

5.3 Ausbreitung von Schadstoffen in die Polarregionen

RALF EBINGHAUS, CHRISTIAN TEMME & ZHIYONG XIE

Transfer of Pollutants into Polar Regions: *The polar regions are considered to be the last large-scale pristine environments on the globe. However, modern physical and chemical analytical methodology provides information on the occurrence of a number of contaminants in Arctic and, to a lesser extent, in the Antarctic environment. These anthropogenic substances can be measured in air, water, snow and ice in their so-called background concentration and tend to bioaccumulate in polar biota, a major dietary source for the Arctic Aboriginal population. There is clear evidence that the global background of a number of man-made chemicals is increasing since the beginning of industrialization. Poleward atmospheric transport of semi-volatile contaminants and transport via global oceanic circulation patterns of the more water soluble substances are the major pathways of pollutants into the Arctic and Antarctic environment. Climate variability in the recent decades may have an influence on observed temporal and spatial distribution patterns of anthropogenic polar contamination.*

Die Polregionen gelten als letzte großflächige Reingebiete unserer Erde. Mit den Methoden der modernen chemischen und physikalischen Analytik lassen sich jedoch auch in der Arktis und, in geringerem Ausmaß, in der Antarktis, chemische Elemente und Verbindungen nachweisen, die erst durch den Menschen verstärkt in die Umwelt eingetragen wurden. Diese Spurenstoffe lassen sich dort üblicherweise in ihrer sogenannten »Hintergrundkonzentration«, d.h. in einer Art globalen Grundbelastung nachweisen, die für einige Umweltschadstoffe seit Beginn der Industrialisierung ansteigt. Aufgrund der niedrigen Temperaturen an den Polen werden mittelflüchtige Substanzen aus den industrialisierten und wärmeren Gebieten der Erde über die Atmosphäre in Richtung Nord- und Südpol transportiert und kondensieren dort aus (»Kaltphasenanreicherung« oder auch »global distillation«).

Ozeanische Transporte von Schadstoffen in die Polregionen werden über die globalen Strömungsmuster gesteuert. Die wesentlichen Transportpfade, auf die in diesem Kapitel im Einzelnen eingegangen wird, sind für die Arktis in *Abb. 5.3-1* dargestellt.

Auf unterschiedlichen Klimaszenarien beruhende Untersuchungen zeigen, dass signifikante Veränderungen der wesentlichen atmosphärischen und ozeanischen Transportmuster möglich sind. Dies bedeutet auch, dass die Klimavariabilität der vergangenen Dekaden möglicherweise für einige der beobachteten Trends der Schadstoffbelastung zum Teil mitverantwortlich sein könnte.

Die Rolle des atmosphärischen Ferntransports für die Belastung der Arktis

Die polaren Ökosysteme können grundsätzlich als die letzten weitgehend vom Menschen unbeeinflussten Gebiete der Erde betrachtet werden. Im Vergleich mit der Arktis ist die Antarktis noch wesentlich weniger belastet durch vom Menschen verursachte (anthropogene) Schadstoffe. Die natürliche Zusammensetzung der Atmosphäre in den Polargebieten ist nahezu unge-

stört. Grund hierfür ist zum einen die große Entfernung zu den industrialisierten Gebieten des Eurasischen und des Amerikanischen Kontinents. Zum anderen sorgen großräumige meteorologische Prozesse dafür, dass die Polargebiete von den gemäßigten Breiten in der Regel abgeschirmt sind, wie weiter unten näher ausgeführt wird.

Die Arktis ist extrem dünn besiedelt, die kommerzielle Fischerei ist minimal ausgeprägt, ebenso wie allgemeine industrielle Aktivitäten. Lediglich im sibirischen Teil der Arktis mit den hochindustrialisierten Gebieten auf der Kola Halbinsel, sowie den Einzugsgebieten der großen Ströme Pechora und Ob/Yesisey ist von starken anthropogenen Belastungen auszugehen (BARD 1999). Viele der im Folgenden vorgestellten Ergebnisse über den Transport von Schadstoffen in die Arktis sind der umfangreichen Übersichtsarbeit von BARD 1999 entnommen.

Es gibt jedoch seit einigen Jahren klare Hinweise darauf, dass es zu zunehmenden Belastungen der polaren Breiten durch Ferntransporte von Schadstoffen aus den gemäßigten Zonen der Erde kommt. Vier Hauptbelastungskategorien sind hier zu nennen:

- Säurebildende Gase (SO_x), z.B. aus Metallverhüttung und Industrie
- Schwermetalle, z.B. aus der Verbrennung fossiler Materialien sowie Erzgewinnung
- Klassische persistente organische Luftschadstoffe (»persistent organic pollutants: POPs«) wie beispielsweise unpolare Pestizide (gamma-Hexachlorocyclohexan) aus landwirtschaftlicher Anwendung und Polychlorierte Biphenyle (PCB), die als Isolatoren in Transformatoren Einsatz finden
- Neu hinzukommende POPs wie polybromierte Flammschutzmittel (PBDEs), Perfluorooctansäure (PFOA), Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und ihre Vorläufersubstanzen (Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen), sowie hormonell wirksame Substanzen wie Nonylphenol und eine Reihe neuerer Schadstoffe aus den Listen der »Hazardous Substances«

der Meeresschutzkonventionen und der EU- Wasserrahmenrichtlinie, hauptsächlich polare Insektizide (Chlorpyrifos, Endosulfan) und Herbizide (Trifluralin, Atrazin, Simazin, Diuron, Isoproturon), sowie halogenierte Phenole.

Es gilt als erwiesen, dass der atmosphärische Ferntransport zur Anreicherung von Schwermetallen und klassischen POPs in polarem Meeresplankton geführt hat, von wo diese weiter in die Nahrungskette gelangen und so auch an der Spitze der Nahrungskette, beim Menschen, zu negativen Auswirkungen führen können.

Der Einfluss der industrialisierten Gebiete auf die Atmosphäre der Polregionen wurde bereits in den 1940er Jahren des vergangenen Jahrhunderts bemerkt, aber noch nicht als solcher erkannt: Während routinemäßiger Überwachungsflüge bemerkte K.R. GREENAWAY eine Verminderung der Sichtweite durch vermehrte Aerosol- und Partikelkonzentrationen in der arktischen Troposphäre. Seit den 1950er Jahren spricht man bei diesem Phänomen vom »Arctic Haze«, und es wurde klar, dass es sich hierbei nicht um eine kleinskalige Windverfrachtung von Staubpartikeln handelt, sondern um großräumige Transporte, die in den gemäßigten Breiten ihren Ursprung hatten. Arctic Haze ist eine Mischung von Aerosolen, die säurebildende Komponenten enthalten, wie zum Beispiel SO_x und NO_x und Partikeln wie zum Beispiel Ruß.

Diese Partikel wiederum können als Transportmittel für Schwermetalle, Pestizide, Polyzyklische

Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Polychlorierte Biphenyle (PCB) dienen. Arctic Haze wird vornehmlich in den unteren 3 Kilometern der Atmosphäre (untere Troposphäre) beobachtet und ist am stärksten ausgeprägt in den kältesten Monaten von Dezember bis April.

Diese jahreszeitliche Abhängigkeit lässt sich jedoch nicht ohne weiteres mit den typischen saisonalen Emissionsmustern vieler Schadstoffe in Übereinstimmung bringen. So werden Pestizide vornehmlich während der Wachstumsperiode von April bis Juni eingesetzt. IVERSEN & JORANGER (1985) erklären diese Beobachtungen damit, dass ein quasi-stationärer, großräumiger meteorologischer Zustand vorherrscht, der den polwärts gerichteten Transport von Schadstoffen kontrolliert. Diese sogenannte Abschirmung (»Blocking«) kann für die saisonalen Muster verantwortlich sein. Die Hauptquellregionen in den mittleren Breiten unterliegen unregelmäßigen atmosphärischen Stagnationen aufgrund der Abschirmung der Westwindzirkulation durch Antizyklone. Diese Stagnationssituationen führen zu verminderter Verdünnung und Auswaschung von Schadstoffen in den Quellregionen und damit zu einer lokalen bzw. regionalen Schadstoffanreicherung. Nähert sich nun ein zyklonisches System diesem abgeschirmten Hochdruckgebiet, so kann sich ein starker Druckgradient ausbilden, der den nordwärts gerichteten Transport dieser mit Schadstoffen angereicherten Luftmasse zur Folge hat.

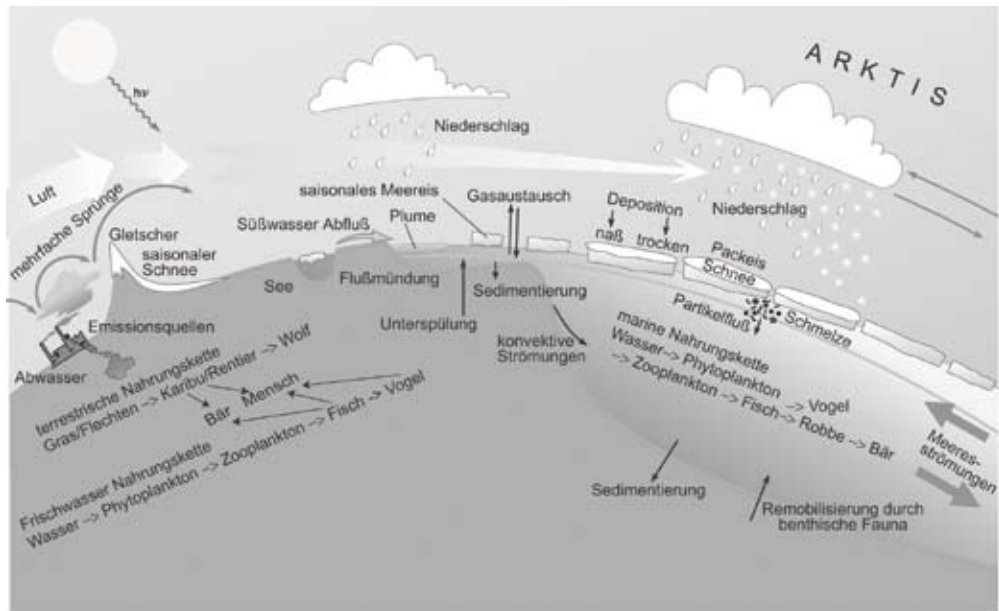


Abb. 5.3-1: Schematische Darstellung der wesentlichen Eintragswege von Schadstoffen in die Arktis. Bioakkumulationspfade, Abbauwege und Ablagerung im arktischen Ökosystem sind ebenfalls dargestellt (aus AMAP 2003, nach STEWART 2000 und MUIR et al. 1999).

Existiert dieser Transportpfad ausreichend lange, kann ein Eintrag in die arktische Troposphäre erfolgen. Abschätzungen haben ergeben, dass Aerosole aus den gemäßigten Breiten in 7–10 Tagen die Arktis erreichen können. Andere Untersuchungen zeigen, dass belastete Luftmassen sogar in wesentlich kürzeren Zeiträumen bis in die nördliche Polarregion gelangen können.

Das Auftreten der Hochdruckabschirmung ist in guter zeitlicher Übereinstimmung mit dem Auftreten belasteter Luftmassen in der Arktis (IVERSEN & JORANGER 1985). Kurzfristige Veränderungen der Zirkulationssysteme sind verantwortlich für die episodenhafte Natur der Aerosolverschmutzung der arktischen Atmosphäre.

Die geographische Lage der Hochdruckabschirmung ist verantwortlich für die relativen Beiträge der unterschiedlichen Quellregionen für die Belastungssituation: Eurasische Quellen sind von größerer Bedeutung für die Verschmutzung der Arktis als nordamerikanische und sind verantwortlich für etwa die Hälfte der Einträge. Im Winter sorgt der ausgeprägte sibirische Antizyklon dafür, dass Luftmassen aus dem zentralen eurasischen Kontinent in die Arktis transportiert werden und von dort entweder nach Nordamerika oder in die Hauptregion der Antizyklone bei den Aleuten und dem südlichen Grönland.

Im Frühjahr löst sich das Hochdruckgebiet über Sibirien langsam auf, und der westliche Teil des eurasischen Kontinents hat die größte Bedeutung für die Belastung der Arktis. Im Sommer hingegen sind auch Einflüsse der Nordatlantik- und der Nordpazifikregion zu erkennen.

Bereits 1975 stellte Goldberg seine Modellvorstellung der »Globalen Destillation« vor, die zu einem nordwärts gerichteten Transport von flüchtigen Schadstoffen aus den gemäßigten und tropischen Breiten in die Arktis führt. Einige langlebige Pestizide wurden und werden insbesondere in tropischen Ländern eingesetzt. Diese sind bekanntermaßen durch hohe Temperaturen und ausgeprägte Niederschläge gekennzeichnet, wodurch sich eine rasche Verteilung der Schadstoffe in Luft und Wasser ergibt. Einmal in die Umwelt eingebracht, können diese Substanzen über lange Zeiträume aus Böden freigesetzt werden und Richtung Polarregionen transportiert werden und dann dort aufgrund der deutlich niedrigeren Temperaturen wieder kondensieren. Dieser Prozess wird in der Literatur häufig modellhaft als Kühlfinger-Effekt (»cold-finger«) oder auch als kalte Kondensation (»cold condensation«) bezeichnet.

Hinzu kommt ein weiterer Effekt, der als globale Fraktionierung (»global fractionation«) bezeichnet wird. Die Verteilung von chemischen Verbindungen zwischen der Gas- und Partikelphase unserer Atmo-

sphäre ist vom individuellen Dampfdruck und von der Umgebungstemperatur abhängig. Mit der Theorie der globalen Fraktionierung lässt sich beschreiben, wie die flüchtigeren Schadstoffe, wie zum Beispiel Hexachlorcyclohexan (HCH) oder einige niedermolekulare Polychlorierte Biphenyle (PCB) bis in die nördlichsten Breiten gelangen, während weniger flüchtige Schadstoffe, wie zum Beispiel DDT, vornehmlich in der Umgebung der Quellregionen verbleiben. Auch innerhalb von Substanzgruppen mit unterschiedlichen Molekulargewichten lässt sich dieses Muster erkennen. So findet sich, relativ betrachtet, in den höheren Breiten ein größerer Anteil von niedermolekularen PCBs, während in den gemäßigten Breiten die höhermolekularen überwiegen (WANIA & SU 2004).

Sind langlebige Schadstoffe erst einmal in die polaren Regionen gelangt, so erhöht sich ihre Lebensdauer dort in der Regel insbesondere im Winter noch weiter, und ihr Potenzial zur Bioakkumulation steigt in gleichem Maße an. Grund hierfür sind zum Beispiel niedrigere Strahlungsintensität und somit langsamerer Abbau durch UV-Aktivität, niedrige Niederschlagsraten und somit ineffektive »Auswaschung« aus der Atmosphäre. Generell kann gesagt werden, dass

- das Verteilungsverhalten der Schadstoffe stark temperaturabhängig ist,
- die Abbaureaktionen, insbesondere durch OH-Radikale, temperaturabhängig sind und
- Abbauraten in Böden- oder Schneeoberflächen erheblich langsamer sind als in Luft oder Wasser.

Als Ergebnis lässt sich beobachten, dass Schadstoffe, die in gemäßigten oder tropischen Klimazonen photochemisch effektiv abgebaut werden können, in polaren Breiten wesentlich stabiler sind und entsprechend lange dort verbleiben und angereichert werden können.

Durch Partikeldeposition oder Gas-Wasseraustausch können diese Schadstoffe dann Eingang finden in terrestrische, aquatische und marine polare Ökosysteme. Der Nachweis von vornehmlich in den Tropen eingesetzten Pestiziden in Binnengewässern Kanadas und Alaskas unterstreicht die Bedeutung des atmosphärischen Ferntransports.

Rolle des atmosphärischen Ferntransports für die Belastung der Antarktis

Ähnlich wie in der Arktis bildet sich auf der Südhalbkugel eine Wetterfront an der Grenze zwischen tropischen und polaren Luftmassen, in der Region der Westwindzone, im Zusammenspiel mit starker zyklonaler Aktivität aus (SHAW 1979). Die geographische Lage der Front wird zusätzlich durch die Position des stratosphärischen Wirbels beeinflusst. Die Westwind-

zone befindet sich im Winter etwa zwischen 40 °S und 60 °S und ist durch starke zirkumpolare Winde ausgezeichnet. Im Gegensatz zur Arktis, wo während des polaren Winters die Polarfront zum Teil auf der Landmasse der Kontinente verläuft, liegt die antarktische Polarfront im Winter sowie im Sommer immer südlich der Kontinente mittlerer Breiten und nördlich der antarktischen Küste.

Die antarktischen Küstenstationen, zu denen die vom Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung betriebene deutsche Neumayer-Station gehört, befinden sich ganzjährig im Übergangsbereich zwischen dem kontinentalen Hochdrucksystem und marinen Tiefdrucksystemen. Der kontinentale Einfluss macht sich durch vom Pol nach Norden abfallende, katabatische, Winde bemerkbar. Die Winde werden durch die Corioliskraft nach Osten abgelenkt und passieren so die Station aus Richtung Südosten bis Osten. Luftmassen mit Quellregionen über dem antarktischen Plateau werden als kontinentale Antarktislufte bezeichnet (PFAFF 1993).

Advektion von feuchter, maritimer Luft ist dagegen mit Zyklonen gekoppelt (WAGENBACH 1996). Die Ursprungsgebiete dieser sogenannten marinen Polarluft liegen über dem antarktischen, eisfreien Ozean (PFAFF 1993). Im Winter kann zusätzlich die Bildung mariner Antarktislufte beobachtet werden, welche sich über dem ca. fünfzehn Breitengrade umfassenden eisbedeckten Gürtel vor der Küste der Antarktis formiert. Innerhalb der Quellregionen von mariner Polarluft und mariner Antarktislufte, der Westwindzone, entspricht die Zyklonenbewegung einem nach Osten gerichteten Transport (BELITZ 1989). Im Winter ist in dieser Region eine erhöhte Zyklonenaktivität zu beobachten (WAGENBACH 1996). An den verschiedenen Messorten hat man, bedingt durch die Zirkulation innerhalb der Zyklonen, vorherrschend Nordost- bis Ost-Winde beim Antransport mariner Luftmassen. Hier ist hinzuzufügen, dass die Umströmungsrichtung der Zyklonen auf der Südhalbkugel im Uhrzeigersinn, auf der Nordhalbkugel dagegen entgegen dem Uhrzeigersinn verläuft.

Neben dem horizontalen Transport ist wiederum der vertikale Transport zu nennen. Von großer Bedeutung sind dabei die Umkehrungen der normalerweise zu beobachtenden Temperaturprofile mit zunehmender Höhe: die sogenannten Temperaturinversionen, bei der die Temperaturen mit steigender Entfernung von der Erdoberfläche ansteigen. Die untere Troposphäre in der Antarktis ist durch ganzjährig auftretende Temperaturinversionen charakterisiert. Besonders ausgeprägt sind diese im Südwinter, bedingt durch die Abkühlung der Schneeoberfläche durch langwellige Strahlungsverluste (WAGENBACH 1996). Die Inversionshöhe erreicht zum

Teil eine vertikale Ausdehnung bis zu 2 km (WESSEL et al. 1998). Dabei können die Temperaturdifferenzen zwischen der Eisoberfläche und der Oberkante der Inversion an der Neumayer-Station bis zu 15 K betragen. In den Monaten von November bis Februar werden diese Situationen seltener und sind hauptsächlich auf Höhen unterhalb von 1.000 m beschränkt (KÖNIG-LANGLÖ et al. 1998).

Die Meereisbedeckung in der Antarktis erreicht im September ihr Maximum mit etwa 22×10^6 km² und vergrößert damit die schnee- und eisbedeckte Fläche der Antarktis (ca. $13,0 \times 10^6$ km²) um mehr als das Doppelte. Die nördliche Eisgrenze liegt in diesem Zeitraum zwischen 60 °S und 65 °S. Das Minimum der Eisbedeckung tritt im März mit 4×10^6 km² auf. In den Sommermonaten sind die polaren Bereiche der angrenzenden Ozeane Atlantik, Pazifik und Indischer Ozean zum größten Teil eisfrei.

Niederschlagsmessungen sind auf Grund starker Winde und Schneedrift in der Antarktis sehr schwierig durchzuführen und dementsprechend ungenau. Neben Schnee und Regen ist auch der Niederschlag von Eiskristallen bei wolkenlosem Himmel zu berücksichtigen. XIE et al. (2003) geben ein Jahresmittel für den Niederschlag der antarktischen Küstenregion bis etwa 60 °S von 125 mm bis 500 mm an.

Im Gegensatz zur Nordhemisphäre weist die Südhemisphäre eine geringere Industrialisierung auf. Bedingt durch die Land-See-Verteilung ist außerdem, im Gegensatz zur Arktis, die Distanz zwischen dem antarktischen Kontinent und den Landmassen in niedrigeren Breiten sehr groß. Die Südspitze Amerikas, Feuerland, liegt z.B. etwa 3.800 km von der Neumayer-Station entfernt. Aus diesen Gründen und wegen der verminderten meridionalen Zirkulation durch die Westwindzone, welche als aktive Barriere für den Transport von Norden nach Süden wirkt, ist die antarktische Troposphäre kaum anthropogen belastet (KOTTMEIER & FAY 1998). Hauptbestandteil der troposphärischen Spurenstoffe stellen Sulfat-Aerosole aus marinen biologischen Quellen, etwa Dimethylsulfid, dar. Sie machen etwa 83% der Gesamt-Aerosole aus und zeigen ein Maximum im antarktischen Winter bis Frühling. Einen geringen Beitrag leisten kontinentale Spurenstoffe aus gemäßigten Breiten mit etwa 4% und extraterrestrischen Quellen mit 6% (SHAW 1979). Es zeigt sich also, dass die Spurenstoffe der antarktischen Troposphäre mit Ausnahme der 4%, welche vorwiegend Schwermetalle im Ultraspurenbereich, persistente organische Verbindungen und künstliche Radionuklide sind, aus natürlichen Quellen eingetragen werden. Der Eintrag von kurzlebigen anthropogenen Spurenstoffen in die Troposphäre ist auf Grund der oben bereits genannten Gründe kaum mög-

lich. Potenzielle Quellregionen für diese Spurenstoffe befinden sich auf den umliegenden Kontinenten, die wenigstens 20 Breitengrade vom Antarktisorand entfernt sind (mit Ausnahme der Antarktischen Halbinsel, die sich fast bis 60 °S erstreckt). Der meridionale Ferntransport in der Grenzschicht wird durch die zirkumpolare Tiefdruckrinne blockiert, so dass ein effektiver Spurenstofftransport lediglich in der freien Troposphäre erfolgen kann. Jedoch wird nur ein geringer Anteil der bodennah emittierten Aerosole und reaktiven Spurengase wegen ihrer geringen atmosphärischen Lebensdauer in die freie Troposphäre getragen.

Rolle des ozeanischen Strömungsmusters für die Belastung der Arktis

Wie bei den atmosphärischen Ferntransporten bereits erläutert, spielen großskalige meteorologische Vorgänge eine zentrale Bedeutung für die Verbreitung von Schadstoffen. Von besonderer Bedeutung, auch für ozeanische Transporte, ist hierbei die Arktische Oszillation (AO). Die AO beschreibt vereinfachend gesagt die relative Lage und Stärke der Ausprägung von Azorenhoch und Islandtief, der AO-Index quantifiziert die Differenz der standardisierten Druckabweichungen dieser beiden Aktionszentren. Ein positiver Index zeigt in der Regel eine stärker ausgeprägte West- oder Südwestströmung, während ein negativer Index für eine schwache zonale Zirkulation steht. Seit Anfang der 1990er Jahre beobachtet man einen anhaltenden Trend von schwach negativem hin zu einem stark positiven AO-Index (PROSHUTINSKY & JOHNSON 1997).

Bei positivem AO-Index werden aufgrund der vorherrschenden Windfelder größere Wassermassen aus dem Atlantik in den Arktischen Ozean transportiert als bei negativem Index. Unter diesen Bedingungen werden vornehmlich Schadstoffe von den westeuropäischen und ostamerikanischen Küsten in den Arktischen Ozean transportiert. Auf der dem Pazifik zugewandten Seite der Arktis wird Wasser aus der Beringsee und von der westlichen Küste Nordamerikas durch die Beringstraße in die Arktis transportiert. Durch diese Strömungsmuster findet kein Rücktransport in die Beringsee statt, gelöste und an Schwebstoffe gebundene Schadstoffe können den Arktischen Ozean auf diesem Wege nicht verlassen.

Als bedeutende Quelle für Schadstoffeinträge müssen weiterhin die großen Flüsse, die in das Polarmeer münden genannt werden (s. Abb. 5.3-2).

Rolle des ozeanischen Strömungsmusters für die Belastung der Antarktis

Betrachtet man den gesamten Südlichen Ozean als die Wassermasse südlich der Subtropischen Front, so umfasst dieser Ozean mehr als 20% der weltweiten Ozeanfläche.

Das absinkende zirkumpolare Tiefenwasser ist in das weltumspannende Zirkulationssystem der Ozeane eingebunden, so dass der Region eine große Rolle im globalen Wärmehaushalt zukommt. In der Tiefsee erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten durchschnittliche Werte von 0,01 bis 0,02 m/s, so dass in einem Jahr 300 km zurückgelegt werden können. Demnach ist

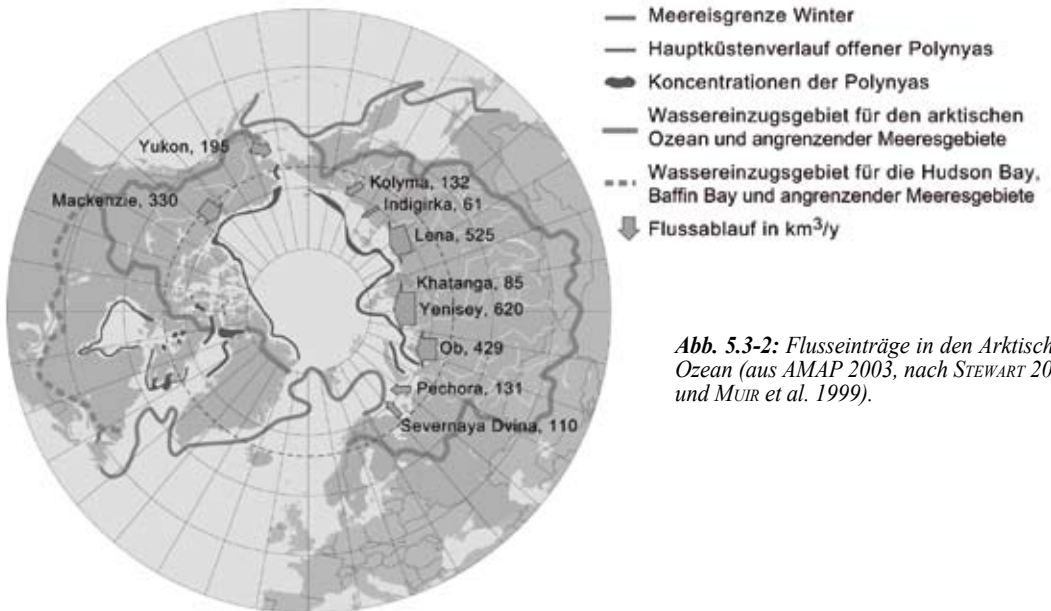


Abb. 5.3-2: Flusseinträge in den Arktischen Ozean (aus AMAP 2003, nach STEWART 2000 und MUIR et al. 1999).

Wasser, das 1950 in der Antarktis abgesunken ist, bis heute ca. 12.000 km weit gewandert. Die etwa 9.000 km von der Antarktis bis zum Äquator sind in diesem Zeitraum als südatlantische Bodenstömung zurückgelegt worden (BALLSCHMITER 1992).

Diese Konvergenz bildet im Südatlantik eine Artengrenze für Plankton und Fisch. Die absinkenden Wassermassen nehmen aber auch den an der Meeresoberfläche erfolgten Eintrag von Schadstoffen mit in die Tiefe. Diese Wasserumschichtungen in der Tiefsee müssen in der Diskussion des globalen Schadstofftransportes mit einbezogen werden, auch wenn sich die Abläufe innerhalb von Dekaden vollziehen. So konnten durch FISCHER et al. (1991) und KRÄMER & BALLSCHMITER (1988) in der Wassersäule vor den Bermudas das erwartete HCH-Muster in der aus der Südhemisphäre stammenden Wasserschicht nachgewiesen werden.

Rolle des Klimawandels für die Schadstoffeinträge in die Polarregionen

Der Klimawandel hat nicht nur unmittelbare Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft, sondern kann über veränderte Niederschlagsmuster und den Rückgang der Eismassen auch weit reichende Folgen für Schadstoffeinträge in die Arktis und Antarktis haben, da sich Transportrouten und Eintragswege insbesondere für POPs ändern können. MA et al. (2011) haben historische POP-Daten für die arktische Atmosphäre untersucht und die Daten seit den frühen 1990er Jahren mit Ergebnissen von Klimamodellen verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass eine Vielzahl von POPs im Zuge des arktischen Temperaturanstiegs remobilisiert werden können und sich in der Atmosphäre wieder vermehrt nachweisen lassen. WOHRNSCHIMMEL et al. (2013) verwendeten ein Multimedia-Modell, um Emissionen und Verbleib sowie den polwärts-gerichteten Transport von POPs abzuschätzen. Während es bei unveränderter Primäremission in die Atmosphäre in den gemäßigten Breiten zu einer Verdoppelung der Belastung der arktischen Atmosphäre und Wassermassen kommt, die in erster Linie auf Veränderungen der Emissionsmuster zurückzuführen ist, erwarten die Autoren für die Luft bzw. die Wasserphase der Arktis für bereits verbotene langlebige Umweltchemikalien einen Anstieg um den Faktor 2 bzw. 4. Dieser Effekt ist vorwiegend auf durch den Klimawandel bedingte Faktoren zurückzuführen (WOHRNSCHIMMEL et al. 2013).

Im Rahmen des Arctic Monitoring and Assessment Programs (AMAP) werden seit 1993 POPs und neuartige Problemstoffe an 4 arktischen Forschungsstationen routinemäßig gemessen. Die Stationen liegen in Kanada (Alert), Finnland (Pallas), Island (Storhofdi und Svalbard) und in Norwegen (Zeppelinstation)

(HUNG et al. 2010). Während für polychlorierte Biphenyle (PCBs) und Organochlor-Pestizide zu Beginn der Vergleichsperiode ein kontinuierlicher Rückgang der Luftkonzentration zu beobachten war, war dies in den späteren Jahren seit etwa 2000 weniger ausgeprägt. Im Gegensatz zu dieser Beobachtung wurden insbesondere für polybromierte Diphenylether (PBDEs), Hexachlorbenzol (HCB) und einige PCB-Kongener über den untersuchten Zeitraum in der Atmosphäre zunehmende Konzentrationen festgestellt (HUNG et al. 2010). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass in die arktische Umwelt sowohl zeitliche als auch räumliche Muster der POP-Transporte durch den Klimawandel beeinflusst werden können. Dies können zum Beispiel verminderte Meereisbedeckung, erhöhte Wassertemperatur, aber auch indirekte Faktoren wie zum Beispiel Biomasseverbrennung in den borealen Bereichen sein. HERMANSON und Mitarbeiter (HERMANSON et al. 2010) haben rezente Depositionsraten von verschiedenen bromierten Flammschutzmitteln an einem Eisbohrkern aus Høltedahlfonna (westlichstes Eisschild auf Svalbard) untersucht und konnten für den Zeitraum 1953 bis 2005 Eintragsabschätzungen vornehmen. Die höchsten Raten wurden für Hexabromcyclododecan und das BDE-Kongener 209 im Zeitraum 1995–2005 mit mehr als 300 pg/(m²×Jahr) gefunden. Die wesentliche Ursache für diese hohen Eintragsraten ist vermutlich ein Zusammenhang mit partikelgebundener Deposition während der »Arctic Haze« Saison (HERMANSON et al. 2010).

Eine Substanzgruppe, die in den vergangenen Jahren sehr viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat sind poly- und perfluorierten Verbindungen (PFAS). Diese Verbindungen zeichnen sich durch eine extreme Persistenz aus und schnell wurde ihre Bedeutung für die Belastung der Arktis deutlich (BUTT et al. 2010). Neben analytischen Untersuchungen zur Beschreibung der aktuellen Belastungssituation der Arktis (und in geringerem Masse auch der Antarktis) haben sich mehrere Modellstudien damit beschäftigt, die Eintragswege näher zu beleuchten und hier insbesondere, ob der atmosphärische Transport von Vorläufersubstanzen oder der Transport mit den globalen ozeanischen Strömungsmustern dominierend sind (STEMMLER et al. 2010, ARMITAGE et al. 2009, WANIA 2007). Experimentelle Arbeiten zeigen in aller Regel eine Dominanz der PFAS-Vorläufersubstanzen aus der Gruppe der Fluor- telomeralkohole (FTOH) und der entsprechenden Sulfonamidoethanole (FOSE/FOSA) (AHRENS et al. 2011, DREYER et al. 2009, SHOEIB et al. 2006, CAI et al. 2012a). Gleichzeitig bestätigt die Dominanz der nicht flüchtigen Umwandlungsprodukte Perfluoroktancarbonsäure (PFOA) und Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) in Oberflächenschneepollen die sogenannte »Vorläuferhypo-

these« (YOUNG et al. 2007, KWOK et al. 2013). Desweiteren zeigten Messungen in der Nähe von Grönland, dass schmelzendes Eis einen wesentlichen Eintragsweg von vormals deponierten PFAS darstellen kann (BUSCH et al. 2010, ZHAO et al. 2012, CAI et al. 2012b). Generell lässt sich jedoch sagen, dass ein einheitliches Bild aufgrund von raum-zeitlichen Inkonsistenzen derzeit nicht ableitbar ist.

Langzeitdatensätze aus der Antarktis sind kaum vorhanden. Die erste Messreihe wurde von KALLENBORN und Mitarbeitern für den Zeitraum 2007–2010 an der Norwegischen Antarktisstation Troll auf dem Dronning Maud Land durchgeführt (KALLENBORN et al. 2013). Für ausgewählte POPs wurden wöchentliche Proben genommen und es konnte gezeigt werden, dass die Konzentrationen der untersuchten Verbindungen deutlich niedriger waren als in der Arktis. Der wesentliche Eintragspfad für die Antarktis ist atmosphärischer Ferntransport und einige Eintragsepisoden von Pestiziden und/oder Industriechemikalien konnten mit Hilfe von FLEXPART-Rechnungen bis zu ihren Quellen in den gemäßigteren Breiten zurückverfolgt werden.

Auch in der Antarktis zeigt sich, dass für die Polychlorierten Verbindungen insbesondere die Fluortelomerkohole von besonderer Bedeutung sind (DEL VENTO et al. 2012), so wie vorher schon für die Arktis beschrieben. Die gemessenen Konzentrationen liegen hier allerdings deutlich niedriger und sind konsistent mit den Befunden von Kallenborn. Ebenfalls in Übereinstimmung mit Untersuchungen aus der Arktis konnten CAI und Mitarbeiter (CAI et al. 2012c) aufgrund von Untersuchungen auf der Fildes-Halbinsel (King-George-Insel) zeigen, dass die Konzentrationen von PFOA und PFOS die Vorläuferhypothese mit dem Ferntransport und anschließender Umwandlung von FTOH und FOSE/FOSA bestätigen.

Eine wichtige Untersuchung zu lange verbotenen POPs führten CABRERIZO und Mitarbeiter auf der Livingston Insel in der Antarktis durch (CABRERIZO et al. 2013). Sie konnten anhand der PCBs zeigen, dass es eine enge Kopplung zwischen der Atmosphäre und den darunter liegenden Schnee-/Eisflächen bzw. den Permafrostböden gibt, die nahe am Luft-Oberfläche-Gleichgewicht liegen, aber sehr leicht in Richtung Netto-Emission verschoben werden können. Das bedeutet, dass bereits vor vielen Jahren deponierte Altablagerungen von PCBs bei veränderten Temperaturen und organischem Anteil in Böden vermehrt wieder freigesetzt werden können. Die Autoren erläutern, dass es sehr wahrscheinlich einen Zusammenhang von Klimawandel, dem antarktischen Kohlenstoffkreislauf und der Remobilisierung von POPs gibt (CABRERIZO et al. 2013).

Schlussbetrachtung

Anthropogene Emissionen aus Industrie und Landwirtschaft sind die wesentlichen Belastungsquellen für die Polarregionen. Emissionsminderungsmaßnahmen werden sich somit über kurz oder lang auch auf die Schadstoffeinträge in Arktis und Antarktis auswirken. Die analytische Erfassung von räumlichen und zeitlichen Trends des Vorkommens von Schadstoffen kann wertvolle Informationen über deren Herkunft und den Erfolg von politischen Maßnahmen liefern. So lässt sich beispielsweise beobachten, dass die Einträge von Polychlorierten Biphenylen (PCB) zu Beginn der 1970er Jahre Spitzenwerte aufwiesen und danach aufgrund politischer Maßnahmen langsam zurückgingen. Heute bewegen sich die Einträge trotz eines weltweiten Banns auf gleichbleibendem Niveau, da PCB's auch weiterhin aus diffusen und somit nur unzureichend zu kontrollierenden Quellen freigesetzt werden. Für Polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) lassen sich die höchsten Einträge in die Arktis ebenfalls für die frühen 1970er Jahre feststellen, gefolgt von einer klaren Reduktion bis 1980. Danach lässt sich jedoch wieder ein langsamer Anstieg beobachten, der auf veränderte Emissionsmuster, im Wesentlichen bei der Energieerzeugung durch die Verbrennung fossiler Materialien zurückzuführen ist. Das auf unterschiedliche Schadsubstanzen zu richtende Augenmerk ist auch von regionalen Besonderheiten und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen beeinflusst. So ist beispielsweise für die kanadische Arktis die Belastung mit Säurebildnern politisch betrachtet mittlerweile von untergeordneter Bedeutung, während das Element Quecksilber in den letzten Jahren immer stärker in den Blickpunkt gerückt ist. Grund hierfür ist nicht zuletzt die knapp 20 Jahre zurückliegende erstmalige Entdeckung der so genannten atmosphärischen Quecksilberrückgänge (Atmospheric Mercury Depletion Events: AMDEs), die im polaren Frühjahr sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis zu stark erhöhten Quecksilbereinträgen in die polaren Ökosysteme führen. Dieser Befund in Zusammenhang mit der Bildung von hochtoxischem Methylquecksilber, dem hohen Bioakkumulationspotential dieser Substanz und den Ernährungsgewohnheiten der indigenen Arktisbevölkerung ist in den vergangenen Jahren ein wichtiger Anlass für intensive Forschungsarbeiten in den nördlichen Polaranrainern gewesen.

Neue Problemstoffe werden in den Fokus rücken, während für einige klassische Schadstoffe, wie z.B. Hexachlorcyclohexan (HCH, Lindan) kontinuierlich sinkende Konzentrationen und Einträge festgestellt werden. Es scheint bereits heute klar, dass bei den neuen

Problemstoffen Polybromierte Diphenylether (PBDEs), die zum Beispiel als Flammschutzmittel eingesetzt werden, und Perfluorierte Organische Substanzen (PFOCs, PFOS, PFOA), die in Feuerlöschschäumen, Teppichen, Verpackungen aber auch Textilien in großem Maßstab eingesetzt werden, aufgrund ihrer Persistenz und ihres hohen Bioakkumulationspotentials eine besonders wichtige Rolle spielen werden. Verlässliche Daten sind für diese und andere »neue« Schadstoffe bislang nur in sehr geringem Umfang in der Literatur zu finden und wurden hier zusammenfassend dargestellt. Gezielte Untersuchungen sowie verbesserte chemisch-analytische Leistungsfähigkeit werden hier einen Beitrag zur Untersuchung von Schadstoffeinträgen in die Polregionen zu leisten haben. Insbesondere sollten vermehrte Anstrengungen unternommen werden Langzeitdatensätze zu erzeugen, die Auskunft zum Beispiel über Trends ermöglichen.

Eine weitere wichtige und bisher kaum berücksichtigte Komponente sind Auswirkungen des Klimawandels auf in der Vergangenheit abgelagerte, besonders langlebige Verbindungen. Globale Regulierungen, wie zum Beispiel die Stockholm Konvention zu den POPs, werden vermutlich auf einer globalen Skala zu einer Verringerung der direkten Einträge dieser besonders problematischen Verbindungen in die Umwelt führen. Gleichzeitig ist jedoch davon auszugehen, dass diese Verbindungen aufgrund ihrer extremen Stabilität in den Kälteedepots dieser Erde über Jahrzehnte konserviert und angereichert sowie im Zuge des Klimawandels mit einem zeitlichen Versatz von Jahrzehnten wieder frei gesetzt werden können. Dieser Zusammenhang zwischen dem Klimawandel und Remobilisierung von (Alt-)Schadstoffen in der polaren Umwelt ist weitgehend unerforscht.

Literatur

- AHRENS, L., SHOEIB, M., DEL VENTO, S., CODLING, G. & C. HALSALL (2011): Polyfluoroalkyl compounds in the Canadian Arctic atmosphere. *Environmental Chemistry*, 8, (4), 399-406.
- AMAP (2003): AMAP assessment 2002. The influence of global change on contaminants pathways to, within, and from the Arctic, Oslo.
- ARMITAGE, J. M., MACLEOD, M. & I. T. COUSINS (2009): Comparative assessment of the global fate and transport pathways of long-chain perfluorocarboxylic acids (PFCAs) and perfluorocarboxylates (PFCs) emitted from direct sources. *Environmental Science & Technology*, 43, (15), 5830-5836.
- BALLSCHMITER, K. H. (1992): Transport und Verbleib organischer Verbindungen im globalen Rahmen. *Angewandte Chemie*, 104 (5), 501-674.
- BARD, S. M. (1999): Global transport of anthropogenic contaminants and consequences for the Arctic marine ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 38 (5), 356-379.
- BELITZ, H.-J. (1989): Impuls- und energietransporte über einem anarktischen Schelfeis, Promotionsarbeit. Berichte des Inst. für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, Bd. 37. S. 1 ff.
- BUSCH, J., AHRENS, L., XIE, Z., STURM, R. & R. EBINGHAUS (2010): Polyfluoroalkyl compounds in the East Greenland Arctic Ocean. *Journal of Environmental Monitoring*, 12, (6), 1242-1246.
- BUTT, C. M., BERGER, U., BOSSI, R. & G. T. TOMY (2010): Levels and trends of poly- and perfluorinated compounds in the arctic environment. *Science of the Total Environment*, 408, (15), 2936-2965.
- CABRERIZO, A., DACHS, J., BARCELO, D. & K. C. JONES (2013): Climatic and biogeochemical controls on the remobilization and reservoirs of persistent organic pollutants in Antarctica. *Environmental Science & Technology*, 47, (9), 4299-4306.
- CAI, M., XIE, Z., MOELLER, A., YIN, Z., HUANG, P., CAI, M., YANG, H., STURM, R., HE, J. & R. EBINGHAUS (2012a): Polyfluorinated compounds in the atmosphere along a cruise pathway from the Japan Sea to the Arctic Ocean. *Chemosphere*, 87, (9), 989-997.
- CAI, M., ZHAO, Z., YIN, Z., AHRENS, L., HUANG, P., CAI, M., YANG, H., HE, J., STURM, R., EBINGHAUS, R. & Z. XIE (2012b): Occurrence of perfluoroalkyl compounds in surface waters from the North Pacific to the Arctic Ocean. *Environmental Science & Technology*, 46, (2), 661-668.
- CAI, M., YANG, H., XIE, Z., ZHAO, Z., WANG, F., LU, Z., STURM, R. & R. EBINGHAUS (2012c): Per- and polyfluoroalkyl substances in snow, lake, surface runoff water and coastal seawater in Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *Journal of Hazardous Materials*, 209, 335-342.
- DEL VENTO, S., HALSALL, C., GIOIA, R., JONES, K. & J. DACHS (2012): Volatile per- and polyfluoroalkyl compounds in the remote atmosphere of the western Antarctic Peninsula: an indirect source of perfluoroalkyl acids to Antarctic waters? *Atmospheric Pollution Research*, 3, (4), 450-455.
- DREYER, A., WEINBERG, I., TEMME, C. & R. EBINGHAUS (2009): Polyfluorinated compounds in the atmosphere of the Atlantic and Southern Oceans: Evidence for a Global Distribution. *Environmental Science & Technology*, 43, (17), 6507-6514.
- FISCHER, R., W. KRÄMER & K. BALLSCHMITER (1991): Hexachlorocyclohexane isomers as markers in the water-flow of the Atlantic Ocean. *Chemosphere*, 23, 889-900.
- HERMANSON, M. H., ISAKSSON, E., FORSSTROM, S., TEXEIRA, C., MUIR, D. C. G., POHJOLA, V. A. & R. S. V. VAN DE WAL (2010): Deposition history of brominated flame retardant compounds in an ice core from Holtedahlfonna, Svalbard, Norway. *Environmental Science & Technology*, 44, (19), 7405-7410.
- HUNG, H., KALLENBORN, R., BREIVIK, K., SU, Y., BRORSTROM-LUNDEN, E., OLAFSDOTTIR, K., THORLACIUS, J. M., LEPPANEN, S., BOSSI, R.,

- SKOV, H., MANO, S., PATTON, G. W., STERN, G., SVERKO, E. & P. FELLIN (2010): Atmospheric monitoring of organic pollutants in the Arctic under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP): 1993-2006. *Science of the Total Environment*, 408, (15), 2854-2873.
- IVERSEN, T. & E. JORANGER (1985): Arctic air pollution and large scale atmospheric flows. *Atmospheric Environment*, 19 (12), 2099-2108.
- KALLENBORN, R., BREIVIK, K., ECKHARDT, S., LUNDER, C. R., MANO, S., SCHLABACH, M. & A. STOHL (2013): Long-term monitoring of persistent organic pollutants (POPs) at the Norwegian Troll station in Dronning Maud Land, Antarctica. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, (14), 6983-6992.
- KÖNIG-LANGLO, G., J. C. KING & P. PETTRÉ (1998): Climatology of the three coastal Antarctic stations Dumont d'Urville, Neumayer, and Halley. *J. Geophys. Res.*, 103 (D9), 10,935-19,946.
- KOTTMEIER, C. & B. FAY (1998): Trajectories in the Antarctic lower troposphere. *J. Geophys. Res. - Atmospheres*, 103 (D9), 10,947-10,974.
- KRÄMER, W. & K. H. BALLSCHMITER (1988): Detection of a new class of organochlorine compounds in the marine environment – the chlorinated paraffins. *Fresenius Z. Anal. Chem.*, 330, 524-526.
- KWOK, K. Y., YAMAZAKI, E., YAMASHITA, N., TANIIYASU, S., MURPHY, M. B., HORII, Y., PETRICK, G., KALLERBORN, R., KANNAN, K., MURANO, K. & P. K. S. LAM (2013): Transport of perfluoroalkyl substances (PFAS) from an arctic glacier to downstream locations: Implications for sources. *Science of the Total Environment*, 447, 46-55.
- MA, J., HUNG, H., TIAN, C. & R. KALLENBORN (2011): Revolatilization of persistent organic pollutants in the Arctic induced by climate change. *Nature Climate Change*, 1, (5), 255-260.
- MUIR, D., B. BRAUNE, B. DEMARCH, R. NORTSTROM, L. WAGEMANN, B. LOCKHART, D. HARGRAVE, R. BRIGHT, J. ADDISON, J. PAYNE & K. REIMIER (1999): Spatial and temporal trends and effects of contaminants in the Canadian Arctic marine ecosystem: a review. *Science of the Total Environment*, 230 (1-3), 83-144.
- PFÄFF, K. (1993): ^2H - und ^{18}O -Gehalte in den Niederschlägen in Abhängigkeit von der meteorologischen Situation im Bereich der Georg von Neumayer-Station, Antarktis, Promotionsarbeit, Naturwiss. Fakultät der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 3-24.
- PROSHUTINSKY, A. T. & M. A. JOHNSON (1997): Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 102 (C6), 12493-12514.
- SHAW, G. E. (1979): Considerations on the origin and properties of the Antarctic aerosol. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 17 (8), 1983-1998.
- SHOEIB, M., HARNER, T. & P. VLAHOS (2006): Perfluorinated chemicals in the Arctic atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 40, (24), 7577-7583.
- STEMMLER, I. & G. LAMMEL (2010): Pathways of PFOA to the Arctic: variabilities and contributions of oceanic currents and atmospheric transport and chemistry sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, (20), 9965-9980.
- STEWART, R. E. (2000): The variable climate of the Mackenzie River Basin: Its water cycle and fresh water discharge. In: LEWIS E. L., E. P. JONES, P. LEMKE, T. D. PROWSE & P. WADHAMS (eds.), *The Freshwater budget of the Arctic Ocean*. Kluwer Academic Publisher, 367-381.
- WAGENBACH, D. (1996): Coastal Antarctica: Atmospheric chemical composition and atmospheric transport. In: Wolff E. W. & R. C. Bales (ed.). *Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow*. NATO ASI, Ser. I, 43, Springer-Verlag: New York, 1996. 173-199.
- WANIA, F. & Y. S. SU (2004): Quantifying the global fractionation of polychlorinated biphenyls. *Ambio*, 33 (3), 161-168.
- WANIA, F. (2007): A global mass balance analysis of the source of perfluorocarboxylic acids in the Arctic ocean. *Environmental Science & Technology*, 41, (13), 4529-4535.
- WESSEL, S., S. AOKI, P. WINKLER, R. WELLER, A. HERBER, H. GERNANDT & O. SCHREMS (1998): Tropospheric ozone depletion in polar regions – A comparison of observations in the Arctic and Antarctic. *Tellus*, 50B, 34-50.
- WOEHRNSCHIMMEL, H., MACLEOD, M. & K. HUNGERBUHLER (2013): Emissions, fate and transport of persistent organic pollutants to the Arctic in a changing global climate. *Environmental Science & Technology*, 47, (5), 2323-2330.
- YOUNG, C. J., FURDUI, V. I., FRANKLIN, J., KOERNER, R. M., MUIR, D. C. G. & S. A. MABURY (2007): Perfluorinated acids in arctic snow: New evidence for atmospheric formation. *Environmental Science & Technology*, 41, (10), 3455-3461.
- XIE, P., J. E. JANOWIAK, P. A. ARKIN, R. ADLER, A. GRUBER, R. FERRARO, G. J. HUFFMAN & S. CURTIS (2003): GPCP Pentad precipitation analyses: An experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates. *Journal of Climate*, 16, 2197-2214.
- ZHAO, Z., XIE, Z., MOELLER, A., STURM, R., TANG, J., ZHANG, G. & R. EBINGHAUS (2012): Distribution and long-range transport of polyfluoroalkyl substances in the Arctic, Atlantic Ocean and Antarctic coast. *Environmental Pollution*, 170, 71-77.

Kontakt:*Prof. Dr. Ralf Ebinghaus**Dr. Zhiyong Xie**Helmholtz-Zentrum Geesthacht**Dr. Christian Temme**Eurofins GfA Lab Service**Ralf.Ebinghaus@hzg.de*