

Ausbreitungswege der Xenobiotika in der Umwelt

Von **Karlheinz Ballschmiter**

1. Einleitung

Eine Darstellung der Transportphänomene in der Ökosphäre – „Ausbreitungswege der Xenobiotika“¹⁾ in der Umwelt – kann in dem vorgegebenen Rahmen nur die grundsätzlichen Möglichkeiten und ihre Dimensionen darstellen. Der Komplexität der möglichen Durchmischungs- und Entmischungsvorgänge in den unterschiedlichen Dimensionen des Raum-Zeit-Gefüges stellt sich der breite Bereich physikalisch-chemischer Eigenschaften der als Xenobiotika zu betrachtenden Verbindungen zur Seite (1-6). Das Spektrum der Verbindungen reicht von Schwefeldioxid, über Trifluorchlormethan (F 11), Decachlorbiphenyl, Trichlor-essigsäure hin bis zum Streusalz. Jede Molekülart wird bestimmte Bereiche und Transportwege bevorzugen, andere wieder als völlig nebensächlich erscheinen lassen.

Generell ist die Kenntnis der Ausbreitung der Xenobiotika in der Umwelt ein wesentlicher Aspekt der Frage „Vorkommen und Verbleib“. Die Zunahme in einer bestimmten Region kann neben dem bewußten Eintrag durch Anwendung oder indirekte Produktion auch Ergebnis des Austrages aus einem anderen Bereich sein.

Da bis auf wenige Ausnahmen Umweltchemikalien lokal bis regional durch Verdünnung beseitigt werden (Abluft, Schornstein, Wind; Abwasser, Kanalisation, Fluß), lassen die regionalen und globalen Massentransportvorgänge in der Ökosphäre vorhersagen, welche langfristigen Konsequenzen durch Verteilungsvorgänge zu erwarten sind.

Bei Abschätzung, ob eine bestimmte Verbindung auf einem bestimmten Transportweg verbreitet wird oder nicht, können die Laborerfahrungen zu Eigenschaften wie Wasserlöslichkeit, Flüchtigkeit, Wasserdampflichkeit, Stabilität leicht irreführen. Vor allem die Begriffe „wasserlöslich“ und „schwerflüchtig“ sind bei regionalen bis globalen Betrachtungen mit neuem Verständnis zu füllen (5,7,8,9).

¹⁾ Xenos: fremd, Bios Leben; Umweltchemikalien

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. K. Ballschmiter, Universität Ulm, Abteilung Analytische Chemie, Oberer Eselsberg
9/26, 7900 Ulm

2. Gliederung der Transportwege

Übersichtlich und für viele Fragestellungen eindeutig ist das Ausmaß der Transportwege oder Ausbreitungsbereiche zu gliedern. Dabei ist für die jeweilige Entfernung bzw. Flächendimension zu definieren, ob man von einer Punktquelle, einer Flächenquelle oder einem diffusen Eintrag ausgehen muß. Im lokalen Rahmen ist ein Schornstein eine Punktquelle, eine Stadt kann es noch sein, während im kontinentalen Rahmen eine Fläche wie das Ruhrgebiet oder das Industriegebiet um Birmingham als Punktquelle anzusehen sind. Bezogen auf einen Meßpunkt wird man sinnvolle Ergebnisse nur aus Flächenquellen erwarten dürfen. Vorgeschlagen wurde auch eine Gliederung in nur drei Bereiche – lokal, regional, global –, die aber nicht streng gegeneinander abgegrenzt wurden (10). In Tabelle 1 ist der Versuch einer solchen Abgrenzung unternommen, wobei der Begriff „national“ für die praktischen Aspekte einer Ausbreitung in der Umwelt von Bedeutung sein kann. Nationale Grenzen sind oft identisch mit Anwendungsbeschränkungen oder Anwendungsmustern, die Ausbreitung unterbrechen sie aber nicht. Tabelle 1 faßt somit die unterschiedlichen Dimensionen eines Xenobiotika-Transportes zusammen.

2.1 Stabilität der Xenobiotika

Wie weit Xenobiotika transportiert werden, hängt in erster Linie von ihren physikalischen Eigenschaften und der chemischen Stabilität ab. In der Troposphäre und auch darüber hinaus spielt die Reaktion mit OH-Radikalen neben einem möglichen Photoabbau die entscheidende Rolle (11,12,13). Biogene Terpene („Tannenduft“) haben z. B. Halbwertszeiten von Minuten bis maximal 24 Stunden. Polychlorierte Terpene (Polychloropinen, Toxaphen) dagegen konnten sich weltweit ausbreiten. In der Hydrosphäre kommt neben der Reaktion mit Wasser (Hydrolyse) dem mikrobiellen Abbau ein entscheidender Anteil in der Umwandlung der Xenobiotika zu („Selbstreinigungskraft“ der Flüsse). Gerade weil so vielfältige biotische und abiotische Umwandlungsmöglichkeiten (Umweltchemie) bestehen, zeigt das Vorkommen vieler Verbindungen in bereits globalen Dimensionen deutlich, welch schwierige Aufgaben der Ökosphäre hinsichtlich des Abbaus der Xenobiotika zugemutet werden.

Tab. 1: Transportbereiche

Bezeichnung	Distanzen (km)
punktuell	0–0,05
lokal	0,05–10
regional	10–200
national	200–1000
kontinental	1000–5000
global	5000–40000

2.2 Molekularer und partikel-adsorbierter Transport

Bei gleicher Stabilität wird die Transportstrecke durch die Austragmechanismen beeinflusst. Partikel-adsorbierte Verbindungen haben wegen der Sedimentation sowohl in der Atmosphäre wie auch in der Hydrosphäre geringere Reichweiten als die Verbindungen, die molekular in Luft oder Wasser transportiert werden (2,5,6,7,8). Einige Beispielrechnungen sollen die Dimensionen veranschaulichen. Die mittlere Verweildauer eines Aerosolpartikels z. B. in der Troposphäre beträgt 7 Tage. Bei Kenntnis des Verhältnisses von adsorbiertem Anteil zur Gesamtmenge, hier „Phi“ genannt, ergibt sich für die Aufenthaltszeit eines Aerosolpartikels in der Troposphäre, hier „T“ genannt, die einfache Beziehung $T = 7$ geteilt durch „Phi“. C. E. JUNGE hat eine Abschätzung von „Phi“ angegeben, die bei Annahme einer mittleren Aerosolkonzentration über die Beziehung Aerosoloberfläche zu Masse die Oberflächen der Aerosole pro m^3 zu errechnen gestattet (2,7). Für Reinfluft ergibt sich eine Oberfläche von $0,1-1 \text{ cm}^2/m^3$. Dieser Wert steigt für Stadtluft auf $100 \text{ cm}^2/m^3$ an. Je niedriger der Dampfdruck einer Verbindung ist, um so höher ist der adsorbierte Anteil. Selbst für DDT mit einem Dampfdruck von nur $1,10^{-7} \text{ mmHg}$ ist für ein Reinfluftaerosol Phi ca. 0,4, d. h. 60% des DDT sind molekular in der Gasphase verteilt. Für PCB liegen die entsprechenden Werte für Phi bei ca. 0,01, d. h. 99% der PCB-Moleküle sind frei in der Troposphäre unter Reinfluftbedingungen. Selbst für stark aerosolbelastete Stadtluft ergeben sich noch Werte von ca. 50% PCB in der freien Gasphase. Diese Werte werden verständlich, wenn man die vorliegenden Gehalte mit den Sättigungskonzentrationen vergleicht. 4,4-DDT hätte eine Sättigungskonzentration von $1,9 \text{ Mikrogramm}/m^3$, bei gemessenen Werten von $2-5 \text{ Nanogramm}/m^3$. Die Sättigungsdichte der Luft für 4,4-DDT ist somit bisher nur zu rund 1% erreicht (2,7).

Für marine Transportsysteme überwiegt der molekular im Wasser gelöste Anteil z. B. selbst für Polychlorbiphenyle, obwohl diese Verbindungen im allgemeinen Sprachgebrauch als „wasserunlöslich“ gelten.

3. Transportvorgänge in der Ökosphäre

Die Transportvorgänge in der Ökosphäre lassen sich untergliedern in

1. Transport in der Technosphäre von der Produktionsstätte zum Anwendungsgebiet.
2. Transport in der Hydrosphäre (Oberflächenwasser, Grundwasser, See, Meer).
3. Transport in der Atmosphäre (Troposphäre 0–10 km; Stratosphäre 10–50 km).
4. Transport in der Lithosphäre.

Die letztgenannten drei Bereiche stehen in regem Austausch, wobei besonders der Transport in der Troposphäre und in den oberen Schichten der Hydrosphäre sich ergänzen können. Die Phasenübergänge in jede Richtung stellen komplexe

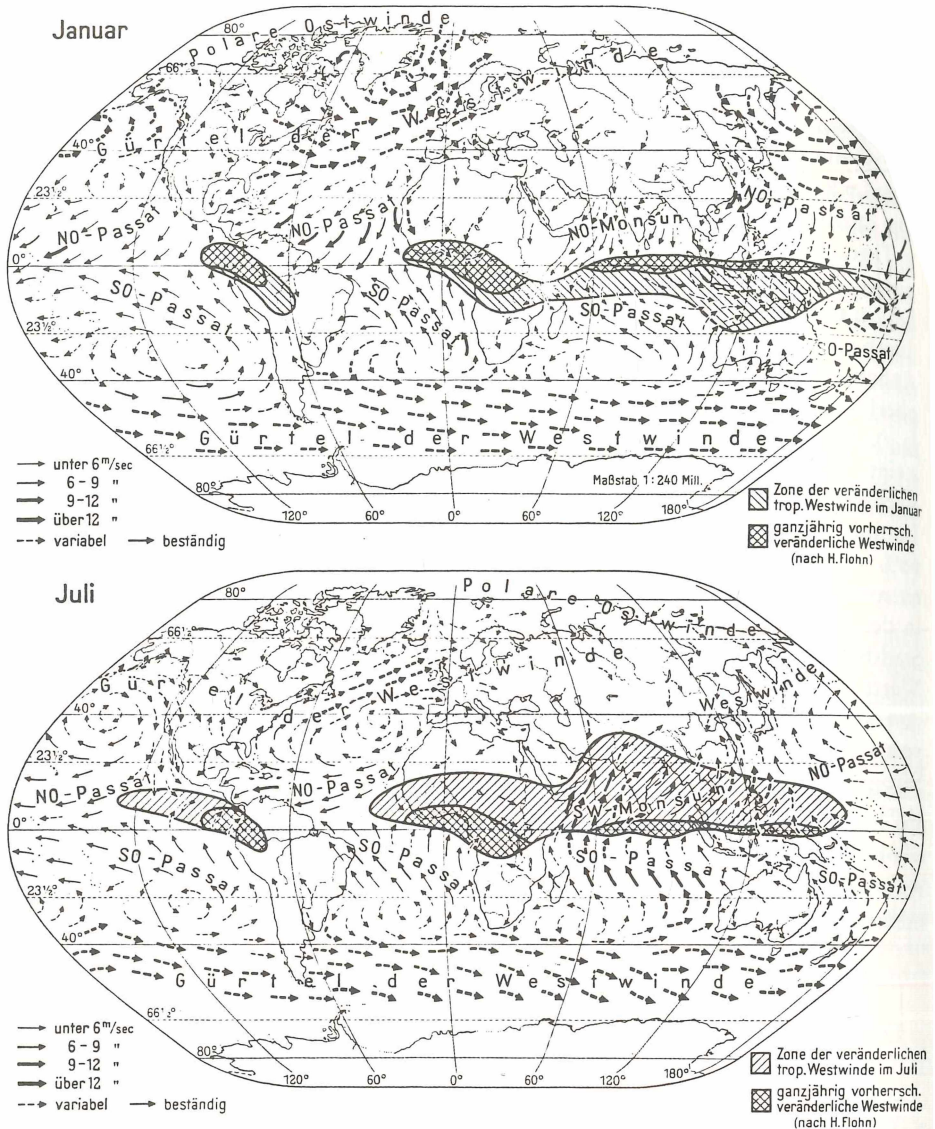


Abb. 1 Karte der mittleren Windverteilung auf der Erde im Januar und Juli (z. T. nach SYDOW-WAGNERS Method. Schulatlas. bearb. v. H. HAACK u. H. LAUTENSACH). Die Darstellung zeigt außer Windrichtung und -stärke auch die Beständigkeit an, die besonders bei der passatischen Zirkulation beider Halbkugeln hervortritt. Im Juli ist die größte Beständigkeit ebenfalls auf die Passatgebiete und außerdem auf Teile des SW-Monsuns Südasiens beschränkt. Die Windstärke ist in diesem Monat auf der Nordhalbkugel entsprechend den geringeren Druckgradienten auffallend geringer (aus: BLÜTHGEN, J., 1966: Allgemeine Klimageographie. W. de Gruyter, Berlin).

physikalisch-chemische Vorgänge dar, die über vereinfachte Modelle erfaßt werden sollen.

Der Transport in der Lithosphäre (Boden) wird in diesem Zusammenhang nicht näher betrachtet, da er bevorzugt nur die Funktion des Bodens als „Quelle“ oder „Senke“ beschreibt.

3.1 Transport Produktionsstätte / Anwendungsgebiet

Dieser von Menschen betriebene Transport, der als Teil der Produktion in der Technosphäre angesehen werden kann, ist nur in ganz groben Zügen zu erfassen, stellt aber einen wichtigen Beitrag zum Phänomen „Verbreitung in der Umwelt“ dar. Dieser Transport kann sich den natürlichen Verteilungsvorgängen überlagern, wenn z. B. sich der Anwendungsbereich für 4,4-DDT von der Nordhemisphäre in die Südhemisphäre verschiebt, oder wenn ein Schädlingsbekämpfungsmittel im Laufe der Zeit im regionalen Rahmen der Ausbreitung oder dem Rückzug eines bestimmten Schädlings folgt (4). Der Startpunkt oder besser die Startfläche für die natürlichen Verteilungsvorgänge wird damit neu gegeben. Sehr häufig läßt die Kenntnis der landwirtschaftlichen Nutzung (Forstwirtschaft, bevorzugte Ackerfrucht, Viehwirtschaft) oder die industrielle Struktur (Energiebasis, Stahlindustrie, Chemische Industrie) für eine Region den **A n t r a n s p o r t** bestimmter Xenobiotika erwarten.

3.2 Transport in der Atmosphäre

Die schnellste und wirksamste Durchmischung bis hin zu den globalen Dimensionen ergibt sich in den unteren 0–10 000 m der Atmosphäre, der Troposphäre (Abb. 1). Die als „Wind und Wetter“ empfundenen Massentransportvorgänge sind weiträumig und in einer Zeitdimension, die innerhalb jeder Hemisphäre in Wochen abläuft (Tabelle 2) (14, 15). Der globale Umlauf eines Gasmoleküls in der Westwindregion der gemäßigten Breiten ist in vier bis sechs Wochen erfolgt. Für die Betrachtung der Durchmischung in der Nordhemisphäre bedeutet dieses, daß die gesamte Luft über Mitteleuropa oder auch die über der UdSSR rund 8–10mal im Jahr nach Osten um den Globus wandert. Gegenläufige Luftbewegungen im kontinentalen Bereich sind nur regional von Bedeutung bzw. gestatten die Analyse „ortsfremder“ Luftmassen, ehe diese in die totale Durchmischung gehen.

Allein ein Wind, der als „leichter Zug“ mit 4 km/Std. kaum als solcher empfunden wird, bringt es in 8 Tagen auf die Strecke Hamburg–Ulm. Diese Betrachtung macht verständlich, welche Entfernungen mit der allgemein angenommenen mittleren Windgeschwindigkeit von 20 km/Std. zurückgelegt werden können. Die Strecke Ostküste USA–Mitteleuropa ist damit in 10 Tagen überwunden. Diese Umsatzgeschwindigkeiten vollziehen sich je Hemisphäre in zwei

Tab. 2: Zeitdimensionen der Transportvorgänge

Atmosphäre	Mittlere Geschwindigkeit	für 1000 km werden benötigt:
Sturm	80km/h	0,5 Tage
Brise (mäßig)	20km/h	4 Tage
Hydrosphäre (Meer)		
Oberflächenstrom	0,80 m/sec.	15 Tage
Tiefenstrom	0,01 m/sec.	3 Jahre

grundsätzlich verschiedenen Bewegungsrichtungen und damit Verteilungsräumen (14,15). In den mittleren Breiten (30°–60° N bzw. S) herrscht die Bewegung nach Osten, d.h. Westwind vor. Zwischen den gemäßigten Breiten und dem Äquator wehen jeweils aufeinander zu der Nordost-Passat und der Südost-Passat. Dieses Gegeneinanderlaufen mit einem Ausweichen nach oben ergibt für den Interhemisphären Austausch eine Zeitskala, die in Jahren zu messen ist. Im kontinentalen Bereich löst sich dieses stark vereinfachte globale Schema in Sonderbewegungen auf. Im Nordsommer löst z. B. über dem Indischen Ozean der Südwest-Monsun den Nordost-Passat (Nordost-Monsun) ab und verlängert den Südost-Passat, dabei den südindischen Äquator überquerend, nach Norden. Der Nordatlantik hat als Ergebnis des ständig vorhandenen zentralatlantischen Hochs eine Luftbewegung im Uhrzeigersinn, bei dem Sahara-Staub bis zu den Antillen und den Bermudas getragen werden kann, während in Irland der Staub von der nordamerikanischen Ostküste erwartet werden darf (9).

Bereits das aufmerksame Verfolgen der Wetterkarte zeigt im kontinentalen Rahmen bevorzugte Luftstraßen auf. Saurer Regen (H_2SO_3 / H_2SO_4 Austrag) über Skandinavien hat weniger seinen Ursprung im kontinentalen Mitteleuropa (Ruhrgebiet, Saargebiet/Elsaß-Lothringen) als vielmehr in den britischen Industriegebieten. Die Zugbahn eines „Tiefs“ über den britischen Inseln läuft im Regelfall nicht über die deutschen Mittelgebirge nach Skandinavien.

Vertikale Luftbewegungen, in lokalem Rahmen als Thermik oder Abwinde bekannt, sind in regionalem Rahmen die Hochs und Tiefs. Hoher Luftdruck resultiert aus sich absenkenden Luftmassen, wie umgekehrt ein Tief durch aufsteigende charakterisiert ist. Die äquatorialen Windstillen (Kalmen) haben hierin ihre Ursache. Diese vertikalen Bewegungen in Tiefdruckgebieten sind ein wesentlicher Faktor für die Homogenisierung der Atmosphäre, denn sie transportieren bodennahe, damit quellennahe Luft in höhere Regionen.

Wird in lokalem Rahmen durch Inversionsschichtung (warme Luft über kälterer Bodenluft) der vertikale Austausch verlangsamt oder gar unterbunden, kommt

es in der kälteren Bodenluft zur Akkumulation der zum Abtransport vorgesehenen Luftverunreinigungen (SO_2 , CO, Stickoxide, Lösungsmittel etc.). Solche Wetterlagen führen indirekt den „normalen“ Abtransport in der unteren Troposphäre besonders föhlsam vor.

Diffusionsvorgänge haben bei der Durchmischung in der Troposphäre untergeordnete Bedeutung, da der tatsächliche Diffusionsweg selbst für Wasserstoff wegen der geringen freien Weglänge von $1,6 \cdot 10^{-5}$ cm bei 0°C und 1 Bar gegenüber der mittleren Windgeschwindigkeit von 5,5 m/sec erheblich zurücksteht. Die reale Diffusion in Längsrichtung liegt für Wasserstoff bei Standardbedingungen bei 0,5 cm/sec.

Transportiert werden die Moleküle in der Atmosphäre in der Gasphase oder adsorbiert an Aerosolen. Der Anteil adsorbierter Moleküle korreliert mit deren Dampfdruck und der Aerosolteilchenzahl bzw. der Aerosolteilchenfläche pro cm^3 (2,7). Messungen und Berechnungen ergeben für n-Alkane, daß noch C_{24} -Alkane zu 90% molekular in der Gasphase auftreten (9).

3.3 Austrag aus der Atmosphäre

Der Austrag aus der Troposphäre kann durch Sedimentation der großen Aerosolpartikel stattfinden, durch Ausregnen (rain out) der als Kondensationskeime für Regentropfen wirkenden Partikel, aber auch als Auswaschen (wash out) durch Regentropfen der in der Gasphase befindlichen Moleküle im Sinne einer „Gaswäsche“ (2,7). Der jeweils wirksamste Austragprozeß hängt von den Eigenschaften der Moleküle (Dampfdruck, Polarität, Wasserlöslichkeit) ab.

Die Mengen, die über eine Aerosoldeposition pro m^2 niedergehen, sind für einige Verbindungen bekannt geworden. 1972 gingen in Island im Sommer 1,05 Mikrogramm PCB pro m^2 und Monat nieder, im Winter ging die Menge auf 0,05 Mikrogramm pro m^2 und Monat zurück. In Süd-Carolina, USA, wurde im Frühjahr 1977 ein „fall out“ von 3,6 Mikrogramm PCB pro m^2 und Monat gemessen.

Obwohl der Partikeldeposition die höhere Austragrate zugeordnet wird, ist festzustellen, daß im Mittel des Jahres 45mal das gesamte in der Troposphäre befindliche Wasser als Regen auf die Erdoberfläche niedergegangen ist, wobei weite Landflächen als aride Gebiete nicht betroffen sind (14,15). Darüber hinaus machen die Ozeane bereits ca. 71% der Erdoberfläche aus, so daß mindestens $\frac{3}{4}$ des Austrages durch Sedimentation, Ausregnen und Auswaschen aus der Troposphäre die Ozeane erreicht.

Für den Austrag durch die Wasserphase (Regentropfen) hat C. E. JUNGE einen Löslichkeitskoeffizienten (α) eingeführt [α – Löslichkeit in Wasser (g/l)/Dampfdichte (g/l)], der die Tendenz für eine Verbindung beschreibt, in die Wasserphase

Tab. 3: Massen und Flächen der Ökosphäre

Troposphäre (0–11 km) (Dichte der Luft bei 0°C, 1 Bar: 1,29 g/l)	$40,0 \cdot 10^{20} \text{ g}$
Wasserdampf (global)	$0,13 \cdot 10^{20} \text{ g}$
Ozeane (gesamt)	$13,17 \cdot 10^{20} \text{ l}$
Atlantischer Ozean (Nord + Süd)	$3,18 \cdot 10^{20} \text{ l}$
Nordsee	$0,00054 \cdot 10^{20} \text{ l}$
Ostsee	$0,00024 \cdot 10^{20} \text{ l}$
Fläche Weltmeere	$360,80 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$
Erdoberfläche (gesamt)	$510 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$

zu gehen (2,7). Die Austragsrate bei einer mittleren Niederschlagsmenge von 100 cm/Jahr und einer Luftsäule von 8 km ergibt sich damit zu: Austragsrate gleich α mal $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ [Jahr}^{-1}]$. Für Transportbetrachtungen ist die Aufenthaltszeit T anschaulicher, die sich aus T gleich $1/\text{Austragsrate}$ ergibt. Bei einem α -Wert von $5 \cdot 10^4$ ergibt sich für Lindan eine nur durch den Auswascheffekt bedingte Aufenthaltszeit in der Troposphäre von 56 Tagen, die entsprechende Aufenthaltszeit beträgt für PCB mit 60% Chlor bei α gleich 3,4 rund 800 Tage. Das Phänomen der Wasserdampfdestillation, das auch für Regentropfen angesetzt werden muß, reduziert die Austragung der betrachteten Moleküle durch Regen nochmals. Ganz andere Verhältnisse liegen selbstverständlich vor, wenn man die gleichen Überlegungen für SO_2 anstellt. SO_2 kann sehr wirkungsvoll durch den Regen ausgetragen werden.

Wieweit die Ozeane neben dieser Funktion als „Senke“ auch als „Quelle“ für den Eintrag in die Troposphäre fungieren, etwa über das Phänomen der Wasserdampfdestillation, kann nur als Frage angedeutet werden.

3.4 Massenumsätze bei Transportvorgängen in der Troposphäre

Die Massenumsätze bei kontinentalen und globalen Durchmischungen entziehen sich der Vorstellung und sind nur durch „Hochzahlen“ faßbar zu machen. Schon eine regionale Luftbewegung von 100 km Breite und 1000 m Höhe – im Wettergeschehen kein besonderes Ereignis – verschiebt pro Kilometer Weg $100 \times 10^9 \text{ m}^3$ Luft, was einer Menge von 126 Millionen Tonnen Luft entspricht. Das Gewicht der Troposphäre (0–10 km) in einer Hemisphäre beträgt ca. 40×10^{14} Tonnen, bei einem Volumen von $1530 \times 10^{15} \text{ m}^3$ in den unteren 3000 m. Um darin eine Konzentration – weltweit – von 1 Nanogramm pro Kubikmeter (ng/

m³) zu erzeugen, muß nur eine Menge von $1,53 \times 10^3$ Tonnen abgegeben werden. Die Meng von 1 ng/m³ kann in vielen Fällen mühelos mit den modernen Methoden der analytischen Chemie bestimmt werden. Allein im Jahre 1976 wurden die Frigene²⁾ CFCI₃, CF₂Cl₂ und CHF₂Cl in 822×10^3 Tonnen weltweit erzeugt.

Leicht unterschätzt werden die Emissionen diffuser, d. h. kleiner Quellen. So werden täglich in der Bundesrepublik etwa 250 Tonnen Autoreifenabrieb erzeugt, d. h. im Jahr 91 400 t, also fast 100 000 Tonnen (11). Diese sind zwar weit verteilt, können sich aber über die Abwasserwege konzentrieren.

3.5 Transport in der Hydrosphäre

Wasser als Transportmittel auch für Xenobiotika tritt in besonders augenfälliger Weise durch die in den letzten Jahrzehnten unmittelbar erlebte Verschmutzung nahezu aller Wasserläufe und küstennaher Meeresgebiete in Erscheinung.

3.5.1 Transportvorgänge auf Kontinenten

Für industrielle Produktionsstätten auf der ganzen Welt ist die Möglichkeit, Abfälle ganz oder zum Teil über Oberflächenwasser ableiten zu können, oftmals eine ganz entscheidende Produktionsvoraussetzung. Flüsse sind demnach zentrale Austragsrouten aus allen industriellen Zivilisationen. Die Notwendigkeit, das Oberflächenwasser auch in anderer Weise, vornehmlich als Trinkwasser, nutzen zu müssen, hat die weltweiten Programme der Abwasserreinigung stark gefördert.

Weniger augenfällig ist der mögliche lokale bis regionale Transport von Xenobiotika durch das Grundwasser. Je nach den geologischen Vorgaben kann ein Grundwasserstrom Geschwindigkeiten von 10^{-4} bis 10^{-6} m/sec erreichen. Es ergeben sich dabei Transporte über etwa 4 km pro Jahr. Der Transport im Grundwasser kommt einer Langsam-Sandfiltration bei der Trinkwassergewinnung gleich, d. h. der Transport von Xenobiotika wird stark durch ihre Wasserlöslichkeit geprägt.

Binnenseen in den gemäßigten Klimazonen erleben im Frühjahr und Herbst, wenn Oberflächen- und Tiefenwasser annähernd gleiche Temperaturen haben und somit gleich schwer sind, im Regelfall durch die dann wehenden Winde eine Durchmischung bis zum Grund, die sogenannte Frühjahrs- und Herbst-Vollzirkulation (dimiktische Seen). Diese Vollzirkulation kann bis 100 m

²⁾ Frigene werden als Kälteflüssigkeit in Kühlschränken, als Treibgase in Sprühdosen usw. verwendet. Solche Stoffe stehen im Verdacht, die Ozonschicht in der Stratosphäre zu schädigen.

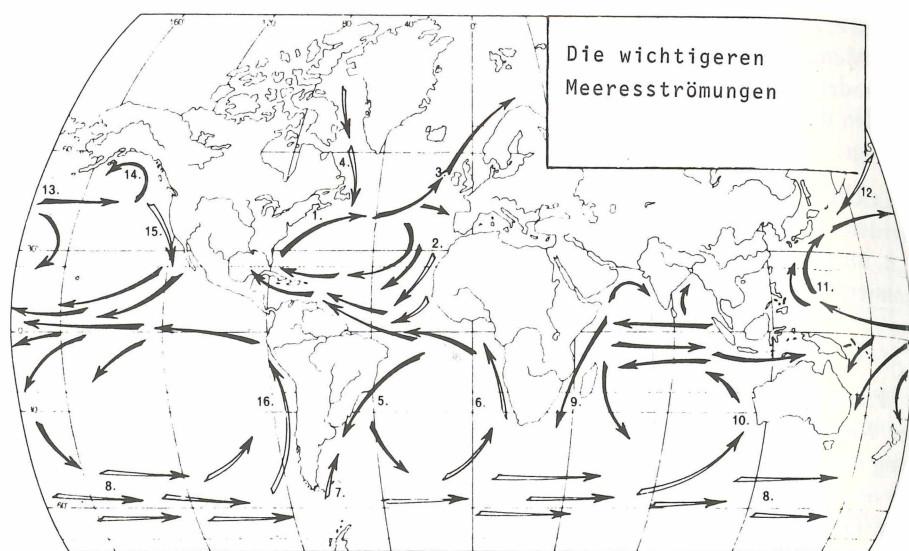


Abb. 2 Die wichtigeren Meeresströmungen. Warme Ströme sind durch dunkle, kalte durch offene Pfeile symbolisiert. 1. Golfstrom, 2. Kanarenstrom, 3. Nordatlantische Strömung, 4. Labrador-Strom, 5. Brasilianische Küstenströmung, 6. Benguelastrom, 7. Falklandströmung, 8. Westwinddrift, 9. Agulhaes-Strom, 10. Westaustralische Strömung, 11. Kuroshio-Strömung, 12. Oyashio-Strom, 13. Nordpazifische Strömung, 14. Alaska-Strom, 15. Kalifornien-Strom, 16. Humboldt-Strom.

und tiefer reichen. Im Sommer bildet sich bei tieferen Seen (Tiefe mehr als 20 m) eine stabile Wärmeschichtung aus, die eine Wasserdurchmischung nur in den oberen 6 bis 10 m zuläßt. In polaren bis subpolaren Gebieten findet im Sommer nur eine Durchmischung statt (monomiktisch), mit sogenannter Winterschichtung (Wasser von $+4^{\circ}\text{C}$ am Boden) in der übrigen Zeit. In den Tropen kommen sowohl monomiktische wie auch polymiktische Seen vor, wobei je nach Lage und Tiefe eine Vollzirkulation durch das kältere Oberflächenwasser im Winter stattfindet. Umwälzungen durch den Wind sind aber durchgreifender.

3.5.2 Transportvorgänge im marinen Bereich

Für die kontinentale bis globale Dimension nehmen die Oberflächenströme der Meere (Abb. 2) Transportfunktionen ein, die sowohl im Massendurchsatz, der Transportentfernung wie in der Transportgeschwindigkeit den Durchmischungsvorgängen in der Troposphäre am nächsten kommen (16,17). Mittlere Stromgeschwindigkeiten sind 0,4 bis 1,5 m/sec mit Spitzen von 2,0 m/sec. Für eine mittlere Geschwindigkeit von 0,8 m/sec ergibt sich eine

Monatsstrecke von ca. 2000 km. Diese Strecke kann sich durch Mäander in der linearen Richtung stark verkürzen. In der Tiefsee erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten im Mittel Werte von 0,01 bis 0,02 m/sec (16,17). In einem Jahr können so 300 km zurückgelegt werden. Im Jahre 1940 in der Antarktis abgesunkenes Wasser ist demnach bis heute ca. 12 000 km weit gewandert. Die etwa 9000 km bis zum Äquator können in diesem Zeitraum als südantlantische Bodenströmung zurückgelegt worden sein.

Die Grobgliederung der Oberflächenströme in allen Ozeanen ist durch globale Kreisströme gekennzeichnet. Sie werden in der Südhemisphäre durch die circumpolare Westwinddrift ergänzt. Die Antarktische Westwinddrift zweigt im Westen von Südamerika, Südafrika und Australien kalte Meeresströmungen nach Norden ab. Auf diese Weise stehen die Ozeane im Austausch des Oberflächenwassers. Der interozeanische Austausch wird durch Tiefenströme ergänzt, die aus der etwa 4000 bis 5000 m tief reichenden Westwinddrift gespeist werden.

Die Feingliederung der Oberflächenströme in den Weltmeeren weist äquatorüberquerende Stromzweige auf. Der nach Westen laufende Südäquatorialstrom zweigt vor dem Südamerikanischen Kontinent den Guayanastrom nach Norden ab, dessen Wassermassen schließlich über den Golf von Mexico in den Golfstrom münden. Auftriebswasser an den Westseiten der Kontinente führt zum Eintrag von Wassermassen, die am Xenobiotika-Transport noch gar nicht oder lange nicht mehr beteiligt waren. Das an den Polen absinkende Oberflächenwasser speist Tiefenströme, die weit über den Äquator hinausgehen und damit auch die Wasserumschichtungen in der Tiefsee in einen Xenobiotika-Transport mit einbeziehen.

Treffen Oberflächenströme aufeinander, besteht für die Wassermassen nur die Möglichkeit, in die Tiefe auszuweichen. Solche sogenannten „Konvergenzen“ bilden scharfe Grenzen für die Gliederung der Wassermassen in den Weltmeeren, die bei der Antarktischen Konvergenz im Südatlantik sogar eine eindeutige Artengrenze darstellen.

Der Transport der Xenobiotika in die Tiefsee läuft global über einen weiteren Mechanismus: den organischen fall-out im Meer, den Detritus. Ausgeschiedene Stoffwechselprodukte und jedes abgestorbene Lebewesen, von der einzelligen Blaualge bis zum Blauwal, sinken in die Tiefe. Die Verwertung als Nahrung für andere Lebewesen bei diesem Absinken bedeutet in unserem Zusammenhang, daß mehrere Kreisläufe ineinander übergehen, die den Transport in die Tiefe lediglich verzögern.

4. Ausblick

Vor dem Hintergrund dieser vielfältigen Möglichkeiten des Massentransports in der Ökosphäre ist es nicht überraschend, daß sich bestimmte Chemikalien, die man als ökochemische Leitchemikalien ansprechen kann, bereits weltweit nachweisen lassen, obwohl Anwendung und Ausbreitung erst vor 35 bis 40 Jahren begonnen haben und obwohl der Einsatz regional beschränkt war. Selbst der mikrobiologische Abbau, der für die Erhaltung des Kohlenstoffkreislaufs seit Beginn der Evolution gesorgt hat, zeigt die Grenzen seiner Möglichkeiten auf: anders hätten die Weltmeere nicht in wenigen Jahrzehnten nachweisbare Mengen von Xenobiotika akkumulieren können.

Die globale Allgegenwart vieler anthropogener Chemikalien ist Realität (5,6,17, 18).

Gekürztes Literaturverzeichnis. Ausführliche Zitate im Gesamtverzeichnis.

- 1) WOODWELL 1967 2) JUNGE 1975 3) BOWDEN 1975 4) GOLDBERG 1975 5) EDWARDS 1975 6) RISEBROUGH et al. 1976 7) JUNGE 1977 8) CAUTREELS, von CAUVENBERGHE 1978 9) EICHMANN et al. 1979 10) KORTE 1980 11) GÜSTEN, PENZHORN 1974 12) PITTS, FINLAYSON 1975 13) BULLRICH 1976 14) HEYER 1977 15) REUTER 1978 16) DIETRICH, ULRICH 1968 17) KRÜGER-ATLAS 1977 18) BALLSCHMITER, ZELL 1980 19) ZELL, BALLSCHMITER 1980.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Ökologie der Vögel. Verhalten Konstitution Umwelt](#)

Jahr/Year: 1981

Band/Volume: [Supp_3](#)

Autor(en)/Author(s): Ballschmiter Karlheinz

Artikel/Article: [Ausbreitung der Xenobiotika in der Umwelt 149-160](#)