

## 5.4 Anreicherung und Effekte von organischen Umweltschadstoffen in der polaren Umwelt

ROLLAND KALLENBORN

*Accumulation and effects of persistent organic environmental pollutants in polar environments: Today, the Polar Regions on our globe are still considered as pristine environments with regard to anthropogenic influences. Due to the lack of significant local sources, all anthropogenic contaminants found in Arctic environments must have been transported into the region over long distances before entering the region. Although low levels of persistent organic chemicals are found in most of the abiotic environments, selected persistent organic pollutants (POPs) like PCBs and DDT-derivatives are found in high levels in tissues of top predating marine animal and in humans, due to specific accumulation processes within the Arctic food webs. Mainly because of the rapid lipid and nutrition transfer between the various trophic levels of the Arctic ecosystem, lipophilic POPs are effectively accumulated up to the representative top-predating species of the polar ecosystem (incl. polar bear and whales). As a final consequence, the indigenous people of the Arctic and in particular the West Canadian and East Greenlandic Inuit populations have been found heavily contaminated by legacy POPs like PCB, HCH and DDT derivatives. Today, we know that many temperature dependent abiotic and biotic processes govern the fate and distribution processes of persistent organic pollutants in environments. The current climate change assessments identified the Arctic as region where ambient temperature increase (in oceans and atmosphere) will lead to dramatic changes in environments and food webs.*

Die Arktis ist auch heute wiederum in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses gerückt. Wissenschaftliche Berichte über den deutlichen Rückgang der Sommereisbedeckung der zentralen Arktis, Funde von neuen Öl- und Gasvorkommen in der zentralen Barentssee und über den steigenden Schiffstransport durch die Russische-Nord-Ost Passage machen deutlich, dass der Klimawandel bereits heute in der Arktis für Mensch und Tier deutlich spürbar ist (GRANNAS et al. 2013, AMAP 2011). Die hiermit verbundenen, umfassenden Umweltveränderungen in der Arktis haben auch deutliche Effekte bei der Verbreitung und bei den Wirkungen von persistenten organischen Schadstoffen (POPs) in der arktischen Umwelt (MACDONALD et al. 2005, KALLENBORN et al. 2012). Auch für die antarktischen Regionen ist der Einfluss des globalen Klimawandels bereits spürbar (VANOMMEN 2013). Atmosphärische Langzeitüberwachungsprogramme für POPs in der Antarktis zeigen deutlich, dass auch hier atmosphärischer Ferntransport als wichtige Schadstoffquelle anzusehen ist (KALLENBORN et al. 2013).

Trotz vielfältiger Berichte über Umweltprobleme und wissenschaftliche Funde neuer potenzieller Schadstoffe in Umweltproben müssen die Polargebiete auch heute noch als die reinsten und von menschlichen Einflüssen weitgehend verschonte Regionen unseres Globus betrachtet werden (AMAP 2009a). Bisher sind nur sehr wenige lokale Schadstoffquellen für umweltstabile organische Schadstoffe (POPs) in polaren Gebieten identifiziert worden. Hierzu gehören vor allem militärische Frühwarnsysteme und Übungsgebiete in der arktischen Region sowie antarktische Forschungsstationen (HALE et al. 2008). Umweltstabile Schadstoffe gelangen normalerweise durch Ferntransport über die Atmos-

phäre, die arktischen Flüsse oder Meeresströmungen in die arktische Umwelt und werden durch die transpolaren Eisbewegungen über die ganze Arktis verteilt. Der atmosphärische Ferntransport von POPs unterliegt sowohl indirekten und direkten klimatischen Effekten, sodass sowohl Abbauewege als auch Transportgeschwindigkeit der POPs beeinflusst werden (MACDONALD et al. 2005, MA et al. 2011).

Im Rahmen des arktischen Monitoring und Überwachungsprogramm der arktischen Anrainerstaaten (Arctic Monitoring and Assessment Programme = AMAP) sind seit Beginn der 1990er Jahre umfangreiche Messungen der zeitlichen und räumlichen Verteilung von ausgewählten umweltstabilen organischen Schadstoffen wie u.a. polychlorierten Biphenylen (PCB), Hexachlorcyclohexan-Isomeren (HCH), Hexachlorbenzol (HCB), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) und Cyclodien-Pestiziden (z.B. Chlordane) durchgeführt worden (AMAP 2011). Diese arktischen Langzeit-Überwachungsprogramme sowohl für Luft als auch für See- und Süßwasser beweisen eindeutig, dass die Konzentrationen für diese Stoffe in der nichtbiologischen Umwelt normalerweise sehr gering sind (AMAP 2009a, HUNG et al. 2010).

Dennoch werden regelmäßig hohe Konzentrationen der oben genannten Stoffe in Organismen gefunden, die die Spitzen der arktischen Nahrungsnetze repräsentieren (MUIR & DE WITT 2010). Zu den hochbelasteten Organismen der Arktis gehören Arten wie Eismöwen (*Larus hyperboreus*), Eissturmvogel (*Fulmarus glacialis*), Eisbären (*Ursus maritimus*), Ringelrobben (*Phoca hispida*) und die arktischen Wale (Zahn- und Bartenwale). Eine eingehende Übersicht über Effekte in den höheren Organismen der Arktis kann in einem um-

fassenden Übersichtsartikel gefunden werden (LETCHER et al 2010). Sogar in den Urbevölkerungsgruppen der Arktis, den Inuit von Grönland und West-Kanadas, die immer noch weitgehend im Einklang mit der Natur leben und sich vorwiegend in den Traditionen ihrer Vorfäter ernähren, sind alarmierend hohe Konzentration nachgewiesen worden (DEWAILLY et al 1996).

Es ist deshalb auch heute noch vordringlich die Aufnahme- und die Verteilung von umweltstabilen, persistenten Schadstoffen in den arktischen Regionen zu erforschen.

### Die arktische Umwelt

Die Resultate der arktischen Schadstoffüberwachung der letzten 20 Jahre im Rahmen des AMAP-Programms zeigen eindeutig, dass die Schadstoffeinträge durch atmosphärischen und ozeanischen Transport sehr gering sind (AMAP 2009a, 2011; HUNG et al. 2010). Für die Summe der polychlorierten Biphenyle (10 Standard PCB Verbindungen vermessen im AMAP-Analyseprogramm) kann eine Hintergrundkonzentration von ca. 10-25 pg/m<sup>3</sup> Luft angenommen werden (pg = 10<sup>-12</sup> g). Für chlorierte Pestizide wie  $\gamma$ -Hexachlorcyclohexan ( $\gamma$ -HCH) liegt die Hintergrundkonzentration bei etwa 30-60 pg/m<sup>3</sup> (HUNG et al. 2010). Ähnliche Konzentrationen konnten zu Beginn der 1990er Jahre auch für antarktische Luftproben bestätigt werden (KALLENBORN et al. 1998), die allerdings in den letzten 20 Jahren deutlich abgesunken sind (KALLENBORN et al. 2013).

In den letzten 10 Jahren wurde für Hexachlorbenzol (HCB) hingegen bei Luftmessungen der norwegischen Zepelinstation in Ny-Ålesund (Svalbard) ein kontinuierlicher Anstieg von 40 pg/m<sup>3</sup> (2004) bis zu 80 pg/m<sup>3</sup> (2012) gefunden werden (Abb. 5.4-1) (KALLENBORN & HUNG 2014). Dieser deutliche Anstieg der HCB-Werte wird vor allem auf die steigende HCB-Verdunstung von den ganzjährig eisfreien Küstengebieten Westspitzbergens zurückgeführt (GRANNAS et al. 2013).

Als Grundlage für eine Bewertung von spezifischen Umweltfaktoren, die an den Schadstoffanreicherungsprozessen in den polaren Nahrungsnetzen beteiligt

sind, können folgende arktis-spezifische Umweltparameter besonders hervorgehoben werden (KALLENBORN et al. 2012):

**Lichtverhältnisse:** Die polare Nacht, die auf dem nördlichen oder südlichen 80. Breitengrad von Oktober bis März bzw. April bis September dauert und dann im Laufe von sechs Wochen zur Mitternachtssonne übergeht, hat besondere photochemische Auswirkungen auf den Verbleib von POP-enhaltenen Schadstoffen in der polaren Umwelt. Für viele leichtflüchtige Verbindungen kann in der Regel atmosphärischer Transport nur im Winter festgestellt werden (z.B. FCKWs, Benzole). Photolabile Verbindungen sind deshalb besonders während der dunklen Jahreszeit in der polaren Umwelt zu finden. Im Sommer werden solche Stoffe normalerweise photochemisch abgebaut (meist mittels Umsetzung mit OH-Radikalen). Hinweise für einen saisonalen photochemischen Abbau finden sich für einige persistente chlorierte Pestizide wie trans-Chlordan in Luftproben für die Mehrzahl der arktischen Messstationen (HUNG et al. 2010) aber auch für die Antarktis (KALLENBORN et al. 2013).

**Umgebungstemperatur:** Die niedrigen Umgebungstemperaturen der Polarregionen sorgen dafür, dass der mikrobiologische Abbau von organischen Schadstoffen (einschließlich persistente Schadstoffe) stark reduziert ist. Verbindungen, die in den temperierten Regionen nachweislich im Laufe von Tagen oder Stunden vollständig abgebaut werden, können somit in der Arktis eine wesentlich längere Aufenthaltsdauer haben (KALLENBORN et al. 2008).

**Niederschlag/Deposition:** Aufgrund der niedrigen Umgebungstemperaturen ist Schnee die vorherrschende Niederschlagsart. Auf Grund der großen Oberfläche der Neuschneekristalle, kann Schnee Partikel und Schadstoffe wesentlich besser binden und zur Erde transportieren als ein Regentropfen (GRANNAS et al. 2013). Im Gegensatz zu Regenwasser verändert Schnee seine physikalische Konsistenz und somit seine Oberflächenstruktur im Laufe kurzer Zeit,

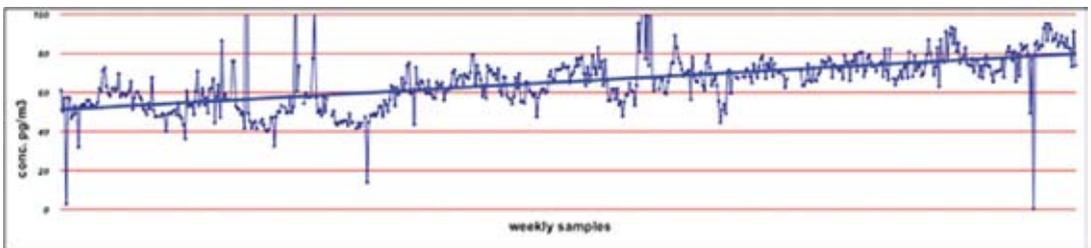


Abb. 5.4-1: Konzentrationsprofil (wöchentliche Probennahme in pg/m<sup>3</sup>) für Hexachlorbenzol (HCB) in den atmosphärischen Langzeitmessungen von der Zepelinstation (Spitzbergen, Svalbard) für die Messperiode 2000 - 2010.

nachdem er auf der Erdoberfläche angelangt ist. Diese Veränderung, die somit auch bedeutende Effekte für die Partikel-Schadstoff Bindungseigenschaften haben, resultiert aus dem Druck der umgebenden Schneekristalle in Kombination mit steigenden Umgebungstemperaturen (GRANNAS et al. 2013).

### Schadstoffanreicherung und biologische Anpassungsprozesse

Die Organismen der polaren Nahrungsnetze müssen sich in der Regel in ihren speziellen Lebensräumen auf extreme saisonale Schwankungen im Nahrungszugang einstellen.

Im Frühjahr eines jeden Jahres, während der Eisschmelze an den Randgebieten der Eiszone (Marginal Ice Zone = MIZ) der Arktis und der Antarktis bilden sich die Nahrungsgrundlagen der komplexen Nahrungsnetze in den Polargebieten (KALLENBORN & VON QUILLFELDT 2011, GRANNAS et al. 2013). Im Zeitraum Mai-Juli schmelzen große Teile der saisonalen Eisflächen in den MIZ Gebieten der Arktis (vor allem der westlichen Barentssee). Im Laufe dieses Prozesses, der sich über mehrere tausend Quadratkilometer gleichzeitig abspielt, werden große Mengen von Nährstoffen bisher eingeschlossen in dem schmelzenden Eis, freigesetzt. Diese Nährstoffe wiederum fördern und steuern Planktonproduktion und Nahrungsaufnahme (WINKELMANN & KNIES 2005). Die Unterseiten der polaren Eisflächen haben sich im Verlaufe der Evolution zu hoch spezifischen saisonalen Lebensräumen für Algen und Plankton entwickelt. Große Mengen von Eisalgen entwickeln und vermehren sich im Verlaufe der Schmelzphasen im Frühjahr und Sommer eines jeden Jahres in Mengen. Eisalgen können bedeutende Mengen von vegetabilen Fettstoffen enthalten. Zooplankton

hat sich in diesen Biotopen auf dieses weitreichende Nahrungsreservoir eingestellt und spezialisiert (BORGA et al. 2005, HALLANGER et al. 2011). Auch viele marine Krebse und polare Fischarten (z.B: Polardorsch = *Boreogadus saida*) haben sich wiederum auf diese Planktonarten als Nahrungsgrundlage spezialisiert. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass vor allem in der Zeit der Eisschmelze in den MIZ die Biomasse sprunghaft ansteigt (FALK-PETERSEN et al. 2000). Heute wissen wir, dass zu diesem Zeitpunkt, während der Eisschmelze auch große Mengen von persistenten Schadstoffen, die mit der transpolaren Eisdrift aus den großen Flüssen der Arktis stammend in den arktischen Ozean eingebracht wurden, wieder freigesetzt werden (PAVLOV et al. 2006). Somit werden große Mengen von anthropogenen Schadstoffen in der saisonalen Schmelzphase gemeinsam mit wichtigen natürlichen Nährstoffen alljährlich in die arktischen Nahrungsnetze dieser Regionen aufgenommen und effektiv verteilt (Abb. 5.4-2).

Anadrome Fischarten (Arten die sowohl im Süßwasser als auch im Meer leben können) wie der arktische Seibling (*Salvelinus alpinus*) und der Atlantische Lachs (*Salmo salar*) verbringen in der Regel 6 Wochen bis 2 Monate des Jahres (Frühjahr, Sommer) im offenen Meer. Während dieser Zeit legen sich die Tiere ein enormes Fettreservoir zu, von dem sie später zehren müssen, wenn sie sich im späten Sommer zur Paarung und zum Laichen in die arktischen Flüsse zurückziehen (AAS-HANSEN et al. 2005). Ein arktischer Seibling der beim Hinaufwandern in einen arktischen Fluss im Sommer ca. 800 g wiegt, ist beim Zurückwandern ins offene Meer im darauffolgenden Frühjahr nur noch ca. 500 g schwer und hat somit mehr als ein Drittel seines Gewichtes verloren. Eingehende Untersuchungen in Norwegen zeigen, dass der Gewichtsverlust weitge-

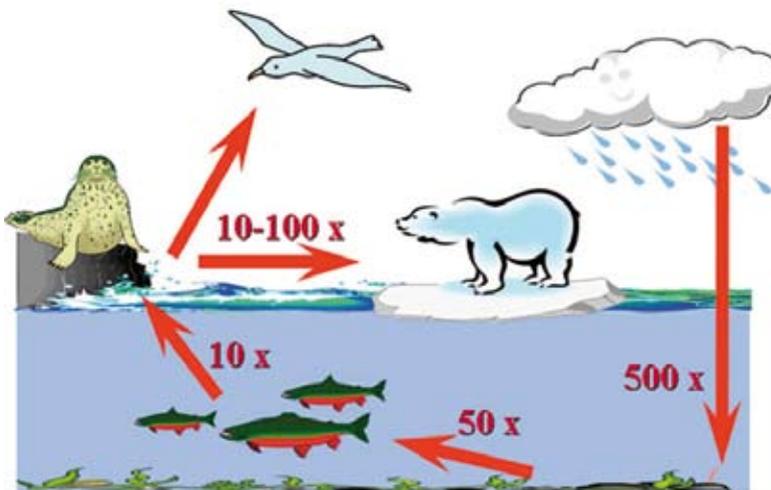


Abb. 5.4-2: Anreicherung von persistenten Schadstoffen im arktischen Nahrungsnetz.

hend durch den Abbau von Körperfett (Lipiden) begründet ist. Fettliebende (lipophile) POPs wie PAH, PCBs und chlorierte Pestizide sind zum größten Teil im Körperfett eingelagert. Der Abbau von Lipiden als Energiespeicher führt also gleichzeitig zu einer Remobilisierung von eingelagerten Schadstoffen in vielen arktischen Organismen. Bevor die Fische wieder ins Meer zur Nahrungsaufnahme schwimmen können, muss der Fischorganismus sich erst wieder durch umfassende physiologische Veränderungen an die marinen Lebensbedingungen und vor allem an den hohen Salzgehalt des Meerwassers anpassen (Smoltifizierung). Dieser Anpassungsprozess ist sehr energieaufwendig für den Fischorganismus. Deshalb kann eine solche saisonbedingte überproportionale Schadstoffbelastung mit POPs bei diesen Organismen, speziell zum Zeitpunkt der Smoltifizierung, zu saisonal grossem physiologischen Stress führen mit entsprechenden eingreifenden Konsequenzen für Überleben, Fitness und Reproduktivität.

Zusätzlich zu den oben genannten Phänomenen sind hoch entwickelte Organismen der oberen trophischen Ebenen in den Nahrungsnetzen der polaren Ökosysteme (u.a., Fische, Seevögel, marine Säugetiere und Eisbären der Arktis) normalerweise ausgeprägte Nahrungsspezialisten, die den Wanderwegen und den saisonalen Schwankungen der Bestände ihrer Beuteorganismen folgen müssen (AMAP 2009a,b). Die Fettreserven der Beuteorganismen stellen eine wichtige Energiequelle für die polaren Beutegreifer da. Untersuchungen arktischer Nahrungsnetze zeigen, dass der Transfer von Lipiden von der Primärproduktion in den Eisalgen bis in die arktischen Dorsche der Randzonen der Arktis normalerweise in Laufe von 2-3 Monaten erfolgt (FALK-PETERSEN et al. 1998). Mit dem raschen Lipid-Transfer im Verlaufe der Nahrungsnetze geht dann auch eine sehr effektive Anreicherung der persistenten Schadstoffe einher, die sich dann in den Spitzen der Nahrungsnetze, bei den Top-Prädatoren in hohe Konzentrationen anreichern.

Hohe Konzentrationen von unterschiedlichen persistenten organischen Schadstoffen wie PCB, HCH und DDT-Verbindungen werden somit in Gewebeproben mariner Säugetiere wie Ringelrobben (*Phoca hispida*), Sattelrobben (*Phoca groenlandica*), Weisswalen (*Delphinapterus leucas*) und Schwertwalen (*Orcinus orcas*) aber auch in Eismöwen (*Larus hyperboreus*), Eisbären (*Ursus maritimus*) und Polarfüchsen (*Alopex lagopus*) gefunden. Weitreichende ökotoxikologische Studien zeigen, dass in Populationen von Eismöwen und Eisbären bereits ein so hohes Konzentrationsniveau erreicht ist, dass Einflüsse auf den Vermehrungszyklus, Physiologie und die allgemeine Fitness der Individuen erwartet werden können (LETCHER et al. 2010). In neuen

norwegischen Studien konnte gezeigt werden, dass hohe PCB Belastung oft mit einer Verringerung des Bruterfolges bei Eismöwen einher geht. Der Muttervogel überführt große Schadstoffmengen in das fettreiche Eigewebe bei der Eiablage. Der reduzierte Bruterfolg wird deshalb vor allem auf den hohen Schadstoffgehalt in den Eiern zurückgeführt, der möglicherweise embryologische Entwicklungsprozesse nachhaltig stören kann (BUSTNES et al. 2005). Neuere Untersuchungen zeigen eindeutig, dass hohe Schadstoffbelastungen signifikante Einwirkung auf Physiologie und Verhaltensmuster der belasteten Eismöwen haben (BUSTNES et al. 2010).

Umfassende Studien über die Schadstoffbelastung von Eisbären in allen arktischen Anrainerstaaten, haben gezeigt, dass vor allem die östlichen Populationen in der norwegischen und der west-sibirischen Arktis hohen Belastungen mit persistenten organischen Schadstoffen ausgesetzt sind (SONNE et al. 2012). Die kanadischen arktischen Küstenbereiche sowie die ausgedehnten Schmelzonen der MIZ in der Framstraße (Ostgrönland), um Svalbard und Bjørnøya (Bäreninsel) sowie Franz-Jozef Land in der russischen Arktis sind wichtige Lebensräume für diese Eisbären, die sich in diesen Regionen ausschließlich von den großen Fettreserven der Ringel- und Sattelrobben ernähren. Die Robben sind spezialisiert auf wenige arktischen Fischarten wie den Polardorsch, der wiederum pelagische arktische Zooplankton-Arten als Nahrungsreservoir ausnutzt. Die kurzen, individuenreichen arktischen Nahrungsnetze in Verbindung mit extremen Biomassenproduktion während der Eisschmelze ermöglichen somit eine rasche und effektive Anreicherung der organischen Giftstoffe, die zu den hohen Konzentrationen in den Eisbären der östlichen Arktis führt. Umfassende Untersuchungen der östlichen Eisbärpopulation in der Svalbardregion haben gezeigt, dass hohe Belastungen mit Organochlorverbindungen (u.a. HCH, PCB, DDT) zur Schwächung des Immunsystems führen kann (SONNE et al. 2012). Außerdem sind hohe Belastungen mit diesen Stoffen inzwischen mit verminderter Reproduktivität, gestörter Entwicklung der Geschlechtsorgane, Neurotoxizität, erhöhter Jungensterblichkeit und reduzierter Lebenserwartung für die norwegischen Eisbärbestände in Verbindung gebracht worden (LETCHER et al. 2010).

### Regionale Konsequenzen

Quellennähe, saisonale und räumliche Verteilungsprozesse gemeinsam mit den physikalisch-chemischen Eigenschaften der transportierten Schadstoffe sorgen dafür, dass die Schadstoffverteilung in den den Polarregionen nicht gleichmäßig über die entsprechenden Regionen verteilt sind (MUIR & DE WIT 2010). Vergleichende Untersuchungen zwischen der antarktischen-

und der arktischen Atmosphäre zeigen, dass die Hintergrundkonzentrationen für die meisten organischen Schadstoffe an antarktischen Messstationen deutlich geringer ist als in der Arktis (KALLENBORN et al. 2013). Ökosystembedingte Unterschiede (Quellennähe, Nahrungsspezialisten) sorgen zusätzlich dafür, dass die Konzentrationen in den höheren Organismen der Antarktis bedeutend niedriger sind als in der Arktis (FUOCO et al. 2009).

Die arktische Umwelt kann in unterschiedliche Ökosysteme eingeteilt werden. Die terrestrische Umwelt der ostsibirischen Tundra, oder Zentral Alaskas ist zu einem geringen Teil mit anthropogenen organischen Schadstoffen belastet. Terrestrische Ökosysteme und Nahrungsnetze weisen normalerweise recht geringe Anreicherungsfaktoren für organische persistente Schadstoffe (POPs) auf. Höhere Organismen wie Schneehühner (*Lagopus lagopus*) Elche (*Alces alces*) und Rentiere (*Rangifer tarandus*), die in großer Zahl die Arktische Tundra bevölkern, sind Pflanzenfresser. Terrestrische Pflanzen reichern normalerweise persistente fettliebende Chemikalien nur in begrenztem Ausmaß an. Somit sind auch die terrestrischen Predatoren wie Eis- und Braunbären (*Ursus arctos*), Vielfraße (*Gulo gulo*), Wölfe (*Canis lupus*) und Luchse (*Lynx lynx*) relativ geringen POP Belastungen ausgesetzt.

Die Lebensformen der arktischen Küstengebiete hingegen sind stark an das marine Ökosystem, speziell an die Eis-assoziierten Lebensräume angepasst. Außerdem tragen die Beiträge der arktischen Flüsse (Sibirien: Lena, Ob, Yenisey; Alaska: Mackenzie) bedeutend zu den Schadstoffbelastungen der arktischen Küstenregionen bei. In den west-sibirischen Küstenregionen sind auch bedeutende Petroleumproduktionsstätten (autonome Region Komi) angesiedelt, die auch zu der hohen Schadstoffbelastung der Region beitragen können. Die Anreicherung von Organochlorverbindungen ist somit besonders in marinen Nahrungsketten zu beobachten.

Durch den starken Rückgang der Sommereisbedeckung in den letzten Jahren und die damit einhergehende starke Reduktion des mehrjährigen Meereises in der zentralen Arktis ist das gesamte zentral-arktische Ökosystem zur Zeit einem dramatischen Wandel ausgesetzt (GRANNAS et al. 2013). Als direkte Folge dieser bereits seit Jahren beobachteten Umwälzungen verändert sich inzwischen das gesamte Eis-assoziierte Nahrungsnetz der zentralen Arktis. Neue Arten verdrängen die ursprünglichen Arten und neue Arten wandern in die eisfreien Regionen ein (KALLENBORN et al. 2012). So verlagerte der nord-atlantische Dorsch (*Gadus morhua*) seine Laichgründe inzwischen von den Küstengewässern der Lofoten Inseln in die westliche Barentssee (NEUENFELDT et al. 2013)

Die zentralen arktischen Eisgebiete stellten bisher einen einzigartigen Lebensraum für die spezialisierten arktischen Tierarten dar. Marine Säugetiere, Seevögel, Polarfüchse und Eisbären nutzen große Bereiche der eisbedeckten Randgebiete als Lebensraum und wandern mit den sich zurückziehenden, schmelzenden Eiskanten im Frühjahr eines jeden Jahres bis in die zentralen arktischen Gebiete zwischen 80° und 90° nördlicher Breite. Wie bereits beschrieben spielen die marginalen Eiszonen (Marginal Ice Zone = MIZ) des westlichen arktischen Ozeans zwischen Ostgrönland und Franz-Josef Land eine zentrale Rolle bei der Regionalen Schadstoffanreicherung, die zu hohen Belastungen der Eisär- und Möwenpopulationen geführt hat. Diese Regionen werden heute zusammen mit den westsibirischen Küstenregion zu den höchstbelasteten arktischen Gebieten gezählt. Der Rückzug der MIZ in die zentralen Bereich der Arktis wird allerdings bedeutende Konsequenzen sowohl für den Zeitpunkt, die Lokalisierung als auch das Ausmaß der jährlichen Sommereisschmelze haben (Grannas et al. 2013).

In der Regel werden auch heute noch geringere Schadstoffbelastungen (POPs) in den Tierarten der westlichen (Nordamerika inkl. Kanada und Alaska) als auch in den Ökosystemen der pazifischen Arktis (Aleuten, westliches Alaska) gefunden. Es wird allerdings erwartet, dass sich in den nächsten Jahren/ Jahrzehnten die regionalen Schadstoffverteilungen aufgrund der oben beschriebenen Umweltveränderungen deutlich verändern und möglicherweise sogar ausgleichen werden.

### **Konsequenzen für Urbevölkerungsgruppen**

Seit vielen Generationen haben sich die Ureinwohner der Arktis an die extremen Lebensbedingungen des hohen Nordens angepasst. Ohne den Zugriff zu Fischen, Robben und Walen der Arktis als Nahrungsquelle hätten die Ureinwohner Grönlands und West-Kanadas, die Inuit, sich nicht in der extremen Umwelt der zentralen Arktis über viele Generationen hinweg behaupten können. Genauso, wie Eisbären, nutzen auch die Inuit nach der Jagd auf marine Säugetiere wie Weißwale (Belugas), Narwale, Ringel- und Sattelrobben bevorzugt das dicke und energiereiche Fettgewebe der Tiere als effektive Energiequelle. Normalerweise wird das Fett, ohne weitere Behandlung, roh verzehrt. Fleisch und Organe werden häufig nicht als Nahrung genutzt (AMAP 2009b).

Bereits in den 1980er Jahren wurden im Rahmen von kanadischen Studien (DEWAILLY et al. 1996) überraschend hohe Konzentrationen von PCB und DDT-Verbindungen in Muttermilch und Blut von Inuitfrauen

gefunden, die sich weitgehend im Einklang mit den uralten Traditionen der Inuit ernähren (PCB bis zu 30 µg/g Fettinhalt). Folgestudien in Ostgrönland unterstrichen eindeutig die Annahme, dass auch in den grönländischen Bevölkerungsgruppen, die sich im Einklang mit Inuittraditionen ernähren, hohe POP-Belastungen gefunden wurden (HANSEN ET AL. 2014). In Bevölkerungsgruppen, die sich mehr an westlich orientierte Ernährungsgewohnheiten angepasst haben, konnten dahingegen keine hohen Schadstoffwerte nachgewiesen werden (Abb. 5.4-3). Die Aufnahme hoher Schadstoffmengen ist also direkt an die zentrale Rolle von marinen Säugetieren als Jagdobjekt und Nahrungsquelle geknüpft (AMAP 2009b).

Die arktischen Anrainerstaaten haben den betroffenen Bevölkerungen bisher nicht empfohlen von den traditionellen Lebensgewohnheiten Abstand zu nehmen. Die verantwortlichen Entscheidungsträger befürchten, dass eine solche Maßnahme bedeutend mehr negative Konsequenzen mit sich bringen könnte als die Verringerung von Schadstoffgehalten.

- Mit der Nutzung von Robben und Fischen als zentrale Nahrungsquellen, werden dem menschlichen Organismus auch wichtige Nährstoffe wie ungesättigte Fettsäuren und Proteine zugeführt, die maß-

geblich dafür verantwortlich gemacht werden, dass in der arktischen Inuit-Bevölkerung die Verbreitung von »Zivilisationskrankheiten« wie Herzinfarkt und Krebserkrankungen bedeutend geringer ist als in westlich orientierten Bevölkerungsgruppen.

- Die traditionelle Jagd und das Nutzen von traditionellen marinen Nahrungsquellen ist ein wichtiger Bestandteil der sozialen Identität der traditionell lebenden Inuit der Arktis. Ein Verbot der Nutzung traditioneller Nahrungsquellen, wie die Jagd auf Wale und Robben, würde mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit zu großen sozialen Problemen führen.

Die hohen Schadstoffbelastungen der arktischen Bevölkerung haben zu umfassenden Diskussionen zwischen Wissenschaft und verwaltenden nationalen Organen geführt. Diese immer noch auf eine zufriedenstellende Lösung wartende Herausforderung wird heute allgemein als »Arktisches Dilemma« bezeichnet. Auf den Färöer Inseln hingegen wurden in den letzten Jahren eine beunruhigend hohe Konzentration von umweltstabilem organischem Quecksilber (vor allem Methyl-Quecksilber) im Fleisch und im Fett der Pilotwale gefunden, die alljährlich von der Bevölkerung der Inseln als wichtige Nahrungsquelle genutzt werden. Deshalb

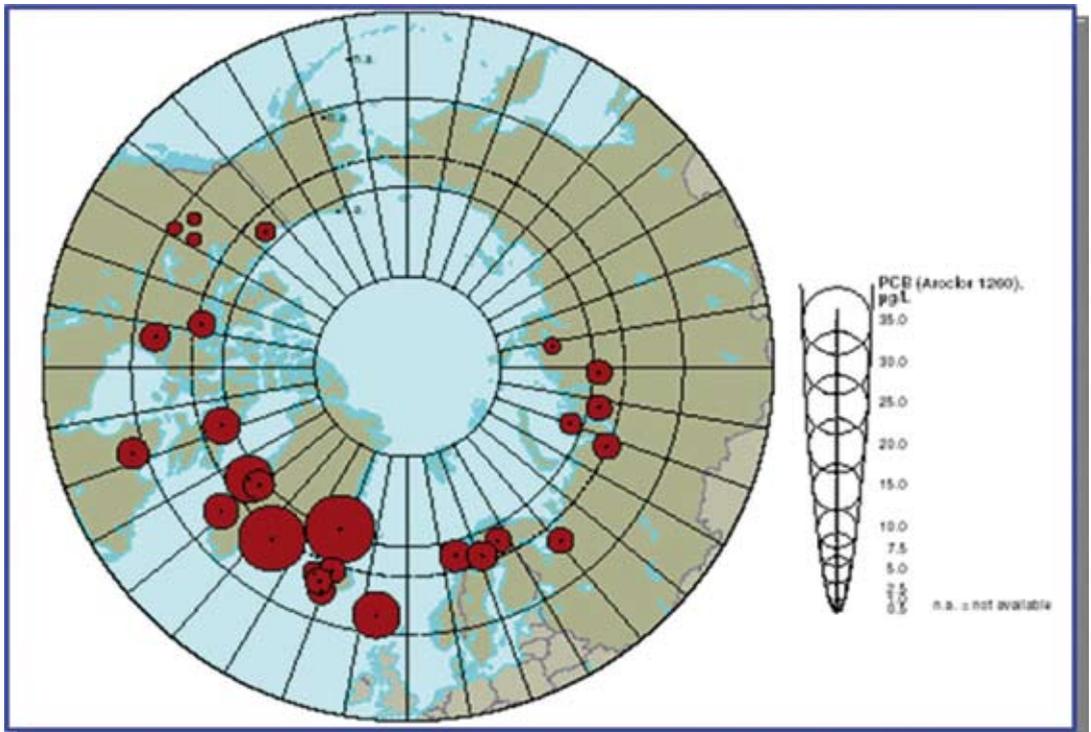


Abb. 5.4-3: Zirkumarktische PCB-Verteilung in Blutproben der arktischen Urbevölkerung (modifiziert n.AMAP 2003).

wird inzwischen auf den Faröer Inseln der Verzehr von Walfleisch für junge Frauen, die planen Kinder zu bekommen, schwangere Frauen und Mütter mit Kleinkindern eingeschränkt. Diesen Bevölkerungsgruppen wird vom Verzehr von Walfleisch stark abgeraten (AMAP 2009b).

### Schlussfolgerungen

Die arktische Umwelt wird ohne Zweifel in den nächsten Dekaden umwälzende Veränderungen erfahren. Durch das rasche Abschmelzen des Meereises der zentralen Arktis sowie die Reduktion des Grönlandeises, werden sich die Habitate und die Nahrungsnetze der arktischen Ökosysteme deutlich verändern. Dies wird auch Änderungen persistenter Schadstoffe in der Arktis verursachen (Quellen, Verteilung und Anreicherungen von anthropogenen Schadstoffen in der Arktis).

Trotz deutlicher anthropogener Einflüsse werden die Polargebiete unserer Welt auch heute noch als die Regionen angesehen, die am geringsten den direkten menschlichen Einflüssen, wie Mineralgewinnung, Verschmutzung und direkten Landschaftseingriffen ausgesetzt sind. Im Bezug zu Umweltschadstoffen geht man deshalb heute davon aus, dass alle Chemikalien, die in der arktischen Umwelt gefunden werden, dorthin über weite Abstände meist aus den Quellenregionen transportiert werden. Die Belastung der nicht-biologischen Umwelt (Luft, Süß- und Meerwasser) mit organochemischen Schadstoffen ist vergleichbar sowohl für die arktische als auch für die antarktische Umwelt. Spezielle Anpassungen der Nahrungsnetze im arktischen Ökosystem in Kombination mit saisonalen Verteilungsmustern und Quellennähe werden heute dafür verantwortlich gemacht, dass sehr hohe Belastungen mit POPs in arktischen marine Organismen, die die Spitze der Nahrungsnetze repräsentieren, nachgewiesen werden. Hohe POP-Konzentrationen, die sogar akute toxische Effekte vermuten lassen, wurden in Eisbären, Eismöwen, Polarfischen und Robben gefunden. Sogar in den Urbevölkerungsgruppen der Inuit West-Kanadas und Ost-Grönlands wurden bedeutende Belastungen mit persistenten Schadstoffen nachgewiesen. Dennoch wurden von den nationalen Entscheidungsträgern bewusst keine nachhaltigen Verhaltensregeln oder offizielle Einschränkungen der traditionellen Nahrungsquellen empfohlen, weil eine solche Maßnahme zu massiven sozialen und gesundheitlichen Konsequenzen führen könnte, die nicht durch die erwartete Reduktion der Schadstoffaufnahme gerechtfertigt ist (Arktisches Dilemma).

### Literatur

- AAS-HANSEN O., M. M. VIJAYAN, H. K. JOHNSEN, C. CAMERON & E. H. JORGENSEN (2005): Resmoltification in wild, anadromous Arctic char (*Salvelinus alpinus*): A survey of osmoregulatory, metabolic, and endocrine changes preceding annual seawater migration. *Canad. J. Fish. Aquat. Sci.* 62/1, 195-204.
- AMAP (2009a): Arctic Pollution 2009. Arctic monitoring and assessment programme, Oslo. xi+83 S.
- AMAP (2009b): AMAP Assessment 2009: Human health in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xiv+254 S.
- AMAP (2011): Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate change and the cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xii + 538 S.
- BORGA, K., H. WOLKERS, J. U. SKAARE, H. HOP, D. C. G. MUIR & G. W. GABRIELSEN (2005a): Bioaccumulation of PCBs in arctic seabirds: influence of dietary exposure and congener biotransformation. *Environ. Poll.* 134/3, 397-409.
- BORGÁ K., G. W. GABRIELSEN, J. U. SKAARE, L. KLEIVANE, R. J. NORSTROM & A. T. FISK (2005b): Why do organochlorine differences between arctic regions vary among trophic levels? *Environ. Sci. Technol.* 39/12, 4343-4352.
- BUSTNES J. O., O. MILAND, M. FJELD, K. E. ERIKSTAD & J. U. SKAARE (2005) Relationships between ecological variables and four organochlorine pollutants in an arctic glaucous gull (*Larus hyperboreus*) population. *Environ. Poll.* 136/1, 175-185.
- BUSTNES J. O., GABRIELSEN G. W. & VERREAULT (2010): Climate variability and temporal trends of persistent organic pollutants in the arctic: A study of glaucous gulls. *Environ. Sci. Technol.* 44, 3155-3161.
- DEWAILLY E., P. AYOTTE, C. LALIBERTE, J. P. WEBER, S. GINGAS & A. J. NANTEL (1996): Polychlorinated biphenyl (PCB) and dichlorodiphenyl dichloroethylene (DDE) concentration in the breast milk of women in Quebec. *Am. J. of Public Health* 86/9, 1241-1246.
- FALK-PETERSEN S., J. R. SARGENT, J. HENDERSON, E. N. HEGSETH, H. HOP & Y. B. OKOLODKOV (1998) Lipids and fatty acids in ice algae and phytoplankton from the marginal ice zone in the Barents Sea. *Polar Biol.* 20/1, 41-47.
- FALK-PETERSEN S., H. HOP, W. P. BUDGELL, E. N. HEGSETH, R. KORSNES, T. B. LOYNING, J. B. ØREBÆK, T. KAWAMURA & K. SHIRASAWA (2000): Physical and ecological processes in the marginal ice zone of the northern Barents Sea during the summer melt period. *J. Mar. Sys.* 27/1-3, 131-159.
- FUOCO R., CAPODAGLIO G., MUSCATELLO B. & M. RADAELLI (2009): Environmental contamination in Antarctica. SCAR Action group. Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Scott Polar Institute, Cambridge, UK, ISBN 978-0-948277-23-8. 98 S.
- GRANNAS A., BOGDAL C., HAGEMAN K., HALSALL C., HARNER T., HUNG H., KALLENBORN R., KLAN P., KLANOVA J., MACDONALD R., MEYER T. & F. WANIA (2013): The role of the global cryosphere in the fate of organic contaminants. *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, Special Issue: New perspectives on Air-Ice Chemical In-

- teractions (AICI) (ACP/ESSD Inter-Journal SI). Atmos. Chem. Phys., 13, 3271–3305.
- HALLANGER I. G., WARNER N. A., RUUS A., EVENSET A., CHRISTENSEN G., HERZKE D., GABRIELSEN G. W. & K. BORGÅ (2011): Seasonality in contaminant accumulation in arctic marine pelagic food webs using trophic magnification factors as a measure of bioaccumulation. *Env. Tox. chem.* 30/5, 1026-1035.
- HALE R. C., KIM S. L., HARVEY E., LAGUARDIA M. J., MAINOR T. M., BUSH E. O. & E. M. JACOBS (2008): Antarctic research bases: Local sources of polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants. *Environ. Sci. Technol.* 42, 1452-1457.
- HANSEN J. C., VAN OOSTDAM J. C., GILMAN A., ODLAND J. O., DONALDSON S. G., VAKTSJOLD A., TIKHONOV C., DUDAREV A. A., AYOTTE P., BERNER J. E., BONEFELD-JØRGENSEN E. C., CARLSEN A., DEUTCJB., DEWAILLY E., FURGAL C., MUCKLE G., OLAFSDOTTIR K., PEDERSEN H. S., RAUTIO A., SANDANGER T., WEIHE P., WEBER J. P., SAVOLAINEN M. & S. SKIMMER (2014): Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) – IPY Meeting in Iqaluit, Nunavut, CANADA, (June 2009) and AMAP Human Health Assessment 2009. In: Kallenborn R., Barr S., diPrisco G. & D. I. Walton (Eds.). IPY Research 2007 - 2009: Transport and pathways of environmental pollutants in polar environments. Book series « From pole to Pole : Environmental Research during IPY 2007-2009. In press.
- HUNG H., KALLENBORN R., BREIVIK K., MANØ S., BRORSTRØM-LUNDEN E., OLAFSDOTTIR K., LEPPANEN S., STERN G., SVERKO E., FELLIN P. & H. SKOV (2010): Atmospheric monitoring of organic pollutants in the arctic under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP): 1993-2006. *Sci. Tot. Environ.* 408, 2854-2873.
- KALLENBORN R., M. OEHME, D. D. WYNN-WILLIAMS, M. SCHLABACH & J. HARRIS (1998): Ambient air levels and atmospheric long-range transport of persistent organochlorines to Signy Island, Antarctica. *Sci. Tot. Environ.* 512/220: 167-180.
- KALLENBORN R., FICK J., LINDBERG R., MOE M., NIELSEN K. M., TYSKLIND M. & T. VASSKOG (2008): Pharmaceutical residues in Northern European Environments: Consequences and perspectives. In: Kümmerer K. (Ed.). *Pharmaceuticals in the Environment*. 3. Edition, Springer Verlag, New York, Tokyo, Heidelberg, ISBN 978-3-540-74663-8, XXXII, 522 S.
- KALLENBORN R. & C. VON QUILLFELDT (2011): Die Barentssee: Ein Schelfmeer von globaler Bedeutung. In: J. Lozan et al. (Eds.). *Warnsignal Klima: Die Meere - Änderungen & Risiken*. GEO-Wissenschaftliche Auswertungen. 163-171.
- KALLENBORN R., HALSALL C., DELLONG M. & P. CARLSSON (2012): The influence of climate change on the global distribution and fate processes of anthropogenic persistent organic pollutants. *J. Environ. Monit.*, 14/11, 2854-2869.
- KALLENBORN R., BREIVIK K., ECKHARDT S., LUNDER C.R., MANØ S., SCHLABACH S. & 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, 6983-6992.
- LETCHER R. J., BUSTNES J. O., DIETZ R., JENSSEN B. M., JØRGENSEN E. H., SONNE C., VERREAULT J., VIJAYAN M. M. & G. W. GABRIELSEN (2010): Exposure and effects assessment of persistent organohalogen contaminants in arctic wildlife and fish. *Sci. tot. Environ.* 408, 2995-3043.
- MACDONALD R., HARNER T. & J. FYFE (2005): Recent climate change in the arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Sci. tot. Environ.* 342, 5-86.
- 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: 256-260.
- MUIR D. C. G. & C. de WIT (2010): Levels and trends of new contaminants, temporal trends of legacy contaminants and effects of contaminants in the arctic: Preface. *Sci. Tot. Environ.* 408, 2852-2853.
- Neuenfeldt S., Righton D., Neat F., Wright P. J., Svedäng H., Michalsen K., Subbey S., Steingrund P. & V. Thorsteinsson (2013): Analysing migrations of atlantic cod, *Gadus morhua*, in the north-east Atlantic Ocean: then, now and the future. *Journal of Fish Biology* (2013) 82, 741763, doi:10.1111/jfb.12043.
- PAVLOV V. (2006): Modelling of long-range transport of contaminants from potential sources in the Arctic Ocean by water and sea ice. In: Ørbæk, J. B., R. Kallenborn, I. Tombre, E. Nøst-Hegseth, S. Falk-Petersen & A.H. Hoel (Eds.). *Arctic and alpine ecosystems and people in a changing environment*. Springer Verlag, New York, Tokyo, Heidelberg, 329-350.
- SONNE C., LETCHER R., BECHTØFT T. Ø., RIGET F. F., MUIR D. C. G., LEIFFSON P. S., BORN E. W., HYLDSTRUP L., BASU N., KIRKEGAARD M. & R. DIETZ (2012): Two decades of biomonitoring polar bear health in Greenland: a review. *Acta Vet. Scand.* 54, S15, 1-7.
- VANOMMEN T. (2013): Climate change: Antarctic response. *Nature* 6, 334-335.
- VAN OOSTDAM J. C., E. DEWAILLY A., GILMAN, J. C., HANSEN, J. O., ODLAND, V., CHASHCHIN, J., BERNER, J., BUTLER-WALKER, B., J. LAGERKVIST, K. OLAFSDOTTIR, L. SOININEN, P. BJERREGARD, V. KLOPOV & J. P. WEBER (2004): Circumpolar maternal blood contaminant survey, 1994-1997 organochlorine compounds. *Sci. Tot. Environ.* 330/1-3, 55-70.
- WINKELMANN D. & J. KNIES (2005): Recent distribution and accumulation of organic carbon on the continental margin west off Spitsbergen. *Geochem. Geophys. Geosys.* 6, 1525-2027.

**Kontakt:**

Prof. Dr. Roland Kallenborn

Norwegische Universität für Biowissenschaften (UMB)

Institut für Chemie, Biotechnologie und

Ernährungswissenschaften (IKBM)

roland.kallenborn@umb.no