

Terrestrische Habitate in Arktis und Antarktis

Botanische, mikrobiologische und bodenkundliche Forschungen am Institut für Polarökologie (IPÖ)

von Burkhard Schroeter¹, Manfred Bölter² und Ludger Kappen³

Zusammenfassung: Bereits mit der Einrichtung des Instituts wurde unter der Leitung von L. Kappen die terrestrisch-biologische Forschung in den Polargebieten begonnen. Erste Untersuchungsgebiete lagen sowohl in der maritimen als auch der kontinentalen Antarktis. Die Forschungen konzentrierten sich auf die Verbreitung, Ökologie und Physiologie von Flechten und Moosen. Ergänzend kamen Untersuchungen zur Bodenkunde und der mikrobiellen Aktivität der Böden hinzu. Die Erfassung der Umwelteinflüsse auf die Produktion der Flechten wurde so weit vorangetrieben, dass mit Hilfe von Datenübertragungen ganzjährige Aufzeichnungen der ökologischen Parameter an einem Standort in der maritimen Antarktis (Livingston Island) verfolgt werden konnten. In der Arktis (Kanada und Sibirien) konnten später botanisch-mikrobiologische Untersuchungen, Stoffumsätze und Bodenentwicklungen in Tundren näher beschreiben. Im Rahmen eines EU-Projekts in Nord-Skandinavien wurden in die naturwissenschaftlichen Betrachtungen auch Umweltveränderungen im Hinblick auf Landnutzung und soziologische Fragestellungen einbezogen.

Abstract: Terrestrial-biological research at the IPÖ started with its foundation when field research under L. Kappen was performed in the maritime and continental Antarctic. These projects focussed on the physiology, ecology and distribution of lichens and mosses. Research strands on soil activity and soil microbial activity were then complemented. Measurements of environmental control variables on photosynthesis were refined to a degree that data transfer allowed year-round data monitoring of ecological parameters at a research site (Livingston Island) in the maritime Antarctic. Research in Arctic environments (Canada and Siberia) described botany and soil related microbiology in order to analyse nutrient fluxes and soil developments in these tundra environments. An international EU-Programme in northern Scandinavia fused natural sciences with environmental changes in perspective of soil management and sociological aspects.

EINLEITUNG

Der terrestrische Arbeitsbereich am Institut für Polarökologie der Universität Kiel umfasste eine botanische und eine mikrobiologische Arbeitsgruppe. Die ersten Projekte der terrestrischen Arbeitsgruppe fokussierten sich auf Vorkommen, Verbreitung und Ökophysiologie von Flechten und Moosen ab 1984 in der maritimen Antarktis auf King George Island und ab 1985 in der kontinentalen Antarktis in Wilkes Land. Neben Bestandsaufnahmen der Vegetation standen hierbei Untersuchungen zu den mikroklimatischen Lebensbedingungen und der Photosyntheseleistung von Flechten im Freiland (KAPPEN et al. 1986, 1987, 1988, 1990) im Mittelpunkt der Arbeiten.

In Zusammenarbeit mit spezialisierten Firmen und dem Institut für Angewandte Physik an der CAU wurden Messgeräte speziell für den Einsatz in der Antarktis neu entwickelt (SCHROETER et al. 1991). Diese Geräte wurden ab 1987 von B. Schroeter auf King-George-Island und später auf Livingston Island sowie in Granite Harbour, Süd-Victoria-Land, eingesetzt. Diese Arbeiten involvierten L. Kappen und B. Schroeter und in diesem Rahmen entstanden Diplomarbeiten und Dissertationen über Primärproduktion und Wasserhaushalt von Flechten der maritimen Antarktis (SCHROETER 1991, KAPPEN & SCHROETER 2002) sowie über die Photosyntheseleistung ausgewählter Flechten der Antarktis und spanischer Hochgebirgsstandorte (FALK 1990). Gleichzeitig liefen Modellierungen der Primärproduktion und Analysen antarktischer Pflanzengemeinschaften (BÖLTER et al. 1989, KAPPEN et al. 1988, 1991).

Zur Ökophysiologie der weit verbreiteten Flechtenart *Cetraria nivalis* wurden vergleichende Untersuchungen an arktischen und temperierten Populationen durchgeführt (SCHIPPERGES 1994). Struktur und Interaktion der Kryptogamenvegetation in der maritimen Antarktis und eine Analyse zur Rolle der Schneebedeckung für die Kryptogamenvegetation waren Themenfelder in der Antarktis (SCHULZ 2000, WINKLER 2000). Einen Schwerpunkt der Arbeiten bildete die ganzjährige Datenerfassung der abiotischen Faktoren und der davon abhängigen Photosyntheseleistung von Flechten in der Antarktis. Diese Arbeiten wurden 1991 begonnen. Der gewonnene langjährige Datensatz kann eine wichtige Grundlage für die Abschätzung der Folgen von Klimaveränderungen auf die terrestrischen Lebensräume in der Antarktis bilden. Die Arbeiten wurden in den folgenden Jahren zusammen mit weiteren Mitarbeitern und ausländischen Kollegen, wie E. I. Friedman, USA, T. G. A. Green, Neuseeland, H. Kanda, Japan, A. Olech, Polen, J. Redon, Chile, L. G. Sancho, Spanien, R. I. L. Smith, UK, R. D. Seppelt, Australien und R. Türk, Österreich, durchgeführt.

Eine Erweiterung stellte in den folgenden Jahren die Bodenmikrobiologie mit Untersuchungen zur mikrobiellen Aktivität in Böden und an Kryptogamen aus der kontinentalen und maritimen Antarktis (BÖLTER 1993a) dar, woraus eine eigene Arbeitsgruppe entstand. Forschungen zur Mikrobiologie und Biochemie antarktischer Böden wurden neue Schwerpunkte (BÖLTER 1989, 1990a, b). Bodenkundliche Arbeiten kamen hinzu, sie bildeten den Ausgangspunkt für vielseitige weitere Untersuchungen antarktischer und arktischer Böden und ihrer Mikrobiologie. Diese intensive Kooperation mit den Kollegen aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der

¹ Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik IPN, an der Universität Kiel, Olshausenstraße 62, D-24118 Kiel.

² Institut für Ökosystemforschung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Olshausenstraße 75, D-24118 Kiel.

³ Neue Straße 14, D-37586 Dassel.

Manuskript eingereicht 5. August 2013; überarbeitet und zum Druck angenommen am 8. November 2013.

Universität Kiel erweiterte die bodenkundlichen Forschungen zur Bodengenese als auch zum Verhalten organischer Substanz (BEYER et al. 1997a, b, BLUME et al. 1996, 1997, KUHN 1997).

Die Kohlenstoffdioxidflüsse in der sibirischen Tundra (Sommerkorn 1998) waren Thema in einem BMBF-Verbundprojekt, ebenso wie die Mikrobiologie von sibirischen Permafrostböden (SCHMIDT 1999), die ökologische Rolle von Gefrier- und Tauprozessen im sibirischen Permafrost (MÜLLER-LUPP 2001) und die diesem Prozess folgende mikrobielle Aktivität (SCHULZ 1999, SOETHE 2000). Daneben ist die Teilnahme von M. Bölter an der Schwedisch-Kanadischen Arktisexpedition TNW99 (DANELL & ANGERBJÖRN 1999) zu nennen.

Eine umfassende Zusammenstellung der Ergebnisse der bodenkundlichen und bodenbiologischen Arbeiten in der Antarktis wurde in Kooperationen mit Kollegen aus Polen, Neuseeland, Australien und Japan in Angriff genommen. Die bodenkundlichen Untersuchungen (Prof. Blume, PD Beyer) ergaben neue Erkenntnisse zur Taxonomie und Genese der antarktischen Böden sowie Darstellungen der Boden- und Pflanzengesellschaften und ihrer Funktionen in Bereichen der kontinentalen und maritimen Antarktis bei den Stationen Casey (Australien), Syowa (Japan) und Arctowski (Polen) (BEYER & BÖLTER 2002).

Die terrestrisch-mikrobiellen Arbeiten am IPÖ wurden seit 1996 dann mit dem Schwerpunkt arktischer Böden weitergeführt. Die Mitarbeit (M. Bölter) in dem EU-Gremium ARTERI zur Koordinierung europäischer Forschungsaktivitäten mündete in dem EU-Projekt RENMAN (Koordination B. Forbes, Rovaniemi). Eine Kieler Gruppe aus Bodenkundlern (Prof. Dr. Horn), Ökologen (Prof. Dr. Müller) und Medizinern (PD Dr. Höller) unter Koordination des IPÖ war hieran aktiv beteiligt. Es war ein Projekt zu Landnutzungsänderungen, ökologischen und soziologischen Veränderungen in Nordskandinavien (Forbes et al. 2006). In Kiel entstanden in diesem Projekt drei Dissertationen (BURKHARD 2004, KEMPER 2004, PETH 2004).

LEBEN UNTER EXTREMBEDINGUNGEN

Biodiversität in terrestrischen Lebensräumen der Antarktis

Die eisfreien terrestrischen Lebensräume in der Antarktis werden von relativ wenigen Organismengruppen besiedelt. Als photosynthetisch aktive Organismen kommen vor allem Kryptogamen wie Flechten, Moose, Lebermoose und Algen und darüber hinaus auch Cyanobakterien vor. Daneben finden sich in der Antarktis auch zwei natürlich vorkommende Blütenpflanzen: Die antarktische Perlwurz *Colobanthus quitensis* und die antarktische Schmiele *Deschampsia antarctica*. Ihr Verbreitungsgebiet ist auf die maritime Antarktis begrenzt und erstreckt sich von den South Orkney Islands bis zu den Terra Firma Islands an der süd-westlichen Antarktischen Halbinsel bis ca. 68° 42' S. Hier kommen sie – oft vergesellschaftet in größeren Kolonien – vor allem in Meeresnähe vor.

Als Primärproduzenten sind jedoch Flechten, Moose und Lebermoose von weitaus größerer Bedeutung (Abb. 1). In der maritimen Antarktis finden sich ausgedehnte Flechtenheiden (*Himantormia lugubris*-*Usnea aurantiaco-atra*-Gesellschaft),

die eine substanzielle Biomasse von bis zu 2000 g Trockengewicht pro m² aufbauen und eine Ausdehnung von mehreren hundert Quadratmetern erreichen können (KAPPEN 1993). Insgesamt konnten für die Antarktis mehr als 380 Flechtenarten, mindestens 106 Moosarten sowie 11 Lebermoosarten nachgewiesen werden (OVSTEDAL & SMITH 2001, OCHYRA et al. 2008). Die überwiegende Zahl der Arten findet sich in der maritimen Antarktis (>350 Flechtenarten, >87 Moosarten, 11 Lebermoose), während für die im Sommer eisfreien terrestrischen Lebensräume in der kontinentalen Antarktis 88 Flechtenarten, 28 Moosarten und nur eine Lebermoosart nachgewiesen werden konnten (OVSTEDAL & SMITH 2001, OCHYRA et al. 2008).

Zwei vernachlässigte Probleme sind bei den Angaben zu Vegetation und insbesondere zu Artenzahlen zum einen die oft nur lückenhafte Beprobung der terrestrischen Lebensräume und zum anderen die häufig unzureichende taxonomische Aufar-

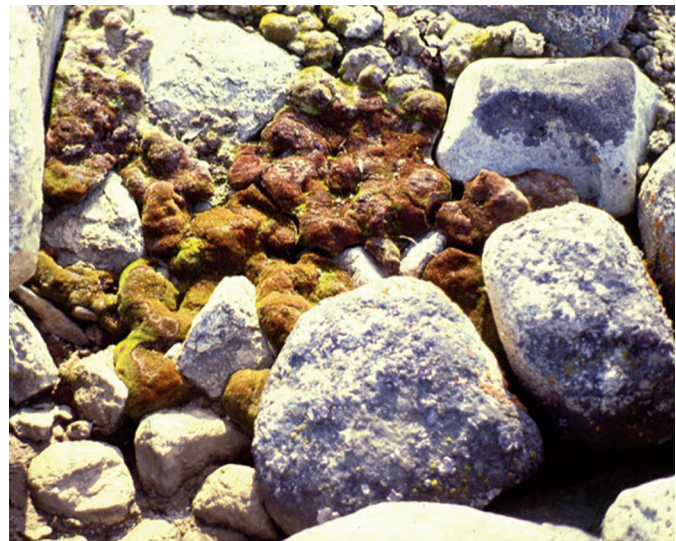


Abb. 1: *Usnea aurantiaco-atra* (oben) auf Livingston Island, maritime Antarktis und *Ceratodon purpureus* (unten) in Granite Harbour, kontinentale Antarktis. (Fotos: B. Schroeter).

Fig. 1: *Usnea aurantiaco-atra* (top) at Livingston Island, maritime Antarctic and *Ceratodon purpureus* (bottom) at Granite Harbour, continental Antarctic. (Photos: B. Schroeter).

beitung der Aufsammlungen. Die Taxonomie ist besonders bei Flechten oftmals schwierig und erfordert Spezialisten.

Exemplarisch soll hier von je einem Standort in der maritimen und der kontinentalen Antarktis berichtet werden, die über viele Jahre das Ziel botanisch-ökophysiologicaler Expeditionen der Kieler Arbeitsgruppen waren.

In der maritimen Antarktis ergab sich durch eine langjährige Kooperation mit der Universidad Complutense, Madrid, Spanien, die Möglichkeit, die spanische Antarktisstation „Juan Carlos I.“ auf Livingston Island, South Shetland Islands, über fast zwei Jahrzehnte regelmäßig im Rahmen von botanischen Sommerexpeditionen zu besuchen. Die spanische Antarktisstation liegt in einem ca. 3 km² großen eisfreien Gebiet an der South Bay von Livingston Island (62° 40' S, 60° 23' W). Sie wird nur im Sommer genutzt.

Seit Gründung der Station gegen Ende der 1980er Jahre wurde dieses botanisch reichhaltige Gebiet durch eine Reihe von Experten besucht und beprobt. So konnten insgesamt 110 Flechtenarten und 42 Moosarten sowie 8 Lebermoosarten in einer zusammenfassenden Publikation durch die Kieler und die spanische Arbeitsgruppe dokumentiert werden (SANCHO et al. 1999). Darüber hinaus erhöhte sich aufgrund von weiteren Forschungen in den folgenden drei Jahren die Zahl der nachgewiesenen Flechtenarten um mehr als 50 % auf 187 Arten (Abb. 2, siehe SOECHTING et al. 2004).

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für den eisfreien Küstenstreifen Botany Bay in Granite Harbour, Southern Victoria Land in der kontinentalen Antarktis (162° 32' E, 77° 00' S) (Abb. 2). Die ersten systematischen Bestandsaufnahmen zu Artenvielfalt und Vegetation sowie experimentelle Untersuchungen zu Ökologie und Ökophysiologie von Flechten und Moosen begannen 1992 mit der Teilnahme von B. Schroeter an einer multinationalen Expedition der Waikato University, Hamilton, Neuseeland. In den folgenden Jahren konnten Kieler Wissenschaftler an insgesamt sieben Expeditionen nach Botany Bay teilnehmen (SCHROETER 1993, KAPPEN & SCHROETER 1995). Im Januar 2008 wurden nach 16 Jahren die Untersuchungen zur Biodiversität an diesem Standort abgeschlossen (SEPPELT et al. 2010). Insgesamt wurden neun Moosarten und eine Lebermoosart sowie 29 Flechtenarten nachgewiesen und in fünf Flechten- sowie zwei Moos-dominierten Gesellschaften zusammengefasst (SEPPELT et al. 1995, 1996, 2010). Aufgrund dieser Arbeiten wurde die für diesen Breitengrad einzigartige biologische Vielfalt des Gebietes inzwischen als „Antarctic Specially Protected Area 154“ unter Schutz gestellt.

Die botanisch-ökologischen Untersuchungen in Granite Harbour fußen auf historischen Berichten über dieses Gebiet im Rahmen der British-Antarctic-Expedition 1910–13 von R. F. Scott, in denen G. Taylor außerordentlich reiche Vorkommen von Flechten und Moosen in Botany Bay beschreibt (TAYLOR 1913, 1916). Spuren dieser frühen Expedition wie z. B. „Granite House“ finden sich dort noch heute. Sie führten insbesondere durch den Fund eines Originalbriefes der „Western Geological Party“ von G. Taylor vom Januar 1912 und anderer Relikte (SCHROETER et al. 1993) zur Eintragung von Granite House als „Historic Site and Monument 67“.

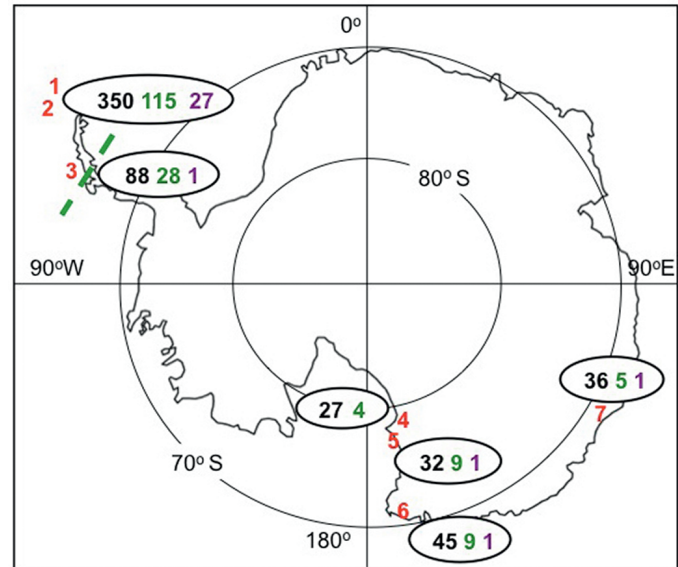


Abb. 2: Artenzahlen für verschiedene gut untersuchte Gebiete in der Antarktis. Die gestrichelte grüne Linie zeigt die südliche Verbreitungsgrenze der beiden nativen Höheren Pflanzen bei ca. 68° S an. Die schwarze Zahl gibt die Artenzahl der für ein Gebiet nachgewiesenen Flechten an, die grüne Zahl die der Moosarten und die violette Zahl die der Lebermoosarten. In allen hier mit Artenzahlen versehenen Gebieten waren Kieler Polarökologen an der Erfassung der Biodiversität beteiligt: 1 = King George Island, 2 = Livingston Island, 3 = Leonie Island, 4 = Dry Valleys, 5 = Granite Harbour, 6 = North Victoria Land, 7 = Wilkes Land.

Fig. 2: Numbers of plant species for different well studied areas of Antarctica. The green dashed line shows the growth boundary of the two higher plants at ca. 68° S. The black numbers indicate the total species numbers of lichens, the green refer to mosses and the pink to liver mosses. At all sites scientists from Kiel University were involved in the survey: 1 = King George Island, 2 = Livingston Island, 3 = Leonie Island, 4 = Dry Valleys, 5 = Granite Harbour, 6 = North Victoria Land, 7 = Wilkes Land.

Adaptation von Flechten und Moosen in antarktischen Lebensräumen

Für ein vertieftes Verständnis der Verbreitung und Biodiversität von Organismen insbesondere unter extremen Lebensbedingungen ist die Frage nach der Anpassbarkeit der Organismen an die abiotischen Faktoren von besonderer Bedeutung. In der Antarktis sind dies niedrige Temperaturen, starke Sonneneinstrahlung und insbesondere eine limitierte Verfügbarkeit von Wasser in resorbierbarer Form (KAPPEN 1988, 1989). Flechten sind für ihre Temperaturresistenz bekannt, die es ihnen erlaubt, als poikilohydre Organismen in ausgetrocknetem – und in einigen Fällen auch in befeuchtetem – Zustand Temperaturen von flüssigen Stickstoff (-196 °C) lebend zu überdauern (KAPPEN 1973). Die Wasserverfügbarkeit am Standort ist in der Regel für die photosynthetische Stoffproduktion entscheidend. Untersuchungen an antarktischen Flechten wie *Umbilicaria aprina* konnten zeigen, dass sich trockene Thalli aus Schnee mit ausreichend Feuchtigkeit aufsättigen können, um metabolisch aktiv zu werden (SCHROETER & SCHEIDEGGER 1995). Die Wasseraufnahme aus gefrorenem Wasser bei Minustemperaturen konnte hierbei in einer Laborstudie mit Hilfe von kombinierten Messungen des CO₂-Gaswechsels und Tieftemperatur-Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop nachgewiesen werden (Abb. 3).

Dieses Phänomen wurde durch Freilandmessungen des CO₂-Gaswechsels (SCHROETER et al. 1994) bestätigt (Abb. 4).

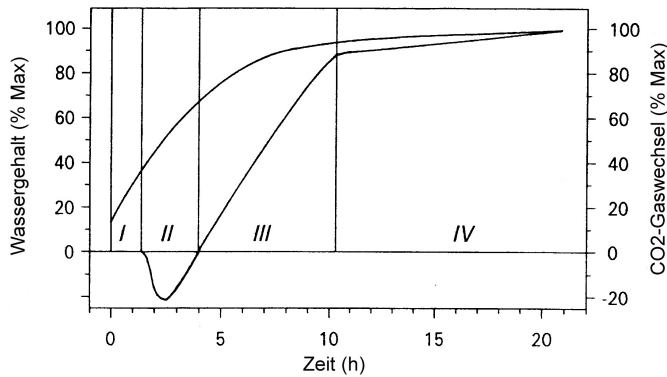


Abb. 3: Aktivierung der Photosynthese von *Umbilicaria aprina* nach Austrocknung durch Aufnahme von Wasser bzw. Wasserdampf bei Minustemperaturen. Trockene Flechtenthalli wurden bei $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Einstrahlung von $200\text{ }\mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ für 20 Stunden mit Schnee behäufelt in einer Gaswechsellmesskammer exponiert. In dieser Zeit wurde der CO_2 -Gaswechsel kontinuierlich registriert und der Wassergehalt in regelmäßigen Zeitabständen ermittelt. Die römischen Ziffern bezeichnen vier Phasen der Reaktivierung des Flechtstoffwechsels. I = Die lufttrockenen Flechtenthalli nehmen Wasser auf, es ist jedoch keine CO_2 -Gaswechselaktivität nachweisbar. II = Während einer weitergehenden Wasseraufnahme der Thalli ist zuerst Atmung und ab dem negativen Scheitelpunkt der Kurve zunehmend photosynthetische CO_2 -Fixierung messbar. III = Während sich die Zunahme des Wassergehalts langsam abschwächt, wird der Kompensationspunkt des CO_2 -Gaswechsels überschritten, eine zunehmende Nettophotosyntheserate ist messbar. IV = In einer Plateauphase wird langsam das Maximum des Thalluswassergehalts wie auch der Nettophotosyntheserate erreicht. Am Ende des Experiments wurden die Proben mit einem Tieftemperatur-Rasterelektronenmikroskop untersucht. Abb. A und B zeigen die erfolgreiche Wasseraufnahme der Pilz- und Algenzellen anhand von wassergefüllten Pilzhyphen und turgeszenten Algenzellen (Maßstab $10\text{ }\mu\text{m}$; verändert nach SCHROETER & SCHEIDEGGER 1995).

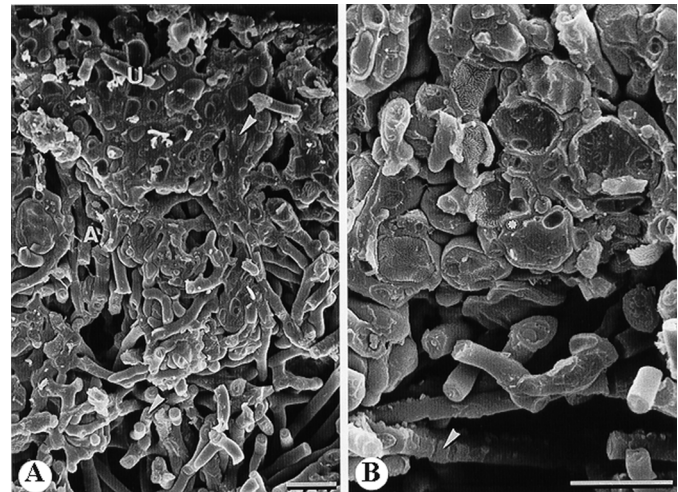


Fig. 3: Activation of photosynthesis of *Umbilicaria aprina* after drying and rewetting by snow/water vapour (resp.) at temperature $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dry thalli were wetted by snow at $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ and radiation of $200\text{ }\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ for 20 hrs and incubated in a gas exchange chamber. The CO_2 -gas exchange was monitored continuously, the water content in regular time intervals. Roman numbers indicate four phases of recovery. I = Dry thalli take up water, but no gas exchange is detectable. II = After further rewetting respiration starts and later photo-synthesis. III = During further water saturation the compensation point of gas exchange is passed and increasing net-photosynthesis becomes visible. IV = A plateau phase is described at maximum thallus water content and net-photosynthesis. At the end of the experiment the thalli were inspected by low-temperature-scanning microscopy. A and B show fungi and algae cells after water uptake at subzero temperatures by water-filled hyphae and turgescient algae cells (scale bar $10\text{ }\mu\text{m}$; after SCHROETER & SCHEIDEGGER 1995).

In der kontinentalen Antarktis konnte das Phänomen einer Wasseraufnahme aus gefrorenem Wasser unter einer durchgehenden Schneedecke *in situ* gezeigt werden (Abb. 5) (PANNEWITZ et al. 2003).

Hierbei wurden speziell entwickelte Freilandmethoden zur Erfassung der Aktivität der Photosysteme anhand von Messungen der Chlorophyll *a* Fluoreszenz eingesetzt (SCHLENSOG & SCHROETER 2001). Die ökologische Bedeutung einer Wasseraufnahme aus Schnee und der damit verbundenen Reaktivierung der metabolischen und photosynthetischen Prozesse liegt in der Erschließung einer Feuchtigkeitsquelle zu einer Jahreszeit, in der bereits genügend Licht für Photosyntheseaktivität vorhanden ist, Minustemperaturen jedoch das Auftreten von flüssigem Wasser verhindern (Abb. 5). Da insbesondere in der kontinentalen Antarktis flüssiges Wasser nur sehr sporadisch und kurzfristig auftritt, sind die nachweisbaren Wachstumsraten der untersuchten Krustenflechten erwartungsgemäß äußerst gering (GREEN et al. 2007, SANCHO et al. 2007).

Neben niedrigen Temperaturen und eingeschränkter Wasserverfügbarkeit sind die starke Einstrahlung während der Sommermonate sowie lang andauernde Dunkelheit während des Polarwinters Kennzeichen der terrestrischen Lebensräume in der Antarktis. Starke Einstrahlung führt häufig zu Photoinhibition und Photodestruktion. Antarktische Flechten und auch Moose erweisen sich aber als sehr gut angepasst: Als poikilohydre Organismen überdauern sie Zeiträume starker Einstrahlung häufig in einem ausgetrocknetem, inaktivem Zustand. Eine Reflexion starker Einstrahlung z. B. durch tote luftgefüllte Zellen im Cortex der Flechten oder durch Glas-

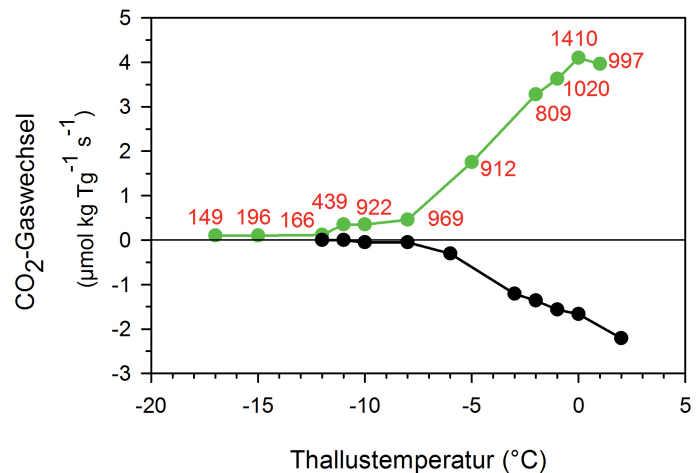


Abb. 4: Freilandmessungen zur Photosynthese und Dunkelatmung von *Umbilicaria aprina* in Granite Harbour. Die schwarze Kurve zeigt die maximalen Raten der Dunkelatmung in Abhängigkeit von der Thallustemperatur, die Dunkelatmung ist bei Temperaturen unterhalb von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht mehr nachweisbar. Die grüne Kurve zeigt die für die jeweiligen Temperaturen maximal erreichten Nettophotosyntheseraten, die roten Zahlen geben die Lichtbedingungen in $\mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ an (nach SCHROETER et al. 1994).

Fig. 4: Field measurements of photosynthesis and dark respiration of *Umbilicaria aprina* at Granite Harbour. The black line shows maximum rates of dark respiration related to thallus temperature, dark respiration is not detected below $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. The green line shows maximal net photosynthesis according to temperature, red numbers indicate light conditions in $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ (after SCHROETER et al. 1994).

haare bei Moosen bewirkt ebenso wie eine schwarz-braune Pigmentierung z. B. durch Melanin auch im feuchten Zustand, dass die Einstrahlung, die schließlich die Photobionten im

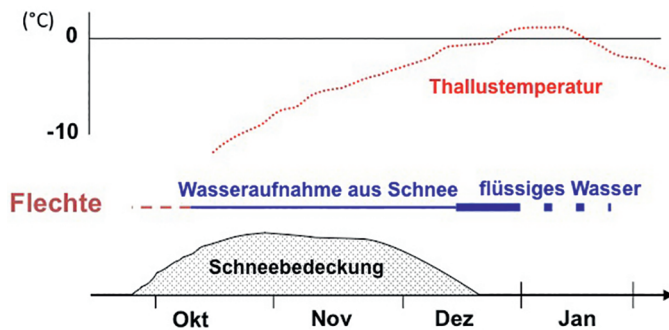


Abb. 5: Saisonale Änderung der Wasserverfügbarkeit für Krustenflechten in Granite Harbour (Antarktis).

Fig. 5: Seasonal change of water availability for crustose lichens at Granite Harbour (Antarctica).

Thallus erreicht, stark abgeschwächt ist. Da sich somit die Photobionten vieler Flechtenarten gewissermaßen in einem Schwachlichtlebensraum befinden, wird eine Schädigung der Photosysteme durch Lichtstress effektiv vermieden. Wie wirkungsvoll die Schutzfunktion des Cortex gegenüber starker Einstrahlung ist, zeigen Untersuchungen an *Umbilicaria aprina* in der kontinentalen Antarktis (KAPPEN et al. 1998). *Umbilicaria aprina* wurde dabei an einem Freilandstandort in der kontinentalen Antarktis nach ca. 5 Monaten Dunkelheit im antarktischen Winter unter einer Schneedecke ausgegraben und unmittelbar starker natürlicher Einstrahlung ausgesetzt, ohne dass eine erkennbare Beeinträchtigung oder Schädigung der Photosyntheseleistung sichtbar wurde.

Generell zeigen Flechten und Moose sowohl in der maritimen als auch in der kontinentalen Antarktis eine große Anpassbarkeit an die Starklichtbedingungen einschließlich UV-Strahlung, wie eine Reihe von Untersuchungen der Kieler Arbeitsgruppe zeigen konnte (SCHLENSOG et al. 1997, SCHROETER & SCHLENSOG 1999, LUD et al. 2003, GREEN et al. 2000, 2005, SCHLENSOG et al. 2004a, b, SCHROETER et al. 2012).

Langzeitmessungen zur Primärproduktion: Prognosen für die Auswirkung der globalen Erwärmung

Neben der Anpassbarkeit von Flechten und Moosen an die abiotischen Faktoren in den antarktischen Lebensräumen ist die Abhängigkeit der Jahresprimärproduktion von den diurnalen wie auch saisonal stark schwankenden abiotischen Faktoren von besonderem Interesse. Die Einwirkung der verschiedenen abiotischen Faktoren auf die Bildung von organisch gebundenem Kohlenstoff bei antarktischen Flechten und Moosen fasst Abb. 6 schematisch zusammen.

Als poikilohydre Organismen sind Flechten maßgeblich von der Wasserverfügbarkeit am Standort abhängig. Während sich die Abhängigkeit der Photosyntheseleistung von Licht und Temperatur mit Hilfe von Messungen des CO_2 -Gaswechsels modellieren lässt und sich die Parameter Licht und Temperatur mit handelsüblicher Sensorik erfassen lassen (s. SCHROETER 1991), wäre die ganzjährige Registrierung der Zeiträume metabolischer Aktivität, in denen ausreichend Feuchtigkeit zur Verfügung steht, sehr aufwändig.

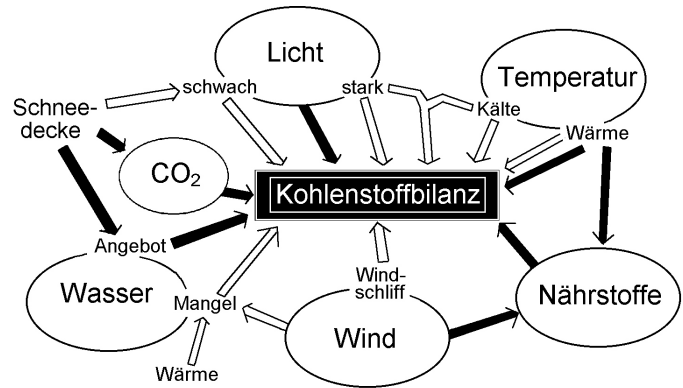


Abb. 6: Abiotische Wirkungsfaktoren für die Kohlenstoffbilanz antarktisch-terrestrischer Systeme. Schwarze Pfeile zeigen positive, weiße Pfeile negative Effekte auf die Bildung von organisch gebundenem Kohlenstoff (nach SCHROETER 1997).

Fig. 6: Abiotic factors of the C-balance in Antarctic terrestrial ecosystems. Black arrows indicate positive, white arrows negative effects on the production of organic carbon (after SCHROETER 1997).

Erst die Entwicklung von automatischen Messsystemen zur Erfassung der Chlorophyll *a* Fluoreszenz von Photosystem II (SCHROETER et al. 1991) und die kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Techniken (SCHROETER et al. 2000, SCHLENSOG & SCHROETER 2001) erlaubt es inzwischen, Langzeitmessungen zur metabolischen Aktivität an Freilandstandorten auch unter klimatischen Extrembedingungen automatisch durchzuführen (SCHROETER & SCHULZ 1995).

Inzwischen liegen aus Langzeitmessungen an der Strauchflechte Flechte *Usnea aurantiaco-atra* auf Livingston Island (Abb. 7) Licht- und Temperaturdaten sowie die Registrierung der metabolischen Aktivität für mehr als 14 Jahre sowie dreijährige parallele Messungen an der Nabelflechte *Umbilicaria aprina* in Granite Harbour vor. Die Auswertung dieser Daten, die noch andauert, zeigt die großen interannuellen Unterschiede in den abiotischen Faktoren und ihre Auswirkungen auf die Jahreskohlenstoffbilanz der Flechten.

Aus diesen Daten lassen sich erste Prognosen für mögliche Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Jahreskohlenstoffbilanz der Flechten ableiten (SCHROETER et al. 2010, 2011, GREEN et al. 2011). Auch wenn die untersuchten Flechtenarten durchweg im physiologisch suboptimalen (zu niedrigem) Temperaturbereich aktiv sind, muss sich eine Klimaerwärmung nicht nur förderlich auf die Jahreskohlenstoffbilanz auswirken. Vor allem wärmere Winter bzw. anhaltende Schneebedeckung können bei den vorherrschenden limitierenden Lichtbedingungen zu substantiellen Verlusten von organisch gebundenem Kohlenstoff durch Atmung führen.

Entscheidend für den Erfolg der Kohlenstofffixierung sind daher die Lichtverhältnisse und die Wasserverfügbarkeit in den Frühjahrsmonaten. Daraus ergibt sich, dass in den antarktischen terrestrischen Ökosystemen lokale und auch regionale Änderungen der Feuchtigkeitsverhältnisse zu Veränderungen in der Vegetationszusammensetzung führen werden. Für Flechten kann ein Anstieg der Umgebungstemperaturen zu einer zunehmend negativen Kohlenstoffbilanz führen. Höhere Pflanzen und Moose werden bei einer Temperaturerhöhung hingegen einen Konkurrenzvorteil gegenüber den langsam wachsenden Flechten erlangen.

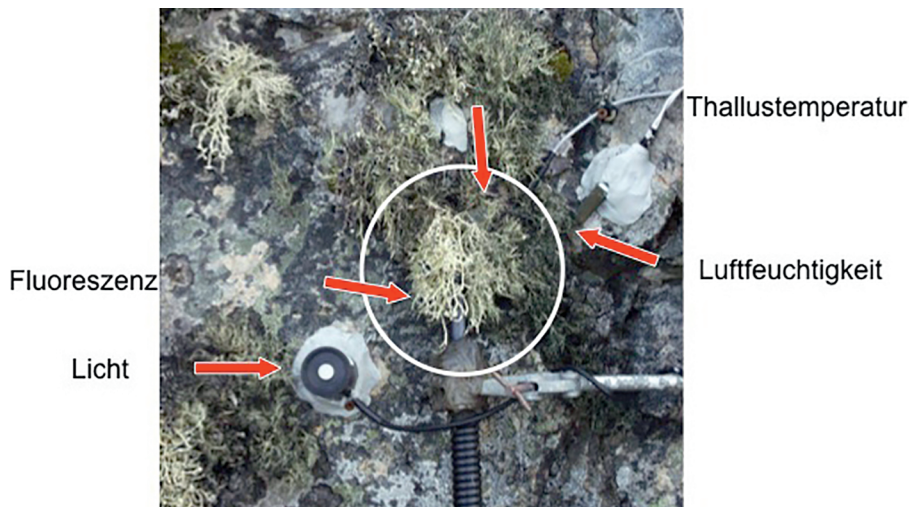


Abb. 7: Messaufbau der Langzeitmessstation auf Livingston Island, South Shetland Islands. Im Zentrum steht ein Thallus der Strauchflechte *Usnea aurantiaco-atra*. Die Messstation ist seit 1992 in Betrieb (Foto B. Schroeter).

Fig. 7: Installation for long-time registration at Livingston Island, South Shetland Islands for a thallus of the lichen *Usnea aurantiaco-atra*. This record of thallus temperature, humidity, light and fluorescence works since 1992 (Photo: B. Schroeter).

BÖDEN IN POLARGEBIETEN

Polare Böden stehen seit einigen Jahren im Fokus der Forschung wegen ihrer Bedeutung zur Freisetzung von CO₂ und CH₄. Ihre Produktion stammt aus bodenmikrobiellen Prozessen, die von den Bedingungen des physikalischen und bodenchemischen Umfeldes gesteuert werden. Eine erhöhte Primärproduktion, verstärkte Verwitterungsprozesse, verlängerte Auftauphasen sowie größere Auftautiefen ergeben neue Aspekte für die bodenbiologischen Prozesse. Die hierzu am Institut für Polarökologie durchgeführten Arbeiten fanden in breiter Kooperation mit nationalen und internationalen Partnern statt, sie weiteten sich auch auf Zusammenhänge von Soziologie und Umweltmanagements in Nordskandinavien aus (BÖLTER 1996c, FORBES et al. 2006).

Böden und Bodenbiologie in der Antarktis

In der maritimen Antarktis begannen die bodenökologischen Arbeiten mit Aufhalten auf der polnischen Station Henryk Arctowski 1984/85 auf King George Island. In den folgenden Jahren, ab 1985/86, wurden bodenkundliche und bodenbiologische Untersuchungen auch auf den antarktischen Kontinent, in der australischen Station Casey durchgeführt. Einflüsse von Witterung und Biologie auf bodenbildende Prozesse und Bodendiversität standen im Vordergrund. Dabei galt es, die polaren Böden mit ihren Besonderheiten als Lebensraum für Mikroorganismen, Pflanzen und Tiere zu beschreiben und die biologischen Prozesse anhand von Aktivitätsparametern und Untersuchungen der Gemeinschaften zu charakterisieren. Zusammenfassende Darstellungen der Ergebnisse finden sich bei BEYER et al. (2000), BEYER & BÖLTER (2002) sowie BÖLTER & KANDELER (2004).

Bodenkundlich unterschieden sich die Habitate der maritimen und kontinentalen Antarktis außerordentlich (BLUME & BÖLTER 1993a, b, BÖLTER et al. 1994, 1995b, BLUME et al. 1997). Eine große Zahl von Bodenarten konnte identifiziert werden, insbesondere war die Beschreibung von Podsolen für die Antarktis ein Novum. Bisher hatte man diesen Bodentyp für die Antarktis ausgeschlossen wegen des Fehlens einer sauren Streu, sowie den Huminstoffen und damit verbundenen Verlagerung von

Fe- und Al-Oxiden bzw. -Hydroxiden (Abb. 8). Die Podsolisierung der Böden in der Antarktis konnte auf Akkumulationen und Transport organischen Materials von Vogelkolonien als auch von Moos- und Flechtenpolstern zurückgeführt werden.

Die organische Substanz in den Böden der Antarktis und ihre Rolle bei der Bodengenese, insbesondere der Podsolisierung, sowie als Substrat für biologische Prozesse stand in den folgenden Jahren im Mittelpunkt der Untersuchungen auf den Stationen „Casey“ und „Arctowski“ (BEYER et al. 1995a,b, 1997a, 2001, 2004a,b, BLUME et al. 1996). Kleinskaligen Beschreibungen an den Standorten „Casey“ und „Arctowski“ folgten landschafts- und geökologischen Ausweitungen (BEYER et al. 1998a, b, BEYER & BÖLTER 1999). Aufgrund dieser Untersuchungen konnten die Bodengesellschaften und pedogenen Prozesse und Zonierungen der Antarktis neu erfasst werden (GORJACHKIN et al. 2004, BEYER et al. 2000).

Angaben über Zahl und Biomasse der Mikroorganismen, deren Gemeinschaften und Verteilungen sowie deren Aktivität waren Grundlagen für Standortsbeschreibungen (BÖLTER 1990a, 1995, 1996a, 1997). Diese Messgrößen für die antarktischen Böden können in direktem Zusammenhang mit dem Gehalt organischen Material gesehen werden und sie variieren daher mit dessen Gesamtgehalt und Verfügbarkeit (BÖLTER 1992a, b, BÖLTER et al. 1999, 2000, BEYER et al. 2000a). Exsudate von Moosen und anderen Pflanzen sind eine bedeutende Quelle leicht verfügbarer organischer Substanz in Form von Monosacchariden und damit Grundlage für reichliches Vorkommen von Mikroorganismen (BÖLTER 1993a, b, MELICK et al. 1994).

Insofern können lokal hohe Gehalte von gelösten Zuckern in Verbindung mit Bodentemperaturen von über 30 °C bei direkter Sonneneinstrahlung zu hohen Werten der Bodenrespiration und des Wachstums von Mikroorganismen führen, die denen temperierter Böden durchaus ähneln (Abb. 9). Die erhöhte Bodenrespiration wie auch die Gesamtaktivität sind auf die oberen Zentimeter der Böden beschränkt, also im unmittelbaren Einfluss von Nährstoffzufuhr und Temperaturwirkung (BÖLTER 1994, 1995, 1997).

Dies spiegelt sich auch in hohen Aktivitäten der Enzyme wider, die den Umsatz organischer Substanz regeln (TSCHERKO et al.

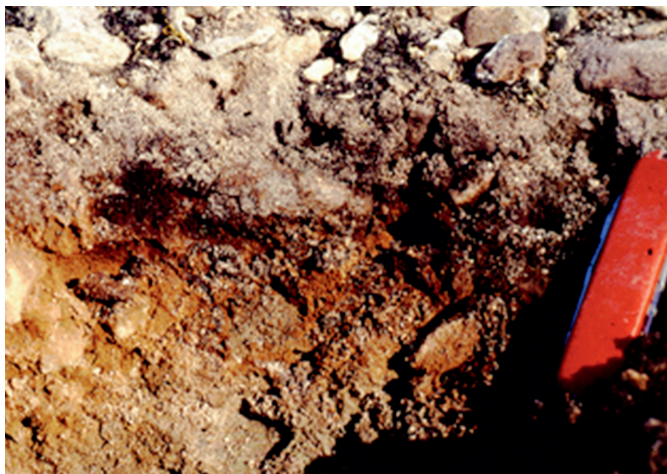


Abb. 8: Skeleti-gelic Podsol unter Kryptogamen an einem Standort einer ehemaligen Pinguinkolonie in der kontinentalen Antarktis im Umfeld der australischen Station Casey (Foto: H.-P. Blume).

Fig. 8: Skeleti-gelic Podzol under cryptogamic vegetation of a former penguin colony at Casey Station, continental Antarctic (Photo: H.-P. Blume).

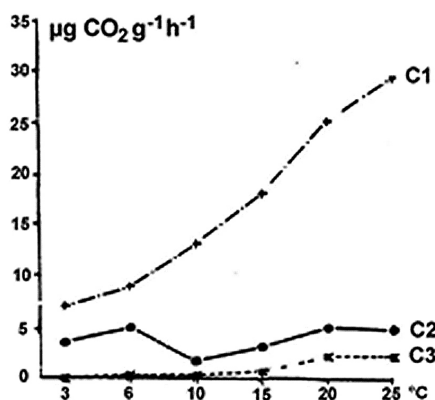


Abb. 9: Bodenrespirationen von drei unterschiedlichen Bodenproben (0–2 cm) der kontinentalen Antarktis (Casey Station). C1 = dichte Vegetationsdecke mit Moosen, C2 = spärlicher Oberflächenbewuchs mit Algen / Cyanobakterien, C3 = kein Bewuchs auf der Oberfläche (nach BÖLTER 1993).

Fig. 9: Soil respiration of three different soil types (each 0–2 cm) from continental Antarctica, Casey Station area. C1 = dense vegetation cover with mosses, C2 = sporadic soil cover of some algae and cyanobacteria, C3 = barren soil, no visible plant organisms (after BÖLTER 1993).

2003). Daraus folgt, dass sich kleinskalige Systeme bilden, die in der maritimen Antarktis besonders eng verbunden sind mit den Wurzelsystemen von *D. antarctica* und *C. quitensis*. Das gilt auch für die Häufigkeiten von Collembolen und Nematoden (BÖLTER et al. 1997). Weitere und übergreifende Untersuchungen zu den Mikroorganismen, deren Physiologie und Abundanzen in polaren Böden sowie dem Besiedlungsgeschehen in antarktischen Biotopen sind in anderen Arbeiten zu finden (HUGHES et al. 2006, MATALONI et al. 2010, BÖLTER 2004, 2011).

Böden und Bodenbiologie in der Arktis

In der Arktis wurden ab Mitte der 1990er Jahre Böden, Bodenorganismen und Vegetation zu wichtigen Themen. Die Projekte hatten zum Ziel, die Veränderlichkeit der dortigen

Systeme im Hinblick auf den Rückgang des Permafrostes (sibirische und kanadische Arktis) sowie den Nutzungswandel der Landschaften (Nord-Skandinavien) zu erfassen.

In Russland waren Standorte auf der Taimyr-Halbinsel, auf Severnaya Zemlya und im Lena-Delta Expeditionsziele in Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle Potsdam des Alfred Wegener Instituts sowie dem Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg. Auch in der sibirischen Arktis bildeten die Wechselwirkungen von Boden und Vegetation in Tundra- und Kaltwüstenhabitaten Untersuchungsschwerpunkte als auch die physikalischen Prozesse im Verlauf von Auftauen und Gefrieren (BÖLTER 1996b, BÖLTER et al. 2002, 2003, SOMMERKORN et al. 1999a, b, SCHMIDT & BÖLTER 2002, MÜLLER-LUPP & BÖLTER 2003, BÖLTER et al. 2006).

Die Frage nach der Diversität von Böden, Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen war Ausgangspunkt einer international durchgeführten Expedition in den Archipel Nordkanadas (Tundra Nordwest 1999), ausgerichtet vom Svensk Polarforskningssekretariat. Auf dieser Expedition wurden von Seiten des IPÖ Böden und Bodenmikroorganismen untersucht (ERIKSEN et al. 2003, BÖLTER 2003, BÖLTER et al. 2003). Ein Ansatz, diese Böden einem qualitativen Schema zuzuordnen und mit denen der Antarktis zu vergleichen, wurde dann wiederum gemeinsam mit dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Kieler Universität vorgenommen und präsentiert (BLUME & BÖLTER 2004, BÖLTER & BLUME 2006).

Mensch und Umwelt in Nord-Skandinavien: Ein mehrjähriges, von der EU gefördertes Projekt (RENMAN) beschäftigte sich zwischen 2002 und 2005 mit der sich verändernden Landnutzung in Nord-Skandinavien. Vom IPÖ aus wurden die Teilprojekte der Universität Kiel (IPÖ, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Institut für Hygiene und Umweltmedizin, Ökologiezentrum) koordiniert. Gegenstand dieser umfassenden Studie waren biologische und soziologische Fragestellungen vor der Hintergrund der Entwicklung eines Konzeptes zur Rentierwirtschaft (FORBES et al. 2006). Dies sollte dem samischen Parlament als Grundlage für Entscheidungen hinsichtlich der künftigen Entwicklung ihres Lebensraums im Norden Norwegens, Schwedens und Finnlands dienen. Vom IPÖ wurden die bodenmikrobiologischen Aspekte untersucht mit Blick auf den Beweidungsstatus der Flächen und deren Vegetation. Als wesentlicher Faktor zeigte sich die Bodenbedeckung. Sie kontrolliert die mikrobiellen Aktivitätsparameter, z. B. Bodenrespiration, über Nährstoffzufuhr, Bodentemperatur und -feuchte.

In den Jahren der Feld- und Laboruntersuchungen haben sich lange Listen von Daten verschiedenster Qualität akkumuliert. Dazu gehören sowohl quantitative Daten zu den verschiedenen Standorten und Proben als auch qualitative Daten der Standortbeschreibungen mit zugeordneten Bildern von Landschaften, Probenorten und Bodenprofilen. Diese Daten zu kombinieren und allgemein zugänglich zu machen, ist seit langem Gegenstand der terrestrischen Arbeitsgruppe (BÖLTER et al. 1987, BÖLTER 1996d), und auch derzeitiger Arbeiten (FLEISCHER et al. 2012). So wird angestrebt, einen Metafile als Grundlage für ein Datenarchiv zu erstellen, das dann über einen allgemein zugänglichen Server verfügbar sein wird.

RESUMÉ TERRESTRISCHER FORSCHUNGEN AM IPÖ

Böden, Pflanzen, Bodentiere und Mikroorganismen beeinflussen sich gegenseitig in allen Biotopen der Erde, jedoch sind sie unter den extremen Klima- und Lichtbedingungen der Polargebiete auf eine besonders enge Verbindung angewiesen. Die polaren Habitate sind sehr divers, und diese Diversität zeigt sich auf engem Raum. Eine wohl etablierte Anpassung an die ökologischen Spannweiten ist Grundbedingung für das Überleben, sowohl hinsichtlich der Gemeinschaften als auch im Individuellen: Pflanzen und ihre Wurzeln sind Träger organischer Substanz, die Abbauprozesse und ihre Organismen greifen unmittelbar in die Bodenstruktur und Bodenentwicklung ein (BÖLTER & BLUME 2002, KAPPEN & SCHROETER 2002).

Diese grundlegenden Zusammenhänge der primären Besiedlung und Bodenentwicklung (JENNY 1984) wurden anhand der Ergebnisse für die polaren Böden weiter entschlüsselt. Der Faktor Zeit spielt hier eine bedeutendere Rolle als in temperierten Gebieten, doch zeigen sich analoge Wege zur Struktur- und Bodenentwicklung. Dass sich auch in den Polargebieten der anthropogene Effekt deutlich herauskehrt und besonders prominent auswirkt, zeigte STONEHOUSE (1999). Das Einwirken politischer Entscheidungen in den polaren Gebieten ist zwar in den arktischen Bereichen durch Landnutzungsveränderungen, Erschließungen von Bodenschätzen, damit verbundene notwendige Verkehrswege u. a. deutlicher feststellbar, jedoch bleiben langfristig auch die antarktischen Habitate nicht von Veränderungen unberührt.

Um die Biodiversität der photosynthetisch aktiven Organismen als einen Indikator für die Auswirkungen von Klimaveränderungen nutzen zu können, ist es notwendig, die Wirkungsmechanismen zu kennen, die die gegenwärtige Verbreitung der terrestrischen Vegetation in Antarktis und Arktis kontrollieren. Die Erkenntnisse über Verbreitung der antarktischen wie auch der arktischen terrestrischen Organismen und ihrer ökophysiologischen Reaktionsbreite, die innerhalb der letzten 30 Jahren gewonnen wurden, erlauben es nun, einige Rückschlüsse auf den potentiellen Einfluss einer Klimaveränderung auf die Landökosysteme der Antarktis zu ziehen. Beispielsweise konnten GREEN et al. (2011) für die terrestrische Vegetation in der Antarktis zwei unterschiedliche, geografisch getrennte Reaktionszonen aufzeigen, die im Süden von den kleinräumigen Temperatur-, Wasser- und Einstrahlungsverhältnissen bestimmt wird, im nördlicheren Bereich dagegen eng an die großräumigen klimatischen Verhältnisse gekoppelt ist. Als Prediktor kann in der nördlichen Zone die mittlere Jahrestemperatur dienen: Pro 1 Kelvin kann man von einer Zunahme der Artenvielfalt um ca. 10 % ausgehen. Unter dem Einfluss einer globalen Temperaturerhöhung wird sich die Grenze zwischen den beiden Zonen nach Süden verschieben und sich so die an die großräumigen klimatischen Verhältnisse gekoppelte nördliche Zone ausdehnen. Innerhalb einer weiter nach Süden verschobenen „microenvironmental zone“ wird jedoch die Biodiversität weiterhin durch die abiotischen Faktoren in kleinen räumlichen Einheiten geprägt bleiben.

Die bodenkundlichen und bodenbiologischen Ergebnisse zeigen deutliche Reaktionen auf Veränderungen der Ökosysteme. Die Komplexität der Wirkungsspektren zwischen Umweltveränderungen, Bodenentwicklung und Bodenbio-

logie ist insbesondere in den Übergangsbereichen der Vegetationszonen sehr ausgeprägt. Ihre Modellierung jedoch wird durch die lokalen Aspekte der Landschaften erschwert, da die Skalierungen der Messgrößen über weite lokale und zeitliche Bereiche zu machen sind. Dies gilt für Habitate der Antarktis (BEYER et al. 1998a, b, BLUME et al. 2002) wie für solche der Arktis (BÖLTER & MÖLLER 2006) und auch für biologische als auch nichtbiologische Eigenschaften der Standorte. Anpassungen von biochemischen Eigenschaften konnten als Grundmerkmale der mikrobiologischen Gemeinschaften und mit weiten ökologischen Bereichen beschrieben werden.

DANKSAGUNG

Allen Mitarbeitern des IPÖ, insbesondere Werner Dzomla, Frank-Peter Rapp und Anette Scheltz sei für die stete Bereitschaft gedankt, sich an den Expeditionen, ihren Vor- oder Nachbereitungen sowie den Darstellungen der Ergebnisse zu beteiligen. Darüber hinaus danken wir allen Kolleginnen und Kollegen auf den verschiedenen Forschungsstationen für ihre Unterstützung bei den Feldarbeiten. Ein besonderer Dank geht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft für eine langjährige Förderung unserer Forschungsarbeiten.

Literatur

- Beyer, L. & Bölter, M. (1999): Formation, ecology, and geography of cryosols of an ice-free oasis in coastal east Antarctica near Casey Station (Wilkes Land).- Austral. J. Soil Res. 37: 209–244.
- Beyer, L., Blume, H.-P. & Bölter, M. (1995b): Soil organic matter in spodosols of Continental Antarctica (Wilkes Land, Casey Station) as revealed by wet chemistry and CPMAS ¹³C-NMR.- Agronomy Abstracts, 1995 Annual Meetings, Amer. Soc. Agron. Crop. Sci. Soc., S. 269.
- Beyer, L., Blume, H.-P., Knicker, H. & Bölter, M. (1997a): Soil organic matter of suggested spodic horizons in relic orthonogenic soils of coastal continental Antarctica (Wilkes Land, Casey Station) and spodic horizons in soils of Germany.- Soil Sci. 162: 518–527.
- Beyer, L., Blume, H.-P. & Bölter, M. (1995a): Die organische Bodensubstanz in Bh-Horizonten von Podsolen Norddeutschlands und früheren Pinguinkolonien der Küstenregion in der kontinentalen Antarktis.- Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 76: 737–740.
- Beyer, L. & Bölter, M. (ed.) (2002): Geoecology of Antarctic Ice-free Coastal Landscapes.- Springer, Heidelberg, Ecol. Stud. 154: 1–427.
- Beyer, L., Bölter, M. & Seppelt, R. D. (2000): Nutrient and thermal regime, microbial biomass, and vegetation of Antarctic soils in the Windmill Islands region of East Antarctica (Wilkes Land).- Arct. Antarct. Alp. Res. 32: 30–39.
- Beyer, L., Knicker, H., Blume, H.-P., Bölter, M., Voigt, B. & Schneider, D. (1997b): Soil organic matter of suggested spodic horizons in relic orthonogenic soils of coastal continental Antarctica (Casey Station, Wilkes Land) in comparison with that of spodic soil horizons in Germany.- Soil Sci. 162: 518–527.
- Beyer, L., Pingank, K., Bölter, M., Schneider, D. & Blume, H.-P. (1998a): Variation of carbon and nitrogen storage in soils of coastal continental Antarctica (Wilkes Land).- Eurasian Soil Sci 31: 551–554.
- Beyer, L., Pingank, K., Bölter, M. & Seppelt, R. (2004a): Soil organic matter in cold soils of coastal eastern Antarctica (Casey Station, Wilkes Land).- In: J. M. Kimble (ed), Cryosols, Springer, Berlin, 509–524.
- Beyer, L., Pingank, K., Bölter, M. & Seppelt, R. (1998b): Small-distance variation of carbon and nitrogen storage in different Antarctic mineral cryosols near Casey Station.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 161: 211–220.
- Beyer, L., White, D. M. & Bölter, M. (2001): Soil organic matter composition, transformation, and microbial colonization of Gelic Podzols in the coastal region of East Antarctica.- Austral. J. Soil Res. 39: 543–563.
- Beyer, L., White, D. M., Pingank, K. & Bölter, M. (2004b): Composition and transformation of soil organic matter in cryosols and gelic histosols in coastal eastern Antarctica (Casey Station, Wilkes Land).- In: J.M. Kimble (ed), Cryosols, Springer, Berlin, 525–556.
- Blume, H.-P. & Bölter, M. (1993a): Podsole, Leptosole und Regosole der Antarktis.- Mitteil. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 72: 843–846.
- Blume, H.-P. & Bölter, M. (1993b): Soils of Casey Station (Wilkes Land, Antarctica).- In: D. Gilichinski (ed), Joint Russian-American Seminar on

- Cryopedology and Global Change, Proceed., Pushchino, 96–104.
- Blume, H.-P., Beyer, L., Bölter, M., Erlenkeuser, H., Kalk, E., Kneesch, S., Pfisterer, U. & Schneider, D. (1997): Pedogenic zonation of the Southern circum-polar region.- *Adv. Geocol.* 30: 69–90.
- Blume, H.-P. & Bölter, M. (2004): Antarctic and Arctic soils as habitats for organisms.- In: M. Jozwiak & A. Kowalkowski (ed), *Regional Monitoring of Natural Environment*. Kielce Sci. Soc. Monitoring Station 5: 95–102.
- Blume, H.-P., Kuhn, D. & Bölter, M. (2002): Soils and soilscapes.- In: L. Beyer & M. Bölter (eds), *Geocology of Antarctic ice-free coastal Landscapes*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, *Ecol. Stud.* 154: 91–113.
- Blume, H.-P., Schneider, D. & Bölter, M. (1996): Organic matter accumulation in and podzolisation of Antarctic soils.- *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 159: 411–412.
- Bölter, M. (1989): Microbial activity in soils from Antarctica (Casey Station, Wilkes Land).- *Polar Biol.* 2: 146–153.
- Bölter, M. (1990a): Microbial ecology of soils from Wilkes Land, Antarctica. I. The bacterial population and its activity in relation to dissolved organic matter.- *Polar Biol.* 3: 104–119.
- Bölter, M. (1990b): Microbial ecology of soils from Wilkes Land, Antarctica. II. Patterns of microbial activity and related organic and inorganic matter.- *Polar Biol.* 3: 120–132.
- Bölter, M. (1992a): Environmental conditions and microbiological properties from soils and lichens from Antarctica (Casey Station, Wilkes Land).- *Polar Biol.* 11: 591–599.
- Bölter, M. (1992b): Organic matter and its availability to microorganisms in Antarctic soils.- In: D. Gilichinski (ed), *Proc. Int. Conf. on Cryopedology, Pushchino, Pushchino Research Center*, 189–199.
- Bölter, M. (1993): Vergleichende Untersuchungen zur mikrobiellen Aktivität in Böden und an Kryptogamen aus der kontinentalen und maritimen Antarktis.- *Habil.Schrift, Univ. Kiel*, 1–201.
- Bölter, M. (1993a): Effects of carbohydrates and leucine on growth of bacteria from Antarctic soils (Casey Station, Wilkes Land).- *Polar Biol.* 13: 297–306.
- Bölter, M. (1993b): Microbial biomass in soils and on plants of King George Island (Arcowski Station, Maritime Antarctic).- *XX Polar Symp., Lublin, S.* 133 (Abstr.).
- Bölter, M. (1994): Microcalorimetry and CO₂-evolution of soils and lichens from Antarctica.- *Polar Biol.* 7: 210–222.
- Bölter, M. (1995): Distributions of bacterial numbers and biomass in soils and on plants from King George Island (Arcowski Station, Maritime Antarctica).- *Polar Biol.* 15: 115–124.
- Bölter, M. (1996a): Analysis of soil microbial communities (autotrophs and heterotrophs) from King George Island (Arcowski Station).- *Polar Biol.* 9: 283–298.
- Bölter, M. (1996b): Soil microbiology.- In: D. Yu. Bolshiyarov & H. Hubberten (ed) *Russian-German cooperation: The expedition TAIMYR 1995*.- *Ber. Polarforsch.* 211: 72–79.
- Bölter, M. (1996c): Consequences of global warming on soil processes in arctic regions.- *Polarforschung* 66: 1–10.
- Bölter, M. (1996d): A data base for Arctic and Antarctic non-marine algae (Abstract).- In: M. Olech (ed), *Proc. Internat. Workshop Antarctic Research on Taxonomy and Ecology of Algae*, Cracow, Poland, 4–5.
- Bölter, M. (1997): Microbial communities in soils and on plants from King George Island (Arcowski Station, Maritime Antarctica).- In: B. Battaglia, G. Valencia & D. Walton (ed.), *Antarctic communities*, Cambridge University Press, Cambridge, 162–169.
- Bölter, M. (2003): Microbiological communities and properties of Arctic soils: Results of the Tundra Northwest Expedition 1999 (Nunavut and Northwest Territories, Canada).- *Polarforschung* 73: 103–110.
- Bölter, M. (2004): Ecophysiology of psychrophilic and psychrotolerant microorganisms. In: S. Shivaji (ed): *Microbes from cold habitats: biodiversity, biotechnology and cold adaptation*.- *Cell. Molecul. Biol.* 50: 563–573.
- Bölter, M. (2011): Soil development and soil biology at King George Island (Maritime Antarctic).- *Pol. Polar Res.* 32: 105–116.
- Bölter, M. & Blume, H.-P. (2002): Soils as habitats for microorganisms.- In: L. Beyer & M. Bölter (eds), *Geocology of Antarctic ice-free coastal Landscapes*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, *Ecol. Stud.* 154: 285–302.
- Bölter, M. & Blume, H.-P. (2006): Ecological characteristics and ratings for soils of Arctic Canada.- *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Iss.* 59: 63–78.
- Bölter, M., Blume, H.-P. & Kappen, L. (1995b): Bodenbiologische Untersuchungen in der maritimen und kontinentalen Antarktis (King George Island und Windmill Islands. Teil 1. Umweltparameter und anorganische Nährstoffe.- *Polarforschung* 65: 41–61.
- Bölter, M., Blume, H.-P. & Kuhn, D. (1999): Soils and their microbiological properties from a transect from Cape Horn to the Antarctic Peninsula.- *Polar Biosci.* 12: 54–67.
- Bölter, M., Blume, H.-P. & Wetzel, H. (2003): Properties, formation and ecology of Arctic soils: results from the Tundra Northwest Expedition 1999 (Nunavut and Northwest Territories, Canada).- *Polarforschung* 73: 89–101.
- Bölter, M., Blume, H.-P., Schneider, D. & Beyer, L. (1997): Soil properties and distributions of invertebrates and bacteria from King George island (Arcowski Station), Maritime Antarctic.- *Polar Biol.* 18: 295–304.
- Bölter, M., Blume, H. P. & Erlenkeuser, H. (1994): Pedological, isotopic, and microbiological properties of Antarctic soils.- *Polarforschung* 64: 1–7.
- Bölter, M. & Kandeler, E. (2004): Microorganisms and microbial processes in Antarctic soils.- In: J.M. Kimble (ed.) *Cryosols*. Springer, Berlin, 557–572.
- Bölter, M., Kappen, L. & Meyer, M. (1989): The influence of microclimatic conditions on potential photosynthesis of *Usnea sphacelata* - a model.- *Ecol. Res.* 4: 297–307.
- Bölter, M., Legendre, P., Leeuw, J. de, Park, R., Schwinghamer, P., Stevens, S. E. & Troussellier, M. (1987): Numerical ecology: developments for microbial ecology. (Chairman Summary).- In: P. Legendre & L. Legendre (eds), *Developments in numerical ecology*. NATO ASI Series, G 14, Springer-Verlag, 469–484.
- Bölter, M. & Möller, R. (2006): Changing microbial ecology with changes in grazing and its management.- In: B.C. Forbes, M. Bölter, L. Müller-Wille, J. Hukkinen, F. Müller, N. Gunsley, Y. Konstantinov (eds), *Reindeer management in northernmost Europe*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, *Ecol. Studi.* 184: 265–295.
- Bölter, M., Möller, M. & Müller-Lupp, W. (2002): CO₂-release from permafrost soils in relation to temperature changes. - In: R. O. Rasmussen & N. E. Koroleva (eds.) *Social and environmental impacts in the North*, Kluwer Acad. Publ, Dordrecht, 7–24.
- Bölter, M., Möller, R., Müller-Lupp, W. & Soethe, N. (2006): Dynamics of CO₂ evolution of Arctic soils from Northern Siberia and Scandinavia.- In: R. Hatano & G. Guggenberger (eds.), *Symptom of Environmental Change in Siberian Permafrost Region*, Proc. Internat. Symp JSPS Core to Core Program between Hokkaido University and Martin Luther University Halle-Wittenberg, 29–20 Nov 2005, Sapporo, Japan. Hokkaido Univ. Press, Sapporo, Japan, 193–206.
- Bölter, M., Müller-Lupp, W., Takata, K., Yabuki, H. & Möller, R. (2003): Potential CO₂-production in aerobic conditions from a Siberian tundra environment.- *Polar Biosci* 16: 70–85.
- Bölter, M., Seppelt, R.D., Beyer, L. & Pingpank, K. (2000): Studies on floristic diversity, soil organic matter, and soil microbes from the Windmill Islands, East Antarctica.- *Bibl. Lichenol.* 75: 421–432.
- Burkhard, B. (2004): Ecological Assessment of the Reindeer Husbandry System in Northern Finland.- *Diss. Inst. Ökosystemforsch. Univ. Kiel*.
- Danell, K. & Angerbjörn, A. (1999): Tundra Northwest 1999.- In: E. Grönlund (ed), *Polarforschungssekret., Årsbok, Stockholm*, 53–196.
- Eriksen, B., Bölter, M., Breen, K., Henry, G., Lévesque E., Mattson, J.-E., Parker, C. L. & Rayback, S. (2003): Environment and site descriptions of an ecological baseline study in the Canadian Arctic: The Tundra Northwest Expedition 1999 (Nunavut and Northwest Territories, Canada).- *Polarforschung* 73: 77–88.
- Falk, K. (1990): Photosyntheseleistung ausgewählter Flechten der Antarktis und spanischer Hochgebirgsstandorte – ein Vergleich.- *Dipl.-Arbeit IPÖ Univ. Kiel*, 1–118.
- Fleischer, D., Bölter, M. & Möller, R. (2012): Implementation of initial data populations of environmental data and creating a primary working database.- *Polar Sci.* 6: 97–103.
- Forbes, B. C., Bölter, M., Müller-Wille, L., Hukkinen, J., Müller, F., Gunsley, N. & Konstantinov, Y. (ed) (2006): *Reindeer management in northernmost Europe*.- *Ecol. Stud.* 184, Springer-Verlag, Heidelberg, 1–397.
- Goryachkin, S. V., Blume, H. P., Beyer, L., Campbell, I., Claridge, G., Bockheim, J. G., Karavaeva, N. A., Targulian, V. & Tarnocai, C. (2004): Similarities and differences in Arctic and Antarctic soil zones.- In: J.M. Kimble (ed.), *Cryosols*, Springer, Berlin, 49–70.
- Green, T. G. A., Kulle, D., Pannewitz, S., Sancho, L. G. & Schroeter, B. (2005): UV-A protection in mosses growing in continental Antarctica.- *Polar Biol.* 28: 822–827.
- Green, T. G. A., Sancho, L. G., Pintado, A. & Schroeter, B. (2011): Functional and spatial pressures on terrestrial vegetation in Antarctica forced by global warming.- *Polar Biol.* 34: 1643–1656.
- Green, T. G. A., Schroeter, B. & Sancho, L. G. (2007): Plant life in Antarctica.- In: F.I. Pugnaire & F. Valladares (eds), *Handbook of Functional Plant Ecology*, CRC Press, Boca Raton London New York, 389–434.
- Green, T. G. A., Schroeter, B. & Seppelt, R. D. (2000): Effects of temperature, light and ambient UV on the photosynthesis of the moss *Bryum argenteum* Hedw. in continental Antarctica.- In: W. Davison, C. Howard-Williams & P. Broady (eds), *Antarctic ecosystems: models for wider ecological understanding*, The Caxton Press, Christchurch NZ, 165–170.
- Hughes, K. A., Ott, S., Bölter, M. & Convey, P. (2006): Colonization processes. - In: D.M. Bergström, P. Convey, & H.L. Huiskes (eds), *Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin, 33–54.
- Jenny, H. (1984): *Factors of soil formation*.- Dover Publ., New York, 1–281.
- Kappen, L. (1973): Response to extreme environments.- In: V. Ahmadjian & M. Hale (eds), *The Lichens*. Acad. Press New York, London, 311–380.

- Kappen, L. (1988): Ecophysiological relationships in different climatic regions.- In: M. Galun (ed), Handbook of Lichenology II, CRC-Press, Boca Raton, 37–100.
- Kappen, L. (1989): Field measurements of carbon dioxide exchange of the Antarctic lichen *Usnea sphacelata* in the frozen state.- *Antarctic Sci.* 1: 31–34.
- Kappen, L. (1993): Lichens in the Antarctic region.- In: E.I. Friedmann (ed), *Antarctic Microbiology*, Wiley, New York, 433–490.
- Kappen, L., Bölter, M. & Kühn, A. (1987): Photosynthetic activity at natural habitats in the maritime Antarctic.- *Bibl. Lichenol.* 25: 297–312.
- Kappen, L., Breuer, M. & Bölter, M. (1991): Ecological and physiological investigations in continental antarctic cryptogams. 3. Photosynthetic production of *Usnea sphacelata*: Diurnal courses, models, and the effect of photoinhibition.- *Polar Biol.* 11: 393–401.
- Kappen, L., Meyer, M. & Bölter, M. (1988): Photosynthetic production of *Ramalina terebrata*, a maritime Antarctic lichen.- *Polarforschung* 58: 181–188.
- Kappen, L., Meyer, M. & Bölter, M. (1990): Ecological and physiological investigations in continental Antarctic cryptogams. I. Vegetation patterns and its relation to snow cover on a hill near Casey Station, Wilkes Land.- *Flora* 184: 209–220.
- Kappen, L. & Schroeter, B. (1995): Eine maßgeschneiderte Expedition in die Antarktis.- *Mitt. Kieler Polarforsch.* 11: 15–16.
- Kappen, L. & Schroeter, B. (2002): Plants and lichens in the Antarctic, their way of living and their relevance to soil formation.- In: L. Beyer & M. Bölter (eds), *Geocology of Antarctic ice-free coastal Landscapes*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Ecol. Stud. 154: 327–373.
- Kappen, L., Schroeter, B., Green, T. G. A. & Seppelt, R. D. (1998): Chlorophyll a fluorescence and CO₂ exchange of *Umbilicaria aprina* under extreme light stress in the cold.- *Oecologia* 113: 325–331.
- Kappen, L., Bölter, M. & Kühn, A. (1986): Field measurements of net photosynthesis of lichens in the Antarctic.- *Polar Biol.* 5, 255–258.
- Kemper, N. (2004): Untersuchungen zum Vorkommen ausgewählter Zooanthropose-Erreger bei Rentieren unter dem Aspekt der aktuellen Situation der finnischen Rentierwirtschaft.- *Diss. Tierärztl. Hochschule Hannover*, 1–163.
- Kuhn, D. (1997): Genese, Ökologie und Soziologie einer Bodengesellschaft in einem Periglazialgebiet der King-George-Insel (West-Antarktis).- *Schriftenreihe Inst. Pflanzenern. Boodenk.* 40: 1–173.
- Lud, D., Schlenso, M., Schroeter, B. & Huiskes, A. H. L. (2003): The influence of UV-B radiation on light dependent photosynthetic performance in *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske in Antarctica.- *Polar Biol.* 26: 225–232.
- Mataloni, G., Garraza, G. G., Bölter, M., Convey, P. & Fermari, P. (2010): What shapes edaphic communities in mineral and ornithogenic soils of Cierva Point, Antarctic Peninsula.- *Polar Sci.* 4: 405–419.
- Melick, D. J., Bölter, M. & Möller, R. (1994): Rates of soluble carbohydrate utilization in soils from the Windmill Islands Oasis, Wilkes Land, continental Antarctica.- *Polar Biol.* 14: 59–64.
- Müller-Lupp, W. (2001): Gefrier- und Tauprozesse im sibirischen Permafrost – Untersuchungsmethoden und ökologische Bedeutung.- *Diss. IPÖ Univ. Kiel*, 1–133.
- Müller-Lupp, W. & Bölter, M. (2003): Effects of soil freezing on physical and microbiological properties of permafrost affected soils.- In: M. Philips, S. M. Springman & L. Arenson (eds), *Permafrost – Proc. of the 8th Internat. Conf. On Permafrost*, Zürich, 21–25 July 2003, ICOP 2003 Permafrost [2], Swets & Zeitlinger, Lisse, 801–805.
- Ochyra, R., Lewis Smith, R. I. & Bednarek-Ochyra, H. (2008): *Illustrated Moss Flora of Antarctica*.- Cambridge University Press, Cambridge, 1–685.
- Ovstedal, D. O. & Lewis Smith, R. I. (2001): *Lichens of Antarctica and South Georgia. A guide to their identification and ecology*.- Cambridge University Press, Cambridge, 1–474.
- Pannowitz, S., Schlenso, M., Green, T. G. A., Sancho, L. G. & Schroeter, B. (2003): Are lichens active under snow in continental Antarctica?.- *Oecologia* 135: 30–38.
- Peth, S. (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidwirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten – Auswirkungen auf thermische, hydraulische und mechanische Bodeneigenschaften.- *Schriftenr. Inst. Bodenkunde, Univ. Kiel*, Bd. 64.
- Sancho, L. G., Schulz, F., Schroeter, B. & Kappen, L. (1999): Bryophyte and lichen flora of South Bay (Livingston Island: South Shetland Islands, Antarctica).- *Nova Hedwigia* 68: 301–337.
- Sancho, L. G., Green, T. G. A. & Pintado, A. (2007): Slowest to fastest: Extreme range in lichen growth rates supports their use as an indicator of climate change in Antarctica.- *Flora* 202: 667–673.
- Schipperges, B. (1994): Intraspecific variations in the ecophysiology of Arctic to temperate populations of the lichen *Cetraria nivalis*.- *Diss. IPÖ Univ. Kiel*, 1–179.
- Schlenso, M. & Schroeter, B. (2001): A new method for the accurate in situ monitoring of chlorophyll a fluorescence in lichens.- *Lichenologist* 33: 443–452.
- Schlenso, M., Pannowitz, S., Green, T. G. A. & Schroeter, B. (2004b): Metabolic recovery of continental Antarctic cryptogams after winter.- *Polar Biol.* 27: 399–408.
- Schlenso, M., Schroeter, B., Pannowitz, S. & Green, T. G. A. (2004a): Adaptation of mosses and lichens to irradiance stress in maritime and continental antarctic habitats.- In: A. H. L. Huiskes, W. W. C. Gieskes, J. Rozema, R. M. L. Schorno, S. M. van der Vies & W. J. Wolff (eds), *Antarctic Biology in a Global Context*. Backhuys Publ. Leiden, 161–166.
- Schlenso, M., Schroeter, B., Sancho, L. G., Pintado, A. & Kappen, L. (1997): Effect of strong irradiance on photosynthetic performance of the melt-water dependent cyanobacterial lichen *Leptogium puberulum* (Collema-ceae) Hue from the maritime Antarctic.- *Bibl. Lichenol.* 67: 235–246.
- Schmidt, N. (1999): Microbial properties and habitats of permafrost soils on Taimyr Peninsula, Central Siberia.- *Diss. Univ. Kiel*, 1–189.
- Schmidt, N. & Bölter, M. (2002): Fungal and bacterial biomass in tundra soils along an arctic transect from Taimyr Peninsula, central Siberia.- *Polar Biol.* 25: 871–877.
- Schroeter, B. (1991): Untersuchungen zu Primärproduktion und Wasserhaushalt von Flechten der maritimen Antarktis unter besonderer Berücksichtigung von *Usnea antarctica* Du Rietz.- *Diss. Univ. Kiel*, 1–148.
- Schroeter, B. (1993): Auf den Spuren von Robert Scott's Terra Nova Expedition – Botanische Untersuchungen in Botany Bay, Granite Harbour, Süd Victoria Land, kontinentale Antarktis.- *Mitt. Kieler Polarforsch.* 8: 28–31.
- Schroeter, B. (1997): Grundlagen der Stoffproduktion von Kryptogamen unter besonderer Berücksichtigung der Flechten – eine Synopse.- *Habil.Schrift Univ. Kiel*, 1–117.
- Schroeter, B., Green, T. G. A., Kappen, L. & Seppelt, R. D. (1994): Carbon dioxide exchange at subzero temperatures. Field measurements on *Umbilicaria aprina* in continental Antarctica.- *Cryptogamic Bot.* 4: 233–241.
- Schroeter, B., Green, T. G. A., Kulle, D., Pannowitz, S., Schlenso, M. & Sancho, L. G. (2012): The moss *Bryum argenteum* var. *muticum* Brid. Is well adapted to cope with high light in continental Antarctica.- *Antarct. Sci.* 24: 281–291.
- Schroeter, B., Green, T. G. A., Pannowitz, S., Schlenso, M. & Sancho, L. G. (2010): Fourteen degrees of latitude and a continent apart: comparison of lichen activity over two years at continental and maritime Antarctic sites.- *Antarct. Sci.* 22: 681–690.
- Schroeter, B., Green, T. G. A., Pannowitz, S., Schlenso, M. & Sancho, L. G. (2011): Summer variability, winter dormancy: lichen activity over 3 years at Botany Bay, 77° S latitude, continental Antarctica.- *Polar Biol.* 34: 13–22.
- Schroeter, B., Green, T. G. A. & Seppelt, R. D. (1993): The history of Granite House and the western geological party of Scott's Terra Nova expedition.- *Polar Rec.* 29: 219–224.
- Schroeter, B., Kappen, L. & Moldaenke, C. (1991): Continuous in situ recording of the photosynthetic activity of Antarctic lichens – established methods and a new approach.- *Lichenologist* 23: 253–265.
- Schroeter, B., Kappen, L. & Sancho, L. G. (2000): Seasonal variation in the carbon balance of lichens in the maritime Antarctic: Long-term measurements of photosynthetic activity in *Usnea aurantiaco-atra*.- In: W. Davison, C. Howard-Williams & P. Broady (ed) *Antarctic ecosystems: models for wider ecological understanding*. The Caxton Press, Christchurch, NZ, 258–262.
- Schroeter, B. & Scheidegger, C. (1995): Water relations in lichens at subzero temperatures: Structural changes and carbon dioxide exchange in the lichen *Umbilicaria aprina* from continental Antarctica.- *New Phytol.* 131: 273–285.
- Schroeter, B. & Schlenso, M. (1999): Über die Auswirkungen von Starklicht auf die Photosynthese von Flechten und Moosen in der Antarktis.- *Mitt. Kieler Polarforsch.* 15: 14–18.
- Schroeter, B. & Schulz, F. (1995): Untersuchungen zur Jahresprimärproduktion von Flechten in der maritimen Antarktis.- *Ber. Polarforsch.* 155: 36–38.
- Schulz, B. (1999): Bodenmikrobiologische Untersuchungen an einem Low-Center-Polygon im Lena-Delta.- *Dipl.-Arbeit IPÖ & Inst. Pflanzenernähr. Bodenk.*, Univ. Kiel, 1–59.
- Schulz, F. (2000): Zur Struktur und Interaktion der Kryptogamenvegetation in der maritimen Antarktis.- *Diss. IPÖ Univ. Kiel*, 1–139.
- Seppelt, R. D., Green, T. G. A. & Schroeter, B. (1995): Lichens and mosses from the Kar Plateau, southern Victoria Land, Antarctica.- *New Zeal. J. Bot.* 33: 203–220.
- Seppelt, R. D., Green, T. G. A. & Schroeter, B. (1996): Additions and corrections to the lichen flora of the Kar Plateau, southern Victoria Land, Antarctica.- *New Zeal. J. Bot.* 34: 329–331.
- Seppelt, R. D., Türk, R., Green, T. G. A., Moser, G., Pannowitz, S., Sancho, L. G. & Schroeter, B. (2010): Lichen and moss communities of Botany Bay, Granite Harbour, Ross Sea, Antarctica.- *Antarct. Sci.* 22: 691–702.
- Soechting, U., Ovstedal, D. G. & Sancho, L. G. (2004): The lichens of Hurd Peninsula, Livingston Island, South Shetlands, Antarctica.- *Bibl. Lichenol.* 88: 607–658.

- Soethe, N.* (2000): Mikrobiologische Prozesse während des Frühjahrs in einigen subpolaren Grünland- und Waldböden Nordnorwegens.- Dipl.-Arbeit Inst. Pflanzenernähr. Bodenkd. / IPÖ Univ. Kiel, 1–96.
- Sommerkorn, M.* (1998): Patterns and controls of CO₂ fluxes in wet Tundra types of the Taimyr Peninsula, Siberia: the contribution of soils and mosses.- Diss. IPÖ Univ. Kiel, 1–189.
- Sommerkorn, M., Bölter, M. & Kappen, L.* (1999b): Carbon dioxide fluxes of soils and mosses in wet tundra of Taimyr Peninsula, Siberia: controlling factors and contribution to net system fluxes.- *Polar Res.* 18: 253–260.
- Sommerkorn, M., Gundelwein, A., Pfeiffer, E.-M. & Bölter, M.* (1999a). Carbon dioxide and methane emissions at Arctic tundra sites in North Siberia.- In: H. Kassens, H.A. Bauch, I. Dmitrenko, H. Eicken, H.-W. Hubberten, M. Melles, J. Thiede & L. Timokhov (eds), *Land-Ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history.* Springer-Verlag, Berlin, 342–352.
- Stonehouse, B.* (1999): Biological processes in cold regions.- *Polar Rec.* 35: 5–10.
- Taylor, G.* (1913): The western journeys. In: L. Huxley (ed), *Scott's last expedition.* Smith, Elder & Co, London, 182–291.
- Taylor, G.* (1916): *With Scott: the silver lining.*- Dodd. Mead & Co., New York, 1–464.
- Tscherko, D., Bölter, M., Beyer, L., Chen, J., Elster, J., Kandeler, E., Kuhn, D. & Blume, H.-P.* (2003): Biomass and enzyme activity of two soils transects at King George Island, Maritime Antarctic.- *Arct. Antarct. Alp. Res.* 35: 34–47.
- Winkler, J. B.* (2000): Die Rolle der Schneebedeckung für die Kryptogamenvegetation in der Antarktis.- Diss. IPÖ Univ. Kiel, 1–134.