

Die oberen Windströmungen und die Abscheidung von künstlichen radioaktiven Aerosolen aus der Atmosphäre

Von JOHANNES M. FOX, *Institut für Strahlenforschung, Medizinische Akademie, Lübeck, Deutschland*

(Manuscript received January 14, 1969; revised version May 27, 1969)

ABSTRACT

Measurements of the concentration of atmospheric radioactivity show a distinctly seasonal variation of the course of the vertical profiles. In spring the concentration of radioactivity increases rapidly with altitude when passing from the upper troposphere into the lower stratosphere. In summer the increase is only moderate, in autumn it is low, but in winter a greater increase is observed, which reaches its maximum value during spring. Additionally a special evaluation of the worldwide Sr-90 data (1958–1965) indicates that the meridional transport of radioactive aerosols depends on the meridional distribution of the zonal wind velocity, and on the gradient of concentration created by the conditions of injection of radioactive debris from nuclear tests. Thus one may conclude, that the process of eddy diffusion is the main cause of the meridional transport and the vertical deposition of radioactive aerosols from the stratosphere. In the spring the lower stratosphere is filled by a greatly enlarged supply of radioactive material, but in the autumn the stratosphere is depleted because of the lack of supply. A tropopause mechanism is not at all necessary if the fallout phenomena are considered in this "dynamic" manner.

ZUSAMMENFASSUNG

Messungen der Radioaktivitätskonzentration im Bereich der Tropopause zeigen einen deutlich von der Jahreszeit abhängigen Verlauf in den Vertikalprofilen. Im Frühjahr nimmt die Radioaktivitätskonzentration mit steigender Höhe beim Übergang aus der Troposphäre in die untere Stratosphäre rapide zu, im Sommer mäßig, im Herbst nur wenig, während im Winter ein erneuter Anstieg beobachtet wird, der im Frühjahr sein Maximum erreicht. Durch eine spezielle Auswertung der weltweiten Sr-90 Daten von 1958–1965 kann gezeigt werden, daß der Meridionaltransport von radioaktiven Aerosolen von der meridionalen Verteilung der zonalen Windgeschwindigkeiten und von dem durch die Injektion bei Kernwaffentests hervorgerufenen Konzentrationsgefälle abhängig ist. Dies legt den Schluß nahe, daß der Prozeß der eddy diffusion die Hauptursache sowohl für den Meridionaltransport als auch für die Vertikalabscheidung radioaktiver Aerosole aus der Stratosphäre ist. Es kommt im Frühjahr zu einer Auffüllung der unteren Stratosphäre mittlerer Breiten durch einen stark erhöhten Nachschub an radioaktivem Material und im Herbst zu einer Entleerung, da der Nachschub geringer wird. Ein Tropopausenmechanismus ist für diese „dynamische“ Betrachtungsweise der Phänomene das Fallout nicht mehr erforderlich.

1. Einleitung

Die Beobachtungsdaten vor allem der letzten Jahre deuten mehr und mehr darauf hin, daß nicht Konvektionsströmungen oder geschlossene Zirkulationssysteme sondern daß vielmehr der Prozeß der „eddy diffusion“ der entschei-

dende Motor für den Transport radioaktiver Aerosole in der Stratosphäre und für deren Abscheidung am Boden ist. Andererseits zeigen die Messungen der Vertikalprofile der Radioaktivitätskonzentration im Bereich des Übergangs von der Stratosphäre zur Troposphäre einen starken Sprung, der die Annahme zu

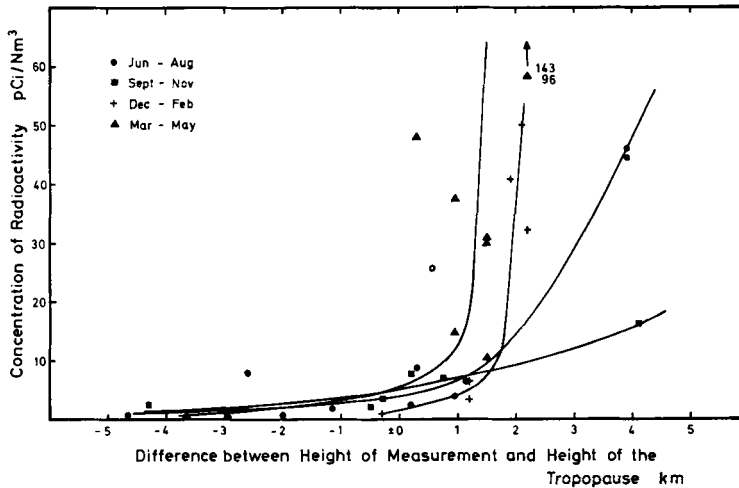


Abb. 1. Jahreszeitliche Vertikalprofile der Radioaktivitätskonzentration im Bereich der Tropopause.

rechtfertigen scheint, daß die Tropopause bei den Abscheidungsvorgängen aus der Stratosphäre einen erheblichen Einfluß hat. Hierin liegt ein gewisser Widerspruch. Denn nach Emden (1913) erzeugt allein das Gleichgewicht zwischen Ein- und Ausstrahlung in einer ruhenden Atmosphäre ein bodennahes Gebiet mit negativem vertikalem Temperaturgradienten mit einem darüber gelagerten Gebiet praktischer Isothermie und damit an der Übergangsstelle eine Tropopause. Diese ist so gesehen ein Gebilde statischer Genese. Durch den Knick im vertikalen Temperaturgradienten wird die Tropopause zwar ein Hindernis für einen adiabatischen Massenfluß darstellen, aber es ist nicht einzusehen, wie dadurch eine Sprungstelle im vertikalen Diffusionskoeffizienten entstehen kann.

Diese Überlegungen haben den Autor dazu geführt, bei der Deutung der seinerzeit gemeinsam mit O. C. Allkofer unternommenen Radioaktivitätsmessungen in der Atmosphäre bis in 35 km Höhe ein „dynamisches“ Konzept zugrunde zu legen und Gedanken aus der Nullschicht-Konzeption von Faust (1954 und 1968) in diese Überlegungen zu übertragen, Allkofer & Fox (1966).

In dieser Arbeit werden die bisher unveröffentlichten Daten von 33 Meßflügen im Bereich der Tropopause aus dem Jahre 1964/65 vorgelegt. Diese Messungen der Änderung der Radioaktivitätskonzentration beim Übergang von der Stratosphäre in die Troposphäre zeigen

eine deutliche jahreszeitabhängige Variation, die das Wechselspiel von Auffüllung und Entleerung der unteren Stratosphäre demonstriert, welches auch Newell (1961) auf Grund seiner Daten vorgeschlagen hat. Dieser Prozeß wiederum ist nur zu verstehen, wenn er eng mit dem Meridionaltransport der radioaktiven Kernwaffenrückstände verknüpft wird. Daher wurden die langjährigen, weltweiten Sr-90 Daten (1958–1965), die Volchok (1966) mitgeteilt hat, einer speziellen numerischen Analyse unterzogen um zu zeigen, daß tatsächlich eine enge Korrelation zwischen Konzentrationsgefälle und mittlerer Windgeschwindigkeit einerseits und Transport und Abscheidung von radioaktivem Material andererseits besteht.

2. Ergebnisse

Die Abb. 1 zeigt das Ergebnis einer Auswertung von 33 Meßflügen, welche im Zeitraum 1964/65 durchgeführt wurden, um speziell den Ausscheidungsmechanismus an der Grenze der Stratosphäre zur Troposphäre zu studieren. Diese Flüge fanden im Rahmen eines umfangreichen Programms zur Messung der Radioaktivitätskonzentration in der Atmosphäre bis in 35 km Höhe statt. Bei den hier ausgewerteten Flügen wurden die radioaktiven Aerosole auf Filtern in einem Gerät niedergeschlagen, das vorher in einem Hochgeschwindigkeitswindkanal der Aerodynamischen Versuchsanstalt

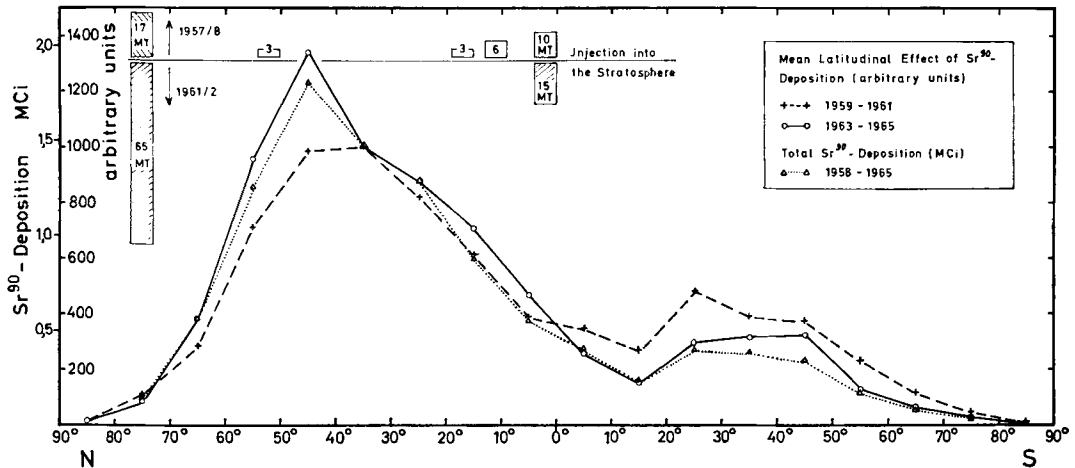


Abb. 2. Breitenverteilung der mittleren jährlichen Sr-90 Abscheidung am Boden während der beiden Kernwaffentestfreien Perioden 1959-1961 und 1963-1965 und Breitenverteilung der kumulierten Sr-90 Abscheidung am Boden während des gesamten Zeitraumes 1958-1965.

Göttingen geeicht worden war. Einzelheiten über das gemeinsam mit O. C. Allkofer durchgeführte Programm und über die Meßtechnik sind in Allkofer & Fox (1966) und Allkofer, Fox & Hauser (1967) beschrieben.

In der Abbildung sind die gemessenen Werte für die Konzentration der Gesamtradioaktivität in Abhängigkeit von der Flughöhe relativ zur aktuellen Lage der Tropopause aufgetragen. Die Flüge fanden über Nordwestdeutschland statt. Die meteorologischen Daten (Lage der Schicht des maximalen Windes und der Tropopause) wurden dem Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes (Aerologische Beobachtungen des täglichen Wetterberichtes) entnommen. Zugrunde liegen die Aufstiege folgender Stationen: Schleswig, Emden, Hannover und Köln. Die Daten von der zentral gelegenen Station Emden ($53^{\circ}22' \text{ N}$, $07^{\circ}12' \text{ O}$) wurden dabei bevorzugt gewertet.

Als interessantestes Ergebnis der Messungen sind die jahreszeitlichen Unterschiede in den Vertikalprofilen anzusehen. Zwar reichen die Daten nicht aus, um den mittleren Verlauf der Profile während der vier Jahreszeiten (wie es durch die ausgezogenen Linien angedeutet ist) mit Sicherheit zu belegen, aber die Tendenz in den Verläufen tritt eindeutig hervor, und das ist in diesem Zusammenhang entscheidend. Im Frühjahr steigt die Radioaktivitätskonzentration im Bereich der Tropopause mit zunehmen-

der Höhe rapide an, im Sommer mäßig, im Herbst nur wenig, um im Winter wieder einen stärkeren Anstieg aufzuweisen, welcher im Frühjahr ein Maximum erreicht.

Dieses Verhalten könnte dadurch erklärt werden, daß im Frühjahr ein Barrierenmechanismus im Bereich der Tropopause wirksam wird, der sich im Herbst nur wenig oder überhaupt nicht auswirkt. Gerade das Gegenteil ist aber der Fall. Der bekannte Effekt des Frühjahrsmaximums der Radioaktivitätsabscheidung am Boden zeigt, daß die Ausscheidungsraten aus der Stratosphäre gerade im Frühjahr stark erhöht sind. Das bedeutet aber, daß offenbar im Frühjahr der Nachschub an radioaktivem Material in der unteren Stratosphäre außerordentlich stark zunehmen muß, damit trotz erhöhter Ausscheidungsraten das Konzentrationsgefälle im Vertikalprofil ansteigt, während im Herbst dieser Nachschub ausbleibt und daher ein Effekt gefunden wird, der einer Entleerung der unteren Stratosphäre gleichkommt. Dieser Mechanismus kann nur funktionieren, wenn der meridionale Transport radioaktiver Aerosole von den meridionalen Gradienten der zonalen Windgeschwindigkeit einerseits und der Konzentration der Aerosole andererseits abhängig ist. Die enge Korrelation zwischen den Breitenkreis-parallelen Winden und der Fallout-Abscheidung wurde von Newell (1963) und Allkofer & Fox (1966)

gezeigt. Diese führt zu der bekannten Breitenverteilung des Fallout am Boden mit dem ausgeprägten Maximum um 40° geogr. Breite. Um die Abhängigkeit dieser Breitenverteilung von der anfänglichen Lokalisation des durch Kernwaffentests injizierten radioaktiven Materials zu zeigen, wurden die von Volchok (1966) mitgeteilten Daten der weltweiten Sr-90 Abscheidung am Boden einer speziellen Analyse unterworfen. Die Daten für die Breitenverteilung der jährlichen Sr-90 Abscheidung am Boden während des Zeitraums 1958 bis 1965 wurden über die beiden kernwaffentestfreien Perioden 1959–1961 und 1963–1965 gemittelt, um mögliche individuelle meteorologische Variationen weitgehend auszuschließen. Die Abb. 2 zeigt diese mittlere jährliche Breitenverteilung der Sr-90 Abscheidung am Boden für beide Perioden, aufgetragen in willkürlichen Einheiten. Um die jährlichen Schwankungen auszuschalten, ist es erforderlich, daß jedes Jahr des Mittelungszeitraumes mit dem gleichen Gewicht eingeht. Dies ist aber nicht gewährleistet, da die jährlichen Ausscheidungsmengen sehr stark mit der Ausgangskonzentration in der Stratosphäre variieren. Daher wurden die jährlichen Kurven vor der Mittelwertbildung willkürlich auf einen gemeinsamen Punkt normiert, so daß der Wert für das Breitenband 30° bis 40° N jeweils 1000 beträgt. (Die in der Abb. 2 punktiert gezeichnete Kurve der kumulierten Sr-90 Abscheidung des gesamten Zeitraumes 1958–1965 hat einen ganz ähnlichen Verlauf wie die Kurve der zweiten Periode 1963–1965. Dies zeigt, wie sehr durch die hohen Injektionsraten in der zweiten Testperiode die Daten aus der Periode 1959–1961 überspielt werden und wie notwendig daher die Normierung der Daten ist.) Um lokale Effekte möglichst auszuschließen, wurden die Kurven der Testperioden Jan. bis Dez. 1958 und Okt. 1961 bis Dez. 1962 nicht verwertet.

Die beiden testfreien Perioden 1959–1961 und 1963–1965 zeichnen sich durch eine unterschiedliche Ausgangsverteilung der Radioaktivitätskonzentration in der Stratosphäre aus. Dies wurde in der Abb. 2 durch Angabe der Injektionsmengen von radioaktivem Material (in Energieäquivalenten) angedeutet. Vor der ersten Periode wurden in die polare und tropische Zone der Stratosphäre 17 bzw. 19 MT TNT Energieäquivalente injiziert, die Ausgangskonzentration an radioaktivem Material war in beiden Zonen etwa die gleiche. Dagegen wurde

vor Beginn der zweiten Periode in die polare Stratosphäre etwa die vierfache Menge an radioaktivem Material injiziert wie in die tropische Stratosphäre, nämlich 65 MT TNT gegenüber 15 MT TNT, Fox (1966). Der Kurvenverlauf für die Periode 1963–1965 zeigt dementsprechend eine deutliche Verlagerung des Abscheidungsmaximums nach Norden gegenüber der Breitenverteilung für 1959–1961, die sich allein aus den unterschiedlichen Injektionsraten vor Beginn beider Perioden erklärt. Diese Tatsache wird noch verdeutlicht wenn man die Abscheidung an der Südhälfte der Erde berücksichtigt: 1959–1961 wurde auf der Nordhalbkugel der Erde etwa die dreifache Menge an Sr-90 abgeschieden wie auf der Südhälfte, 1963–1965 war es jedoch mehr als die viereinhalbfache Menge. Diese bevorzugte Abscheidung auf der nördlichen Hemisphäre geht allein auf die vermehrte Injektion an radioaktivem Material in die polare Stratosphäre während der zweiten Kernwaffentestperiode 1961/62 zurück. Der meridionale Transport erfolgt offenbar in Abhängigkeit von dem Konzentrationsgefälle in der Stratosphäre, wie es bei Diffusionsprozessen zu erwarten ist.

3. Diskussion

Diese Ergebnisse lassen sich auf die einfachste Weise verstehen, wenn man annimmt, daß sowohl der meridionale Transport als auch die vertikale Abscheidung von radioaktiven Aerosolen in der unteren Stratosphäre in überwiegendem Maß durch den Prozeß der „eddy diffusion“ verursacht werden, wobei die Diffusionskoeffizienten an die Meridionalverteilung der oberen Winde gebunden sind. Für diese Annahme spricht vor allem die enge Korrelation der Fallout-Phänomene mit den oberen Windströmungen, die sowohl hinsichtlich der Breitenverteilung als auch bezüglich der jahreszeitlichen Variationen nachgewiesen werden kann. Die Korrelation in den Meridionalverteilungen von Fallout und zonaler Zirkulation kann aus dem Vergleich der Abbildungen 2 und 3 erkannt werden. Die Abb. 3 zeigt einen Meridionalchnitt durch die Atmosphäre der Nordhalbkugel bis in 22 km Höhe. Die eingezeichneten Isotachenlinien der mittleren jährlichen Zonalwindkomponenten (gemittelt über die geogr. Länge) sind einer Arbeit von Holopainen (1966)

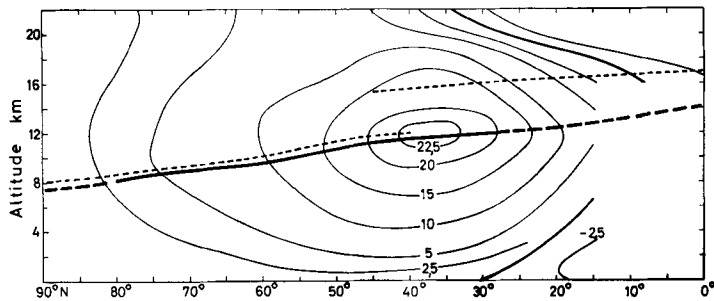


Abb. 3. Meridionalverteilung der mittleren jährlichen Zonalwindkomponente, gemittelt über die geographische Länge. Einheiten: m sec^{-1} . Stark ausgezogene Linie: mittlere jährliche Lage der hochtroposphärischen Maximalwindschicht nach Faust (1960), gepunktete Linie: mittlere jährliche Tropopausenlage.

entnommen und basieren auf den von Crutcher (1959) mitgeteilten Karten der mittleren Winde; sie wurden unter Berücksichtigung der Neigung der Isobarenflächen umgezeichnet und durch die Daten von Oort (1965) für die Niveaus von 100 mb bis 30 mb ergänzt. (Der Anschluß der Daten von Oort, die nur den Zeitraum von IGY 1957/58 umfassen, an diejenigen von Holopainen, die über einen Mindestzeitraum von 5 Jahren gemittelt sind, läßt sich ohne Schwierigkeiten durchführen.) Die Daten von Crutcher (1959), Holopainen (1966) und Oort (1965) zeigen, daß die Isolinien sowohl der „standing eddy“-als auch der „transient eddy“-Komponente der oberen Horizontalwinde prinzipiell die gleiche meridionale Verteilung aufweisen wie die Isotachen in Abb. 3. Demgemäß sollte m.E. das gleiche für die Diffusionskoeffizienten gelten, und es ist evident, daß daraus qualitativ die in Abb. 2 gezeigten Breitenverteilungen des Sr-90 am Boden resultieren können, wenn man zusätzlich noch die Injektionsbedingungen für Sr-90 in der Stratosphäre berücksichtigt.

Hinsichtlich der jahreszeitlichen Variationen der Sr-90 Abscheidung am Boden wurden die Sr-90 Daten von Volchok (1966) einem analogen Auswerteverfahren unterzogen, wie es hinsichtlich der Breitenverteilung in Abb. 2 geschehen ist. Das Ergebnis bestätigt, jetzt gesichert durch Mittelung langjähriger Daten, die Beobachtungen, die z.B. von Newell (1961) aber auch anderen Autoren mitgeteilt wurden: Das Frühjahrsmaximum der Radioaktivitätsabscheidung am Boden verlagert sich mit fortschreitender Jahreszeit von Süden nach Norden, etwa parallel mit der Nordwärtsverlagerung des Kerns der hochtroposphärischen Maximalwind-schicht. Die Daten von Holopainen (1967) und

Oort (1964) zeigen dies auch für die „standing eddy“- und „transient eddy“-Komponenten der oberen Horizontalwindkomponenten. Dadurch läßt sich die meridionale Verlagerung des Abscheidungsmaximums mit fortschreitender Jahreszeit zwanglos erklären. Die Intensitätsunterschiede, die vor allem die „transient eddy“-Komponente betreffen, erklären das Auftreten des Frühjahrsmaximums als solchem.

Gegen diese These, daß „eddy diffusion“-Prozesse mit an das zonale Windfeld gebundenen Diffusionskoeffizienten für Transport und Abscheidung radioaktiver Aerosole verantwortlich sind, spricht das Modell von Davidson, Friend & Seitz (1966). Ihr Modell basiert auf der Annahme von „eddy diffusion“-Prozessen als Hauptmotor für Transport und Abscheidung der radioaktiven Aerosole. Die Autoren berücksichtigen außerdem die Partikelfallgeschwindigkeit nach Berechnungen von Junge, Chagnon & Manson (1961), wash-out-Effekte in der Troposphäre proportional der von Möller (1951) mitgeteilten Breitenverteilung der jährlichen Niederschläge und schließlich Effekte der Tropopause. Das Ergebnis der Berechnungen, denen jeweils unterschiedliche Annahmen über die Verteilung der Größen der horizontalen und vertikalen Diffusionskoeffizienten zugrundelagen, ist höchst bemerkenswert: Man erzielte das beste Ergebnis bei Annahme eines konstanten horizontalen Diffusionskoeffizienten in der gesamten Atmosphäre und je eines konstanten vertikalen Diffusionskoeffizienten für die Stratosphäre bzw. die Troposphäre. Notwendige Bedingung für befriedigende Ergebnisse war, daß die Achsenneigung der Hauptdiffusionsrichtung parallel zur mittleren jährlichen Tropopausenkonfiguration gewählt wurde, wobei man im

Bereich der Bruchstelle zwischen $33,5^\circ$ und $46,5^\circ$ geographischer Breite eine lineare Verbindung der beiden Tropopausenäste annahm.

Die Annahme einer erhöhten Abscheidungsrate im Bereich der Bruchstelle der Tropopause verschlechterte die Ergebnisse erheblich. Dies ist verständlich, nachdem Danielsen (1959) und Staley (1962) seinerzeit die Durchlässigkeit der Tropopause in weiten Bereichen außerhalb der Bruchstelle der Tropopause festgestellt haben. Erstaunlich ist dagegen und für die hier gesetzte These von großer Bedeutung, daß das Modell von Davidson, Friend & Seitz unbefriedigende Ergebnisse liefert, wenn die Diffusionskoeffizienten an die Verteilung der oberen Winde gekoppelt werden. Zwischen der hier vertretenen These, die die Diffusionskoeffizienten an die oberen Winde koppelt und auf diese Weise die Phänomene des Fallout ohne die Hilfe eines Tropopausenmechanismus qualitativ gut beschreibt, und der quantitativen Modellrechnung tritt also ein Widerspruch zutage. Es stellt sich die Frage, wie dieser aufzulösen ist.

Zunächst kann gesagt werden, daß die Annahme konstanter Diffusionskoeffizienten sicherlich eine grobe Näherung an die tatsächlichen Verhältnisse ist, die durch die zusätzliche Annahme über die Achsenneigung der Hauptdiffusionsrichtung verbessert wird. Diese Voraussetzung bringt scheinbar die Tropopause wieder ins Spiel, obwohl Rechnungen unter der Annahme einer Tropopausenbruchstelle nicht zum Ziel geführt haben.—Für die mittleren und hohen Breiten liegt die Tropopause parallel zur hochtroposphärischen Schicht maximaler Windgeschwindigkeit, wie aus Abb. 3 hervorgeht. In diesem Bereich ist es selbstverständlich, daß die Hauptachse der Diffusion diese Richtung einnimmt, die Existenz der Tropopause wäre dazu nicht erforderlich. Im Bereich der tropischen Tropopause ist dagegen keine Beziehung zum meridionalen Windfeld festzustellen (vgl. Abb. 3).

Eine Erklärung hierfür könnte man finden, wenn man mit Faust (1954 und 1968) der hochtroposphärischen Maximalwindschicht den Charakter einer Nullschicht zulegt (auch wenn diese Frage noch nicht vollständig gesichert ist). Aus der Existenz einer Nullschicht folgt nach Attmannspacher (1961) die Auflösung der „statischen“ Tropopause im Sinne von Emden (1913) (s. Abschn. 1) und die Erzeugung einer „dynamischen“ Tropopause durch die Null-

schicht. Diese würde sich vollständig in das hier entworfene Bild eingliedern.

Die Maximalwindschicht hat aber in den tropischen Breiten keinen Nullschichtcharakter; daher entfällt für diese Region die Verbindung der Tropopause mit dem zonalen Windfeld; darauf hat Attmannspacher (1961) ausdrücklich hingewiesen. Der tropische Zweig der Tropopause ist also als „statische“ Tropopause anzusprechen. Unter diesen Umständen ist der Schluß möglich, daß in den tropischen Breiten andere Prozesse als „eddy diffusion“ bei Transport und Abscheidung radioaktiver Aerosole eine entscheidende Rolle spielen und daß hier der Grund für die scheinbaren Widersprüche zwischen der hier vertretenen These und den Rechnungen von Davidson, Friend & Seitz zu suchen ist. Für diese Behauptung sprechen auch Daten von Feely *et al.* (1966), aus denen hervorgeht, daß der horizontale Gradient der Sr-90 Konzentration in der Stratosphäre seine ursprüngliche Richtung von Norden nach Süden, die durch die Injektion bedingt ist, umkehrt. Dieser Effekt ist durch Diffusion allein nicht gut erklärlich. Außerdem ist auf die besonderen Verhältnisse der tropischen zonalen Zirkulation hinzuweisen, wie z. B. die Ost-West-Umstellung und die 26-Monats-Oszillation.

Abschließend sei noch eine spezielle Frage im Zusammenhang mit den hier vorgelegten Messungen erörtert. Der starke Sprung in der Radioaktivitätskonzentration in den Vertikalprofilen liegt in der Nähe der Tropopause. Dies könnte auf einen entscheidenden Einfluß der Tropopause auf die Abscheidung der radioaktiven Aerosole schließen lassen. Jedoch ist auch dies ein Ergebnis der Verteilung der Diffusionskoeffizienten. Im Bereich der Maximalwindschicht nehmen die vertikalen Diffusionskoeffizienten besonders hohe Werte an, Newell (1963). Die Abscheidung ist in diesem Gebiet also beschleunigt. Dadurch kommt es zu einem Ansteigen des vertikalen Gradienten der Radioaktivitätskonzentration in der direkt darüber liegenden Schicht, ein Effekt, den Machta (1966) in speziellen Modellrechnungen gezeigt hat.

4. Schluß

Die Messungen der Radioaktivitätskonzentration an der Grenze zwischen Stratosphäre und Troposphäre zeigen eine jahreszeitliche Varia-

tion, die sich zwanglos in eine allgemeine Betrachtungsweise der Fallout-Phänomene auf der Basis von „eddy diffusion“ Prozessen einfügen. Für mittlere und hohe geographische Breiten kann für die Erklärung der Phänomene auf einen aktiven Tropopausenmechanismus verzichtet werden.

Mein Dank gilt besonders Herrn Dr. H. Faust und Herrn Dr. Huslein, Deutscher Wetterdienst,

Offenbach, für ausführliche und anregende Diskussionen. Ich danke dem Zentralinstitut für Atomenergie Dokumentation (ZAED), Frankfurt, für die zur Verfügungstellung von spezieller Literatur. Vor allem möchte ich mich bei Frau I. Fleischhauer und Frau G. Wegener für die Hilfe bei der Auswertung und Darstellung der Daten bedanken.

LITERATUR

- Allkofer, O. C. & Fox, J. M. 1966. New conceptions on the meteorology of stratospheric fallout from nuclear weapon tests. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A* 15, 299–317.
- Allkofer, O. C., Fox, J. M. & Hauser, H. 1966. Nuklidzusammensetzung des stratosphärischen Fallout drei Jahre nach Beendigung der Kernwaffentestserien in der Atmosphäre. *Atomkernenergie* 11, 467–476.
- Attmannspacher, W. 1960. Über die Existenz einer hochstratosphärischen Nullschicht 1. Art. *Meteorol. Rdsch.* 13, 38–45.
- Attmannspacher, W. 1961. Nullschicht und Tropopause. *Geofisica Pura e Appl.* 48, 151–166.
- Crutcher, H. L. 1959. Upper wind statistics charts of the northern hemisphere; Office of the Chief of the U.S. Naval Operations; Technical Paper No. 41, U.S. Weather Bureau.
- Danielsen, E. F. 1959. The laminar structure of the atmosphere and its relation to the concept of tropopause. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A* 11, 293–322.
- Davidson, B., Friend, J. P. & Seitz, H. 1966. Numerical models of diffusion and rainout of stratospheric radioactive materials. *Tellus*, 18, 301–315.
- Emden, R. 1913. Über Strahlungsgleichgewicht und atmosphärische Strahlungen, *Sitzungsbericht d. math. phys. Kl. d. K.B. Ak. d. Wiss.* 55.
- Faust, H. 1954. Nullschichteffekt und Frontalzonen. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A* 6, 334–369.
- Faust, H. 1960. Die Schwachwindsschicht in der unteren Stratosphäre als Nullschicht. *Meteorol. Rdsch.* 13, 77–85.
- Faust, H. 1968. *Der Aufbau der Erdatmosphäre*. „Die Wissenschaft“, Bd. 127, 79–94. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- Feely, H. W., Seitz, H., Lagomarsino, R. J. & Biscaye, P. E. 1966. Transport and fallout of stratospheric radioactive debris. *Tellus* 18, 316–328.
- Fox, J. M. 1966. *Untersuchungen des stratosphärischen radioaktiven Fallout von Kernwaffentests*, pp. 98–99 (unveröffentlichter Bericht). Inst. f. Kernphysik, Kiel.
- Holopainen, E. O. 1966. Some dynamic applications of upperwind statistics. *Finn. Meteorol. Off. Contrib.* 62, 1–22.
- Holopainen, E. O. 1967. On the mean meridional circulation and the flux of angular momentum over the northern hemisphere. *Tellus* 19, 1–13.
- Junge, C. E., Chagnon, C. W. & Manson, J. E. 1961. Stratospheric aerosols. *Journ. Meteorol.* 18, 81–108.
- Machta, L. 1966. Some aspects of simulating large scale atmospheric mixing. *Tellus* 18, 355–362.
- Möller, F. 1951. Vierteljahreskarten des Niederschlags für die ganze Erde. *Peterm. Geogr. Mitt.* 1, 145–156.
- Newell, R. E. 1963. The general circulation of the atmosphere and its effects on the movements of trace substances. *Journ. Geoph. Res.* 68, 3949–3962.
- Newell, R. E. 1961. The transport of trace substances in the atmosphere and their implications for the general circulation of the stratosphere. *Geofis. Pura e Appl.* 49, 137–158.
- Oort, A. H. 1964. Direct measurement of the meridional circulation in the stratosphere during the IGY. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A* 14, 141–148.
- Oort, A. H. 1965. The climatology of the lower stratosphere during the IGY and its implications for the regime of circulation. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A* 14, 243–278.
- Staley, D. O. 1962. On the mechanism of mass and radioactivity transport from stratosphere to troposphere. *J. Atm. Sci.* 19, 450–467.
- Volchok, H. L. 1966. Tables of Average Sr-90 Fallout and Precipitation. *HASL Fallout Program, Quart. Summ. Rep. July 1, HASL-172*, I-92–I-140.

ВЕТРЫ В ВЫСОКИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ И ВЫПАДЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОАКТИВНОГО АЭРОЗОЛЯ ИЗ АТМОСФЕРЫ

Измерения концентрации атмосферной радиоактивности выявляют четкие сезонные вариации хода ее вертикальных профилей. Весной концентрации радиоактивности быстро увеличиваются с высотой при прохождении из верхней тропосферы в нижнюю стратосферу. Летом это увеличение довольно умеренное, осенью оно мало, а зимой наблюдается большее увеличение, достигающее максимальных значений весной. В дополнение к этому специальное рассмотрение глобальных данных по Sr-90 за период 1958–1965 гг. показывает, что меридиональный перенос радиоактивного аэрозоля зависит от меридионального распределения зональной

скорости ветра и от градиента концентрации создаваемого условиями ввода радиоактивных загрязнений от ядерных испытаний. Поэтому можно заключить, что процесс турбулентной диффузии является главной причиной меридионального переноса и вывода радиоактивного аэрозоля из стратосферы. Весной нижняя стратосфера наполняется благодаря сильно увеличенному притоку радиоактивного материала, а осенью она очищается из-за отсутствия притока. Поэтому механизм действия тропопаузы оказывается совершенно ненужным, если явления выпадения рассматривать таким «динамическим» образом.