensiven Freisetzung (Mineralisierung) der C-Reserven im Boden kam (*Silvola et al. 1996*).

Im Rahmen der globalen Klimaveränderung besteht ein grosser Forschungsbedarf. Es sind vor allem die nordhemisphärischen Torflager in den nördlichen borealen Waldländern und der angrenzenden Tundrenzzone, welche durch ihre enormen Kohlenstoffvorräte in Zusammenhang mit dem "Treibhauseffekt" zu verschiedenen Forschungsstudien veranlassen. Im Gegensatz zu Mitteleuropa sind diese Moorflächen in den borealen und subarktischen Gebieten noch weitgehend erhalten. Der gesamte Vorrat dieser Ökosysteme wird auf 455 Gt C geschätzt (*Gorham 1991, 182*). Durch das Ungleichgewicht zwischen pflanzlicher Produktion und mikrobiellem Abbau wurde dieser Kohlenstoff in den letzten 12 000 Jahren auf der Erdoberfläche als Torf akkumuliert (*Wüthrich et al. 1994, 251*) und stellt rund 23 % des terrestrischen Kohlenstoffvorrats der Erde dar (*Miller et al. 1983, 120*).

In Zusammenhang mit den CO₂-Flüssen aus Mooregebieten spielt die Abbaubarkeit des Torfes eine grosse Rolle. Sie wird durch die Qualität des Torfmaterials (z.B. N-Gehalt, Zersetzungsgrad, Azidität) bestimmt. Der Zersetzungsgrad eines Torfes und dessen N-Gehalt werden entscheidend dadurch beeinflusst, wie lange das organische Material im Akrotelm des Bodens vorliegt, bevor es im Katotelm dem aeroben mikrobiellen Abbau entzogen wird (*Clymo 1992; Malmer & Wallén 1993*). Ebenso wird die mikrobielle Aktivität und somit der CO₂-Fluss entscheidend durch die Temperaturverhältnisse und den Stand der Wassertafel beeinflusst (*Moore & Dalva 1993, 651; Funk et al. 1994, 271*). Die mikrobiellen Abbauprozesse laufen bei tiefen Temperaturen reduziert ab, können jedoch selbst bei Bodentemperaturen unter 0°C zu einer CO₂-Freisetzung führen (*Wüthrich 1994, 73*). Bei einem Absinken der Wassertafel steht dem mikrobiellen Abbau mehr Sauerstoff zur Verfügung, und es kommt unter günstigen Bedingungen zu einer Aktivitätssteigerung der Mikroorganismen.

Durch fortschreitende Klimaveränderungen und die für die Zukunft prognostizierten veränderten Klimabedingungen (z.B. höhere Temperaturen → sinkender Permafrost) könnte eine tiefgreifende Veränderung in der C-Bilanz von Moorökosystemen stattfinden. Durch erhöhte biologische Abbauproduktivität dank vergrösserter Auftauschicht in den Permafrostgebieten und durch ungünstige Wachstumsbedingungen für die Vegetation (z.B. wegen reduziertem Strahlungsangebot infolge zunehmender Bewölkung; vgl. *Wüthrich et al. 1998*) wäre eine vermehrte Abgabe von CO₂ an die Atmosphäre denkbar. Die Folge wäre ein reduziertes Moorwachstum und möglicherweise eine Verschiebung der Funktion der Mooregebiete von einer C-Senke zu einer C-Quelle (siehe auch *Houghton 1993, Oechel et al. 1997*). Damit würde das Torfwachstum gestoppt und es käme zu einem Torfabbau. Im Sinne einer positiven Rückkopplung könnte dies den Treibhauseffekt weiter verstärken.

Seit etwa zehn Jahren werden verschiedene Prozesse in Moorökosystemen intensiv erforscht, um die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die grossen Mooregebiete der nördlichen Hemisphäre verstehen zu können. Bei der

Betrachtung der vorhandenen Literatur fällt auf, dass zwar viele Studien bezüglich Kohlenstoffflüssen aus Mooren existieren, diese sich aber meist auf die Vegetationszeit der Pflanzen beschränken und Prozesse während der Winterzeit nicht berücksichtigen. Es wird – meist auch verursacht durch die logistischen Schwierigkeiten von Wintermessungen – davon ausgegangen, dass die Prozesse im Boden im Winter eingestellt werden. Neuere Studien haben jedoch gezeigt, dass selbst bei schneebedeckter Oberfläche während des Winterhalbjahres durchaus bedeutende CO₂-Flüsse aus Mooren gemessen werden können (Zimov et al. 1996, Sommerfeld et al. 1993, Winston et al. 1995, Brooks et al. 1996, Kelley et al. 1968).

Der vorliegende Artikel dokumentiert die Resultate einer Diplomarbeit, die im Winter 1997/1998 in einem Jura-Hochmoor durchgeführt wurde (Weber 1999). Ziel dieser Studie war es, im Rahmen einer dreimonatigen Feldkampagne die CO₂-Flüsse und ihre wichtigsten Regler während des Winters zu erfassen. Die Bodentemperaturen und Wassertafelschwankungen wurden in Bezug auf die mikrobielle Aktivität als zentrale Steuerfaktoren angenommen und daher bei der Untersuchung laufend erfasst. Die Auswirkungen der Schneedeckenentwicklung auf die winterlichen CO₂-Flüsse standen ebenfalls im Vordergrund.

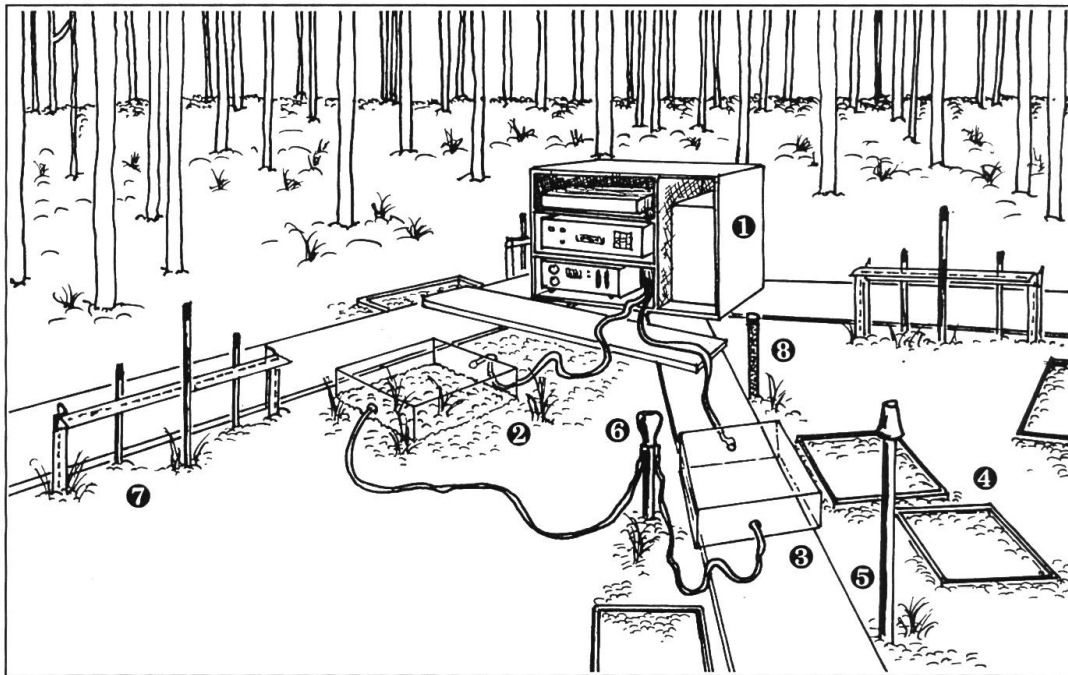
2 Untersuchungsgebiet und Methoden

Die Untersuchungen wurden am Ostrand der Freiberge, ca. 4 km östlich von Tramelan in einem naturnahen Hochmoor ("La Tourbière au sud des Veaux", 574.000/232.375) durchgeführt. Da dieses Moor niemals drainiert wurde, kann es als eines der letzten Hochmoore der Schweiz mit ungestörtem natürlichem Wasserhaushalt gelten. Das Moor besteht aus einem in Richtung SW-NE gestreckten Moorkomplex, der ungefähr 600 m lang und 200 m breit ist. Der Hochmoorbereich hat eine Breite von 50-80 m und weist eine Torfmächtigkeit von ca. 1.5 m auf (vgl. Abb. 2 bei Kempel-Eggenberger, Studer & Weber in diesem Heft).

Grossklimatisch liegt das Untersuchungsgebiet in der kühltemperierten Klimazone des subozeanischen Typus und weist mittlere Januartemperaturen von ca. -2°C bis -4°C und einen durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 1300-1400 mm auf. Das Moor ist auf der Hochmoorfläche von einem Bergföhrenbestand besiedelt und wird von *Sphagnum*-Torfmoosen dominiert. Detaillierte Angaben zum Hochmoor "au sud des Veaux" sind bei Weber (1999) zu finden.

Die Feldmessungen wurden von Ende Oktober 1997 bis Anfang Februar 1998 durchgeführt. Mittels mobiler Gaswechselanlage wurden die CO₂-Flüsse wöchentlich mit der Kammermessmethode auf der Hochmoorfläche an sechs verschiedenen Flächen innerhalb eines ca. 40 m² grossen Messplatzes bestimmt (vgl. Abb. 2 bei Kempel-Eggenberger, Studer & Weber in diesem Heft).

Das Messsystem wurde für den Einsatz unter extremen Bedingungen entwickelt und besteht aus Pumpe, Infrarot-Gasanalysator, Messkammer, Referenzkammer und künstlicher Beleuchtung, sowie aus verschiedenen Sensoren zur Messung von aktueller Temperatur, Luftdruck, Taupunkt und Lichtfluss (detaillierter Beschrieb bei Wüthrich et al. 1998). Die Stromversorgung des Systems erfolgte über eine 12V Bleibatterie. Die Anordnung des Messsystems ist aus Abb. 1 ersichtlich.



Legende:

- 1 Gaswechselanlage mit Schreiber, Infrarot-Gasanalysator, Pumpe (von oben nach unten)
- 2 Messkammer
- 3 Referenzkammer
- 4 Metallsockel (Anzahl: 6)
- 5 Wasserstandsrohr (Anzahl: 3)
- 6 Mischkolben
- 7 Tensiometer zur Bestimmung der Bodenfeuchte (Anzahl: 3 x 3)
- 8 Vierkant-Edelstahlrohr für die Probennahme von Moorwasser

Abb. 1 Schematische Darstellung des Messplatzes im "La Tourbière au sud des Veaux". Nebst der Gaswechselanlage sind die Installationen für die Bestimmung der Bodenfeuchte, der Wassertafel und des pH sowie des Sauerstoffgehaltes im Moorwasser dargestellt.

Die Messungen an den einzelnen Messplätzen wurden zwischen zehn Uhr morgens und drei Uhr nachmittags durchgeführt, um die besten Strahlungsverhältnisse nutzen zu können. Auf jeder Messfläche wurde zuerst unter Naturlichtbedingungen ("Starklicht", ca. 6 Std./Tag) gemessen, dann bei definiertem Kunstlicht ("Dämmerlicht", $100 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ca. 2 Std./Tag) und bei Dunkelheit (zur Messung der Dunkelatmung, ca. 16 Std./Tag). Anhand dieser lichtabhängigen Messungen wurden die Tagesbilanzen der CO_2 -Flüsse entsprechend der jahreszeitlichen Lichtkurve durch Aufsummierung der Einzelwerte berechnet (vgl. Tab. 1).

Neben den eigentlichen CO_2 -Messungen wurden zusätzlich weitere meteorologische Parameter erfasst, um eine sinnvolle Interpretation der Resultate zu ermöglichen. Dazu wurde eine mikrometeorologische Messstation zur Erfassung von Wind, Strahlung, Oberflächen- und Bodentemperaturen auf der Hochmoorfläche aufgestellt (vgl. *Kempel-Eggenberger, Studer & Weber* in diesem Heft). Die Erfassung der Wasserstände im Moor erfolgte mittels sechs Kunststoffrohren ($\varnothing 60 \text{ mm}$), die wöchentlich abgelesen wurden.

3 Ergebnisse

3.1 Witterungsverlauf und Schneedeckenentwicklung

Der Witterungsverlauf während der Messkampagne im Jura von Oktober 1997 bis März 1998 war durch grosse Schwankungen gekennzeichnet. In dieser Zeit überquerten zahlreiche Störungen das Untersuchungsgebiet, die häufig zu Niederschlägen in Form von Regen oder auch Schnee führten. Während der ganzen Kampagne wurden insgesamt ca. 460 mm Niederschlag erfasst, wobei gerade für die "Schneephasen" die zeitliche Zuordnung sehr unsicher ist, da der Niederschlagsmesser nicht beheizt werden konnte.

Niederschlag in Form von Schnee fiel bereits Mitte November, führte aber nur für wenige Tage zu einer geschlossenen Schneedecke von geringer Mächtigkeit. Eine Schneedecke von mehr als 15 cm Mächtigkeit bildete sich erst Mitte Dezember. Diese blieb jedoch nur bis zum 25.12.1997 bestehen und schmolz danach vollständig weg. Erst in der zweiten Januarhälfte führten ausgiebige Schneefälle zu einer ca. 35 cm mächtigen Schneedecke, die rund vier Wochen persistierte.

Zu einer frühen Einwinterung mit einer mächtigen Schneedecke, die für die mikrobiellen Abbauprozesse im Boden für längere Zeit günstige Bedingungen hätte schaffen können, kam es während des Winters 1997/1998 nicht.

3.2 Schwankungen der Wassertafel

Die Wassertafel im "La Tourbière au sud des Veaux" erreichte zu Beginn der Messkampagne ihren tiefsten Stand bei ca. 10 cm unter der Mooroberfläche. Durch eine Zunahme der Niederschläge anfangs November stieg die Wassertafel auf knapp 4 cm an, sank jedoch in der Folge durch Niederschlag in Form von Schnee und einer einwöchigen niederschlagsfreien Zeit bis zum 25.11.1997 um etwas mehr als 2 cm (siehe Abb. 2). Schwankungen der Wassertafel infolge von Schneeschmelze oder durch Bildung einer geringmächtigen Schneedecke sind in der Zeit vom 25.11.-26.12.1997 zu sehen. Deutlich ersichtlich ist das Absinken der Wassertafel ab Mitte Januar, als sich eine Schneedecke von 35 cm entwickelte und die Lufttemperaturen stetig auf -10°C sanken. Steigende Lufttemperaturen ab Mitte Februar 1998 führten dazu, dass der Niederschlag erneut als Regen fiel und die Schneedecke verschwand, was ein Ansteigen der Wassertafel zur Folge hatte.

3.3 Temperaturen im Torf

Während sich die Lufttemperaturen im Laufe der Kampagne zwischen -18 und $+19^{\circ}\text{C}$ bewegten, lagen die Temperaturen an der Mooroberfläche nie tiefer als -1.6°C und waren in einer Bodentiefe von 30 cm stets über dem Nullpunkt (Abb. 3). Solange das Moor schnee- und eisfrei war, reagierten sowohl die Lufttemperatur als auch die Oberflächentemperatur des Bodens sehr rasch auf Strahlungseinflüsse. Demgegenüber reagierten bei Schneebedeckung auch die obersten Bodentemperaturen kaum noch auf Strahlungsimpulse. Die Temperaturen in allen Schichten des Bodens blieben dann praktisch konstant.

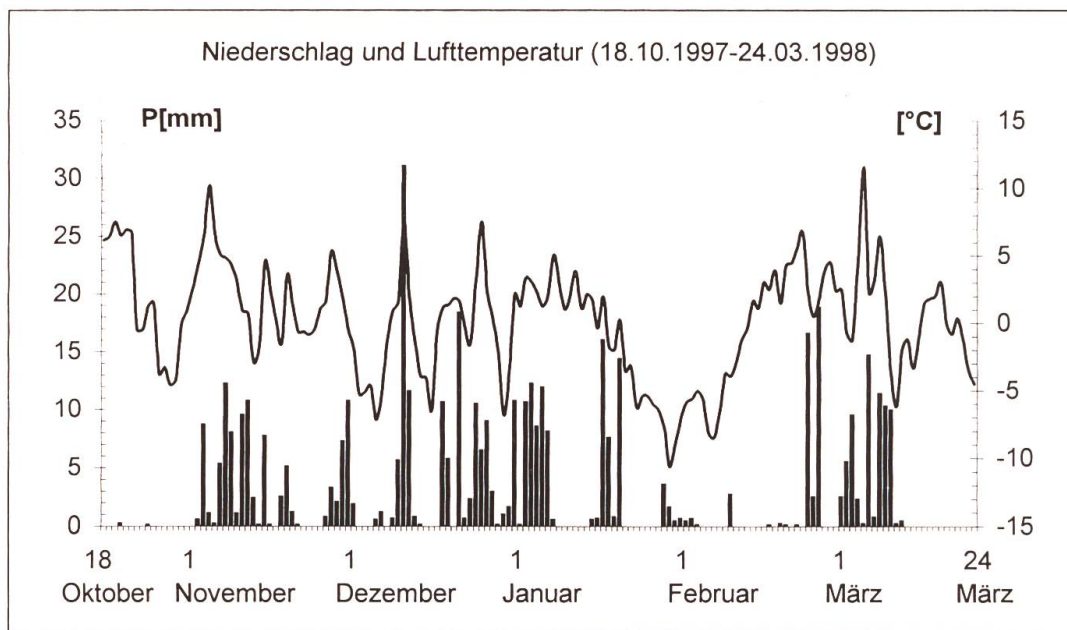


Abb. 2 Niederschlagsverteilung und Lufttemperatur während der Feldkampagne 1997/1998 im "La Tourbière au sud des Veaux". Grundlage: Tagesmittel.

Bei Tauwetter und starken Niederschlägen zeigte sich, dass Wärmetransport in Folge von Wassereintrüben im Boden eine markante Temperaturerhöhung verursachen kann. Für die gesamte Messkampagne kann insgesamt eine stetige, wenn auch nicht gleichmässige Abkühlung des Bodens um ca. 7°C aufgezeigt werden.

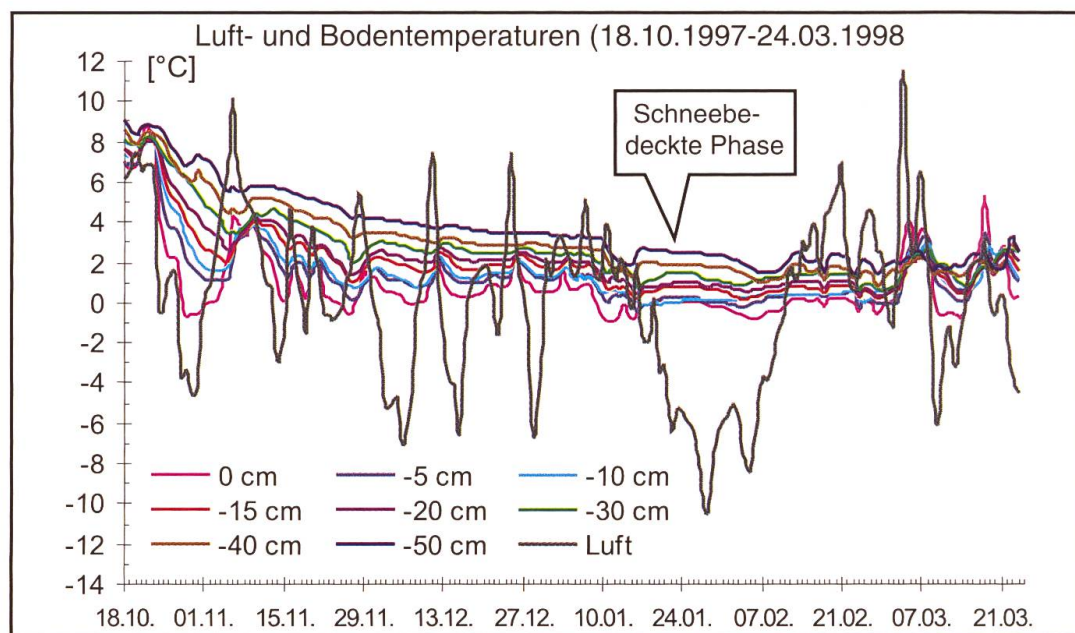


Abb. 3 Tagesmittel von Bodentemperaturen und Lufttemperatur (Messhöhe: 2.8 m) der gesamten Messkampagne im "La Tourbière au sud des Veaux". Die schwarzen Pfeile zeigen auf die Kalt- und Warmphasen und deren verzögerte Abkühlung und Erwärmung der Bodentemperaturen (Kurven geglättet).

3.4 Winterliche CO₂-Flüsse über dem Moor

Die Abb. 4 zeigt die durchschnittlichen CO₂-Flüsse im Verlaufe der Messkampagne, dargestellt als Tagesraten. Ein starker Abfall der pflanzlichen Photosynthese ist ab Dezember sichtbar und setzt sich bis zum Ende der Kampagne fort. Es zeigt sich jedoch, dass selbst im späten Winter eine Aktivität der von *Sphagnum*-Moosen dominierten Pflanzendecke messbar war, sogar unter einer 35 cm dicken Schneedecke.

Die Respirationsraten sinken während des ganzen Winters nicht unter 1.6 g CO₂ m⁻² d⁻¹ und erreichen den höchsten Wert von 2.9 g CO₂ m⁻² d⁻¹ am 30.01.1998 gegen Ende der Kampagne bei entwickelter Schneedecke. Die Respiration dominiert ab Dezember 1997 auch tagsüber deutlich über die Photosynthese und es kommt dadurch zu einem kräftigen CO₂-Fluss vom Moorboden an die Atmosphäre.

Die modellierten Tagessummen sind in Tab. 1 ersichtlich. Die Beträge sind für alle Tage der Kampagne positiv, d.h. das Moor stellte im Tagesmittel für die gesamte Zeit eine Kohlendioxidquelle dar. Mit 0.7-1.2 g CO₂ m⁻² d⁻¹ wurden die geringsten Netto-CO₂-Austräge in den Novembertagen gemessen. Die stärksten CO₂-Austräge mit Beträgen von 2.3-2.8 g CO₂ m⁻² d⁻¹ fanden an den letzten beiden Messtagen statt, an denen das Moor unter einer ca. 30 cm dicken Schneedecke lag. Generell sind Beträge um 2 g CO₂ m⁻² d⁻¹ ab Anfang Dezember bis zum Ende der Messkampagne anfangs Februar zu verzeichnen.

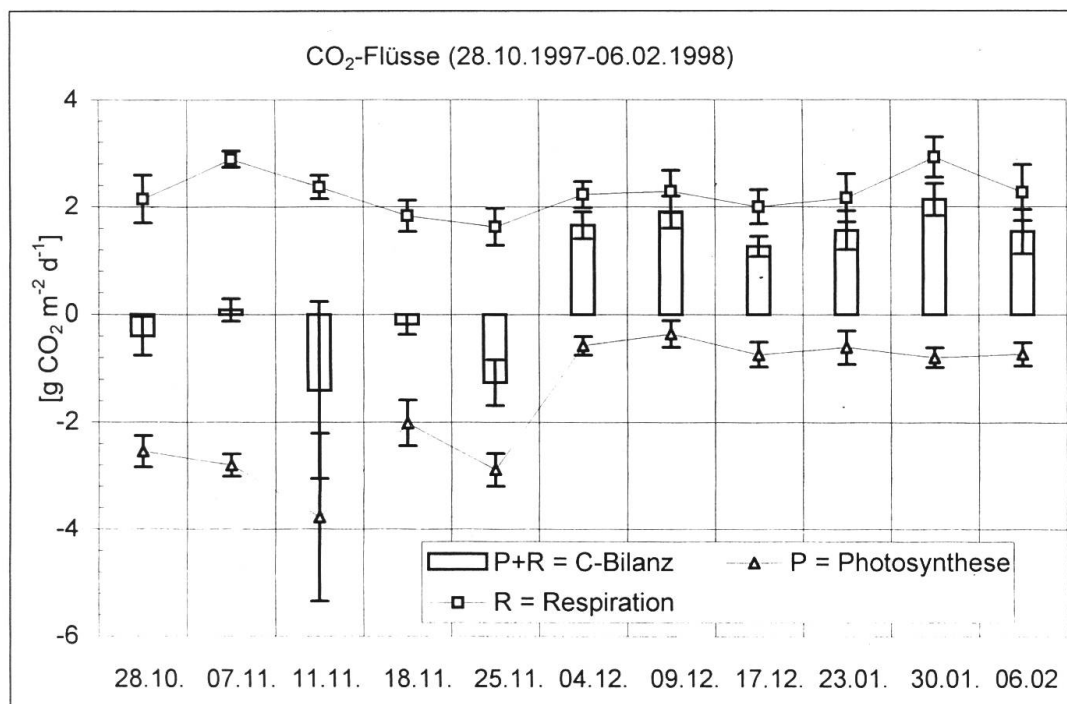


Abb. 4 Messwerte für Photosynthese, Respiration und C-Bilanz unter natürlichen Lichtverhältnissen (10:00-15:00 Uhr) im Verlaufe des Winters 1997/1998 im "La Tourbière ausud des Veaux". Mittelwerte und Standardabweichung für n = 5.

Tab. 1 Tagesbilanzen der CO₂-Flüsse sowie Tagesmittel der Lufttemperatur (2.8 m) und der Bodentemperatur (-5 cm) der Feldkampagne 1997/1998 im "La Tourbière au sud des Veaux". Die für die Modellierung der Tagesbilanzen verwendete dreistufige Einteilung der Messtage nach unterschiedlichen Strahlungsintensitäten ist ebenfalls in der Tabelle ersichtlich.

Messtag	CO ₂ -Fluss [g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹]	Lufttemp. [°C]	Bodentemp. [°C]	Tag [h]	Dämmerung [h]	Nacht [h]
28.10.1997	1.26	-3.77	3.18	8	1.5	14.5
07.11.1997	2.09	6.56	3.02	6	2	16
11.11.1997	1.06	2.96	3.29	7.5	1.5	15
18.11.1997	1.19	0.28	1.92	6.5	2	15.5
25.11.1997	0.76	-0.37	0.80	6.5	1.5	16
04.12.1997	2.07	-5.10	1.15	6.5	1.5	16
09.12.1997	2.20	0.94	0.77	6	1	17
17.12.1997	1.86	-0.65	0.93	6	1	17
23.01.1998	2.10	-5.43	0.24	4.5	-	19.5
30.01.1998	2.85	-7.18	0.00	4.5	-	19.5
06.02.1998	2.24	-6.59	-0.05	5.5	-	18.5

4 Diskussion

Viele Feld- und Laboruntersuchungen zeigen einen engen Zusammenhang zwischen Temperatur, Wassertafel und Bodenatmung in Moorböden (Funk et al. 1994, Moore & Dalva 1993, Peterson et al. 1984, Wüthrich et al. 1997, Yavitt et al. 1993, Zimov et al. 1993). Zu Beginn der Kampagne bis zum 25.11.1997, und damit während der schneefreien Zeit, korreliert der Verlauf der Respiration gut mit der Bodentemperatur und führt schliesslich mit abnehmender Temperatur zu einer minimalen Respiration von 1.63 g CO₂ m⁻² d⁻¹ (Abb. 5). In dieser Phase ist auch der Zusammenhang zwischen der mikrobiellen Aktivität und den Wassertafelschwankungen zu erkennen. Die Respirationsraten nehmen mit steigender Wassertafel (Akrotelm verkleinert sich, schlechtere Sauerstoffversorgung) bis zum 18.11.1997 deutlich ab, wobei sich die Schwankungen der Wassertafel nur in einem Bereich von 2 cm bewegen.

Die Messperiode vom 04.12.-17.12.1997 ist gekennzeichnet durch sich häufig ändernde Witterungsverhältnisse. Starke Niederschläge, teils als Schnee, führen zu kurzfristiger Schneebedeckung, und bedingt durch enorme Schwankungen der Lufttemperatur kommt es immer wieder zu Schmelzvorgängen, die ein signifikantes Absinken der Wassertafel verhindern. Die Respirationsraten schwanken in dieser Zeit nur geringfügig und korrelieren eng mit dem Verlauf der Bodentemperaturen. Eine Absenkung der Wassertafel am 09.12.1997 um 3 cm zeigt kaum Wirkung auf die Respiration. Der Einfluss der Wassertafelschwankungen auf die Aktivität der Mikroorganismen kann in dieser Phase somit als unbedeutend betrachtet werden.

Bei der Photosynthese ist die Abnahme zu Beginn der Einwinterungsphase deutlich zu erkennen (Abb. 5). Im Herbst wird der Lichtkompensationspunkt der Vegetationsdecke mit abnehmender Aktivität der Blattorgane hinaufgesetzt. Es braucht also immer höhere Photonenflüsse, damit an einem Standort Kohlendioxid

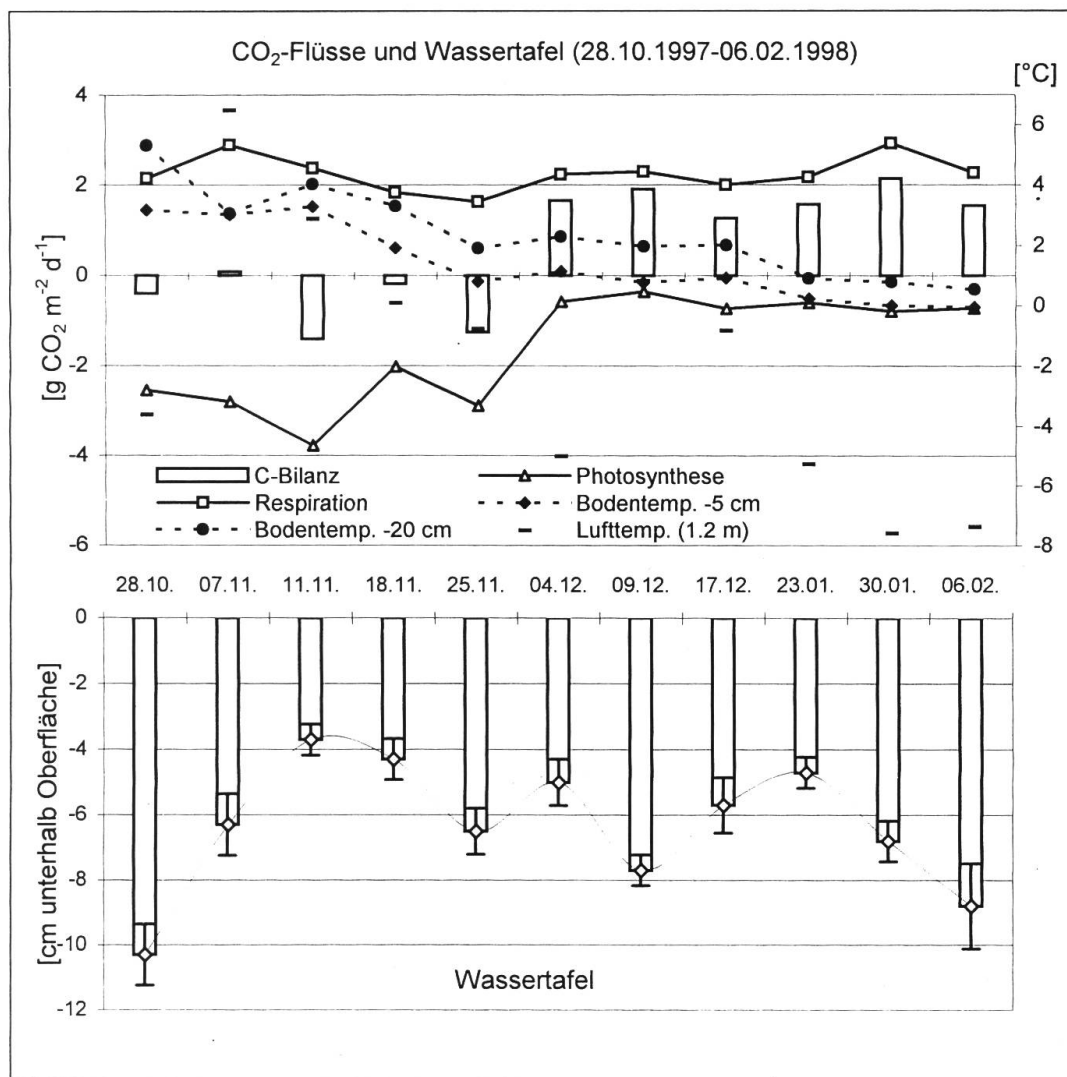


Abb. 5 Verlauf der Messwerte von Photosynthese, Respiration, Boden- und Lufttemperaturen sowie Veränderungen der Wassertafelstände während der Messkampagne 1997/1998 im "La Tourbière au sud des Veaux". Grundlage: Mittelwerte für Photosynthese/Respiration ($n = 5$) und Wassertafel ($n = 3$); Tagesmittel der Boden- und Lufttemperaturen.

assimiliert werden kann. Täglich wird somit die Zeit länger, in der am Standort CO_2 -Verluste an die Atmosphäre dominieren, bis letztlich die Photosynthese auf vernachlässigbar tiefe Werte absinkt. In der vorliegenden Studie war die Vegetation ab dem 04.12.1997 nicht mehr in der Lage, die mikrobiell verursachten respiratorischen CO_2 -Verluste zu kompensieren.

Bei der Betrachtung der Respirationsraten der letzten drei Messtage im Januar und Februar 1998, als der Moorboden von einer durchschnittlich 30 cm mächtigen Schneedecke bedeckt war, ist mit dem Absinken der Wassertafel um 4 cm ein deutlicher Anstieg der Respiration zu erkennen. Obwohl die Bodentemperaturen am 30.01.1998 nur noch zwischen $0\text{--}0.8^\circ\text{C}$ in 5–20 cm Bodentiefe lagen, ist an diesem Messtag die höchste Respirationsrate der gesamten Kampagne zu verzeichnen. Ein zu dieser Zeit optimales Angebot an abbaubarem organischem Material und die durch das Absinken der Wassertafel bessere Sauerstoffversorgung dürften für die erhöhte Aktivität der Mikroorganismen verantwortlich sein.

Der Effekt der Selbsterwärmung des Torfkörpers, wie er auch von *Küster* (1990) beschrieben wird, konnte während der gesamten Messkampagne 1997/1998 nicht beobachtet werden. Wahrscheinlich war an allen Messtagen die mikrobielle Aktivität und die Isolation durch die Schneedecke zu gering, um diesen Effekt auslösen zu können.

CO₂-Flussmessungen in Mooren von Yavitt in West Virginia und Maryland (beide um 39° N, 79° W) ergaben Netto-CO₂-Flüsse während des Winters, die erstaunlicherweise ziemlich gut mit den von uns gemessenen Werten im Jura übereinstimmen. Auch *Zimov et al.* (1993) gibt für ungefrorene Torfgebiete über Permafrost in der sibirischen Tundra winterliche CO₂-Verluste zwischen 0.2-2.1 g CO₂ m⁻² d⁻¹ an. Die Daten der Jurakampagne können somit durchaus mit Forschungsergebnissen in borealen, arktischen und subarktischen Zonen in Bezug gesetzt werden.

5 Fazit

Die Untersuchungen der CO₂-Flüsse im “La Tourbière au sud des Veaux” haben gezeigt, dass im Winter selbst bei tiefen Bodentemperaturen eine klar messbare mikrobielle Aktivität aufrechterhalten bleibt und zu einer relevanten CO₂-Abgabe an die Atmosphäre führt.

Die im Jura gemessenen CO₂-Flüsse zeigen für alle Messtage im Winter 1997/1998 eine positive C-Bilanz. Das Moor fungiert somit über etwa vier Monate als C-Quelle. Es ist bekannt, dass heute die Moore in unseren Breiten nur ein geringes jährliches Wachstum aufweisen und meist sogar am Degradieren sind. Betrachtet man nun die winterlichen CO₂-Flüsse im “La Tourbière au sud des Veaux”, die selbst durch die Schneedecke hindurch deutlich messbar sind und je nach Einsetzen der Einwinterungsphase auch merklich höher sein können (siehe *Studer*, in Bearbeitung), wird verständlich, dass sich Moore in einem sehr empfindlichen Gleichgewicht befinden, für welches die Art der Einwinterung sowie die während des Winters im Torf herrschenden hydrologischen Verhältnisse eine zentrale Rolle spielen. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine positive C-Bilanz (C-Verlust) bei günstigen Abbaubedingungen und künftig schlechteren Wachstumsbedingungen für die Pflanzen zu einem Gleichstand zwischen C-Aufnahme und C-Abgabe oder sogar zu einer in der Jahresbilanz positiven C-Bilanz führt, was einen Abbau des Moores zur Folge hätte.

In der Literatur sind nur wenige Studien zu finden, die sich mit winterlichen CO₂-Flüssen befassen. Die vorliegende Arbeit hat jedoch gezeigt, dass im Winter die Abbauprozesse im Boden keinesfalls stagnieren, sondern dass durchaus eine Aktivität der Mikroorganismen messbar ist, besonders unter günstigen Bedingungen (isolierende Schneedecke, sinkende Wassertafel, milde Bodentemperaturen).

Die CO₂-Flussraten der vorliegenden Arbeit sind gut mit Resultaten von winterlichen CO₂-Flussmessungen in nördlichen Regionen zu vergleichen und erlauben dadurch landschaftsökologische Analogieschlüsse. Basierend auf analogen Prozesszusammenhängen vermuten wir aufgrund unserer Daten, dass unter Verhältnissen mit früher Schneedeckenentwicklung und verlängerter Schnee-

bedeckungsdauer in den nördlichen Regionen mit einem vermehrten Abbau der riesigen Torflager und damit mit einer Verstärkung des "Treibhauseffektes" zu rechnen ist.

Literatur

- Brooks P.D., Williams M.W. & Schmidt S.K. 1996. Microbial activity under alpine snowpacks, Niot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry* 32: 93-113.
- Clymo R.S. 1992. Models of peat growth. *Suo* 43(4-5): 127-136.
- Funk D.W., Pullmann E.R. & Peterson K.M. 1994. Influence of water table on carbon dioxide, carbon monoxide, and methane fluxes from taiga bog microcosms. *Global Biogeochemical Cycles* 8(3): 271-278.
- Gorham E. 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* 1(2): 182-195.
- Grünig A., Vetterli L. & Wildi O. 1986. *Die Hoch- und Übergangsmoore der Schweiz – eine Inventarauswertung*. Birmensdorf, 1-62.
- Houghton R.A. 1993. Is carbon accumulating in the northern temperate zone? *Global Biogeochemical Cycles* 7(3): 611-617.
- Kelley J.J., Weaver D.F. & Smith B.P. 1968. The variation of carbon dioxide under the snow in the arctic. *Ecology* 49(2): 358-361.
- Kempel-Eggenberger C., Studer K. & Weber M. 1999. Der Stoffhaushalt im Winter in Jura Ökosystemen: Paradoxe Muster unter der Schneedecke. In diesem Heft.
- Küster E. 1990. Mikrobiologie von Moor und Torf. In: Göttlich K. (Hg.): *Moor- und Torfkunde*. Stuttgart, 262-271.
- Malmer N. & Wallén B. 1993. Accumulation and release of organic matter in ombrotrophic bog hummocks – processes and regional variation. *Ecography* 16: 193-211.
- Miller P.C., Kendall R. & Oechel W.C. 1983. Simulating carbon accumulation in northern ecosystems. *Simulation* 40: 119-131.
- Moore T.R. & Dalva M. 1993. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. *Journal of Soil Science* 44: 651-664.
- Oechel W.C., Vourlitis G. & Hastings S.J. 1997. Cold season CO₂ emission from arctic soils. *Global Biogeochemical Cycles* 11(2): 163-172.
- Peterson K.M., Billings W.D. & Reynolds D.N. 1984. Influence of water table and atmospheric CO₂ concentration on the carbon balance of arctic tundra. *Arctic and Alpine Research* 16(3): 331-335.

- Silvola J., Alm J., Ahlholm U., Nykanen H. & Martikainen P.J. 1996. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology* 84: 219-228.
- Sommerfeld R.A., Mosier A.R. & Musselman R.C. 1993. CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets. *Nature* 361: 140-142.
- Studer K.F. (in Bearb.). *Modellierung des Einflusses saisonaler Klimaänderungen (v.a. Schneedeckenentwicklung) auf die Bodenwasser- und Bodenenergiebilanz und der Rückkoppelungseffekte auf den Kohlenstoffkreislauf in dem Schweizer Jura-Hochmoor "La Tourbière au sud des Veaux"*. Arbeitstitel der Dissertation am Geographischen Institut der Universität Basel.
- Weber M. 1999. *Winterliche CO₂-Flüsse in einem Jura-Hochmoor*. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Basel, 1-94.
- Winston G.C., Stephens B.B., Sundquist E.T., Hardy J.P. & Davis R.E. 1995. Seasonal variability in CO₂ transport through snow in a boreal forest. *Biogeochemistry of seasonally snow-covered catchments* 228: 61-70.
- Wüthrich C. 1994. *Die biologische Aktivität arktischer Böden mit spezieller Berücksichtigung ornithogen eutrophierter Gebiete (Spitzbergen und Finnmark)*. Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 17, 1-222.
- Wüthrich C., Döbeli C., Schaub D. & Leser H. 1994. The pattern of carbon-mineralisation in the high-Arctic tundra (Western and Northern Spitsbergen) as an expression of landscape ecologic environment heterogeneity. *Zeitschrift für Geomorphologie. N. F. Suppl.* 97: 251-264.
- Wüthrich C. & Schaub D. 1997. Reaktionspotential unterschiedlicher Moortypen für Änderungen von Licht und Bodenwasserhaushalt. *Bulletin Bodenkundl. Ges. Schweiz* 21: 41-48.
- Wüthrich C., Möller I. & Thannheiser D. 1998. Soil carbon losses due to increased cloudiness in a high Arctic tundra watershed (Spitsbergen). In: Lewkowicz A.G. & Allard M. (eds): *Proceedings, Seventh International Conference on Permafrost*, Yellowknife, Collection Nordicana, 1165-1172.
- Yavitt J.B., Wieder R.K. & Lang G.E. 1993. CO₂ and CH₄ dynamics of a *Sphagnum*-dominated peatland in West Virginia. *Global Biogeochemical Cycles* 7(2): 259-274.
- Zimov S.A., Zimova G.M., Daviodov S.P., Daviodova A.I., Voropaev Y.V., Voropaeva Z.V., Prosiannikov S.F. & Prosiannikova O.V. 1993. Winter biotic activity and production of CO₂ in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research* 98(D3): 5017-5023.
- Zimov S.A., Davidov S.P., Voropaev Y.V., Prosiannikov S.F., Semiletov I.P., Chapin M.C. & Chapin F.S. 1996. Siberian CO₂ efflux in winter as a CO₂ source and cause of seasonality in atmospheric CO₂. *Climatic Change* 33: 111-120.