



Die Arktis: Umweltchemisches Feldlaboratorium mit globaler Bedeutung Regionale Umweltforschung als wichtiger Beitrag zum Verständnis von globalen Schadstofftransportprozessen

Roland Kallenborn, Longyearbyen, Norwegen, roland.kallenborn@unis.no

Zusammenfassung

Arktische Umweltforschung hat auf eindrucksvolle Weise demonstriert, wie internationale und interdisziplinäre Zusammenarbeit im Rahmen von regional begrenzten Studien zum weiten wissenschaftlichen Verständnis von globalen Selektions-, Verteilungs- und Transportprozessen von anthropogenen Substanzen geführt hat. Experten aus dem Umfeld der Umweltchemie, Geochemie, Biochemie, aber auch der Feldbiologie (Zoologie, Botanik), Ökotoxikologie, Meteorologie, Informatik, Geophysik, Geologie, Glaziologie, Atmosphärenphysik, etc. arbeiten zielgerichtet zusammen, um die komplizierten Zusammenhänge der globalen Schadstofftransportprozesse (Verteilung, Verbleib und Abbau) zu verstehen und besser vorhersagen zu können. Die regionale Umweltforschung in der Arktis, die vor allem auf der kontinuierlichen Weiterentwicklung umweltchemischer Untersuchungen und der Interpretation der hieraus resultierenden Daten beruht, ist deshalb als ein herausragendes Beispiel zu betrachten, bei dem regional begrenzte internationale Forschung und Überwachung maßgeblich zum Verständnis globaler Verteilungsprozesse beigetragen hat.

Einleitende Bemerkungen

Die Arktis als Forschungsregion hat bereits seit vielen Generationen Wissenschaftler unterschiedlicher Sparten zu bahnbrechenden Forschungsunternehmen angespornt. Auch im Rahmen der Umweltforschung und Umweltchemie hat die Arktis als Forschungslokalität in den letzten Jahrzehnten eine nicht zu unterschätzende Rolle gespielt. Internationale Umweltchemieforschung in der Arktis hat in eindrucksvoller Weise zeigen können, wie regional begrenzte Forschung signifikant zum Verständnis globaler Umweltprozesse beitragen kann.

Als Umweltchemie wird in den hier vorliegenden Betrachtungen der Typ von analytisch-chemischer Forschung verstanden, der sich mit der Verbreitung, dem Verbleib und dem Abbau von anthropogenen Schadstoffen in der Umwelt befasst. Aspekte, die sich mit biogenen Substanzen befassen, die in einigen Fällen sogar weit giftiger und umweltschädlicher sein können als alle vom Menschen geschaffenen Schadstoffe, wurden nicht in die hier vorliegende Arbeit eingebunden.

Heute versteht man unter Arktis die Region oberhalb des nördlichen Polarkreises (Breitengrad 66 °N), die eine Fläche von ca. 16 Mill. km² bedeckt (Abbildung 1). Das Nordpolarmeer (Fläche ca. 13,2. Mill. km²) wird von den Landmassen der arktischen Anrainerstaaten (Grönland,

Norwegen, Schweden, Finnland, Russland, USA & Kanada) umschlossen (ca. 3 Mio. km²).



Abbildung 1: Die Arktis als wichtige Forschungsregion zur Untersuchung von regionalen und globalen Schadstoffverteilungsprozessen. (mit freundlicher Genehmigung von UNEP/ Grid Arendal: Hugo Ahlenius).

In der hohen Arktis (> 75 °N) dauert der Übergang von der Polarnacht zur Mitternachtssonne im Frühjahr jeden Jahres nur wenige Wochen. Dies hat zur Folge, dass sich die photochemischen Bedingungen, die den atmosphärischen und meeresgebundenen Transport von umweltstabilen Schadstoffen beeinflussen, innerhalb kurzer Zeit drastisch ändern. Viele photolabile Schadstoffe wie flüchtige organische Verbindungen (non-methane hydrocarbons = NMHCs) werden während des Winters in beträchtlichen Konzentrationen in die arktische Luft eingebracht. Im Sommer sind diese Stoffe dann allerdings nicht mehr in der arktischen Umwelt nachweisbar (Blake et al. 2003).

Die niedrigen Jahrestemperaturen in der arktischen Umwelt führen zu einem stark reduzierten (mikro)biologischen Abbau von Schadstoffen. Verbindungen, die unter Laborbedingungen rasch abgebaut werden können, können, sobald in die arktische Umwelt entlassen, lange Zeit unverändert vorliegen. Solche Stoffe weisen somit also eine

deutlich höhere Umweltstabilität auf, als dies vorher in Laborexperimenten vorhergesagt und dokumentiert wurde. Polychlorierte Biphenyle (PCB), Hexachlorcyclohexan-Isomere (HCH), Chlornorbornane (Toxaphene[®]) als auch perfluorierte alkylierte Substanzen (PFAS) sind beredte Beispiele für die erhöhte Umweltstabilität von anthropogenen Schadstoffen in der arktischen Umwelt im Vergleich zu mittleren Breitengraden. Der kontinuierliche Eintrag über viele Jahrzehnte von solchen umweltstabilen organischen Schadstoffen (persistent organic pollutants = POPs) in die arktische Umwelt führte letztendlich zu der umfassend dokumentierten, hohen Belastung der arktischen marinen Tierwelt, vor allem der Beutegreifern die an der Spitze der arktischen Nahrungskette stehen (Schwertwale, Eisbären, Robben, Polarfüchse und Eismöwen). Dies gilt auch für die Urbevölkerungsgruppen (Inuits) Grönlands und Ost-Kanadas, die sich immer noch auf traditionelle Art und Weise ernähren. Die hohe PCB-Belastung dieser Menschen ist inzwischen als bedenklich eingestuft worden (AMAP 2004).

Umweltchemische Untersuchungen in arktischen Ökosystemen spielen deshalb heute eine sehr wichtige Rolle wenn es darum geht, Effekte von Schadstoffen nachzuweisen oder auch mögliche Gegenmaßnahmen zu bewerten, um den Eintrag von Schadstoffen in die arktische Umwelt effektiv zu kontrollieren und ihm Einhalt zu gebieten.

Die bereits seit Jahrzehnten laufenden arktischen Langzeitüberwachungsprogramme wie das Arktische Schadstoffüberwachungsprogramm (AMAP = Arctic Monitoring and Assessment Programme: www.amap.no) und das Europäische Monitoring Programm (EMEP = European Monitoring and Evaluation Programme: www.emep.int) konnten inzwischen die globale Dimension des Schadstoffferntransportes von POPs und Metallen eindrucksvoll wissenschaftlich belegen. Diese wissenschaftlichen Informationen haben dann als Konsequenz maßgeblich dazu beigetragen, dass die Stockholm Konvention für POPs und die Århus Konvention für ferntransportierte Schadstoffe als internationale Kontrollorgane etabliert wurden.

Der neueste IPCC Bericht (IPCC = International Panel for Climate Change) weist ebenfalls mit aller Deutlichkeit darauf hin, dass dramatische klimabedingte Umweltveränderungen speziell in der Arktis zu erwarten sind (IPCC 2007). Es ist somit auch zu erwarten, dass Verteilungs- und Anreicherungsprozesse von Schadstoffen in der Arktis deutlicher als in anderen Regionen von den erwarteten Klimaveränderungen beeinflusst werden. Die Überwachung von Schadstoffverteilungsprozessen in der Arktis kombiniert mit Untersuchungen von Klimaveränderungen hat deshalb das Potential eines effektiven Früherkennungssystems für globale Klimaveränderungen.

Um die internationale Bedeutung der heutigen arktischen umweltchemischen Forschung zu bewerten, soll anhand einiger herausragender Beispiele verdeutlicht werden, wie von Einzelstudien, Felduntersuchungen und Überwachungsprogrammen in der Arktis auf die grundlegenden Prinzipien

der globalen Schadstoffverteilungs- und -transportprozesse geschlossen werden kann.

Nachweis von umweltstabilen Schadstoffen aufgrund neuer technologischer Entwicklungen: Perfluorierte alkylierte Substanzen in der Arktis

Die atemberaubende technologische Entwicklung der letzten Jahre im Bereich der hochauflösten Chromatographie (z.B. Flüssigkeits- und Gaschromatographie) und Massenspektrometrie (MS) als Detektions- und Identifizierungsmethode im Bereich Umweltanalytik hat zu bahnbrechenden neuen chemisch-analytischen Methoden in der Ultra-Spurenanalytik geführt. Besonders die Neuentwicklungen im Bereich hochauflösender Flüssigkeitschromatographie (HPLC) mit massenselektiven Detektoren (MS: Quatrupol- und Time-of-Flight Massenspektrometer) hat zu bedeutenden Verbesserungen der Methoden-Empfindlichkeit und Instrumentstabilität geführt (Trenholm et al. 2006, Gross et al. 2006, Zwiener & Frimmel 2004). Somit ist es inzwischen möglich, ein breites Spektrum von polaren, wasserlöslichen Verbindungen mit diesen verbesserten analytisch-chemischen Methoden in gering belasteten Proben mit niedrigen Konzentrationen nachzuweisen (\leq ppb = parts per billion Niveau). So konnte erstmals im Jahre 2000 mit modernen HPLC/MS-Methoden die Präsenz von PFAS in arktischen Umweltproben nachgewiesen werden (Kannan et al. 2001). PFAS sind aufgrund ihrer sowohl oleophoben also auch hydrophoben Eigenschaften (amphiphil) sehr begehrte Zusatzstoffe für Imprägnierungs- und Reinigungsmittel sowie für Flammenschutzmittel (Kallenborn et al. 2004). In den letzten fünf Jahren wurden die analytischen Methoden kontinuierlich verfeinert und erste Überwachungsprogramme, die mit den nunmehr nach akkreditierten Methoden validierten analytischen Verfahren durchgeführt wurden, bestätigen die Omnipräsenz von PFAS in der Arktis (Stock et al. 2007) und in anderen Regionen dieser Erde (Wania 2007). Inzwischen sind bereits mehr als 20 perfluorierte Substanzen wie perfluorierte Carbonsäuren, Sulfone, Sufonamide, Telomer-Alkohole etc. in arktischen Umweltproben nachgewiesen worden.

In der Gruppe der umweltstabilen Substanzen, die in arktischen Proben gefunden werden konnten, stellen perfluorierte Stoffe eine ganz besondere Substanzklasse dar. Aufgrund der hohen Stabilität der C-F Bindung sind perfluorierte Stoffe kaum durch biochemische/ enzymatische oder photochemische Prozesse abbaubar. Deshalb müssen diese Stoffe als extrem umweltstabil angesehen werden und es ist zu erwarten, dass trotz rascher Begrenzung des Verkaufs und der Anwendung der kommerziell wichtigsten Verbindungen (Perfluoroktansulfonsäure, PFOS, und Perfluoroktansäure, PFOA) durch internationale Abkommen, diese Verbindungen auch auf viele Jahre hinaus noch in der Umwelt nachweisbar sein werden.

Inzwischen konnte gezeigt werden, dass der größte Teil von PFOS, der in der arktischen Umwelt zu finden ist, durch direkte biochemische Transformation von Fluorsulfamido-

Alkoholen entstanden ist. Ebenso konnte gezeigt werden, dass einige perfluorierte Carbonsäuren (PFA) in der arktischen Umwelt als Abbauprodukte von flüchtigen Fluor-Telomer-Alkoholen (FTOH) zu betrachten sind (Young et al., 2007).

Diese wissenschaftlichen Resultate, die im Rahmen von zahlreichen neueren internationalen umweltchemischen Untersuchungen in der Arktis erbracht wurden, sind somit von großer Wichtigkeit, um die chemischen Umwandlungs- und Transportprozesse vollends zu verstehen, die zur globalen Verteilung von anthropogenen Schadstoffen führen.

Transport and Anreicherung von POPs in der arktischen Umwelt

Seit über 20 Jahren werden inzwischen kontinuierliche Überwachungsprogramme für POPs im Rahmen des Arktischen Langzeitmonitoring Programms (AMAP) durchgeführt (siehe Einleitung). Analytische Methoden werden dabei regelmäßig durch internationale Ringtests, an denen alle beteiligten Laboratorien teilnehmen, überprüft. Die Überwachungsprogramme decken so gut wie alle wichtigen Umweltkompartimente (Luft, Wasser, Sediment und Biota) ab. Die AMAP Schadstoff-Überwachungsprogramme sollten ursprünglich Hintergrundwerte für die Ausbreitung und den Verbleib von POPs in der arktischen Umwelt liefern. Deshalb wurden die ersten überraschenden Ergebnisse, die relativ hohe Konzentrationen von chlorierten Pestiziden wie Hexachlorcyclohexan-Isomeren (HCH) in Luft und Biota nachwies, in der wissenschaftlichen Welt zuerst mit Skepsis aufgenommen. Heute wissen wir, dass eine Reihe von umweltstabilen semi-volatilen organischen Verbindungen über die Atmosphäre oder Meeresströmungen kontinuierlich aus den Quellregionen in die Polarregionen (z. B. Arktis) transportiert wird. Die Luft- und Meeresströmungen der nördlichen Hemisphäre sind normalerweise immer nordwärts gerichtet, während auf der Südhemisphäre Luft- und Meeresströmungen in Richtung Süden verlaufen (Abbildung 2). Für eine Auswahl so genannter semi-volatiler organischer Schadstoffe konnte nachgewiesen werden, dass während des atmosphärischen Transportes zu den polaren Akkumulationsregionen Deponierung (Aufnahme der Schadstoffe in Wasser/Sediment während Niederschlagsperioden) und Wiederaufnahme (Verdampfung) in die Atmosphäre mehrfach auftreten können. Dieser Effekt wird auch populärwissenschaftlich als „Grasshüpfereffekt“ bezeichnet (Wania and Mackay 1993; Wania and Mackay 1996). Allgemein wird inzwischen der Luftmassentransport von umweltstabilen organischen Schadstoffen als der wichtigste Eintragsweg in die Arktis angesehen.

Durch diesen selektiven polwärts gerichteten Transport der Luft- und Wassermassen werden ausgewählte umweltstabile Schadstoffe wie α -HCH, Hexachlorbenzol (HCB), Chlornorbornane (Toxaphene[®]), PCB u. a. aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften (Stabilität, Flüchtigkeit, Löslichkeit etc.) per Luft und/oder Wasserweg in die Arktis transportiert und dort in arktischen Nahrungsnetzen

angereichert (AMAP 2004). Innerhalb der Arktis können Schadstoffe wiederum durch Eismassen-Transport (transpolare Eisdrift) in wenigen Jahren (5-6 Jahre) aus den westsibirischen Flussmündungen bis in die marginalen Schmelzonen der West-Arktis (zwischen Grönland, Spitzbergen und Franz-Josef Land) transportiert werden, wo sie dann alljährlich während der Frühlingsmelzperiode in die arktischen Nahrungsnetze aufgenommen werden (Kallenborn und Herzke 2001). Die Liste der Schadstoffe, die in arktischen Umweltproben nachgewiesen werden, verlängert sich kontinuierlich im Zuge der Weiter- und Neuentwicklung der umweltanalytischen Verfahren.

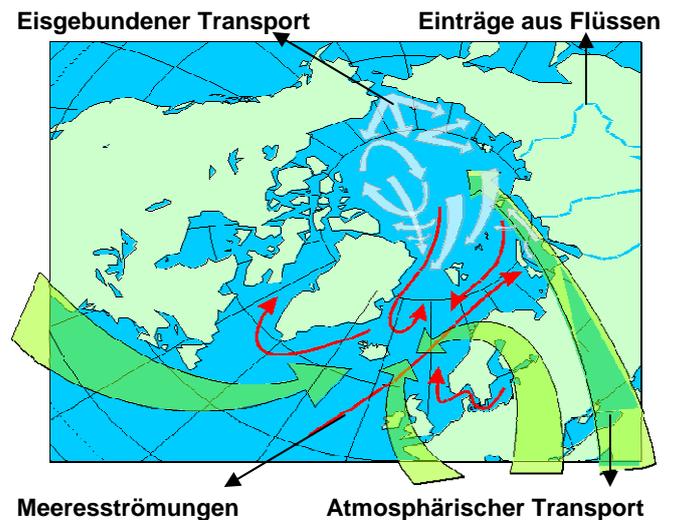


Abb. 2: Schadstofftransport und Verteilung in der Arktis

Hohe Konzentrationen von PCB, DDT und anderen ausgewählten Schadstoffen konnten auch in den arktischen Urbevölkerungsgruppen (Inuit), die sich immer noch im Einklang mit ihren uralten Traditionen ernähren, gefunden werden. Inzwischen wurde auch, aufgrund der hohen PCB- und Organo-Quecksilber-Konzentrationen in Meeressäugtieren, der Bevölkerung der Färöer-Inseln, insbesondere den schwangeren Frauen, empfohlen, kein Walfleisch mehr zu essen (AMAP 2003).

Neuere Untersuchungen zeigen, dass die Verteilung der Schadstoffe innerhalb der Arktis nicht als gleichmäßig und homogen anzusehen ist. Die westliche Arktis (Canada und Alaska) scheint für einige der umweltstabilen Verbindungen allgemein geringere Schadstoffgehalte in den untersuchten Umweltkompartimenten aufzuweisen als dies für die europäische Arktis der Fall ist. Dieser Unterschied kann mit hoher Wahrscheinlichkeit durch geographische (Eintrag durch Flüsse, Eistransport), ozeanographische (Meeresströmungen, Golfstrom) und meteorologische (z. B. Luftmassentransport, Quellennähe) Besonderheiten erklärt werden.

In den letzten Jahren konnten durch umfassende umweltchemische Untersuchungen sogar einige „Hot-Spot“ Lokalitäten in der Arktis nachgewiesen werden (AMAP 2004, Kallenborn et al. 2007). In diesen geographisch eng eingegrenzten Regionen konnten Anreicherungsprozesse für umweltstabile Schadstoffe aufgrund günstiger biologischer,

meteorologischer und ozeanographischer Rahmenbedingungen als besonders effektiv charakterisiert werden. So wurden in einem Süßwasser-Ökosystem (Ellasjøen) auf der Bäreninsel (Bjørnøya) in der norwegischen Arktis signifikant höhere Konzentrationswerte in Umweltproben (Sediment, Wasser, Fisch, Seevögel) gefunden, als dies in anderen Seen in der näheren Umgebung gezeigt werden konnte (AMAP 2004). Umfassende ökotoxikologische und umweltchemische Untersuchungen haben inzwischen gezeigt, dass speziell während der Brutzeit Möwen und Alkenvögel aus der Schmelzzone der marinen Eiszone, in der Nähe der Insel, große Mengen organischer Schadstoffe aus ihren marinen Beutetieren (Krebstiere, Fische) anreichern. Dieselben Vögel setzen dann einen bedeutenden Teil der Schadstoffe wiederum durch ihre Exkremente beim Baden im See (Ellasjøen), der in der Nähe der großen Brutkolonie im südlichen Teil der Bäreninsel liegt, frei. Die Schadstoffe werden dann sehr effektiv im Nahrungsnetz des Sees aufgenommen. Diese komplexe Kombination von Transport- und Akkumulationsprozessen führt letztendlich zu den sehr hohen POP-Konzentrationen, die in den Tieren des Sees (Krebstiere, Fische, Vögel) nachgewiesen werden konnten. (Evenset et al. 2005, 2007).

Die Bausteine passen zusammen

Als Teil der umfassenden internationalen und interdisziplinären Umweltforschung in der Arktis hat die Umweltchemie (Spurenanalytik von organischen und anorganischen Schadstoffen) wichtige wissenschaftlich fundierte Beiträge zum Transport, Verbleib und Abbau von anthropogenen Spurenstoffen geliefert. Konzentrationsdaten und Schadstoffverteilungen in unterschiedlichsten Probenmatrizes sind wichtige Informationen zur umfassenden umweltbezogenen Risikobeurteilung dieser global verbreiteten chemischen Verbindungen. So konnte mit Hilfe der umweltchemischen Forschung der letzten Jahre deutlich gemacht werden, dass

- 1.) ausgewählte Schadstoffe effektiv durch Meeresströmungen und Luftmassenbewegungen in die Polargebiete insbesondere die Arktis transportiert werden;
- 2.) die komplexe Kombination von luftmassen-, wasser- und eisgebundenem Schadstofftransport zu einem selektiven, aber höchst effektiven Transportprozess von umweltstabilen Schadstoffen in die Arktis führt;
- 3.) vor allem lipophile und umweltstabile Schadstoffe effektiv in den kurzkettingen aber individuenreichen Nahrungsnetzen der Arktis zu hohen Konzentrationen angereichert werden (Kallenborn 2006);
- 4.) hohe Konzentrationen von ausgewählten POPs in der arktischen Urbevölkerung (Inuits) Grönlands und Kanadas, die sich immer noch nach alter Tradition ernährt, nachweisbar sind.

Arktische Umweltforschung hat somit auf eindrucksvolle Weise demonstriert, wie internationale und interdisziplinäre Zusammenarbeit im Rahmen von regional begrenzten

Studien zum weiten wissenschaftlichen Verständnis von globalen Selektions-, Verteilungs- und Transportprozessen von anthropogenen Substanzen geführt hat.

Der bisher zusammengetragene enorme Datensatz von Konzentrationswerten und Schadstoffverteilungen wird inzwischen ebenfalls sehr erfolgreich genutzt, um Neuentwicklungen von globalen und regionalen Schadstoffverteilungsmodellen zu evaluieren und zu verbessern (Kallenborn and Berg 2006). Es ist deshalb zu erwarten, dass durch die bisher so erfolgreich demonstrierte internationale Zusammenarbeit auch weiterhin wichtige Umweltprozesse studiert und neue Mechanismen aufgezeigt werden können.

Literatur

- AMAP, 2003. AMAP Assessment 2002: Human Health in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xiv+137 pp.
- AMAP, 2004. AMAP Assessment 2002: Persistent Organic Pollutants in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xvi+310 pp.
- Blake N.J., Blake D.R., Sive B.C., Katzenstein A., Meinardi S., Wingenter O.W., Atlas E.L., Flocke F., Ridley B.A., Rowland F.S. (2003) The seasonal evolution of NMHCs and light alkyl nitrates at middle to high northern latitudes during TOPSE. *J. Geophys. Res. – Atm.* 108/ D4, 8359/ TOP 7: 1-15.
- Evenset A., Christensen G.N., Kallenborn R. (2005) Selected chlorobornanes, polychlorinated naphthalenes and brominated flame retardants in Bjørnøya freshwater biota. *Environ. Poll.* 136: 419-430
- Evenset A., Carroll J., Christensen G.N., Kallenborn R., Gregor D. & Gabrielsen G.W. (2007) Seabird guano is an efficient conveyer of persistent organic pollutants (POPs) to Arctic lake ecosystems. *Environ. Sci. Technol.* 41/4: 1173-1179
- Gros M., Petrovic M., Barcelo, D. (2006) Multi-residue analytical methods using LC-tandem MS for the determination of pharmaceuticals in environmental and wastewater samples: a review. *Anal. Bioanal. Chem.* 386/4: 741-952.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Young C.J., Furdui V.I., Franklin J., Koerner R.M., Muir D.C.G., Mabury S.A. (2007) Perfluorinated acids in arctic snow: New evidence for atmospheric formation. *Environ. Sci. Technol.* 41/10: 3455-3461
- Kannan K., Koistinen J., Beckmen K., Evans T., Gorzelany J.F., Hansen K.J., Jones P.D., Helle E., Nyman M.; Giesy

- J.P. (2001) Accumulation of perfluorooctane sulfonate in marine mammals. *Environ. Sci. Technol.* 35/8: 1593-1598.
- Kallenborn R., Herzke D. (2001) Schadstoff-Ferntransport in die Arktis. *UWSF - Z Umweltchem Ökotox.* 4: 216 – 226.
- Kallenborn R., U. Berger, U. Järnberg, M. Dam, O. Glesne, B. Hedlund, J.-P. Hirvi, A. Lundgren, B. Bügel-Mogensen & A.S. Sigurttsson (2004) Perfluorinated alkylated substances (PFAS) in the Nordic environment. *TemaNord* 2004:552, © Nordic Council of Ministers, Copenhagen 2004, ISBN 92-893-1051-0, ISSN 0908-6692, pp.112.
- Kallenborn R. (2006) Anreicherung und Effekte von organischen Umweltschadstoffen in der Polaren Umwelt. In: J. Lozan et al.: Warnsignale aus den Polargebieten. Verlag Wissenschaftliche Auswertungen, pp. 352.
- Kallenborn R., Berg T. (2006) Long-term atmospheric contaminant monitoring for the elucidation of airborne transport processes into Polar Regions. In: *Arctic and Alpine Environments* (Ed.-In Chief: J. B. Ørbæk) Springer Verlag, New York, Tokyo, Heidelberg, ISBN 3-540-48512-0, XXVIII + pp. 434
- Kallenborn, R., Christensen G.N., Evenset A., Schlabach M., Stohl A. (2007) Atmospheric transport of persistent organic pollutants (POPs) to Bjørnøya (Bear island). *J. Environ. Monitor*, in press. DOI: 10.1039/b707757m
- Kivi R., Kyrö E., Turunen T., Harris N.R.P., von der Gathen P., Rex M., Andersen S.B., Wohltmann I (2007) Ozonesonde observations in the Arctic during 1989–2003: Ozone variability and trends in the lower stratosphere and free troposphere. *J. Geophys. Res.* 112, D08306: 1-17.
- Stock N.L., Furdui V.I., Muir D.C.G., Mabury S.A. (2007) Perfluoroalkyl contaminants in the Canadian Arctic: Evidence of atmospheric transport and local contamination. *Environ. Sci. Technol.* 41/10: 3529-3536
- Trenholm R.A., Vanderford B.J., Holady J.C., Rexing D.J., Snyder S.A. (2006) Broad range analysis of endocrine disruptors and pharmaceuticals using gas chromatography and liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Chemosphere* 65/11: 1990-1998
- Von Savigny C., Ulas E.P., Eichmann K.U., Burrows J.P. (2005) Detection and mapping of polar stratospheric clouds using limb scattering observations. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 5: 7169-7190.
- Venzke, J.F. (2006) Die Arktis und ihre Grenzen: Eine physisch-geographische Einführung. In: Lozan J., Hupfer P., Peipenburg D., Graßl H., Hubberten H.W., Karbe L. (2006) Warnsignale aus den Polargebieten. *Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg: pp.: 352
- Zwiener C., Frimmel F.H. (2004) LC-MS analysis in the aquatic environment and in water treatment technology - a critical review - Part II: Applications for emerging contaminants and related pollutants, microorganisms and humic acids. *Anal. Bioanal. Chem.* 378/4: 862-874
- Wania F. (2007) A global mass balance analysis of the source of perfluorocarboxylic acids in the Arctic Ocean. *Environ. Sci. Technol.* 41/13: 4529-4535
- Wania F., Mackay D. (1993) Global Fractionation and cold condensation of low volatility organochlorine compounds in polar regions. *Ambio* 22/1: 10-18.
- Wania F., Mackay D. (1996) Tracking the distribution of persistent organic pollutants. *Environ. Sci. Technol.* 30/9: A390-A396

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Roland Kallenborn, Environmental Technology, University Centre in Svalbard (UNIS), P.O. Box 156, NO-9171 Longyearbyen, Tel.: + 47 79023351, FAX: +47 79023301, URL: www.unis.no