

TEXTE

21/2013

Der Einfluss menschlicher Aktivitäten auf Bodenorganismen der maritimen Antarktis und die Einschleppung von fremden Arten in die Antarktis

Kurzfassung

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3709 85 157
UBA-FB 001739 /KURZ

Der Einfluss menschlicher Aktivitäten auf Bodenorganismen der maritimen Antarktis und die Einschleppung von fremden Arten in die Antarktis

Kurzfassung

von

**Dr. David J. Russell, Dr. Karin Hohberg, Dr. Volker Otte, Dr. Axel
Christian**

Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz

Dr. Mikhail Potapov

Pedagogical State University Moscow, Russland

Prof. Dr. Alexander Brückner

Universität für Bodenkultur Wien, Österreich

Dr. Sandra J. McInnes

British Antarctic Survey, Cambridge, UK

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4415.html>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz Am Museum 1 02826 Görlitz
Abschlussdatum:	März 2013
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/
Redaktion:	Fachgebiet I 3.5 Schutz der Antarktis Fritz Hertel

Dessau-Roßlau, April 2013

Zusammenfassung

Eine enorm wachsende Quelle anthropogenen Einflusses auf die antarktische Umwelt stellen Forschung und Tourismus dar. Heutzutage bieten über 40 unterschiedliche Unternehmen aus knapp 15 Ländern Kreuzfahrtreisen mit der Möglichkeit zu Landgängen an, v. a. auf im Gebiet der nördlichen Antarktische Halbinsel. Seit 1989/1990 nahm die Zahl der Besucher in der Antarktis z.T. exponentiell zu und seit etwa zehn Jahre **besuchen mehr als 20.000 Touristen pro Jahr die Antarktis**. Der Tourismus ist allerdings nicht gleichmäßig auf alle Zielorte verteilt. Die Zunahme der Besucherzahlen **konzentriert sich auf wenige Regionen** (v. a. die Südliche Shetlandinseln und die nordwestliche Antarktische Halbinsel) und Orte, z. B. Whalers Bay (Deception Island), Neko Harbour oder Half Moon Island.

Die Zahl der sich zum Zwecke der Forschung in der Antarktis aufhaltenden Personen ist deutlich geringer als die Zahl der Touristen. **80 Forschungsstationen werden derzeit von 29 Nationen in der Antarktis betriebe, in den ca. 4.300 Personen im Sommer und etwa 1.000 im Winter leben und arbeiten**. Somit könnte die Belastung, die durch das Forschungspersonal ausgeht, im Vergleich zu der der Touristen als geringfügiger angesehen werden. Allerdings ist die Belastung um die Forschungsstationen erheblich konzentrierter und vor allem lang anhaltender.

Die kumulativen Umweltschäden in der Nähe von Forschungsstationen waren bereits Gegenstand gezielter Untersuchungen. Ein Großteil solcher wissenschaftlichen Studien behandeln marine Ökosysteme oder die Folgen chemischer Umweltverschmutzungen (Havarien, Abfallhalden oder Abwasser). Forschungsobjekte und Ziele touristischer Ausflüge sind die weit verbreiteten Brut- und Mauserplätze von Wirbeltieren wie Pinguinen, Robben und Vögeln. Deshalb werden in vielen Studien die Reaktionen von antarktischen Wirbeltieren auf die Anwesenheit von Menschen untersucht.

Bevorzugte antarktische Brut- und Mauserplätze von Pinguinen, Robben und Vögeln sind in der Regel eisfreie Gebiete. Nur an solchen eisfreien Stellen kann es Boden und dementsprechend Bodenorganismen geben. Da gerade diese Gebiete als touristische Ausflugsziele konzentriert aufgesucht werden, sind sie für Störung und Belastung durch menschliche Aktivitäten stark anfällig. Antarktische Böden gelten außerdem gegenüber anthropogener Störung als sehr empfindlich. **Trotzdem fanden bisher relativ wenige Untersuchungen zur Auswirkung menschlicher Aktivitäten auf Böden und Bodenorganismen in der Antarktis statt.**

Verglichen mit Lebensräumen in anderen Breiten, z. B. den Tropen oder gemäßigten Breiten, **ist die terrestrische antarktische Fauna und Flora sehr arten- und strukturarm**. Botanische Artengemeinschaften bestehen weitgehend nur aus Kryptogamen (Moose, Lebermoose und Flechten), während lediglich zwei höhere (Blüten-) Pflanzen natürlicherweise vorkommen. Die endemische terrestrische Wirbellosenfauna der Antarktis besteht lediglich aus Diptera (Fliegen, zwei Arten), Acari (Milben), Collembola (Springschwänzen), Nematoda (Fadenwürmern), Rotifera (Rädertierchen), Tardigrada (Bärtierchen) und Protozoa (Einzellern). Die terrestrische Wirbellosenfauna findet teilweise nur in eisfreien Stellen ihren Lebensraum. Die Faunengemeinschaften v. a. der kontinentalen Antarktis gehören zudem zu den Einfachsten der Erde.

Die wenigen Studien zum anthropogenen Einfluss auf die Vegetation attestieren v. a. eine direkte Schädigung durch Zertrampeln sowie eine indirekte Schädigung z. B. durch die Beeinflussung des darunter liegenden Bodenmaterials. Obwohl viele wissenschaftliche

Grundlagenstudien zur Bodenfauna der Antarktis existieren, gibt es kaum Untersuchungen zu den Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf terrestrische antarktische Wirbellosengemeinschaften. Die wenigen Studien konnten negative Effekte durch z. T. bereits geringen anthropogenen Einfluss zeigen. Es wurde jedoch meist nur der Einfluss auf Gesamtdichten ganzer Gruppen untersucht. Der Einfluss auf andere Parameter der Biodiversität ist unbekannt. Fast alle wissenschaftlichen Untersuchungen zu antarktischen Bodenorganismen fanden in räumlich relativ begrenzten Gebieten statt und konzentrierten sich auf einzelne taxonomische Gruppen. **Untersuchungen von anthropogenen Auswirkungen basierend auf größeren regionalen Skalen und mehreren bodenlebenden Tiergruppen sind extrem selten.**

Demgegenüber wurde die potenzielle und tatsächliche Einschleppung von nicht-heimischen Arten in antarktische Habitate etwas intensiver untersucht. Die **deutliche Gefahr einer anthropogenen Einschleppung antarktischer Arten** v. a. durch Touristen ist mehrfach betont worden. Die geringe Biodiversität und Simplizität der terrestrischen Organismengemeinschaften der Antarktis macht sie potenziell empfindlich gegenüber einer Besiedlung durch einwandernde Arten. Auch der Umstand, dass viele Touristen erst subantarktische Inseln besuchen, bevor sie in die Antarktis fahren, verstärkt diese Empfindlichkeit.

Angesichts der großen Zahl von Touristen, die die wenigen eisfreien Stellen in der Antarktis besuchen, könnte der Einfluss menschlicher und somit auch touristischer Aktivitäten auf antarktische Böden und Bodenorganismen erheblich sein. **Die vorliegende Untersuchung sollte deshalb potenzielle anthropogene Auswirkungen auf einen Großteil der Organismengemeinschaft des Bodens (außer Mikroorganismen) sowie auf eine größere, stark vom Tourismus betroffene Region (die Antarktische Halbinsel) zeigen.** Als Untersuchungsorte wurden solche Lokalitäten ausgewählt, die von Touristen frequentiert oder auch von Stationspersonal und Wissenschaftlern häufig aufgesucht werden. Die Studie sollte folgende Fragen beantworten: (1) Wurden nicht-heimische Bodentierarten in Gebiete mit hoher menschlicher Aktivität eingeschleppt? (2) Wie effektiv sind bestehende Präventivmaßnahmen gegen eine Verschleppung von Bodenorganismen? (3) Gibt es einen direkten anthropogenen Einfluss auf antarktische Bodenorganismengemeinschaften? (4) Welche Habitatparameter oder Wechselwirkungen zwischen menschlichen Aktivitäten und Habitatparameter beeinflussen das Vorkommen antarktischer Bodenorganismen? (5) Führt eine durch Menschen verursachte Verschleppung von Arten zu einer „Homogenisierung“ und somit zu einer Verringerung der Diversität des Artenbestandes verschiedener antarktischer Habitate?

Das Hauptkriterium bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete war die regelmäßige Anwesenheit von Menschen. Daher kamen **als Untersuchungsgebiete vorwiegend Anlandestellen von touristischen Kreuzfahrten sowie Gebiete, die stark von Stations- bzw. Forschungspersonal frequentiert sind**, entlang der Antarktischen Halbinsel in Betracht. Die Geländearbeiten fanden während der Landgänge verschiedener antarktischer Touren dreier Kreuzfahrtschiffe statt: MS Hanseatic, MS Bremen (beide Hapag-Lloyd GmbH Hamburg) sowie MS Delphin (Hansatours GmbH Hamburg). Während mehrerer Fahrten dieser Schiffe führten wissenschaftliches Personal der Kreuzfahrtschiffe und andere Wissenschaftler die Probenahmen durch. Mitarbeiter der Arbeitsgruppe um Hans-Ulrich Peter (Institut für Ökologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena) haben weitere Untersuchungsgebiete auf der Fildes Peninsula von King George Island während ihrer dortigen Forschungsaufenthalte beprobt.

Insgesamt wurden 13 Lokalitäten geprobt: Arctowski Station (King George Island), Biologenbucht und Punta Christian (2 Flächen) auf der Fildes Peninsula (King George Island), Ardley Island, Halfmoon Island, Hannah Point auf Livingston Island, Whalers Bay und Telefon Bay auf Deception Island, Devil Island und Paulet Island im Weddellmeer sowie Neko Harbour und Petermann Island an der Antarktischen Halbinsel. Hiervon wurden neun im ersten Untersuchungsjahr (2010), sieben im zweiten Untersuchungsjahr (2011) und nur drei davon in beiden Untersuchungsjahren bearbeitet.

Ein standardisiertes Beprobungsschema stellte sicher, dass die Geländearbeiten (1) die örtlichen Bedingungen berücksichtigten, (2) die notwendige Datengrundlage für eine statistische Analyse der Ergebnisse gewährleisteten und (3) vom Arbeitsaufwand im Rahmen der Projektressourcen realisierbar waren. Das verwendete Beprobungsschema besaß die folgenden Hierarchieebenen: „Lokalität“ (= Untersuchungsgebiet), „Treatment“ (= anthropogen beeinflusste oder unbeeinflusste Untersuchungsflächen innerhalb einer Lokalität), „Areale“ (= verschiedene Untersuchungsflächen innerhalb eines Treatments, bevorzugt aufgeteilt in jeweils drei anthropogen beeinflusste und unbeeinflusste Areale pro Lokalität) und einzelne Bodenstichproben innerhalb eines Areals (vier pro Areal; gleichmäßig verteilt innerhalb eines Quadratmeters). Die Auswahl der Areale erfolgte jeweils paarweise: je ein anthropogen beeinflusstes und ein unbeeinflusstes Areal, die sich bezüglich Bodensubstrat, Vegetation usw. ansonsten gleichen. Eine genaue schriftliche Anleitung für die Geländearbeit sowie ein standardisiertes Geländeprotokoll für die Probennehmer wurden entwickelt, das der Vergleichbarkeit aller Ergebnisse gewährleistete.

In den beiden Untersuchungsjahren konnten insgesamt 327 Proben entnommen und bearbeitet werden. Die Bodenproben wurden einzeln in handelsübliche Plastikgefrierbeutel verpackt und verschlossen und während der weiteren Schiffstour gekühlt gelagert. Zusätzlich zu den Bodenproben getrennt genommene Vegetationsproben wurden in Papiertüten verpackt und ebenfalls kühl und trocken gelagert. Alle Proben wurden möglichst bald nach ihrer Entnahme zurück nach Deutschland geflogen, wo die Bearbeitung der Proben stattfand.

Nach der Ankunft der Proben in Görlitz wurden zuerst die Vegetationsproben an einen Botaniker (V. Otte, Görlitz) weitergeleitet. Die Vegetation wurde hauptsächlich als biotischer Habitatfaktor untersucht. Hierzu wurden neben der artgenauen Erfassung der vorhandenen Taxa für jedes Untersuchungsareal der Deckungsgrad der Vegetation und die Pflanzengesellschaft erfasst.

Die Bodentiere wurden aus jeder einzelnen Bodenprobe mit Hilfe zwei verschiedener Methoden extrahiert. Für die Mikrofauna (Nematoda und Tardigrada) wurde eine Nassextraktion modifiziert nach Baermann und für die Mesofauna (Collembola und die verschiedenen Milbengruppen) eine Trockenextraktion nach MacFadyen angewandt. Die Extraktion der Tiere erfolgte möglichst am gleichen Tag oder spätestens innerhalb weniger Tage nach Ankunft der Proben. Nach Abschluss der MacFadyen-Extraktion wurde das Extraktionsgut jeder Probe in 70%iges Ethanol überführt und drei Wochen zur Konservierung der Bodentiere gelagert. Das Extrakt der Nematoden und Tardigraden wurde täglich entnommen und die Tiere mit ca. 60° C heißem Wasser getötet und in ca. 0,2%iger Triethanolamin-Formalinlösung bei 4 °C konserviert.

Nach Extraktion und Konservierung der Tiere erfolgte die Sortierung auf der Ebene taxonomischer Großgruppen (Collembola, Actinedida, Oribatida, Gamasina; Nematoda und

Tardigrada) mit Hilfe eines Stereomikroskops bei maximal 50-facher Vergrößerung. Die Determination der Bodentierarten führten europäische Taxon-Spezialisten durch: Nematoda (K. Hohberg, Görlitz), Tardigrada (S. McInnes, Cambridge), Collembola (M. Potapov, Moskau), sowie den Milbengruppen Actinedida (D. Russell, Görlitz), Oribatida (A. Bruckner, Wien) und Gamasina (A. Christian, Görlitz). Für die Artdetermination wurden anschließend mikroskopische Präparate der Individuen der jeweiligen Gruppe hergestellt und die Individuen unter dem Mikroskop bei maximal 1000-facher Vergrößerung möglichst auf Artebene bestimmt.

Für die nähere Charakterisierung des Bodens jeder Probe wurden folgende bodenkundliche Parameter herangezogen: Bodentemperatur, Bodenfeuchte, pH-Wert, organischer Kohlenstoff, Korngrößenverteilung und C/N-Verhältnis. Ziel der Bodenanalysen war es, die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Arealtypen (anthropogen beeinflusste und unbeeinflusste Areale) bezüglich der allgemeinen Habitatparameter sicherzustellen sowie Aussagen über einen eventuell rein habitatbedingten Einfluss auf die Faunengemeinschaften treffen zu können.

Die erfassten Individuendichten jeder Art in jeder Probe wurden auf Individuen pro 100 cm³ Substrat hochgerechnet, um eine Standardisierung der unterschiedlich großen Proben und somit eine Vergleichbarkeit aller Daten zu gewährleisten. Um festzustellen, ob signifikante Unterschiede in der Individuendichte oder im Artenreichtum zwischen Lokalitäten bzw vor allem zwischen anthropogen beeinflussten und unbeeinflussten Arealen existieren, wurden die Daten einer nicht-parametrischen Varianzanalyse (ANOVA) unterzogen. Um eventuelle Zusammenhänge zwischen den Bodentierarten und Habitatparametern zu ermitteln, wurde eine nicht-parametrische Spearman-Korrelationsanalyse mit den zoologischen Daten und allen abiotischen Bodendaten sowie den Vegetationsdaten durchgeführt. Um eine Beeinflussung des Vorkommens einzelner Arten bzw ganzer Artengemeinschaften durch Hintergrundfaktoren (z. B. Bodenfeuchte, Bodentemperatur, Gehalt an organischem Material usw) nachzuweisen, wurden Kovarianzanalysen (ANCOVA) durchgeführt. Die Ähnlichkeit der erfassten Tiergemeinschaften wurde mit einem NMDS-Verfahren (non-metric multidimensional scaling) dargestellt, um festzustellen, ob die Faktoren Lokalität und Treatment (= anthropogener Einfluss oder nicht) die Struktur der Gesamtgemeinschaften beeinflussen. Um zu testen, ob die Faktoren Lokalität und Treatment einen signifikanten Einfluss auf die Ähnlichkeit der untersuchten Faunengemeinschaft hatten, wurde die PERMANOVA-Routine eingesetzt. Um den alleinigen Einfluss des Faktors Treatment herauszustellen, wurde schließlich eine CAP („canonical analysis of principal coordinates“) durchgeführt.

Die Charakteristiken der untersuchten Böden reflektierten typische maritim antarktische Verhältnisse. Die gemessenen Bodentemperaturen zeigten relativ kühle Substrate an, während die Feuchtigkeitswerte relative feuchte Böden andeuteten. Die Bodentextur aller Lokalitäten war meist sandig oder kiesig und der pH-Wert der beprobten Bodensubstrate zeigte i. d. R. schwach bis mäßig saure Verhältnisse an. Die untersuchten Böden waren im Allgemeinen relativ arm an organischem Material. Die C/N-Verhältnisse der Böden zeigten allerdings eine hohe Qualität des organischen Materials an. Insgesamt konnte ein allgemeiner Nord-Süd-Gradient abnehmender Bodenparameter (Bodenfeuchte, Gehalt an organischem Material und C/N-Verhältnis) sowie einem zunehmendem pH-Wert festgestellt werden. Signifikante Unterschiede zwischen den beeinflussten und unbeeinflussten Arealen der einzelnen Lokalitäten wurden selten festgestellt. Wenn Unterschiede statistisch signifikant waren, dann waren die absoluten Unterschiede gering und somit biologisch wahrscheinlich nicht relevant.

Keine Vegetation war in den Flächen auf Devil Island, Petermann Island, Telefon Bay, Whalers Bay (im Jahre 2011) und Neko Harbour vorhanden. Vegetation wurde an acht der 13 Lokalitäten festgestellt. In zwei Fällen (Paulet Island, Halfmoon Island) bestand die Vegetation aus Reinbeständen der Grünalge *Prasiola crispa*. Die erfasste Vegetation bestand in erster Linie aus Kryptogamen. Insgesamt wurden zwei Arten von Gefäßpflanzen, 24 Flechtenarten, 19 Laubmoose, drei Lebermoose und eine Makroalgenart nachgewiesen. Alle diese Arten wurden auf den Lokalitäten der Südlichen Shetlandinseln (King George Island und Ardley Island) angetroffen, sehr wenige außerdem auf Halfmoon Island und in der Whalers Bay (im Jahre 2010). Alle Arten waren von den Südlichen Shetlandinseln bereits bekannt. Die erfassten Gefäßpflanzen repräsentieren die beiden einzigen in der Antarktis heimischen Arten, während bei Flechten und Moosen nur ein Bruchteil des aus den Sammelgebieten bekannten Artenbestandes nachgewiesen wurde. Ursache ist einerseits, dass ein nennenswerter Teil der Kryptogamenarten Felshabitate besiedelt, die in der vorliegenden Studie nicht beprobt wurden. Andererseits sind die Individuendichten eines großen Teils der vorkommenden Arten gering und somit auch die Wahrscheinlichkeit ihres Nachweises bei einer nicht zielgerichteten Suche. Es konnte keine bislang in der Antarktis nicht bereits bekannte Pflanzenart festgestellt werden. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit eingeführter Arten ist jedoch bei der hier angewendeten Methodik im Falle von Arten mit geringer Individuendichte gering.

Die vegetationskundlichen Ergebnisse bestätigten die Vergleichbarkeit der vom Menschen beeinflussten und unbeeinflussten Areale. Markante Unterschiede in der Diversität von anthropogen beeinflussten und unbeeinflussten Bereichen waren nicht nachweisbar. In einzelnen Lokalitäten konnte eine minimale Verschiebung von pleurocarpen zu acrocarpen Moosen in beeinflussten Arealen aber in anderen Lokalitäten auch umgekehrte Verschiebungen beobachtet, aber nicht statistisch belegt werden. Der Tritt in Sanionia-Gesellschaften schaffte vereinzelt offene Erdstellen, auf denen sich diese Moose gegenüber der Konkurrenz deckenbildender Arten behaupten können. Umgekehrt scheinen die trittempfindlichen Strauchflechten im unbeeinflussten Bereich etwas besser vertreten zu sein. Die Fotodokumentationen zeigten z. T. in den von Besuchern frequentierten Bereichen eine Förderung von *Prasiola crispa* zu Lasten der sonstigen Arten, wobei kümmerlich wachsende *Deschampsia* zwischen Decken von *Prasiola* fast verschwindet, während im nicht betretenen Bereich *Deschampsia* die dominante Art ist.

Aus allen untersuchten Tiergruppen konnten **mehr als 320.000 Individuen registriert werden. Die meisten Individuen wurden bei den Nematoden (> 255.000 Individuen), Tardigrada (> 30.000) und Collembola (> 25.000) gefunden. Insgesamt 98 Arten wurden nachgewiesen, hauptsächlich Nematoda (40 Arten), Actinedida (25), Tardigrada (14) und Collembola (11).**

Die erfasste Mesofauna (= Collembola, Actinedida, Oribatida und Gamasina) kann als typisch für die maritime Antarktis angesehen werden. Fast alle festgestellten Arten waren bereits zuvor aus der maritimen Antarktis gemeldet worden. Einige der registrierten Taxa sind darüber hinaus endemisch in der Antarktis. Allerdings wurden keine lokalen Endemiten festgestellt. Auch wurde für die ermittelten Arten keine Erweiterung ihrer bisherigen zoogeografischen Verbreitung belegt.

Die räumliche Verteilung der Untersuchungsgebiete innerhalb der maritimen Antarktis war eher begrenzt. Trotzdem wurden alle bekannten Collembolenarten der maritimen Antarktis in der vorliegenden Untersuchung nachgewiesen. Im Gegensatz dazu wurden keineswegs alle an

der Antarktischen Halbinsel vorkommenden Milbenarten in der vorliegenden Untersuchung registriert. Dies liegt vermutlich daran, dass die untersuchten Substrate sich von denen früherer Arteninventaruntersuchungen unterscheiden, die auf der Untersuchung mehrerer unterschiedlicher Mikrohabitate oder hauptsächlich auf dem Absammeln von Steinunterseiten basieren. Mit über 40 registrierten Arten hat die vorliegende Untersuchung trotzdem einen relativ großen Teil der Mesofauna der maritimen Antarktis erfasst. Der Artenreichtum und die registrierten Dichten der Mesofauna, die in den einzelnen untersuchten Lokationen ermittelt wurden, stimmen weitgehend mit den Zahlen aus früheren Studien überein. Einige der Lokationen (Paulet Island, Devils Island oder Petermann Island) waren im Vergleich zu den übrigen Lokalitäten oder zu früheren Studien allerdings extrem arten- und individuenarm.

Ein großer Teil der bisherigen antarktischen Studien widmete sich nicht der bodenbewohnenden Mikrofauna (Nematoda und Tardigrada), sondern der aus Moospolstern und Flechten. Daher ist die Tatsache, dass z. B. 19 der 40 in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Nematodenarten bisher nicht aus antarktischen Studien bekannt oder beschrieben sind, nicht als Indiz für eine Einschleppung durch Touristen zu werten. Es ist denkbar, dass diese Arten bisher aufgrund der Kleinräumigkeit ihrer Verteilung und der eingeschränkten Anzahl von detaillierten Untersuchungen in der maritimen Antarktis bisher übersehen wurden. Die vorliegende Studie hat besonders für Tardigraden außerdem neue Lokationen und Habitate einbezogen und so den bisherigen Kenntnisstand des Artenreichtums einiger Lokalitäten innerhalb der maritimen Antarktis erweitert. Die vorliegende Arbeit konnte mindestens sechs Arten der bislang bekannten antarktischen Tardigradafauna neu hinzuzufügen.

In beiden Untersuchungsjahren wurden hoch signifikante Unterschiede zwischen den Faunen aller Tiergruppen der unterschiedlichen Lokalitäten festgestellt, sowohl bezüglich Artenreichtum als auch Individuendichte. Die starken Unterschiede zwischen den Lokalitäten liegen vermutlich an lokalen Habitatunterschieden (Charakteristika der jeweiligen Küste, Hangexposition, Bodenparameter, Ausprägung der Vegetation usw). **Eine signifikant abnehmende Gesamtdichte von den nördlichsten zu den südlichsten Lokalitäten** war besonders bei der Mikrofauna offensichtlich. Die höchsten Individuendichten und Artenzahlen wiesen im Jahr 2010 die nördlichsten Untersuchungsstellen auf King George Island auf. In 2011 waren die höchsten Nematodenzahlen ausnahmsweise in den Böden der relativ südlich gelegenen Paulet Island zu finden. Allerdings gingen diese hohen Dichten auf eine Massenvermehrung einer einzelnen Art, *Rhomborhabditis cf. teres*, zurück. Ursache hierfür ist vermutlich der vergleichsweise hohe Stickstoffgehalt und mutmaßlich entsprechend reichhaltige Bakterienangebot der ornithogenen Böden auf Paulet Island. Ein Nord-Süd-Gradient war bei den Dichten der Mesofauna nicht so offensichtlich, obwohl hier die höchsten Dichten in den Lokalitäten der Südlichen Shetlandinseln gefunden wurden. Abnehmender Artenreichtum von den nördlichsten zu den südlichsten Lokalitäten wurde bei allen Tiergruppen festgestellt. Dieser Trend kann allerdings nicht als allgemein gültig angesehen werden, da verschiedene Studien auch aus weiter südlich gelegenen Regionen der maritimen Antarktis relativ artenreiche Bodentiergemeinschaften feststellten.

Für die Einschätzung einer bisher nicht festgestellten Art als nicht-heimisch wurden die folgenden Kriterien angewandt: bisher aus antarktischen Lebensräumen nicht bekannt (oder als eingeschleppte Art bereits bekannt), bekannt als Kosmopolit oder aus Europa, parthenogenetische Fortpflanzung bzw ihre höchsten Dichten gefunden in offenen Böden ohne Vegetationsdecke. In der vorliegenden Studie gab es keinen direkten Beleg dafür, dass eine Art

durch den Menschen eingeschleppt wurde. Daher werden nicht-heimische Arten nur als *möglicherweise von Menschen eingeführt* angesehen.

Bei den Tardigrada und Nematoda gab es einige bislang noch nicht in der Antarktis festgestellte Arten. Ihr Status als heimische oder nicht-heimische Art konnte nicht bewertet werden, da sie für die Wissenschaft neu sind oder aufgrund mangelnder Vergleichsuntersuchungen bislang nicht festgestellt werden konnten. Bei den Nematoda wurden fünf Arten zum ersten Mal aus der Antarktis gemeldet. Diese sind verwandt mit morphologisch sehr ähnlichen, kosmopolitisch verbreiteten Arten. Es bleibt offen, ob es sich bei diesen Funden tatsächlich um weit verbreitete Arten oder aber um verwandte Arten handelt, die eine auf die Antarktis begrenzte Verbreitung aufweisen. Hinsichtlich der Tardigraden gibt es keinen Hinweis auf eine Einschleppung. Die vorliegende Untersuchung erbrachte allerdings Nachweise mehrerer potenziell neuer Arten. Da aber die bisherige Analyse nahelegt, dass es sich dabei nicht um bereits bekannte Arten handelt, weist alles eher auf einheimische Arten als auf eine Einschleppung nicht-heimischer Arten in die maritime Antarktis hin.

Demgegenüber wurden bei den Collembola und Actinedida acht Arten als **nicht-einheimisch und potentiell eingeschleppt identifiziert**. Die **höchste Anzahl nicht-heimischer Arten wurde auf Deception Island nachgewiesen**. Die vorliegende Untersuchung lässt die Zahl der aus Deception Island bekannten Collembolenarten auf 14 anwachsen, darunter sind sieben nicht-heimische Arten, die somit 50 % der vorkommenden Arten ausmachen. Die hohe Anzahl nicht-heimischer Arten kann in erster Linie auf die durch die geothermale Aktivität warmen und feuchten Bedingungen zurückgeführt werden. Die lange Geschichte menschlicher Präsenz auf Deception Island und das gegenwärtig hohe Niveau an Tourismus wird ebenfalls als Ursache für die Besiedlung der Insel durch nicht-heimische Arten betrachtet. **Die zweithöchste Zahl von potenziell nicht-heimischen Arten und deren zweithöchste Individuenzahl wurden auf Neko Harbour festgestellt**. Dieser Fundort weist in der maritimen Antarktis ebenfalls eine der höchsten Besucherzahlen pro Jahr auf, was wiederum auf eine mögliche, anthropogen beeinflusste Ausbreitung dieser Arten hinweist. Mehrere dieser Arten wurden auch an verschiedenen anderen touristischen Anlandestellen nachgewiesen, wenn auch mit nur wenigen Individuen. Damit erscheint **eine durch den Menschen geförderte Ausbreitung sehr wahrscheinlich**. Fast alle nicht-heimischen Arten der Actinedida und Collembola zeigten keine signifikanten Abundanzunterschiede zwischen touristisch beeinflussten und nicht-beeinflussten Küstengebieten. Dies ist ein weiterer Hinweis auf ihr Potenzial, durch menschliche Aktivitäten verbreitet zu werden.

Die auf der MS Hanseatic **gegen eine Verschleppung von Arten standardmäßig durchgeführten Präventivmaßnahmen ließen eine unzureichende Effizienz erkennen** und erwiesen sich besonders in Gebieten als unwirksam, die stark verschlammte waren oder arten- und individuenreiche Bodentiergemeinschaften beherbergten. Beispielsweise gab es große Unterschiede zwischen zwei Sätzen von Kontrollreinigungspuren. Nach dem Landgang auf Südgeorgien war bei 100% der Proben starkes Wachstum und Aktivität von Mikroorganismen erkennbar. Die mikrobielle Aktivität wurde vermutlich durch den Pinguinkot begünstigt und veranschaulicht die biologische Vitalität dieser mittels Schuhwerk verschleppten Substrate. In 30% der Proben befanden sich Reste von Federn und Detritus, während Bodenpartikel in 60% der Proben vorhanden waren. Pflanzenreste waren in etwas mehr als 50% der Proben zu finden. Ebenfalls etwas mehr als 50% der Proben enthielten Bodentiere. Demgegenüber waren die Proben nach dem Aufenthalt auf Deception Island vergleichsweise sauber. Zwar wurden in

fast allen Fällen (80% der Proben) Bodenpartikel erfasst, mikrobielle Aktivität war in den Proben jedoch nur ausnahmsweise (10%) zu verzeichnen. Feder- und Pflanzenreste waren in 20% der Proben vorhanden. Zwei Nematodenindividuen wurden in zwei verschiedenen Proben nachgewiesen. **Dadurch konnte der Transport von Bodenorganismen durch das Schuhwerk von Besuchern trotz „Bootwashing“ gesichert nachgewiesen werden.** Durch die Konservierung der Proben ist nicht bekannt, ob die Individuen nach der Verschleppung noch lebten und auch weiterhin existenzfähig waren. Die Ergebnisse verdeutlichen allerdings das hohe biologische *Potenzial* von Erdresten am Schuhwerk und die Notwendigkeit präventiver Maßnahmen wie dem „Bootwashing“. Die mangelnde Effizienz der Maßnahmen ist nicht primär auf die dabei verwendeten Methoden zurückzuführen, sondern auf menschliches Fehlverhalten während der Durchführung der Maßnahme (z. B. eine unzureichende Nutzung bzw Kontrolle der Nutzung).

In der vorliegenden Arbeit wurde die in der maritimen Antarktis bekannte Verbreitung der hier nachgewiesenen Arten sowie ihre bisher ermittelten ökologische Präferenzen dargestellt. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Korrelations- und Kovarianzanalysen erweitern bzw bestätigen das aktuelle Wissen bezüglich der ökologischen Präferenzen der untersuchten Arten. Beide Analysen konnten einen entscheidenden Zusammenhang zwischen der Bodenfauna und der Vegetationsbedeckung zeigen: **je dichter die Vegetationsbedeckung war, umso individuen- und artenreicher waren die erfassten Bodentiergemeinschaften.** Der positive Vegetationseffekt zeigte sich bei allen taxonomischen Gruppen. Auch bei vielen Einzelarten konnte ein Anstieg der Individuenzahlen mit zunehmender Vegetationsbedeckung festgestellt werden. Die Kovarianzanalysen offenbarten signifikant höheren Dichten v. a. bei mittlerer Vegetationsbedeckung. Dies zeigt die **Bedeutung von Vegetation als Habitat für die antarktische Bodenfauna, egal wie stark entwickelt diese Vegetation ist.** Bodensubstrate mit Vegetation bieten einen räumlich und klimatisch günstigeren Lebensraum als die vorwiegend mineralischen Sand-, Kies- und Schotterflächen.

Die Korrelationsergebnisse bestätigen eine mögliche Limitierung der Fauna durch die Bodenfeuchte, denn viele taxonomischen Großgruppen und viele einzelne Arten bildeten bei höherer Bodenfeuchte signifikant höhere Dichten (und Artenzahlen innerhalb der Großgruppen) aus. Dieser Effekt war am stärksten bei den Collembola, Actinedida und Nematoda ausgeprägt. Eindeutig waren weiterhin positive Zusammenhänge zwischen insbesondere den Collembola, Oribatida und Nematoda und Parametern, die für den Gehalt, die Zusammensetzung sowie die Qualität der organischen Substanz im Bodensubstrat stehen. **Je höher die Qualität dieser Parameter war, desto arten- und individuenreicher traten diese Gruppen in Erscheinung.** Bodensubstrate mit einem entsprechend hohen Anteil organischer Substanz bieten ebenfalls einen räumlich und klimatisch günstigeren Lebensraum und vermutlich auch ein höheres Nahrungsangebot. Die Reaktionen einzelner Collembolenarten hingen mit der Artgruppe zusammen: einheimische Arten folgten meist dem allgemeinen Trend einer positiven Reaktion auf den Nährstoffzustand des Bodens, während nicht-heimische Arten hierauf negativ korrelierten. Nur der Artenreichtum der Actinedida korrelierte negativ mit Boden-pH, was bedeutet, dass mehr Arten bei niedrigerem Boden-pH nachgewiesen wurden. Unter den abiotischen Faktoren zeigte die Bodentextur den geringsten Einfluss auf die Gemeinschaftsparameter.

Die Ergebnisse waren hinsichtlich einer Auswirkung der menschlichen Aktivitäten auf die Bodenfauna nicht persistent über alle Tiergruppen, Untersuchungsjahre und faunistischen

Parameter. Entsprechend waren anthropogenen Auswirkungen „kryptisch“ innerhalb der Gesamtdaten zu finden und oft überlagert durch eine hohe Datenvariabilität. **Exakte statistische Verfahren konnten allerdings signifikante Einflüsse des Menschen auf die untersuchte Bodenfauna eindeutig nachweisen.** In erster Linie handelt es sich hier wohl um Begehungseffekte, da in den Untersuchungsgebieten weder menschlicher Abfall noch andere Kontaminationen erlaubt sind und vermutlich auch nicht stattfinden.

Die Anwesenheit von Menschen beeinflusste auf dem Niveau der taxonomischen Großgruppen vor allem die Gesamtabundanzen. Sowohl die Varianzanalysen als auch z. T. **die Kovarianzanalysen zeigten, dass die Dichten aller Tiergruppen (mit Ausnahme der Actinedida) in den durch menschliche Begehung beeinflussten Arealen insgesamt signifikant niedriger waren.** Diese Effekte sind allerdings nicht erkennbar, wenn die einzelnen Taxa zu höheren taxonomischen/ökologischen Gruppen kombiniert werden. Das bedeutet, dass die Reaktionen der einzelnen Tiergruppe taxon-spezifisch und nicht kumulativ waren. Es wurde kein genereller anthropogener Einfluss auf die Artenzahl festgestellt, auch wenn in einzelnen Jahren für die Collembola (2011) und Oribatida (2010) signifikant reduzierte Artenzahlen in den anthropogen beeinflussten Arealen festgestellt wurden.

Darüber hinaus zeigten die Kovarianzanalysen eine starke Wechselwirkung zwischen anthropogenem Einfluss und dem Deckungsgrad der Vegetation. Der menschliche Einfluss wirkte stärker negativ auf die Individuendichten in Flächen mit mittlerer Vegetationsdecke. **Wo die Vegetationsbedeckung also lediglich spärlich war, hatte die menschliche Begehung größere Auswirkungen, als dort, wo keine oder viel Vegetation vorhanden war.** Die Wechselwirkung war am stärksten bei den Collembola, Actinedida, Oribatida und z. T. auch Nematoda ausgeprägt. Dies ist von besonderer Bedeutung, da im Falle antarktischer Lebensräume generell lediglich größere Ansammlungen geschlossener Vegetation geschützt werden, entweder als ausgewiesene Antarctic Specially Protected Areas (ASPAs) oder als Bereiche mit Betretungsverbot in den Visitor Site Guidelines für die jeweiligen Anlandeorte.

Der anthropogene Einfluss auf die einzelnen Arten war unterschiedlich. Einige Arten wurden mit zunehmendem anthropogenen Einfluss negativ beeinflusst (niedrigere Abundanzen), einige wenige andere Arten wurden sogar positiv beeinflusst (höhere Abundanzen). Für eine Reihe von Arten zeigten die Analysen außerdem signifikante Wechselwirkungen zwischen der anthropogenen Wirkung und dem Grad der Vegetationsbedeckung mit signifikant stärkeren anthropogenen Auswirkungen (ob positiv oder negativ) bei mittel bis stark ausgeprägter Vegetationsdecke. Wenn man alle Bodentiergruppen zusammen betrachtet, dann **zeigen über 35 % der Arten entweder eine positive oder negative Reaktion auf die menschliche Begehung.** Wenn man diejenigen Arten hinzu nimmt, die zwar statistisch nicht-signifikant, so doch immerhin einen Trend für eine anthropogene Beeinflussung zeigen, dann **sind fast 2/3 aller festgestellten Arten** entweder positiv oder negativ beeinflusst. Dies kann als **Hinweis auf eine Veränderung der Nahrungsnetzstruktur in Arealen unter anthropogenem Einfluss** angesehen werden. Da die artenarmen Gemeinschaften der Antarktis kaum funktionelle Redundanzen aufweisen, kann die konstante Einwirkung von Menschen insgesamt zu größeren Veränderungen bei den Ökosystemfunktionen der Bodenlebewesen führen.

In Lebensräumen, die viele verschiedene Mikrohabitate aufweisen, kann die Artenzusammensetzung zwischen verschiedenen Mikrohabitaten unterschiedlich sein. Diese kleinräumige Unterschiedlichkeit zwischen den verschiedenen Arealen ist eine der Hauptquellen der Biodiversität (lokale β -Diversität). Es ist denkbar, dass Touristen Bodensubstrat

im Profil ihrer Gummistiefel oder in der Ausrüstung transportieren und darin auch Bodentiere von Mikrohabitat zu Mikrohabitat transportieren und so die Biodiversität der lokalen Mikrohabitate verändern. Es konnte jedoch für keine der untersuchten Tiergruppen ein menschlichen Einfluss auf die β -Diversität insgesamt festgestellt werden. Allerdings zeigten die PERMANOVA-Analysen eine höchst signifikante Interaktion zwischen Lokalität und menschlicher Begehung bei der Diversität der Actinediden- und Tardigradenfaunen. Insgesamt bedeutet dies, dass eine durch Menschen verursachte Verringerung der β -Diversität bei diesen Tiergruppen bestätigt werden konnte, die aber auf wenige Lokalisationen beschränkt ist. Bei der Analyse der Daten bestimmter Lokationen konnte für die Actinedida und Tardigrada eine Reduktion der β -Diversität in den anthropogen beeinflussten Arealen bei etwa 40 % der Lokationen festgestellt werden.

Auch wenn die Ergebnisse bezüglich einer anthropogenen Auswirkung weder über die Tiergruppen noch über die Jahre oder Lokationen einheitlich waren, **so zeigt die Summe der Ergebnisse doch wichtige Veränderungen auf, die auf einen menschlichen Einfluss zurückgehen.** Darüber hinaus sind viele der Lokationen während des antarktischen Sommers auch von großen Pinguin- und Robbenkolonien bevölkert, die ebenfalls einen großen Einfluss auf die Böden und die Bodenfauna haben. Alle anthropogenen Auswirkungen, die hier beschrieben wurden, sind also stärker bei den intensiver besuchten Anlandestellen und liegen deutlich über denen, die durch Wildtiere verursacht sind.

Aus den erzielten Ergebnissen sind konkrete **Empfehlungen** für einen verbesserten Schutz der sensiblen antarktischen Ökosysteme vor menschlicher Beeinflussung ableitbar. In erster Linie betreffen diese die **Präventivmaßnahmen gegen eine Ein- bzw Verschleppung nicht-heimischer Bodenorganismen.** Hierzu ist eine Verbesserung der Aufklärung antarktischer Besucher über die Notwendigkeit dieser Maßnahmen und die Kontrolle ihrer sachgerechten Durchführung notwendig. Dazu gehört auch eine Intensivierung ihrer Anwendung zwischen subantarktischen und antarktischen Gebieten sowie nach einem Besuch von Standorten, die bereits hohe Zahlen nicht-heimischer Arten aufweisen, wie z. B. Deception Island oder Neko Harbour. Weiterhin müssen **spezielle Mikrohabitate stärker geschützt werden,** z. B. durch eine Ausweitung der für Besucher geschlossenen Bereiche (z. B. in den jeweiligen Visitor Site Guidelines) um Areale mit initialer oder sporadischer Vegetation sowie um Flächen mit Schmelzwasserströmen (= Ansammlung organischer Material im Boden und erhöhter Bodenfeuchte). Damit zukünftig eine weitere Ausbreitung von in der Antarktis nicht-heimischen Arten verhindert wird und anthropogene Auswirkungen auf antarktische terrestrische Ökosysteme minimiert werden, ist **grundsätzlich eine Einschränkung der Gebiete erforderlich, die von Touristen besucht werden dürfen.** Hierfür wird eine „Positivliste“ empfohlen, außerhalb das Betreten durch Touristen nicht gestattet sein sollten. Außerdem wird die Etablierung eines international durchgeführten, langfristigen **bodenbiologischen Monitoringprogramms** angeregt, um ein besseres Verständnis der langfristigen Auswirkungen des Menschen in Gebieten mit starkem Tourismus sowie eine Erfolgskontrolle und Verbesserungen von Schutzmaßnahmen zu erzielen.