

# Geoökologische Aspekte der Schadstoffdynamik in einem antarktischen Geosystem

Von Bernd Tschochner<sup>1</sup>, Oswald Blumenstein<sup>1</sup>, Wolfgang Krüger<sup>1</sup> und Wolfgang Bechmann<sup>2</sup>

**Zusammenfassung:** Es wird die anthropogene Überformung eines antarktischen Geosystems durch organische Kontaminanten beschrieben. Im Vergleich zu Milieubedingungen des gemäßigten Klimas treten spezifische Verteilungsmuster auf. Diese sind Ergebnis von Wechselwirkungen, welche sowohl zwischen den Stoffen untereinander als auch zwischen ihnen und den natürlichen Raumstrukturen eintreten. Da eine Fixierung an natürliche Bodenorganica nicht möglich ist, entwickelt sich die Bodenbasis zu einer Schadstoffsenke. Die Systemdynamik wird unter Berücksichtigung theoretischer Ansätze der Geoökologie interpretiert.

**Summary:** Described are anthropogenic changes of an antarctic geosystem caused by organic contaminants. In comparison to the environmental conditions of a temperate climate, specific orders of pattern occur. They are the result of interactions between the substances among each other as well as between the substances and the natural space elements. The base of soil develops into a depot of contaminants because they cannot be fixed to natural soil organics. The dynamics of this system are interpreted by taking theoretical geoecological approaches into consideration.

## 1. GEOÖKOLOGISCHE ANSÄTZE UND PROBLEMSTELLUNG

Vorliegender Aufsatz nimmt eine Einschätzung der Einflüsse anthropogener Aktivitäten im lokalen Maßstab vor. Er versteht sich somit als ein Bestandteil der angewandten Antarktisforschung, deren Ziel in der Verbesserung umweltrelevanter Entscheidungsfindung und in Vorbeugung bzw. Minimierung schädigender Einflüsse auf die Umwelt (vgl. WALTON & SHEARS 1994) besteht.

Viele Gesetzmäßigkeiten anthropogen initiiertter Geodynamik sind für gemäßigte Klimabedingungen schon intensiv untersucht worden. Geosysteme mit verschiedenen stofflich-energetischen Milieubedingungen lassen sich jedoch nicht mit einheitlichen Anspracheregeln erfassen. Es stellt sich demnach das Grund-satzproblem nach der Allgemeingültigkeit bzw. der Notwendigkeit einer räumlichen Spezifizierung von relevanten Prozessen der Geosystementwicklung.

Bei der Aufklärung geoökologischer Charakteristika anthropogener Aktivitäten in polaren Geosystemen ist zu berücksichtigen, dass durch die menschliche Tätigkeit neue Stoffe und Energieformen in die Geosysteme eingetragen und neue Struktu-

ren geschaffen werden können. Im Verlaufe dieses „Hemero-bisierungsprozesses“ wird deshalb zunehmend die Bedeutung naturgenetischer Prozesse vermindert (vgl. BLUMENSTEIN 1996). Sowohl diese Strukturveränderungen als auch neue Formen physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse führen zu einer Zunahme der Komplexität der Geosysteme. Alle eingetragenen Stoffkomponenten, so auch die Schadstoffe, erfahren einerseits eine Zwischenspeicherung, andererseits werden sie aber auch um- und abgebaut bzw. als Output über die Systemgrenze abgegeben.

Je komplexer sich die Struktur und die Dynamik entwickeln, um so zahlreicher können auch neue „Systemeigenschaften“, die einzelnen Bestandteile nicht oder nur in geringem Maße besitzen, werden. Deshalb sind nicht Einzelprozesse, sondern die Funktionalität des Gesamtsystems zu erfassen.

Ein entsprechendes Grundprinzip, dem Synergetik-Konzept entlehnt, besteht unter anderem darin, daß aus der Umgebung auf das Geosystem Kontrollparameter einwirken. Sie sind auf thermodynamische Größen zurückzuführen (z.B. Temperatur T, Druck p, Masse m und Konzentrationen c) und kontrollieren seinen makroskopischen Zustand. In dessen Innerem sind metastabile Parameter von Bedeutung. Diese können als Ordnungsparameter wirksam werden und nicht nur ihre Eigenschaften, sondern auch die der anderen Zustandsgrößen verändern („Ver-sklavung“).

Vergleicht man das polare mit dem gemäßigten Klima, so sind andersartige Bedingungen in Form, Intensität und Rhythmik der Kontrollparameter (Strahlung, Temperatur, Wind) gegeben. Unmittelbar werden davon Um- und Abbauprozesse (mikrobiell, photolytisch) sowie die Geschwindigkeit der Translokationsprozesse (Verlagerungsprozesse) beeinflusst. Zu berücksichtigen ist auch die Verminderung der Barrierewirkung des Substrates gegenüber einer Stoffmigration infolge eingeschränkter Interaktionsmöglichkeiten (Sorption, Komplexbildung) mit der Matrix.

Es sollten deshalb folgende Fragen untersucht werden: Inwie weit können die für polare Räume typischen Kontrollparameter sowie die durch das Fehlen eines Humushorizontes verminderten Speichermöglichkeiten typische Muster der Verteilung von Schadstoffen in der Fläche und der Tiefe initiieren? Welche Spezifika einer potentiellen bzw. aktuellen Gefährdung terrestrischer und aquatischer Geosysteme treten unter den polaren Milieubedingungen in der räumlichen Nachbarschaft von Kontaminationsherden auf?

<sup>1</sup> Dr. Bernd Tschochner, Dr. habil. Oswald Blumenstein, PD Dr. habil. Wolfgang Krüger, Institut für Geoökologie, Universität Potsdam, Postfach 60 15 53, D-144 15 Potsdam

<sup>2</sup> HD Dr. habil. Wolfgang Bechmann, Institut für Physikalische und Technische Chemie, Universität Potsdam, Postfach 60 15 53, D-144 15 Potsdam

Manuskript eingegangen 20. Februar 1998; angenommen 5. Oktober 1998

## 2. EINIGE ARBEITEN ZUR ANTHROPOGENEN STOFFDYNAMIK IN DER ANTARKTIS

Gegenwärtig zeigt sich auch in der Antarktisforschung ein verstärkter Trend zu Forschungsarbeiten, welche im Rahmen eines Umweltmonitorings durchgeführt werden. Sie sind als fundamentales Element von Grundlagenuntersuchungen im Umweltmanagement und -schutz zu verstehen und führen zur Erstellung von Basisdaten, welche sowohl eine Identifikation von natürlichen als auch anthropogen bedingten Umweltveränderungen möglich machen (vgl. SCAR-COMNAP-Report 1996). Einige wesentliche Arbeiten mit zum Teil widersprüchlichen Resultaten sollen in diesem Zusammenhang benannt werden.

KENNICUTT et al. (1991 bzw. 1992) beschäftigten sich mit der Prozessdynamik, welche durch eine Ölhavarie der Bahia Paraiso ausgelöst wurde. Das gesamte marine Geosystem im Arthur Harbor war im sub- und intertidalen Bereich unterschiedlich stark kontaminiert. Zur Verringerung der Schadstoffakkumulation trugen vor allem die wind- und strömungsbedingte Verdünnung, die Stoffaufnahme durch Organismen (Inkorporation) und die Sedimentation bei, während nach Ansicht der Verfasser die mikrobielle Oxidation bzw. photolytischen Prozesse kaum eine Rolle spielten. Auch HOWINGTON et al. (1992) untersuchten die Verteilung von strömungs- und windbedingten Abwasserfahnen in küstennahen Gewässerbereichen.

KARL (1992) diskutierte hingegen den Anteil eines mikrobiellen Oxidationspotentials an dem Abbau einzelner organischer Stoffgruppen. GREEN & NICHOLS (1995) untersuchten die Dynamik ausgewählter anthropogener Kohlenwasserstoffe in marinen Sedimenten und Böden im Umkreis der Davis-Station und fanden eine Sterolverbindung, welche durch die Reduktion des ungesättigten Cholesterols im Interstitial entsteht. Einen Ansatz, biogene Organica von anthropogenen zu unterscheiden, diskutierten VENKATESAN & SANTIAGO (1989).

Auch Fragen der Stoffdynamik von Metallspezies unter polaren Bedingungen waren Gegenstand der Untersuchungen über anthropogene Einflüsse. ACETO et al. (1993) untersuchten die Verteilung von Spurenmetallen in einem See, COSMA et al. (1993) bestimmten Spurenmetalle in den Sedimenten der Terra Nova Bay. CAPRIOLI et al. (1993) klärten die raum-zeitlichen Variationen von Haupt- und Spurenmetallen in Seenbereichen auf. CAPODAGLIO et al. (1993) diskutieren die Bedeutung von Komplezierungsprozessen im oberen Bereich des Wasserkörpers der Terra Nova Bay, welche eine wesentliche Voraussetzung für die Bioverfügbarkeit der Metallspezies darstellt. LUGAR (1994) faßt wesentliche Ergebnisse des Monitorings von Metallen in suspendierten Partikeln der McMurdo-Station zusammen.

## 3. UNTERSUCHUNGSRAUM UND -METHODEN

Einige Untersuchungen zur Dynamik von Xenobiotica unter polaren Bedingungen wurden während der Feldarbeiten 1991/92 im Fuhrpark der Georg-Forster-Station und seinem Marginalraum bzw. dem Zenitgebiet (beide Schirmacheroase) vorge-

nommen (vgl. Abb. 1). Sie waren kein immanenter Bestandteil eines Arbeitsprogramms, die Probenahme trug somit den Charakter einer Voruntersuchung. Die Resultate können deshalb nur Ansätze reflektieren, die exakte Beweisführung bedarf einer größeren Probenanzahl sowie einer spezifischen Problemorientierung in Ansatz und Realisierung.

Der Fuhrpark (F) ist an einem schwach geneigten ( $2^\circ - 4^\circ$ ), ost-exponierten Hang mit angrenzendem Talbodenbereich lokalisiert, welcher beiderseits durch zwei W-E streichende Felsrücken aus anstehendem Biotitgneis begrenzt wird (Abb. 1 unten). Die spezifische Nutzung seit 1976 ließ die Annahme zu, daß die geostrukturellen Bedingungen nicht nur eine mögliche Tiefenverlagerung von Kontaminanten zuließen, sondern auch ihre Migration in ein nahegelegenes Oberflächengewässer.

Das Zenitgebiet (Z) befindet sich ca. 400 m nördlich und wird von einer Gruppe von vier Tälern gebildet, welche zwischen 100 m und 110 m über dem Meeresspiegel liegen.

Das sich in W-E erstreckende, eisfreie Areal der Schirmacheroase befindet sich zwischen dem antarktischen Inlandeis im Süden und dem Lazarevshelfeis im Norden. Das kristalline Gestein in seinem Untergrund unterlag mehrfachen Metamorphosen und Faltungsvorgängen und ist von markanten Störungszonen durchzogen (vgl. KÄMPF & STACKEBRANDT 1985). Lockergestein findet man in drei Ausprägungsformen. Der Hangschutt wurde vor allem durch Frostverwitterung des anstehenden Gesteins gebildet. Die Schuttdecken des Talbodens entstanden sowohl nach der Umlagerung von Hangschutt- als auch von Moränenmaterial.

Das Substrat wurde, vor allem infolge der hohen Anzahl von Frostwechseltagen (mehrjähriges Mittel = 60 d), durch mechanische Verwitterungsprozesse des anstehenden Gesteins gebildet. Morphogenetisch bedingt, besteht zwischen beiden untersuchten Standorttypen „Hangschutt“ und „sandiger Talboden“ ein deutlicher Unterschied im Anteil des Grobbodens bzw. Skelettgehaltes (Tab. 1). In der Verteilung der Korngrößen des Feinbodens dominiert mit einem Anteil von 30–50 % überall die Mittel- und Grobsandfraktion (vgl. KRÜGER 1996). Sehr niedrig sind die Gehalte an Feinsand, Schluff und Ton. Sowohl im Hangschutt als auch im sandigen Talbodenbereich (vgl. KRÜGER 1996) liegen die Werte dieser Substrate unter 10 %.

Die Probennahmepunkte wurden so ausgewählt, dass sowohl die potentielle Transportrichtung der Kontaminanten als auch verschiedene Standorttypen erfasst werden konnten (vgl. Abb. 1 sowie Tab. 1).

Für ihren Nachweis wurden deshalb Wasser- und Bodenproben aus unterschiedlichen Profilbereichen (vgl. Tab. 5–7) entnommen. Die Auswahl richtete sich nach den Kriterien „Tiefe des Frosttales (Basis des Auftauhorizonts)“ und „Änderung der Substratbeschaffenheit“. Es war versucht worden, je Standort drei Probenahmen abzusichern.

Die Anteile der einzelnen Korngrößenklassen wurden für die Sandfraktion mittels Trockensiebung, die Schlufffraktionen und

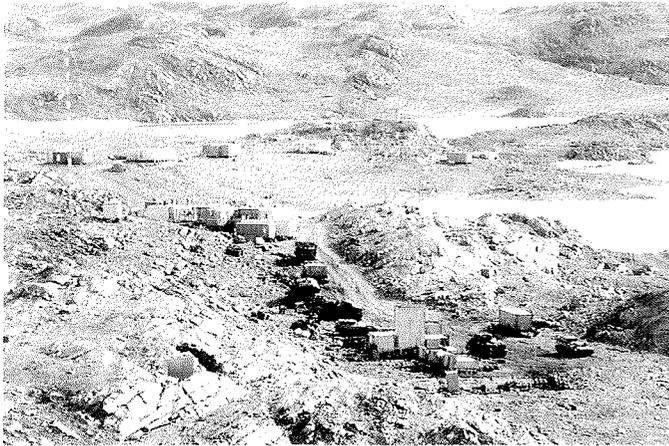
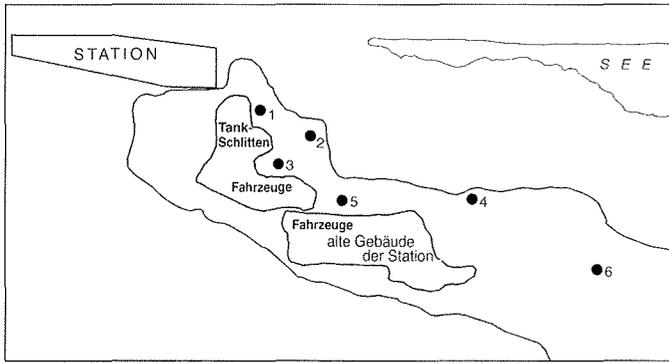


Abb.1: Übersicht über die Untersuchungsräume (oben) und Detailphoto „Fuhrpark“ (unten).

Fig. 1: View of the investigation areas (top) and a detailed foto of „Fuhrpark“ (below).

Standort	F 1, F 2 und F 3	F 4, F 5 und F 6
Standorttyp	Hang mit Hangschutt, O - W exponiert	sandiger Talboden, eben
Durchschnittlicher Anteil des Grobboden [%]	30 - 40	10 - 30
Dominante Fraktion des Feinbodens	Mittelsand	Mittelsand
Durchschnittliches Porenvolumen [%]	35 - 45	43 - 50

Tab. 1: Charakteristika der Probennahmepunkte

Tab. 1: Characteristics of sampling sites

der Tongehalt durch das Sedimentationsverfahren nach KÖHN (vgl. BARSCH & BILLWITZ 1990) ermittelt. Die Bestimmung der Bodenfarbe erfolgte am frischen Bodenschurf im Gelände mit Hilfe der Farbskala „Standard Soil Color Charts“ der Firma Eijkamp.

Das Bodenwasser wurde als Schöpfprobe aus dem Bodenaufschluss entnommen. Die Analyse weiterer Zustandsgrößen ist auf Basis der in Tab. 2 aufgeführten Verfahren realisiert worden.

Zustandsgröße	Verfahren	Medium
Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)	DIN 38 409-H18	Boden, Wasser
Adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX)	DIN 38 409-H14	Boden, Wasser
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	DIN 38 409-H13	Boden, Wasser
Polyzyklische Biphenyle (PCB)	DIN 38 407 - F2	Boden, Wasser
Gesamter organisch gebundener bzw. löslicher organ. Kohlenstoff (TOC / DOC)	DIN 38 409 - H3	Boden, Wasser
Extrahierbare organische Kohlenstoffverbindungen (EOX)	DIN 38 409 - H8	Boden, Wasser
Benzolaromaten (BTX)	DIN 38 407 - F9	Boden, Wasser
pH-Wert	DIN 38 404 - C5	Boden, Wasser
Elektrische Leitfähigkeit	DIN 38 404 - C8	Wasser
Keimzahl KBE je g Boden		Boden

Tab. 2: Analyierte Zustandsgrößen

Tab. 2: Analyzed state parameters

#### 4. POTENTIELLE TRANSFORMATIONSPROZESSE DER ORGANISCHEN XENOBIOTICA

Die BTX-Gruppe umfaßt Benzol, Toluol und Xylol. Diese Verbindungen sind Bestandteil der Leichtöle und sehr stabil. Emissionsquellen sind sowohl Kraftfahrzeugabgase als auch Verdunstungsprozesse beim Tanken. Infolge ihrer hohen Flüchtigkeit können sie schnell aus dem Bodenbereich entweichen. Sie sind innerhalb des Bodens, wegen ihrer guten Wasserlöslichkeit und nur mäßigen Neigung zur sorptiven Bindung an die partikuläre

Matrix durch H-Brücken, mobil (Benzol > Toluol > Xylol). Ein Abbau kann durch aerobe Mikroorganismen erfolgen.

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) besitzen eine unterschiedliche Anzahl von kondensierten Aromaten im Molekül. Die PAK-Gehalte sind Summenparameter, in die je nach Methode die Summe der Konzentrationen einer unterschiedlichen Anzahl von Leitsubstanzen eingeht. Die Ermittlung der PAK basiert auf der EPA-Methode 610, welche die Bestimmung von 16 Substanzen beinhaltet. Die Stoffgruppe ist vorwiegend anthropogenen Ursprungs, deshalb zeigen sich bei einer Belastung als Resultat einer Emission typische PAK-Profile, die sowohl Rückschlüsse auf den Emittenten als auch Hinweise auf die raumspezifische Geodynamik zulassen. Die PAK zeigen eine ausgeprägte Akkumulationstendenz an Bodenorganica. Unter gemäßigten Klimabedingungen konnte selbst bei extremen Wasserdurchsatz nur die Verlagerung niedermolekularer (2- und 3-Ringsysteme) Species nachgewiesen werden (BECHMANN & GRUNEWALD 1995).

Die Fixierung erfolgt vor allem durch Lösungsmittel-Sorbat-Interaktionen (BLUME et al. 1990), so dass insbesondere hydrophobe Species eine intensive Fixierung an die organische Bodensubstanz erfahren. Ein Abbau kann sowohl durch photolytische Spaltung als auch durch Bakterien und Pilze erfolgen.

Mobilitätsunterschiede sind unter Zuhilfenahme der physikalisch-chemischen Konstanten erklärbar (vgl. Tab. 3). Die unterschiedliche Bedeutung der flüssigen Phase für die Translokationsprozesse (Raumverlagerung) wird deutlich.

Verbindung	Dampfdruck bei 25 °C [Pa]		Wasserlöslichkeit bei 25°C [mg l <sup>-1</sup> ]
	fest	gelöst	
1. Naphthalin	10,4	36,8	3,1
2. Acenaphthen	0,3	1,5	3,8
3. Acenaphthylen	0,9	4,14	16,1
4. Fluoren	0,09	0,715	1,9
5. Phenanthren	0,02	0,0113	1,1
6. Anthracen	0,001	0,0778	0,045
7. Fluoranthen	0,00123	0,00872	0,26
8. Pyren	0,0006	0,0119	0,732
9. Benz(a)anthracen	0,000028	0,000606	0,011

Tab. 3: Durchschnittswerte physikalisch-chemischer Konstanten einiger PAK (die in der Literatur angegebenen Konstanten weichen z.Z. erheblich voneinander ab).

Tab. 3: Average data of physical-chemical constants of some PAK.

Aber auch erhöhte Gehalte an MKW können zur Mobilitätssteigerung der PAK führen. Im Untersuchungsraum stellen die Dieselölkraftstoffe die Hauptkomponenten der MKW dar. Sie bestehen aus aliphatischen (etwa 77 %) und aromatischen Strukturen (etwa 18 % Monoaromaten, 4,5 % Diaromaten, 0,5 % Triaromaten). Der Kohlenwasserstoffanteil wird mit etwa 86 % angegeben (KÄMPFER et al. 1988). Die Mobilität und Abbaubarkeit sind abhängig von den Kettenlängen. Als Retardationsmechanismen können wiederum die Bodenorganica wirksam werden.

#### 5. KLIMATISCHE UND BODENHYDROLOGISCHE CHARAKTERISTIKA IN DER SUBTOPISCHEN DIMENSION - KONTROLL- UND ORDNUNGSPARAMETER DER STOFFDYNAMIK

Die externalen (von außen wirksamen) Kontrollparameter, die auf thermodynamische Größen zurückzuführen sind, kontrollieren den Fließgleichgewichtszustand des Systems. Bestimmend sind in den Geosystemen der Schirmacheroase die Strahlung, die Temperatur und die Wassermenge, welche als Inputgrößen in die einzelnen Kompartimente eingehen.

Aus der südlichen Breitenlage und der daraus resultierenden Strahlungssituation leiten sich die Spezifika der klimatischen Verhältnisse ab. Im Gegensatz zum Inlandeis ist im Polarsommer eine positive Strahlungsbilanz zu verzeichnen, das Maximum tritt in den Monaten Dezember / Januar auf. Abb. 2 zeigt den Temperaturverlauf in 2 m Höhe während der Feldarbeiten. Es wird daraus ersichtlich, dass es im antarktischen Sommer zum Auftauen des Dauerfrostbodens kommt, wobei große Wassermengen freigesetzt werden können.

Dem mittleren Niederschlag von 330 mm steht eine potentielle Verdunstung von 500 mm gegenüber, deshalb muß das Klima der Oase als arid bezeichnet werden (vgl. BORMANN & FRITSCHKE 1998). Infolge der großen Windgeschwindigkeiten können sich nur in den Leelagen temporäre oder permanente Schneefelder ausbilden.

Die thermische Situation in den Lockergesteinsdecken wird von den Randbedingungen  
 – Witterung (Lufttemperatur, Wind, Bewölkung)  
 – Lage (Exposition, Neigung) sowie  
 – Substrateigenschaften (Farbe, Wassergehalt, Korngröße) bestimmt. Die Bodentemperaturen liegen während der Auftauphase bei beiden Standorttypen in der Regel im positiven Bereich (vgl. Abb. 3 sowie KRÜGER 1996). Frostwechsel tritt nur an Tagen mit hohem Bewölkungsgrad bzw. zu Beginn und am Ende des Polarsommers innerhalb der ersten Zentimeter des Profils ein. Bereits ab 20 cm Tiefe sind die Temperaturamplituden <5 K, in 50 cm Tiefe werden Werte zwischen 1 und 4 °C erreicht.

Von Bedeutung für die Geodynamik ist vor allem die Andauerzeit positiver Temperaturen (Tab. 4). Von ihr hängen die Intensität fluid bedingter Verlagerungsprozesse sowie, bei Erreichen der physiologisch wirksamen Temperatur, die Stoffaufnahme autotropher Organismen ab.

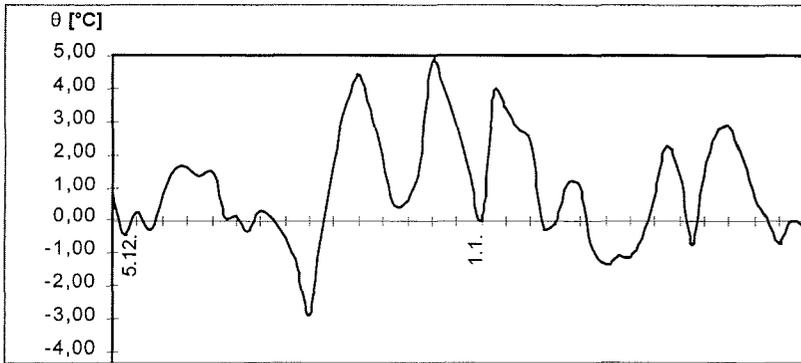


Abb. 2: Tagesmitteltemperaturen in 2 m Höhe während der Feldarbeiten.

Fig. 2: Mean temperatures at a height of two metres during field investigations.

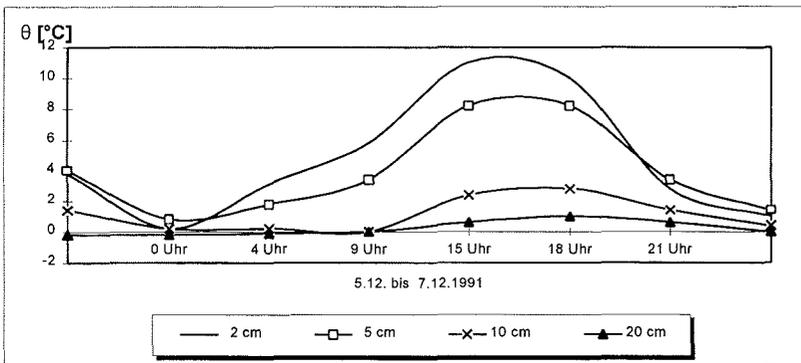
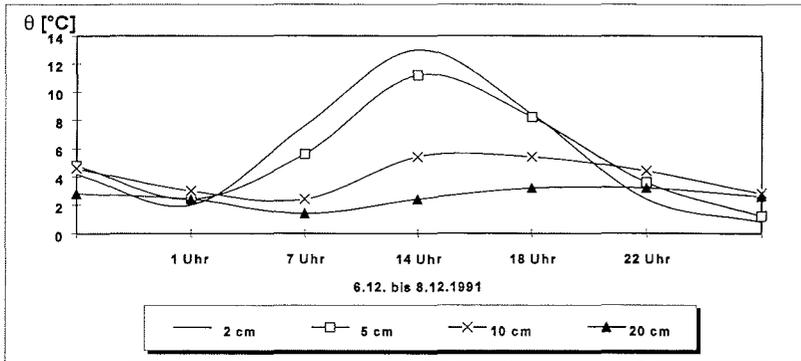


Abb. 3: Charakteristika eines Tagesganges der Bodentemperaturen an den Standorten Fuhrpark F1 (oben) und F3 (unten).

Fig. 3: Characteristics of soil temperatures during a day in a talus deposit (top) and a valley bottom location (below).

Aus der Dominanz der Mittel- und Grobsandfraktion lässt sich ein hoher Anteil an Grobporen ableiten. Das Schmelzwasser kann somit sehr schnell eindringen und bis zur Auftaubasis versickern. Es kommt in diesem Fall mit einem Wasseranteil von 10–15 Gew-% zu einer vollständigen Durchnässung des Profils. In Phasen relativer Trockenheit, vor allem nach Abschmelzen der Schneefelder ab Anfang Januar, kehrt sich die primäre Bewegungsrichtung des Bodenwassers um. Während dieses Lösungsaufstieges bleiben die Feuchtegehalte mit 2–6 Gew-% relativ niedrig.

Das Bodenwasser bestimmt wesentlich Intensität und Richtung der Geodynamik im Raum. Da es darüber hinaus die Möglichkeit besitzt, unter den raumtypischen Fluktuationen des Kontrollparameters Temperatur häufig den Aggregatzustand zu wechseln (Ausdruck einer Metastabilität) und damit alle anderen Zustandsgrößen entscheidend zu prägen, ist es als ein Ordnungsparameter des Geosystems zu begreifen.

Tiefe unter Flur [cm]	Andauerzeit [d]
0 - 5	70 - 80
5 - 20	60 - 70
20 - 50	50 - 60
50 - 80	40 - 50

Tab. 4: Andauerzeit für positive Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen

Tab. 4: Incessant time of positive soil temperatures in varying depths

## 6. TRANSLOKATIONSPROZESSE UND STRUKTURMUSTERBILDUNG

Neue stoffliche Systemelemente sowie die daraus resultierenden neuartigen Prozesse können im Ergebnis zur Selbstorganisation neuer Strukturen und damit zu Systemeigenschaften führen, welche im natürlichen Zustand nicht oder nur in geringem Maße vorhanden waren. Diese verändern die Funktionalität des Gesamtsystems. Die Tab. 5–7 enthalten einige Untersuchungsergebnisse.

Sie zeigen zunächst, dass auch in antarktischen Geosystemen durch anthropogene Aktivitäten lokal allochthone (raumfremde) Stoffe und Energieformen eingetragen und akkumuliert wurden.

Das Zenitgebiet als weitgehend unbeeinflusster Raum ist dem Fuhrpark und seiner Marginalzone gegenübergestellt, deren Bodenkörper deutlich höhere MKW- und PAK-Gehalte aufweisen. In zwei Substratproben wurden auch BTX gefunden. Diese Ersteinschätzung wird durch die hydrochemischen Charakteri-

Probe / Tiefe [cm u. F.]	MKW [mg kg <sup>-1</sup> ]	AOX [mg kg <sup>-1</sup> ]	BTX [mg kg <sup>-1</sup> ]	PAK [mg kg <sup>-1</sup> ]	Keimzahl [KBE g <sup>-1</sup> ]
F 1 - 10	7352	24	-	1,65	2,0 · 10 <sup>3</sup>
F 1 - 25	4499	45	-	1,51	2,0 · 10 <sup>3</sup>
F 1 - 50	4035	64	-	2,24	5,2 · 10 <sup>4</sup>
F 2 - 10	425	21	-	-	2,3 · 10 <sup>6</sup>
F 2 - 20	20	44	-	-	3,4 · 10 <sup>6</sup>
F 2 - 40	309	35	-	-	2,8 · 10 <sup>6</sup>
F 3 - 10	2026	24	-	-	3,0 · 10 <sup>5</sup>
F 3 - 30	452	61	-	-	4,7 · 10 <sup>5</sup>
F 3 - 50	4903	83	1,15	15,47	1,7 · 10 <sup>5</sup>
F 4 - 10	1003	30	-	-	1,5 · 10 <sup>5</sup>
F 4 - 20	1485	51	-	-	1,4 · 10 <sup>5</sup>
F 4 - 40	6651	70	-	1,1	4,6 · 10 <sup>5</sup>
F 5 - 10	1437	78	-	-	2,2 · 10 <sup>5</sup>
F 5 - 30	166	46	-	-	1,8 · 10 <sup>5</sup>
F 5 - 40	719	73	0,6	0,63	2,0 · 10 <sup>5</sup>
F 6 - 30	< 20	43	-	-	8,5 · 10 <sup>5</sup>
F 6 - 60	< 20	120	-	-	4,1 · 10 <sup>5</sup>

**Tab. 5:** Gesamtgehalte in den Bodenproben des Fuhrparks (F, vgl. Abb. 1). In keiner der Bodenproben wurde EOX (mg Cl kg<sup>-1</sup>) gefunden – bedeutet nicht nachweisbar, KBE g<sup>-1</sup> = Koloniebildende Einheiten pro g Boden (auf Agar)

**Tab. 5:** Total contents in soil samples of the area "Fuhrpark" (F, comp. Fig. 1)

Probe / Tiefe [cm u. F.]	MKW [mg kg <sup>-1</sup> ]	AOX [mg kg <sup>-1</sup> ]	BTX [mg kg <sup>-1</sup> ]	PAK [mg kg <sup>-1</sup> ]	Keimzahl [KBE g <sup>-1</sup> ]
Z 1 - 5	48	47	-	0,36	2,8 · 10 <sup>5</sup>
Z 1 - 15	217	96	-	-	3,0 · 10 <sup>5</sup>
Z 2 - 15	< 20	86	-	-	3,5 · 10 <sup>5</sup>
Z 2 - 50	< 20	120	-	-	9,3 · 10 <sup>4</sup>
Z 3 - 25	< 20	63	-	-	6,6 · 10 <sup>6</sup>
Z 4 - 10	< 20	31	-	-	1,7 · 10 <sup>5</sup>
Z 4 - 20	< 20	27	-	2,45	3,6 · 10 <sup>4</sup>

**Tab. 6:** Gesamtgehalte in den Bodenproben des Zenitgebietes (Z, vgl. Abb. 1). – bedeutet nicht nachweisbar; KBE g<sup>-1</sup> = Koloniebildende Einheiten pro g Boden (auf Agar)

**Tab. 6:** Total contents in soil samples of the area "Zenit" (Z, comp. Fig. 1)

stika der Bodenwasserproben untermauert. Die Leitfähigkeit und die MKW-Konzentrationen sind im Fuhrparkbereich erhöht. Deutlich tritt auch gelöster Kohlenstoff (DOC) in Erscheinung. Interessanterweise verhalten sich die MKW- und die AOX-Konzentrationen diametral. Letztere sind nur im Bodenwasser des weitgehend unbeeinflussten Geosystems Zenit gefunden worden.

In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, dass CRIPPS (1989), der sich mit der Identifikation von anthropogenen Kohlenwasserstoffen in antarktischen Geosystemen befaßte, feststellte, dass die Aufklärung geringer Kontaminationswirkungen schwierig ist, da viele Substanzen auch in biogenen Strukturen synthetisiert werden können, selbst die PAK in der Antarktis. Deren Identifikation ist deshalb als alleiniger Nachweis für eine Kontamination wenig geeignet. CRIPPS (1989) empfiehlt deshalb eine Quantifizierung aller Gehalte gegenüber einer gemeinsamen Basis und die Aufklärung der Quellen-Senken-Beziehung bzw. der Schadstoffmuster.

Als neue Strukturen, welche im Ergebnis von Selbstorganisationsprozessen entstanden sind, lassen sich die Anordnungsmuster der Kontaminanten interpretieren. Die Akkumulation der PAK ist primär das Ergebnis der Lage der Beprobungsstandorte in Beziehung zur Quelle des Stoffinputs. Da sie vorwiegend bei einer unvollständigen Verbrennung oder Pyrolyse von organischem Material, in vorliegendem Fall den Kraftstoffen entstehen, sind sie vor allem dort, wo unmittelbar eine Abgaseinwirkung stattfinden konnte, anzutreffen (Standorte Fuhrpark F 1, F 3 und F 5, vgl. Abb. 1). Es werden hauptsächlich Species mit 3 und 4 Ringsystemen gefunden, die toxikologisch besonders bedenklichen hochmolekularen PAK mit fünf und mehr kondensierten Ringen, unter denen sich die starken Karzinogene befinden, spielen keine Rolle.

Als Co-Mechanismus des Transports fungieren die MKW (vgl. Abschnitt 4). Im unmittelbaren Bereich der Schadstoffquelle (Fuhrpark F 1) treten beide Stoffgruppen in allen Horizonten auf,

Probe / Tiefe [cm u. F.]	Acidität [pH H <sub>2</sub> O]	Leitfähigkeit [mS cm <sup>-1</sup> ]	MKW [mg kg <sup>-1</sup> ]	AOX [mg l <sup>-1</sup> ]	DOC [mg l <sup>-1</sup> ]	PAK [mg l <sup>-1</sup> ]	Keimzahl [KBE ml <sup>-1</sup> ]
F 1 - 60	6,6	1200	26,8	-	81	0,001	5,3 · 10 <sup>5</sup>
F 3 - 40	6,7	1140	2,0	-	160	0,001	2,3 · 10 <sup>5</sup>
F 4 - 40	6,8	1120	5,4	-	120	-	1,0 · 10 <sup>5</sup>
F 5 - 40	6,7	470	4,5	-	140	0,062	3,4 · 10 <sup>5</sup>
F 6 - 60	6,9	890	-	0,016	15	0,0005	4,7 · 10 <sup>4</sup>
Z 1 - 15	5,9	27	-	0,013	1	0,0005	-
Z 2 - 30	6,2	78	-	0,029	2	0,0004	5,5 · 10 <sup>5</sup>
Z 3 - 25	6,3	98	-	0,019	2	0,0003	4,2 · 10 <sup>5</sup>
Z 4 - 20	6,3	55	-	0,014	2	0,0003	1,7 · 10 <sup>5</sup>

**Tab. 7:** Gesamtkonzentrationen in den Bodenwasserproben des Fuhrparks (F) und des Zenitgebietes (Z, vgl. Abb. 1).

Auch in den Wasserproben waren außer 0,14 mg C l<sup>-1</sup> am Standort F 5-40 keine EOX und auch keine BTX (mg l<sup>-1</sup>) nachweisbar. - bedeutet nicht nachweisbar; KBE ml<sup>-1</sup> = Koloniebildende Einheiten pro ml Wasser (auf Agar)

**Tab. 7:** Total concentrations of in the soil water samples of the areas "Fuhrpark (F)" and "Zenit" (Z, comp. Fig. 1)

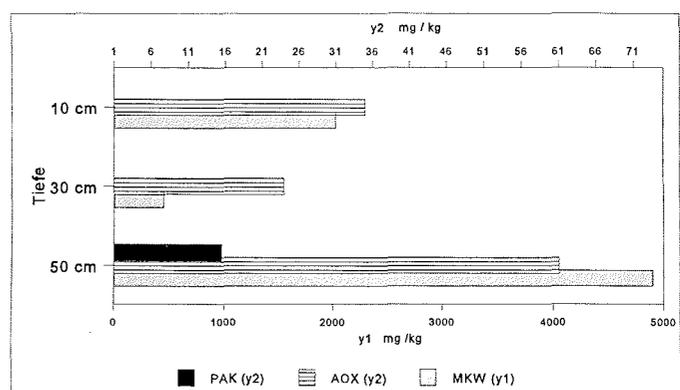
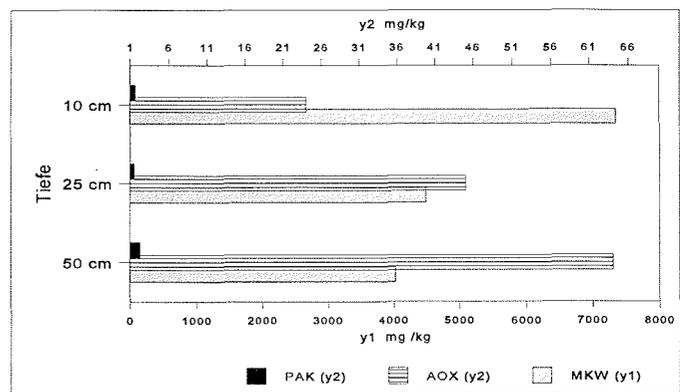
im Bodenwasser sind hohe Konzentrationen an MKW-Mengen, aber keine nennenswerten PAK-Species zu finden. Erst nach einer gewissen Dauer ist, sichtbar an den Vertikalgradienten der anderen Bodenstandorte (F 3, F 5), die Tiefenverlagerung der PAK abgeschlossen. Eine Konzentrationszunahme im Bodenwasser (Fuhrpark FW 5) deutet darauf hin. Selbst im Zenitgebiet sind diese Effekte nachweisbar: im unmittelbaren Umfeld von Fahrwegen (Zenitgebiet Z 1, vgl. Abb. 1) treten nennenswerte MKW-Gehalte auf, welche mit der Tiefe zunehmen, auch PAK-Spuren sind im oberen Bodenbereich nachweisbar. In größerer Entfernung sind jedoch wiederum die PAK-Species an der Basis des Beprobungspunktes (Zenitgebiet Z 4) zu finden.

Im Gegensatz zu den räumlichen Verteilungsmustern, welche unter Kontrollparameterbedingungen des gemäßigten Klimas entstehen, entwickelt sich im Untersuchungsraum die Bodenbasis als Schadstoffsenke. Deren ausschließliche Tiefenverlagerung ist ein Resultat fehlender Retardationsmechanismen durch natürliche Bodenorganica.

Mit Ausnahme von Standort Fuhrpark F 1 treten die höchsten Schadstoffkonzentrationen zumeist in dem Grenzraum zum Festgestein bzw. zum zementierten Lockermaterial auf (Abb. 4).

Verursacht durch den Übergang von der vertikalen zur lateralen Richtung des Stofftransportes entwickelt sich ein Stauereffekt. Diese Grenzschicht stellt somit nicht nur eine Senke des Stofftransportes, sondern auch einen Zwischenspeicher und damit eine Sekundärquelle des Stoffflusses dar. So konnten für die Talbodenstandorte infolge der ariden Bedingungen Effekte des Lösungsaufstieges beschrieben werden, welche zur Erhöhung der Gehalte von Kationen der I und II Hauptgruppe in den obersten Bodenschichten führten. Eine Verringerung der Acidität sowie Erhöhung der Leitfähigkeit des Bodenwassers als Folge dieser Dynamik wurden eindeutig belegt (KRÜGER 1996).

Die im Vergleich zu den Hangschuttstandorten bedeutende Stoffakkumulation im obersten Bodenbereich hat für das geo-



**Abb. 4:** Vertikalprofil der Belastung durch organische Kontaminanten an den Standorten Fuhrpark F1 (oben) und F3 (unten).

**Fig. 4:** Vertical profile of pollution by organic contaminants at sites F1 (top) and F3 (below).

chemische Milieu eine herausragende Bedeutung, sowohl als Faktor im Rahmen der Verwitterungsprozesse als auch hinsichtlich der Entwicklung potentieller Lebensformen. Die raumspezifische Vergrößerung der Alkalinität bis auf etwa pH 10 sowie die Erhöhung des osmotischen Potentials erfordern von den Organismen spezifische Adaptationsstrategien.

Während die Salinarkomponenten im Grenzbereich zur Atmosphäre bis zum nächsten Zeitpunkt eines oberirdischen Wasserinputs durch Niederschlag bzw. Schmelzwasser akkumulieren, erfolgt bei den PAK eine Mengenabnahme. Im Zusammenhang mit der kapillaren Wasserbewegung wird durch ihren Dampfdruck, welcher im gelösten Zustand höher ist (vgl. Tab. 3), bzw. Codestillationsprozesse eine Translokation in die Atmosphäre möglich. Bei der Diskussion von Intensität und Umfang dieser Speicherentleerung müssten zwar häufig der negative Rückkopplungseffekt durch das scheinbar geringe Temperaturniveau berücksichtigt werden, jedoch können im obersten Bodenbereich zeitweise Maximalwerte von  $> 15\text{ °C}$  auftreten (KRÜGER 1996). Die Dissipation (Zerstreuung) der PAK ist deshalb sowohl über den Verdünnungseffekt, verursacht durch die laterale Wasserbewegung, als auch über den Output in die Atmosphäre (verursacht durch die vertikale Wasserbewegung) möglich.

Ein Vergleich der PAK-Muster (Abb. 5) im Akkumulationsraum (40–50 cm unter Flur) kann eine weitere Gesetzmäßigkeit der aus der raumtypischen Geodynamik resultierenden Strukturmusterbildung dokumentieren.

Am Beprobungspunkt F 1, der am Hang gelegenen Kontaminationsquelle, ist fast das gesamte Spektrum der 16 EPA-Substanzen vorhanden, neben den Vertretern 13–16 [Benzo(a)pyren, Dibenzo(a,h)anthracen, Benzo(g,h,i)perylen und Indeno(1,2,3-cd)pyren] fehlt jedoch auch das sehr gut wasserlösliche Acenaphthylen (Substanz 3). Dieses ist jedoch dominant am Beprobungspunkt F 3, der als Talbodenstandort eine Akkumulationsbasis für das kontaminierte Hangwasser darstellt.

Deutlich ist auch die im Vergleich zum Zenitgebiet höhere DOC-Konzentration im Bodenwasser. In Verbindung mit den geringfügig höheren pH-Werten sowie der auffallend großen Leitfähigkeit ist von anthropogenen Quellen auszugehen. Inwieweit der Effekt einerseits durch das von der Station produzierte Abwasser, welches vor allem an der Auftaubasis abströmt, andererseits durch Zwischenprodukte einer mikrobiellen Oxidation bedingt wird, ist infolge der geringen Datenbasis nicht zu entscheiden. Wie in Abschnitt 2 dargestellt, wird die mikrobielle Dynamik im marinen Bereich der Antarktis als eine weitgehend vernachlässigbare Größe charakterisiert.

Wie jedoch WÜTHRICH (1994) für arktische Standorte nachweisen konnte, finden selbst bei Bodentemperaturen unter  $0\text{ °C}$  Respirationsvorgänge durch Pilze bzw. Bakterien statt. Die mikrobielle Aktivität zeigt dabei eine stärkere Temperaturabhängigkeit, je weniger organisches Ausgangssubstrat zur Verfügung steht. Auch eine Austrocknung führt zu einer Minderung der Aktivitäten und der Anzahl. Berücksichtigt man die von KRÜGER (1996) dargestellten Spezifika der Temperatur- und Bodendynamik, dann wird klar, daß insbesondere im oberen Bereich des sonnenexponierten Hangstandortes (Fuhrpark F 1–10, vgl. Tab. 5) die Anzahl der koloniebildenden Einheiten am geringsten, die aller Vertikalbereiche des gegenüberliegenden F 2 am höchsten ist.

Die organischen Xenobiotica könnten als Kohlenstoff- und damit Energiequelle für Destruenten dienen. Nach KÄMPFER et al. (1988) ist dabei der Abbau

1. aliphatischer Strukturen leichter als aromatischer,
2. langkettiger Species besser als kurzkettiger,

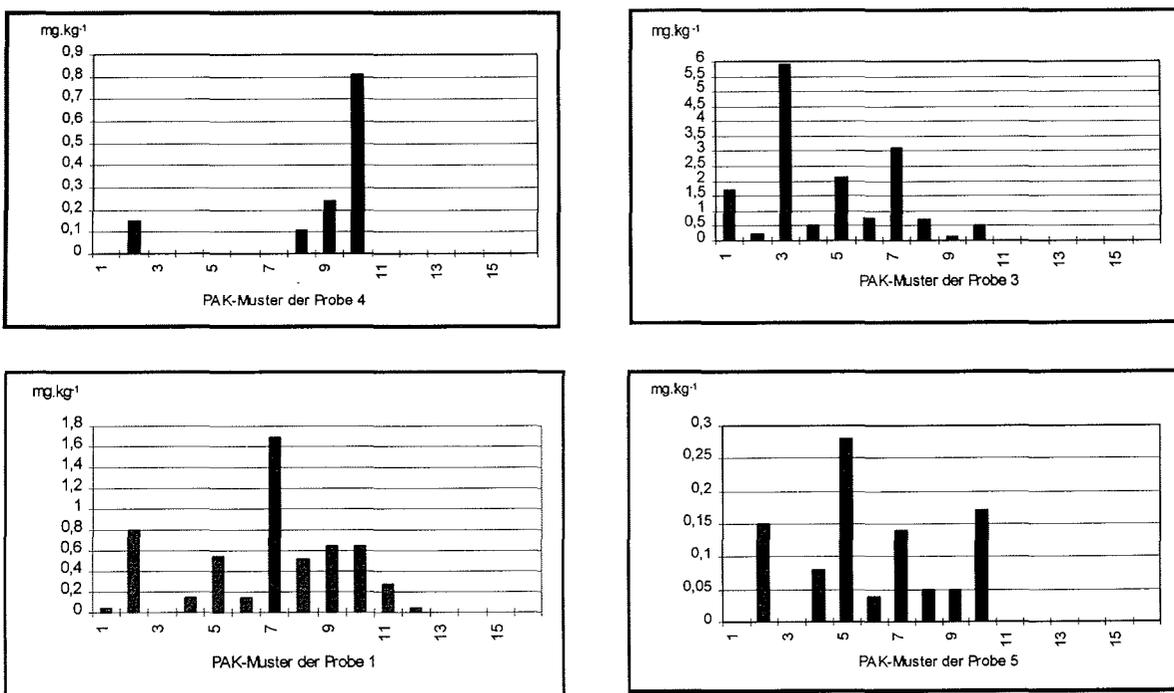


Abb. 5: PAK-Muster im Untersuchungsgebiet Fuhrpark (F), erfaßt nach der EPA-Methode 610.

Fig. 5: PAH pattern of the investigation area recorded by EPA method 610.

3. gesättigter aliphatischer Kohlenwasserstoffe schneller als ungesättigter und
4. unverzweigter Ketten besser als verzweigter einzuschätzen.

Da intrazellulär stattfindend, werden niedermolekulare, wasserlösliche Species direkt aufgenommen, für die höhermolekulare besitzen viele Mikroorganismen lipophile Zellwandbestandteile.

Die Keimzahlen im Boden des Untersuchungsgebietes Fuhrpark (F) wären für sich allein dahingehend interpretierbar. Im Vergleich zum Zenitgebiet (Z) ergeben sich jedoch kaum nennenswerte Unterschiede, so dass keine konkrete Antwort auf Umfang und Intensität mikrobieller Umsatzprozesse gegeben werden kann.

## 7. FAZIT

Es wurden einige neue Strukturelemente und damit Eigenschaften eines antarktischen Geosystems (F), welches anthropogen überprägt wurde, beschrieben. Diese sind in Vergleichsräumen im natürlichen Systemzustand (Z) nicht oder nur in geringem Maße vorhanden. Sowohl diese Veränderungen als auch neue Formen physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse führen zu einer Zunahme der Komplexität des Systems. Seine Funktionalität wird verändert.

Im Gegensatz zu Verteilungsmustern, welche unter Kontrollparameterbedingungen des gemäßigten Klimas entstehen, stellt im Untersuchungsraum die *Bodenbasis* die Schadstoffsenke dar. Die Tiefenverlagerung ist ein Resultat fehlender Retardationsmechanismen durch natürliche Bodenorganica. Eine Funktion der organischen Bodensubstanz als Ordnungsparameter der Stoff- und Energiedynamik, für humide außertropische Geosystemen empirisch belegt (BLUMENSTEIN 1996), ist demnach für antarktische Räume nicht ableitbar. Als solcher wird jedoch das Bodenwasser wirksam. Es zeigt unter den charakteristischen Milieubedingungen des Raumes Metastabilität, seine Dynamik bestimmt Richtung und Dynamik der meisten Transferprozesse.

## DANKSAGUNG

Für die Durchführung der Schadstoffanalytik bzw. mikrobiologischen Untersuchungen möchten wir Herrn Dr. F. DEHNAD (Institut für Wasser- und Umweltschutztechnologie Hamburg) sowie für die organisatorische und finanzielle Unterstützung Herrn Prof. Dr. HUBBERTEN (AWI-Forschungsstelle Potsdam) aufrichtig danken.

## Literatur

- Aceto, M., Sarzanini, C., Abollino, O., Sacchero, G. & Mentasti, E. (1993): Distribution of minor and trace metals in Carezza Lake (Antarctica) Ecosystem. – Inter. J. Environ. Anal. Chem. 55: 165–318.
- Barsch, H. & Billwitz, K. (Hrsg). (1990): Physisch-geographische Arbeitsmethoden. – Hermann Haack, Gotha, 256 S.
- Bechmann, W. & Grunewald, K. (1995): PAK-Profil in Rieselfeldsubstraten. – Chem. Technik, 47: 26–30
- Blume, H.-P. et al. (1990): Handbuch Bodenschutz. – ecomed, Landsberg, 686 S.
- Blumenstein, O. (1997): Geoökologische Aspekte des Evolutionsprozesses hemerober Geosysteme im jungpleistozänen Raum. – Potsdamer Geogr. Forsch. 13: 1–188.
- Bormann, P. & Fritsche, D. (ed.), (1998): The Schirmacher Oasis, Queen Maud Land, East Antarctica and its surroundings.- Petermanns Geogr. Mitt. Erg.-Heft 289, 448 S.
- Capodaglio, G., Toscano, G., Scarponi, G. & Cescon, P. (1993): Copper complex in the surface seawater of Terra Nova Bay (Antarctica). – Inter. J. Environ. Anal. Chem. 55: 129–148.
- Caprioli, R., Falchi, G., Gragnani, R. & Torcini, S. (1993): Variation of major and trace elements in some of the lakes at Terra Nova Bay (Antarctica). – Inter. J. Environ. Anal. Chem. 55: 179–195.
- Cripps, G. C. (1989): Problems in the identification of anthropogenic hydrocarbons against natural background levels in the Antarctic. – Antarctic Sci. 1 (4): 307–312.
- Cosma, B., Soggia, F., Abelmoschi, M., L. & Frache, R. (1993): Determination of trace metals in Antarctic sediments from Terra Nova Bay – Ross Sea. – Inter. J. Environ. Anal. Chem. 55: 121–128.
- Green, G., & Nichols, P. D. (1995): Hydrocarbons and sterols in marine sediments and soils at Davis Station, Antarctica: A survey for human-derived contaminants. – Antarctic Sci. 7 (2): 137–144.
- Howington, J. P., Mc Fetters, G., A., Barry, J., P. & Smith, J. J. (1992): Distribution of the McMurdo Station sewage plume.- Mari. Poll. Bull. 25, (9–12): 324–327.
- Karl, D. M. (1992): The Grounding of the Bahia Paraiso: Microbial ecology of the 1989 Antarctic oil spill. – Microb. Ecol. 24: 77–89.
- Kämpf, H. & Stackebrandt, W. (1985): Geologisch-tektonische Kartierung der Schirmacheroase / Ostantarktis. – Forschungsbericht AdW, ZIPE Potsdam.
- Kämpfer, P., Feidieker, D., Strehel, S. & Steinf, M. (1988): Untersuchungen zum mikrobiellen Abbau von Kohlenwasserstoffen. – Hygiene Berlin 2, 246 S.
- Kennicutt II, M. C., Sweet, S. T., Fraser, W. R., Stockton, W. L. & Culver, M. (1991): Grounding of Bahia Paraiso at Arthur Harbor, Antarctica. 1. Distribution and fate of Oil spill related hydrocarbons. – Environ. Science & Techn. 25: 509–518.
- Kennicutt II, M. C., Mc Donald, T. J., Denoux, G., J. & Mc Donald, S. J. (1992): Hydrocarbon contamination on the Antarctic Peninsula. – Marine Poll. Bull. 24 (10): 499–506.
- Krüger, W. (1996): Ergebnisse der landschaftsökologischen Untersuchungen in der Schirmacheroase. – Potsdamer Geogr. Forsch. 6: 3–113.
- Lugar, R. M. (1994): Results of TSP metal monitoring at McMurdo Station, Antarctica. – Idaho National Engineering Laboratory EG & G Idaho, Inc., 1–18.
- Venkatesan, M. I. & Santiago F. H. (1989): Sterols in ocean sediments: novel tracers to examine habitats of cetaceans, pinnipeds, penguins and humans. – Marine Biol. 102: 431–437.
- SCAR-COMNAP (1996): Environmental monitoring in Antarctica. – Material der Workshops vom 17.–20.10. 1995 und 25.–29.03 1996, 46 S.
- Walton, D. W. H. & Shears, J. (1994): The need for environmental monitoring in Antarctica: Baselines, environmental impact assessments accidents and footprints. – Inter. J. Environ. Anal. Chem. 55: 77–90.
- Wüthrich, C. (1994): Die biologische Aktivität arktischer Böden mit spezieller Berücksichtigung ornithogen eutrophierter Gebiete (Spitzbergen und Finnmark). – Baseler Beitr. Physiogeogr. 17, 225 S.