

## 4.13 Kohlendioxid und Methan im Permafrost

EVA-MARIA PFEIFFER

*Carbon dioxide and methane fluxes in permafrost affected landscapes are of special importance for estimating and modelling the global carbon budget. The importance of permafrost landscapes for gas fluxes - measured via closed chamber techniques and eddy covariant systems - will be presented. Main carbon sinks are the huge peat lands and the wet organic rich tundra sites, which are expected to become significant carbon sources in the future. The permafrost associated gas hydrates of West Siberia and the gas rich, deeper permafrost sediments of Northeast Siberia are recent and significant  $CH_4$ -sources. Studies in the permafrost region show that arctic ecosystems act as both  $CO_2$ -sink and strong  $CH_4$ -source. The strength of the different sources and sinks are still uncertain. Latter findings underline the importance of long-term flux studies for assessing the response of permafrost related ecosystems to global change and how this response will feed back to the climate system. The impact of changing permafrost conditions and the consequences for the Nordic people calls for a stronger permafrost research.*

### Klimaerwärmung und Permafrost

Die Kryosphäre – mit ihren eisbedeckten Polen, dem Meereis, vergletscherten Hochgebirgen und riesigen zirkumparktischen Dauerfrostgebieten – bestimmt über komplexe Austauschprozesse mit der Atmo-, Hydro-, Geo- und Biosphäre unser aktuelles Klima. Dieses verändert sich zunehmend z.B. durch einen globalen Temperaturabstieg von  $0,6^\circ C$  oder eine Zunahme der Niederschläge um ca. 2%. An den drastischen Änderungen haben die Treibhausgase Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Methan ( $CH_4$ ) einen wesentlichen Anteil. So erhöhte sich die  $CO_2$ -Konzentration in der Troposphäre in den letzten 200 Jahren von 280 auf 367 ppm (part per million = Teile pro Million Teile) während der Gehalt des wesentlich wirksameren Spurengases Methan (derzeitige Konzentration 1,7 ppm mit 21-fachem relativen Treibhauspotenzial) sich seit der vorindustriellen Zeit sogar mehr als verdoppelt hat (ETHERIDGE et al. 1998). Die Konzentrationen beider Treibhausgase befinden sich auf einem Niveau, wie es in den letzten 650.000 Jahren nicht erreicht wurde (SIEGENTHALER et al. 2005, SPHANI et al. 2005).

Es sind vor allem die terrestrischen Permafrostgebiete (Permafrost = Böden oder Sedimente, die für 2 Jahre und mehr in Folge Temperaturen von  $< 0^\circ C$  aufweisen) der nördlichen Hemisphäre mit ihren riesigen borealen und subarktischen Mooren, feuchten arktischen Tundren, eisreichen tieferen Sedimentabfolgen sowie den im Permafrost gespeicherten und/oder durch den Permafrost an der Freisetzung behinderten Gashydrate, die für den globalen Kohlenstoffkreislauf sowie für die Freisetzung und Festlegung von  $CO_2$  und  $CH_4$  von Bedeutung sind (Abb. 4.13-1). Trotz intensiverer Forschung in den letzten 15 Jahren sind die Prognosen und Abschätzungen zur Entwicklung der Treibhausgasfreisetzung im Permafrost immer noch strittig. Bisherige, durch Feldmessungen gestützte Hochrechnungen und Modellierungen konzentrierten sich vor allem in Alaska und Skandinavien, während für Kanada und Sibirien nur wenige regionale Untersuchungen vorliegen (zusammengestellt in KUTZBACH 2005). Im Folgenden soll an ausgewählten Beispielen die Besonderheit der mit Permafrost assoziierten Spurengasemissionen und ihre Bedeutung innerhalb des sich erwärmenden Erdsystems aufgezeigt werden.

### Permafrost und Kohlenstoffflüsse

Permafrost nimmt ca. 25% der Landoberfläche der Nordhalbkugel ein (ca. 23 Mio.  $km^2$ ) und kann Mächtigkeiten von mehr als 1.000 m erreichen. Nach seinem Flächenanteil im Nord-Süd-Gefälle wird er in kontinuierlichen, diskontinuierlichen und fleckenhaften Permafrost eingeteilt (zur Verbreitung siehe auch Abb. 4.13-2). So genannter »warmer Permafrost« (Bodentemperaturen höher als  $-2^\circ C$ , aber unter  $0^\circ C$ ) reagiert schnell auf Temperaturerhöhungen und ist besonders anfällig für Permafrostdegradation.

Weltweit sind etwa 455 Pg (1 Petagramm, Pg =  $10^{16}$  g) organischer Bodenkohlenstoff (SOC = Soil Organic Carbon) in Permafrost beeinflussten Ökosystemen festgelegt (Abb. 4.13-3). Das entspricht etwa 1/3 des Pools an

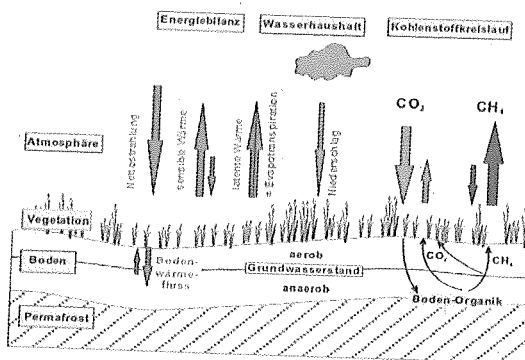


Abb. 4.13-1: Wechselwirkungen im gekoppelten System Spurengas-, Wasser- und Energieflüsse in Permafrost. Das Schema zeigt die die wesentlichen Steuergrößen und Wechselwirkungen in Permafrost beeinflussten Landschaften (KUTZBACH 2005).

E-Mail-Adresse: empfeiffer@ifb.uni-hamburg.de

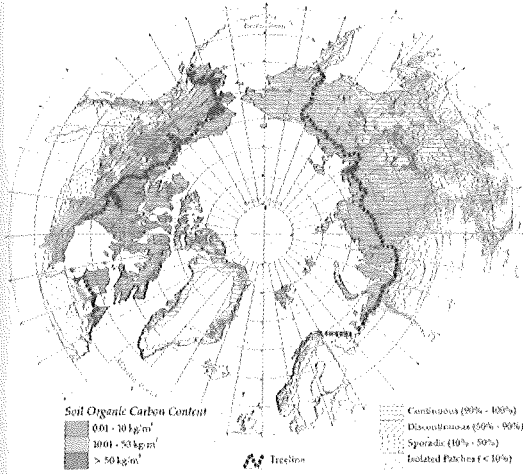


Abb. 4.13- 2: Permafrostverteilung und Abschätzung der gespeicherten Mengen an SOC in kg/m<sup>2</sup> (Quelle: NCSCD 1999).

organischem Kohlenstoff unserer Erde. Allein in den arktischen, feuchten Tundren sind etwa 14% des globalen organischen Bodenkohlenstoffs (POST et al. 1982) zugänglich, d.h. oberflächennah, gespeichert und stehen über die Prozesse der Auftauzone im aktiven Austausch mit der bodennahen Atmosphäre. Zusätzlich sind erhebliche, noch nicht verlässlich bilanzierte Mengen an SOC in den tieferen eisreichen und torfreichen Permafrostsedimenten festgelegt. Davon sind allein ca. 72 Pg C in den westsibirischen Mooren und ca. 192 Pg C in den arktischen Tundren oberflächennah festgelegt (SMITH et al. 2004, BILLINGS 1987).

Weitere bedeutende C-Quellen stellen die mit dem Permafrost assoziierten CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Clathrate dar. Nach bisherigen groben Schätzungen sind hier ca. 10.000 Tg Methangashydrat gespeichert (KVENVOLDEN 1993). Es wird diskutiert, dass es in Folge einer Abnahme der

Permafrostmächtigkeit und der damit verbundenen geänderter Temperatur- und Druckbedingungen zur verstärkten Methanfreisetzung kommt. Das Ausmaß und die Rückkopplung für die Klimaentwicklung sind bisher jedoch nur schwer abschätzbar.

### CO<sub>2</sub>-Flüsse im Permafrost

Permafrostgebiete mit ihren an die besonderen und extremen Bedingungen angepassten Biozöosen sind geologisch gesehen C-Senken. Die Kohlendioxidflüsse (mit den Teilprozessen Festlegung-Umsatz-Freisetzung) im Permafrost werden im Wesentlichen durch die Wasser- und Energieflüsse am Standort gesteuert: niedrige Temperaturen, hohe Wasserstände durch stauenden Permafrost im Untergrund, kurze Vegetationszeiten, niedrige mikrobielle Aktivitäten und Migration von Wasser und gelösten Stoffen entlang thermischer Gradienten bestimmen die aktuelle Senkenstärke für CO<sub>2</sub>. Daten für eine flächendeckende Bilanzierung und Modellierung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung in Sibirien sind immer noch unzureichend (ZAMOLODCHIKOV & KARELIN 2001). Einzelne regionale Abschätzungen z.B. für Moorgebiete in Westsibirien (mit einem Flächenanteil von 600.000 km<sup>2</sup>) zeigen, dass seit den letzten 11,5 ka atmosphärisches CO<sub>2</sub> mit durchschnittlich 6,1 Tg C pro Jahr festgelegt wurde. Diese Permafrost beeinflussten Moore speichern bis zu 26% des terrestrischen organischen Kohlenstoffs (SMITH et al. 2004). Feldmessungen zur Abschätzung von CO<sub>2</sub>-Flüssen in feuchten Tundren Nordostsibiriens, ergeben einerseits Werten zwischen -37,4 bis -103 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (ZAMOLODCHIKOV & KARELIN 2001, ZAMOLODCHIKOV et al. 2003) und andererseits Freisetzungsraten von +51 bis +62 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (ZIMOV et al. 1993, CORRADI et al. 2005). Diese Daten verdeutlichen die Unsicherheiten hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Senken und -Quellenstärke dieser Permafrost beeinflussten Gebiete.

Aktuelle Eddy-Kovarianz-Messungen der CO<sub>2</sub>-Flüsse in Nordostsibirischen Lena-Delta zeigen für Tundren zwar eine geringe CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Frühjahr und deutliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Herbst (siehe Abb. 4.13-4) mit einer temporären Quellstärke (ausgedrückt als kumulative NEE = Netto Ecosystem Exchange) von maximal +14 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. Im Sommer (Juni–August) jedoch wurde Kohlenstoff mit Raten von ca. -119 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> festgelegt. In der Gesamtbilanz sind auch diese feuchten, polygonalen Tundrenböden jährliche CO<sub>2</sub>-Senken mit Werten von -71 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (KUTZBACH 2005).

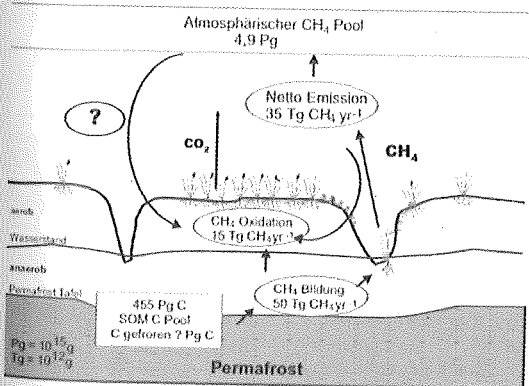


Abb. 4.13- 3: C-Pools und Spurengasflüsse im Permafrost, verändert nach VOURLITIS & OECHEL 1997.

### Methan und Permafrost

Die Methanquellen der feuchten und kohlenstoffreichen Permafrostgebiete können auf der lokalen und regionalen Skala z.T. gut bilanziert werden. Im Zuge der anaeroben

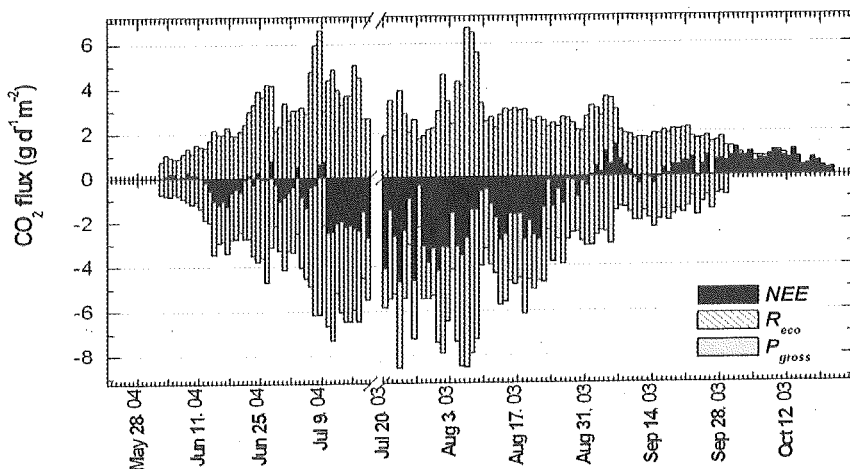


Abb. 4.13-4: CO<sub>2</sub>-Flüsse in einer polygonalen Tundra des Lena-Deltas in g CO<sub>2</sub>/(Tag×m<sup>2</sup>). CO<sub>2</sub>-Budget Komponenten: NEE = CO<sub>2</sub> Net Ecosystem Exchange, R<sub>eco</sub> = modellierte Ecosystem Respiration, P<sub>gross</sub> = modellierte Brutto-Photosynthese (KUTZBACH 2005).

C-Umsätze in Böden und Sedimenten wird organische Substanz von methanogenen Archaeen zu Methan reduziert (siehe Schema in Abb. 4.13-5). Aus den zirkumpolaren feuchten Tundren wurden mittels closed-chamber-Messungen Freisetzungsraten von 3 bis 360 mg CH<sub>4</sub>/(Tag×m<sup>2</sup>) gemessen (Zusammenstellung in PFEIFFER 1998). Aber nicht alles in den reduzierten Bodenhorizonten gebildete Methan erreicht die Atmosphäre. Etwa 70–80% des gebildeten Methans wird in den aeroben Zonen der Auftauzone (*active layer*) wieder oxidiert, so dass nur ein geringer Anteil tatsächlich emittiert wird. Abgesicherte Schätzungen der Oxidationsleistungen methanoxidierender Bodenbakterien und damit zur Senkenstärke von Permafrostböden fehlen bisher. Ältere Schätzungen geben für Tundren Oxidationstärken von 15 Tg CH<sub>4</sub> pro Jahr an (VOURLITIS & OECHEL 1997).

Abb. 4.13-6 zeigt beispielhaft für die polygonale

Feuchttundra des Lena Deltas die verschiedenen punktuellen Methanquellen dieser Permafrostlandschaft. Besonders deutliche CH<sub>4</sub>-Quellen sind die feuchten Zentren der polygonalen Netze mit Freisetzungsraten von maximal 119 mg/(Tag×m<sup>2</sup>). Dagegen zeigen die trockenen Polygonränder nur geringe Emissionswerte von ca. 8 mg/(Tag×m<sup>2</sup>). Sie sind in trockenen Phasen der Vegetationsperiode auch CH<sub>4</sub>-Senken. Hohe Methanmengen werden ebenfalls in Seen gebildet und über Pflanzen direkt freigesetzt (KUTZBACH et al. 2004). Gesteuert werden die mikrobiellen Prozesse in erster Linie durch das Temperatur- und Wasserregime am Standort wobei die beiden beteiligten Mikroorganismengruppen unterschiedlich an die Temperatur- und Feuchtebedingungen angepasst sind.

Einzelne Felduntersuchungen zu Spurengasgehalten in tieferen, eisreichen Permafrostabfolgen liegen für Nordostsibirien vor. Im Bereich des Indigirka-Kolyma-

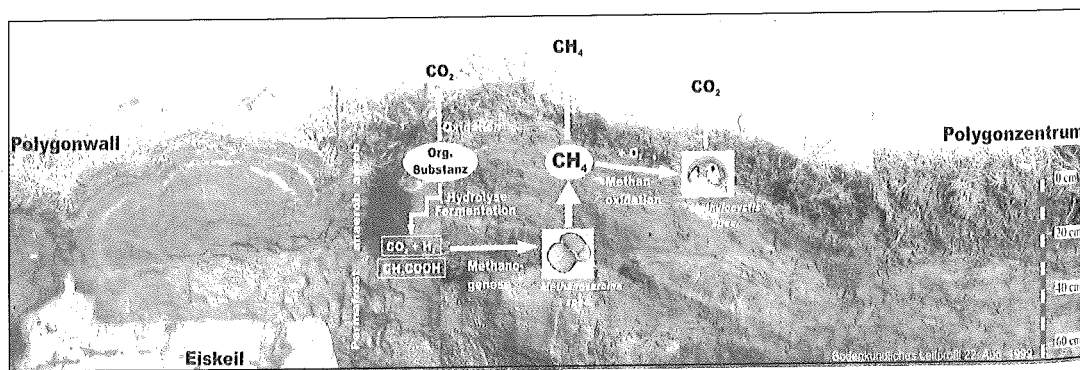


Abb. 4.13-5: Methanflüsse im Permafrost. Querschnitt durch ein Eiskeilpolygon mit angeschnittenem Polygonwall und Polygonzentrum des Lena-Deltas. Die Abbildung zeigt die beiden wichtigsten mikrobiell gesteuerten Prozesse im Methankreislauf – Methanbildung und Methanoxidation – im Oberboden der polygonalen Tundra.

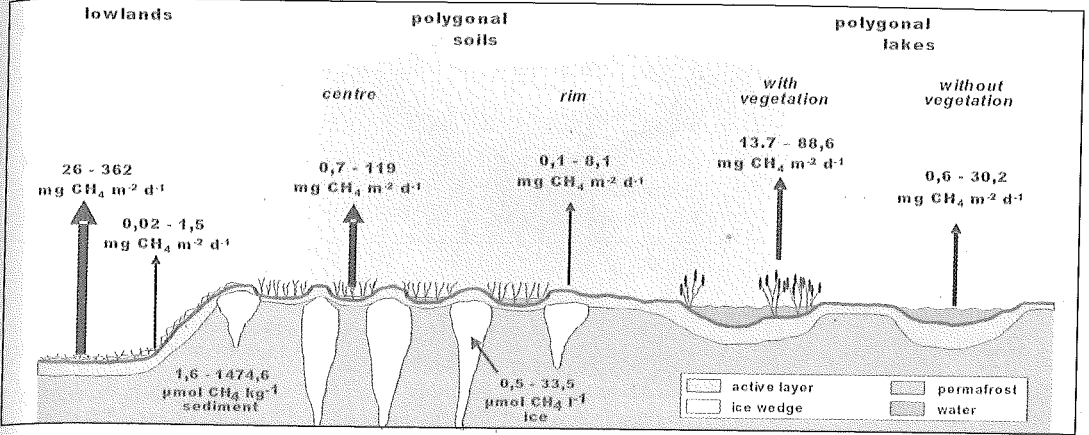


Abb. 4.13-6: Methanfreisetzung aus verschiedenen Landschaftsbereichen in Permafrost am Beispiel des Lena-Deltas. Angaben in mg CH<sub>4</sub>/(Tag·m<sup>2</sup>) (nach PFEIFFER et al. 2002, WAGNER et al. 2003, SPOTT et al. 2003, KUTZBACH et al. 2003).

Tiefelandes konnten in bis zu 50 m tiefen Permafrostbohrungen hohe Methan-Gehalte gemessen werden (siehe Abb. 4.13-7). Dieses eingefrorene Methan kann in Folge steigender Temperaturen und verstärkter Degradation (Zunahme der sommerlichen Auftauzone, Erwärmung des Permafrostes, Abnahme der Permafrostmächtigkeit) freigesetzt werden. Erste grobe Abschätzungen ergeben eine Methanfreisetzung aus tiefen Permafrostabfolgen der Küstenabschnitte des Kolyma-Indigirka-Tieflandes von 7.500 t CH<sub>4</sub> (RIVKINA 2005).

### Klimaerwärmung und Spurengasfreisetzung aus dem Permafrost

Die Wirkung von Klimaänderungen auf die künftige Entwicklung des Permafrostes können derzeit nur grob abgeschätzt werden. Dabei wird für die Permafrostgebiete eine wesentlich schnellere Erwärmung mit einem erheblicheren Ausmaß als in anderen Regionen der Erde erwartet (POLYAKOV et al. 2003). Für die Permafrost beeinflussten Ökosysteme, die sich in Jahrtausenden an die extremen Bedingungen des Permafrostes angepasst haben, muss mit

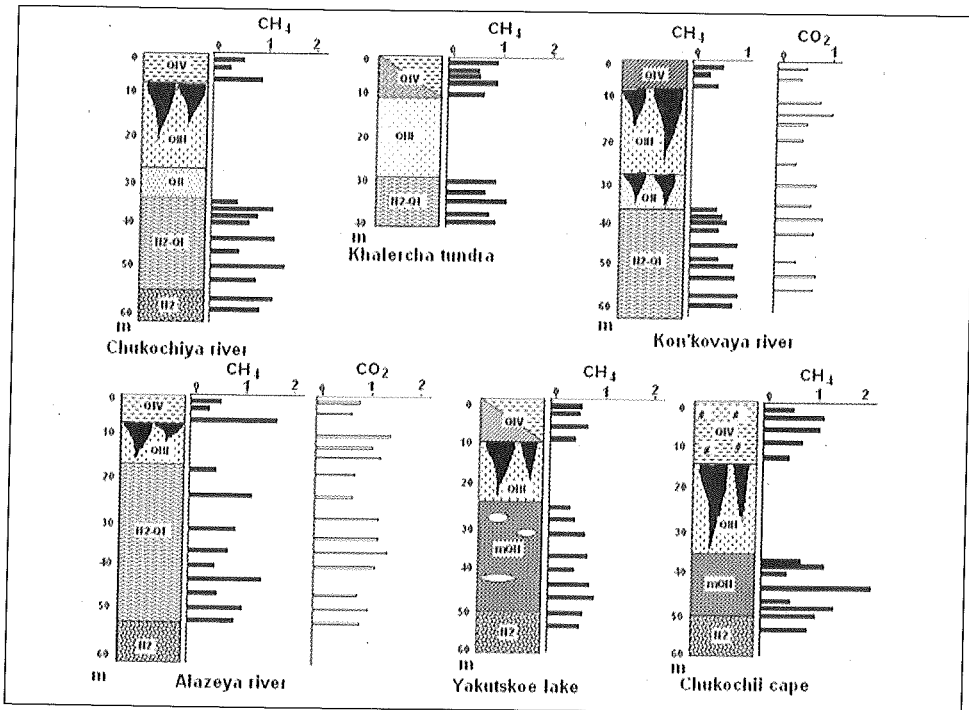


Abb. 4.13-7: CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Gehalte (mmol/kg) im eisreichen tieferen Permafrostsedimenten des Kolyma-Indigirka-Gebiets in Nordostsibirien (RIVKINA 2005).

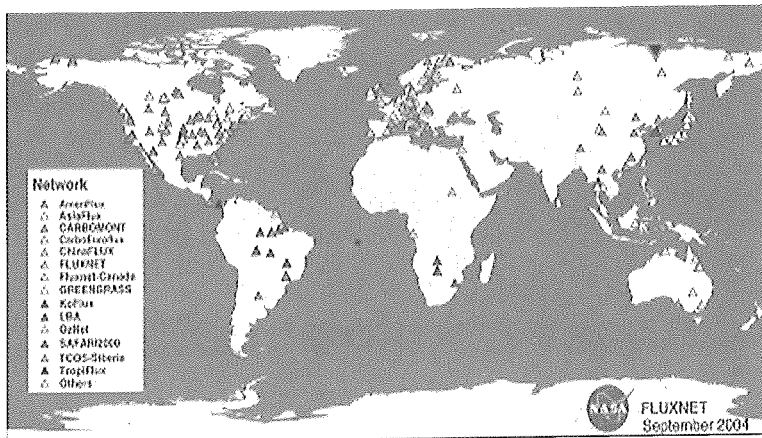


Abb. 4.13-8: Verteilung des internationalen Messnetzes FLUXNET zur Ermittlung von Spurengasfreisetzung. Die Verteilung zeigt die Unterrepräsentation der riesigen Permafrostflächen der arktischen Regionen, insbesondere in Sibirien. Hier besteht derzeit der größte Forschungsbedarf (verändert nach Cook et al. 2004).

gravierenden Artenverschiebungen gerechnet werden. Die Wirkung von Klimawärmung auf den C-Haushalt der Permafrostböden kann bisher nur grob abgeschätzt werden (SCHARPENSEEL & PFEIFFER 1998).

Obwohl seit langem Permafrost als bedeutende Quellen für klimarelevante Spurengase bekannt ist, fehlen immer noch repräsentative, durch Feldmessungen abgesicherte Abschätzungen und langzeitige Prozessstudien zum Ist-Zustand der Kohlenstoffquellen- und -senkenstärken im Permafrost. Vorliegende Befunde aus Messreihen und Modellen bestätigen das Temperatur- und Wasserregime als steuernde Größen der Spurengasemission aus dem Permafrost. Zur Wirkung von temperaturbedingten Klimaveränderungen auf kalte Böden, eis- und gasreiche Sedimentabfolgen, Vegetations- und Frostmuster-Komplexe, Gewässerkörper sowie die Hydrologie im Landschaftsmaßstab gibt es bisher kaum gesicherte Daten. Eine verstärkte Spurengasfreisetzung erhöht den derzeitigen Erwärmungstrend. Die Temperatur bedingte Erwärmung des Permafrostbodens führt zu verstärktem Bodenabtrag, zu Hanginstabilitäten und verstärkter Erosion der eisreichen, tieferen Sedimente an arktischen Küsten und ihres Hinterlandes. Klimaerwärmung im Permafrost und der damit einhergehenden drastischen Umweltveränderungen werden erheblichen Einfluss auf die nordische Bevölkerung und ihre gewachsen Lebensstrukturen haben. Hier besteht besondere Verantwortung für künftige Generationen.

### Schlussfolgerungen

In den letzten 2 Jahrzehnten konnten gesicherte Daten zur natürlichen  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Emission auf lokaler und z. T. regionaler Ebene ermittelt werden. Kenntnisdefizite bestehen weiterhin hinsichtlich der verstärkten Freisetzung dieser klimarelevanten Spurengase im Zuge der durch Klima- und Umweltveränderungen bedingten Permafrost-Degradationen. Verbesserte Abschätzungen der Gesamt-C-Pools im Permafrost - insbesondere in den Böden und tieferen Sedimente - sind notwendig, um gesicherte  $\text{CO}_2$ - und Methanfreisetzungsraten aus arktischen Mooren, Permafrostsedimenten und den darunter liegenden geogenen Gaslagerstätten hochrechnen und modellieren zu können. Vorhandene internationale Messnetze zeigen Kenntnislücken im Bereich des sibirischen und kanadischen Permafrostes (siehe Abb. 4.13-8). Ebenso unzureichend sind die Daten zur Abschätzung der anthropogenen Spurengasemission in Folge verstärkter Nutzung der Permafrostgebiete, z.B. durch verstärkte Gasförderung oder künftige Gashydratausbeutung. Strategien zur Reduzierung klimarelevanter Spurengase aus den Permafrostgebieten müssen auf der Basis wissenschaftlich abgesicherter Mess- und Modellierungsdaten entwickelt werden. Die sensiblen Permafrostgebiete Sibiriens stellen Schlüsselregionen für künftige regionale und globale Abschätzungen dar ♦