



760
2022

Berichte

zur Polar- und Meeresforschung

Reports on Polar and Marine Research

**Messungen des oberflächennahen Ozons
an Bord von Forschungsschiffen im Atlantik und
an der GEORG-VON-NEUMAYER-STATION in der
Antarktis von 1977 bis 1996**

Peter Winkler

Die Berichte zur Polar- und Meeresforschung werden vom Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven, Deutschland, in Fortsetzung der vormaligen Berichte zur Polarforschung herausgegeben. Sie erscheinen in unregelmäßiger Abfolge.

Die Berichte zur Polar- und Meeresforschung enthalten Darstellungen und Ergebnisse der vom AWI selbst oder mit seiner Unterstützung durchgeführten Forschungsarbeiten in den Polargebieten und in den Meeren.

Die Publikationen umfassen Expeditionsberichte der vom AWI betriebenen Schiffe, Flugzeuge und Stationen, Forschungsergebnisse (inkl. Dissertationen) des Instituts und des Archivs für deutsche Polarforschung, sowie Abstracts und Proceedings von nationalen und internationalen Tagungen und Workshops des AWI.

Die Beiträge geben nicht notwendigerweise die Auffassung des AWI wider.

Herausgeber

Dr. Horst Bornemann

Redaktionelle Bearbeitung und Layout
Birgit Reimann, Susan Amir Sawadkuhi

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Am Handelshafen 12
27570 Bremerhaven
Germany

www.awi.de
www.awi.de/reports

Der Erstautor bzw. herausgebende Autor eines Bandes der Berichte zur Polar- und Meeresforschung versichert, dass er über alle Rechte am Werk verfügt und überträgt sämtliche Rechte auch im Namen seiner Koautoren an das AWI. Ein einfaches Nutzungsrecht verbleibt, wenn nicht anders angegeben, beim Autor (bei den Autoren). Das AWI beansprucht die Publikation der eingereichten Manuskripte über sein Repositorium ePIC (electronic Publication Information Center, s. Innenseite am Rückdeckel) mit optionalem print-on-demand.

The Reports on Polar and Marine Research are issued by the Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (AWI) in Bremerhaven, Germany, succeeding the former Reports on Polar Research. They are published at irregular intervals.

The Reports on Polar and Marine Research contain presentations and results of research activities in polar regions and in the seas either carried out by the AWI or with its support.

Publications comprise expedition reports of the ships, aircrafts, and stations operated by the AWI, research results (incl. dissertations) of the Institute and the Archiv für deutsche Polarforschung, as well as abstracts and proceedings of national and international conferences and workshops of the AWI.

The papers contained in the Reports do not necessarily reflect the opinion of the AWI.

Editor

Dr. Horst Bornemann

Editorial editing and layout
Susan Amir Sawadkuhi

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Am Handelshafen 12
27570 Bremerhaven
Germany

www.awi.de
www.awi.de/en/reports

The first or editing author of an issue of Reports on Polar and Marine Research ensures that he possesses all rights of the opus, and transfers all rights to the AWI, including those associated with the co-authors. The non-exclusive right of use (einfaches Nutzungsrecht) remains with the author unless stated otherwise. The AWI reserves the right to publish the submitted articles in its repository ePIC (electronic Publication Information Center, see inside page of verso) with the option to "print-on-demand".

*Titel: Forschungsschiff Meteor I (links) mit Ozonmessgerät im Peildeckhaus 1976
(Foto: J. Kettler) und Spurenstoffobservatorium (rechts) südlich der Georg-von-Neumayer-Station 1982
(Foto: G. König-Langlo)*

*Cover: Research vessel Meteor I (left) with ozone measuring device at the compass bridge 1976
(photo: J. Kettler) and air chemistry observatory (right) south of the Georg-von-Neumayer-Station 1982
(Photo: G. König-Langlo)*

Messungen des oberflächennahen Ozons an Bord von Forschungsschiffen im Atlantik und an der GEORG-VON-NEUMAYER-STATION in der Antarktis von 1977 bis 1996

Peter Winkler

Please cite or link this publication using the identifiers

<https://hdl.handle.net/10013/epic.6483bc99-b555-4a5b-a3da-4ca7ead1028f>

https://doi.org/10.48433/BzPM_0760_2022

ISSN 1866-3192

Verfasser

Dr. Peter Winkler

Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg (i. R.)

Jetzt: Hechenbergstr. 9, 82362 Weilheim

E-Mail: pu_winkler@t-online.de

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----|
| Vorwort | 2 |
| Zusammenfassung | 3 |
| Summary | 4 |
| 1. Beobachtungen zum oberflächennahen Ozon über dem Atlantik | 5 |
| 2. Das Messverfahren | 8 |
| 3. Die Ansaugstellen auf den verschiedenen Schiffen | 12 |
| 3.1 FS <i>Meteor I</i> | 12 |
| 3.2 FS <i>Meteor II</i> | 13 |
| 3.3 FFS <i>Anton Dohrn</i> | 14 |
| 3.4 FFS <i>Walther Herwig</i> | 14 |
| 3.5 FS <i>Polarstern</i> | 15 |
| 3.6 Eisbrecher <i>Akademik Fedorov</i> | 16 |
| 3.7 Versorger <i>Polar Queen</i> | 17 |
| 3.8 Versorger <i>Polarbjörn</i> | 17 |
| 3.9 S.A. <i>Agulhas</i> | 18 |
| 3.10 Eisbrecher <i>Ymer</i> | 18 |
| 4. Breitenverteilung des oberflächennahen Ozon | 20 |
| 5. Tagesgänge in Nord- und Südhemisphäre | 27 |
| 6. Jahregänge in Nord- und Südhemisphäre | 39 |
| 7. Trends in Nord- und Südhemisphäre | 41 |
| 8. Ferntransport | 47 |
| 9. Oberflächennahes Ozon an der ITCZ | 51 |
| 10. Ergebnisse der Ozonmessungen an der GvN-Station 1982 – 1996 | 60 |
| 11. Die wichtigsten Ergebnisse in Kurzform | 71 |
| 12. Anhang: Ergebnisse der Einzelreisen 1977 – 1996 | 73 |
| 13. Literaturverzeichnis | 150 |
| 14. Abkürzungsverzeichnis | 163 |
| Danksagung | 163 |
| Bildrechte | 164 |

VORWORT

Vom ehemaligen Meteorologischen Observatorium Hamburg aus wurden zwischen 1977 und 1996 Messungen des oberflächennahen Ozons überwiegend auf dem Atlantik zwischen 90° Nord und 76° Süd durchgeführt. Die Nord-Süd Verteilung sollte eine Aussage zu den Verhältnissen in unverschmutzter Luft ermöglichen in einer Zeit, als über dem Festland in Industriegebieten bereits Episoden mit photochemischer Ozonbildung bei strahlungsreichem Wetter festgestellt wurden. Die Messgeräte wurden von Personal des DWD oder von Forschungsinstituten betreut. Die auf Schreiber aufgezeichneten Daten wurden nach Ende der Reise ausgewertet.

Eine erste Veröffentlichung mit Ergebnissen erschien 1988 zu den bis 1986 gewonnenen Daten. In der jetzigen Arbeit wird eine Gesamtauswertung von allen Reisen vorgenommen.

An der deutschen *Georg-von-Neumayer-Station* und der Nachfolgestation *Neumayer-II* in der Antarktis wurde das oberflächennahe Ozon von 1982 bis 1996 ebenfalls gemessen. Die Messungen wurden von den Überwinterern des Alfred-Wegener-Instituts für Polarforschung betreut. Auch diese Ergebnisse wurden hier vollständig ausgewertet und dargestellt, da bisher nur Teilergebnisse veröffentlicht worden waren.

Auch wenn die Messungen lange Zeit zurückliegen, ist die Dokumentation aus mehreren Gründen bedeutsam:

- Es handelt sich um einen einmaligen Datensatz aus dem größtmöglichen Breitenbereich.
- Inzwischen entstandene neuere Literatur erlaubt eine umfassendere Dateninterpretation mithilfe zwischenzeitlich publizierter Erkenntnisse, als sie zur Zeit des Messprogrammes selbst verfügbar waren.
- Es zeigte sich, dass die atmosphärischen Verhältnisse weit komplexer sind, als bisher angenommen wurde. Chemie-Transport-Modelle sind noch nicht in der Lage, kleinskalige Austausch- und Transportvorgänge zu beschreiben. Messungen zeigen daher die realen natürlichen Vorgänge und können dazu dienen, noch immer bestehende Wissenslücken deutlich werden zu lassen.

Alle Betreuer der Ozonmessungen haben immer wieder Findigkeit bewiesen, wenn technische Probleme zu überwinden waren. Sie waren dabei auf eigenständige Lösungsansätze angewiesen, da die Kommunikationsmöglichkeiten zur damaligen Zeit noch sehr beschränkt waren.

Die Originalregistrierstreifen werden im Archiv des Deutschen Wetterdienstes in Leipzig aufbewahrt (Kärnerstr. 68, 04288 Leipzig). Alle Messdaten, die digital vorliegen, sind zudem über das Weltdatenzentrum PANGAEA Data Publisher for Earth & Environmental Science (<https://www.pangaea.de>) in Verbindung mit einer Creative Commons-Lizenz zugänglich.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Auswertung der Messungen des oberflächennahen Ozons von 77 Schiffsreisen zwischen 1977 und 1996 auf dem Atlantik umfasste die Breitenverteilung von 90°N bis 75°S, Nord-Süd-Schnitte durch die ITCZ, sowie Tages- und Jahrgänge und Trends. In der Breitenverteilung zeigte das Mischungsverhältnis in der Nordhemisphäre im Mittel doppelt so hohe Werte wie in der Südhemisphäre. Bei den Tropopausenbrüchen (22°N / S; 57°N / S; 75°N / S) traten sekundäre Maxima auf, da hier verstärkt Intrusionen von stratosphärischem Ozon stattfinden. Bei manchen Einzelreisen trat eine hohe Variabilität des oberflächennahen Ozons auf, bei anderen Reisen nicht. Eine hohe Variabilität wird den in diesen Breiten häufigen stratosphärischen Intrusionen zugeschrieben. Die mittleren Tagesgänge ergaben nur geringe Schwankungen von ± 2 ppb um den Mittelwert, wobei das Tagesmaximum vorwiegend auf den Vormittag und das Tagesminimum auf den Nachmittag fiel. Jahrgänge, gemittelt über 15 Breitengrade, ließen sich in der Nordhemisphäre nicht klar nachweisen, in der Südhemisphäre ergab sich in allen Breiten ein Sommerminimum. Das Verhalten des Ozonmischungsverhältnisses im Bereich der ITCZ erwies sich als sehr variabel: es können Maxima oder seltener Minima auftreten, häufig war ein deutlicher Anstieg des Mischungsverhältnisses beim Wechsel von der Süd- in die Nordhemisphäre zu verzeichnen und gelegentlich blieb das Ozonmischungsverhältnis nahezu unverändert. Es scheint zwei typische troposphärische Zustände zu geben: Im ersten Zustand weist die Nordhemisphäre deutlich höhere Ozonmischungsverhältnisse als die Südhemisphäre auf. Im zweiten Zustand besitzen beide Hemisphären ähnlich hohe Mischungsverhältnisse. Die Gründe dazu wurden anhand von Literaturergebnissen untersucht. In der Nordhemisphäre ergab sich kein Trend im Messzeitraum von 1977 bis 1996, abgesehen von einem Anstieg in hohen Breiten. In der Südhemisphäre zeigte sich in allen Breiten eine relativ einheitliche Zunahme.

An der *Georg-von-Neumayer-Station* und der Nachfolgestation *Neumayer-II* in der Antarktis wurde das Bodenozone von 1982 bis 1996 in einem besonderen Spurenstofflabor abseits der Hauptstation gemessen. Hier zeigte sich ein deutlicher Jahrgang mit einem Wintermaximum und einem Sommerminimum. Die Tagesgänge waren im Winter minimal, im Sommer etwas ausgeprägter. Im Zeitraum August bis Oktober kann episodenhaft ein nahezu vollständiger Ozonabbau festgestellt werden, der von aus Frostblumen freigesetztem Brom verursacht wird. In hohen nördlichen Breiten wurden vergleichbare Episoden auch bei den Schiffsmessungen gefunden. Bis 1991 nahm an der *Georg-von-Neumayer-Station* das Ozonmischungsverhältnis im Jahresmittel zu und blieb danach in etwa konstant. In der Antarktis spielt der katabatische Wind eine wesentliche Rolle, da mit ihm ständig aus höheren Niveaus dort vorhandene höhere Ozonmischungsverhältnisse zum Meeresniveau transportiert werden. Bei Triftschnee können sich starke elektrische Felder aufbauen, die an Metallteilen Sprühentladungen erzeugen. Dabei kann auch Ozon gebildet werden. Gerät dieses Ozon in die Ansaugleitung, so wird das Ozonmischungsverhältnis verfälscht.

SUMMARY

The analysis of near-surface ozone measurements from 77 ships cruises in the Atlantic between 1977 and 1996 included latitudinal average distributions from 90°N to 75°S, north-south cross-sections through the ITCZ, as well as daily and seasonal variations and trends. In the latitudinal distribution, the mixing ratio in the northern hemisphere was on average twice as high as in the southern hemisphere. Near the tropopause breaks (22°N / S; 57°N / S; 75°N / S) secondary maxima occurred because of frequent intrusions of stratospheric ozone. During some but not at all cruises, a high variability of ozone was found. This high variability was attributed to frequent stratospheric intrusions at distinguished latitudes.

The mean daily cycles showed only small variations of ± 2 ppb around the mean, with the daily maximum falling mostly in the morning and the daily minimum in the afternoon. Yearly cycles of ozone averaged over 15 degrees latitude could not be clearly detected in the northern hemisphere; in the southern hemisphere there was a summer minimum in all latitudes. The behaviour of the ozone mixing ratio across the ITCZ proved to be very variable: Here, peaks or rare minima may occur, but often a significant increase in mixing ratio was observed during the transition from the southern to the northern hemisphere and occasionally the ozone concentration remained almost unchanged. The reasons for these findings were investigated on the basis of literature results. The meridional distribution of ozone allows to conclude on two distinct states of the troposphere: in the first state the northern hemisphere shows much higher ozone mixing ratios than the southern hemisphere. In the second state, both hemispheres the mixing ratios of ozone are relatively uniform.

In the Northern Hemisphere no trend was detectable over the period 1977 to 1996, apart from a slight increase at high latitudes. In the southern hemisphere a relatively uniform increase in all latitudes was established for the whole period under investigation.

At the *Georg-von-Neumayer-Station* and its successor *Neumayer-II* in Antarctica, ground-near ozone was measured from 1982 to 1996 in a special trace substance observatory away from the main station. Here a clear yearly cycle with a winter maximum and a summer minimum was established. The daily cycles were minimal in winter, a little more pronounced in summer. Between August and October, an episodic almost complete depletion of ozone can occur, caused by bromine released from frost flowers. Similar episodes were also found at ship measurements at high northern latitudes. Until 1991, annual average ozone mixing ratios at the *Georg-von-Neumayer-Station* increased and remained approximately constant thereafter. In Antarctica, the catabatic wind plays an important role, which permanently transports ozone from higher levels where higher ozone mixing ratios are encountered to the sea level. In the case of drift snow, strong electric fields can build up, which may generate spray discharges on metal parts. Ozone can also be formed. If this artificially generated ozone enters the intake line, the ozone mixing ratio is distorted.

1. BEOBACHTUNGEN ZUM OBERFLÄCHENNAHEN OZON ÜBER DEM ATLANTIK

In den Jahren 1977 bis 1996 wurde auf zahlreichen Reisen deutscher Forschungsschiffe das oberflächennahe Ozon in der Grenzschicht über dem Atlantik gemessen. Während in Europa zu dieser Zeit schon Episoden mit Photosmog festgestellt wurden, war davon auszugehen, dass in unverschmutzter Luft noch weitgehend ungestörte Verhältnisse anzutreffen wären. Über dem Kontinent wird Ozon am Boden zerstört und tagsüber durch konvektiven und turbulenten Austausch aus der höheren Atmosphäre nach unten transportiert, weshalb sich ein ausgeprägter Tagesgang einstellt. Die Abbaugeschwindigkeit wird als Depositionsgeschwindigkeit bezeichnet. Über dem Ozean ist die Depositionsgeschwindigkeit gegenüber dem Festland sehr gering. Als verantwortlich gilt die Reaktion von Ozon mit Iodid im Meerwasser, wobei eine neue Modellierungs-Untersuchung mit einem realistischeren Ansatz der Oberflächenmikrostruktur bessere Übereinstimmung mit Messungen ergaben (Pound et al. 2020). Da die Reaktionsrate von Ozon mit Iodid temperaturabhängig ist, sind für die Tropen höhere Depositionsgeschwindigkeiten als in mittleren und polaren Breiten zu erwarten. Über dem Atlantik tragen folgende Prozesse zum troposphärischen Ozonhaushalt bei:

- Zustrom aus der Stratosphäre,
- Deposition an der Meeresoberfläche,
- Ferntransport von photochemisch entstandenem Ozon aus Gebieten mit verschmutzter Luft oder von Biomassenverbrennung. Letztere wird in den Tropen zu bestimmten Jahreszeiten praktiziert,
- Ferntransport von Vorläufergasen wie NO_x aus anthropogenen Quellen und photochemische Ozonbildung oder Abbau durch Photolyse über dem Ozean, sofern hier günstige Bedingungen herrschen (hohe Einstrahlung).

Zu stratosphärischen Intrusionen lagen bereits Kenntnisse vor (Danielsen and Hipskind 1980; Danielsen and Mohnen 1977; Vaughan and Tuck 1985). Hier waren Tropopausenfaltungen auf der kalten Seite des polaren Strahlstroms analysiert worden, ebenso wie der Ozoneintrag im Bereich von Kaltlufttropfen (cut-off low), die häufig über längere Zeit existieren können. Auch zur Ozonbildung bei Biomassenverbrennung gab es erste Erkenntnisse aus Brasilien (Kirchhoff et al. 1988). Situationen, in denen Ozon durch Ferntransport vom Kontinent auf dem Atlantik beobachtet wurden, waren ebenfalls dokumentiert worden (Bazhanov and Petrov 1986). Es bestanden jedoch noch erhebliche Unsicherheiten über die Bedeutung der einzelnen Prozesse und besonders darüber, ob der meteorologische Transport aus der Stratosphäre oder die photochemische Ozonbildung für den troposphärischen Ozonhaushalt insgesamt bedeutender wären.

Ein wichtiger Parameter ist die Lebensdauer des Ozons, da sich daraus Konsequenzen für den Ferntransport, für die Vermischung von Luftpaketen mit unterschiedlichen Ozonmischungsverhältnissen und für die Ausbildung von Tages- und Jahresgängen ergeben.

Abschätzungen zur Lebensdauer (Halbwertszeit) des troposphärischen Ozons ergaben aus frühen Modellrechnungen die in Tabelle 1.1 genannten Dauern (Liu et al. 1987):

Tab. 1.1: Lebensdauer des troposphärischen Ozons

| Breite | Sommer | Winter |
|---------------|---------------|---------------|
| 40°N | 8 Tage | 100 Tage |
| 20°N | 5 Tage | 17 Tage |

Die gesamt-troposphärische Lebensdauer wurde in späteren Untersuchungen mit 25 – 28 Tagen angegeben (Racherla and Adams 2006), eine aktuelle Studie ermittelte wieder einen längeren Wert von 73 Tagen (Bates and Jacob 2020). Die Sommer-Winter Unterschiede dürften bestehen bleiben, ebenso ist über dem Ozean wegen der niedrigen Depositionsgeschwindigkeit die Lebensdauer höher als über den Kontinenten, abgesehen von den Polargebieten. Die Depositionsgeschwindigkeit über dem Ozean ist nicht als einheitlich anzusehen. Ryabinin und Mitarbeiter vermuteten, dass Ozon durch Reaktion mit organischen Mikroschichten (sogenannte slicks) rasch abgebaut werden kann (Ryabinin et al. 1992), doch wurde dies nicht näher belegt. Während Aerosolbildung aus organischen Mikroschichten über dem Ozean bereits nachgewiesen ist, sind keine weiteren Untersuchungen bekannt geworden, dass Ozon in Gebieten mit organischen Mikroschichten verstärkt abgebaut würde. Es wurde jedoch argumentiert, dass solche Mikroschichten die Emission von Jodid beeinflussen könnten (Tinel et al. 2020), welches rasch mit Ozon reagiert, doch scheint der Prozess in der Natur unbedeutend zu sein. Dies lässt sich später aus den geringen Tagesgängen von Ozon über dem Ozean bestätigen, weshalb man schließen kann, dass ein verstärkter Ozonabbau über Gebieten mit organischen Mikroschichten im Mittel keine Rolle spielt.

In dem oben erwähnten Zeitraum 1977 bis 1996 wurde das oberflächennahe Ozon auf insgesamt 77 Schiffsreisen gemessen, die in Tabelle 12.1 zusammengestellt sind.

Über die frühen Reisen von 1977 bis 1986 war bereits eine Publikation erschienen (Winkler 1988), das Datenmaterial wurde danach etwa verdoppelt und wird in der gegenwärtigen Arbeit einer Gesamtauswertung unterzogen. Dabei werden folgende Gesichtspunkte behandelt:

- Verteilung des Ozons im Nord-Südschnitt und hemisphärische Unterschiede,
- Verhalten des Ozons an der innertropischen Konvergenzzone (ITCZ),
- Tages- und Jahresgänge in verschiedenen geographischen Breiten,
- Trends als Funktion der geographischen Breite in beiden Hemisphären,
- Besonderheiten, die während der Einzelreisen beobachtet wurden.

Man muss sich bei den Ergebnissen im Klaren sein, dass Schiffsreisen keine wirkliche Dauer-messreihe ersetzen können, sondern ein Mittel über eine Anzahl von Momentaufnahmen darstellt. Zudem fanden die Reisen in die Arktis oder Antarktis vorzugsweise zu bestimmten Jahreszeiten statt, so dass diese Zeiten überrepräsentiert sind. Trotz dieser Einschränkungen können zahlreiche verlässliche Schlüsse gezogen werden.

Andere Fragen, etwa die, ob und wann photochemisch entstandenes Ozon aus Industriegebieten oder aus Biomassenverbrennung in den Tropen durch Ferntransport an den Messort gelangte, wurde nur in wenigen Fällen untersucht, da hierzu eine aufwändigere meteorologische Analyse erforderlich ist. Lediglich in Einzelfällen konnten einigermaßen verlässliche Schlüsse gezogen werden, wenn zum Beispiel gleichzeitige Messungen von Krypton-85 vorgenommen worden waren oder andere anthropogene Luftbeimengungen wie etwa Ruß auf einer Reise untersucht wurden (Polarsternreise ANT-XII). Beide Spurenstoffe entstammen anthropogenen Quellen.

Eine besondere Wirkung des troposphärischen Ozons auf den Strahlungshaushalt scheint noch erwähnenswert: Ozon ist neben CO₂ und Wasserdampf ein wichtiges strahlungsaktives Spurengas, dessen Absorptionslinie mitten im langwelligen atmosphärischen Strahlungsfenster liegt, über das langwellige Strahlung an den Weltraum abgegeben werden kann. Obwohl sich nur 10% des Gesamt Ozons in der Troposphäre befinden, wirkt sich wegen der Druckverbreiterung der Absorptionslinie bei 9,6 µm eine prozentuale Änderung des Ozons in der Troposphäre ebenso stark aus wie eine gleichgroße prozentuale Konzentrationsänderung des Ozons in der Stratosphäre (Ramanathan and Dickinson 1979). Die Absorption über die Flügel der Linie ist somit für den Strahlungshaushalt bedeutsam und langfristige Veränderungen der troposphärischen Ozonmischungsverhältnisse sind somit von besonderem Interesse.

2. DAS MESSVERFAHREN

Als Messverfahren wurde das nasschemische Kaliumjodid-Verfahren eingesetzt. Dieses Verfahren arbeitet im Prinzip absolut (Attmannspacher 1971), d.h. pro Ozonmolekül werden bei der Reaktion von Jod zu Jodid in neutral gepufferter KJ-Lösung zwei Elektronen frei, die als Coulomb'scher Strom gemessen werden und ein Maß für das Ozonmischungsverhältnis darstellen.

Abb. 2.1 zeigt das Originalgerät, das nach und nach für den Schiffseinsatz verbessert wurde. Die Luft wird in einen Sprudler gepumpt, in welchem an der Platinkathode Jod durch Reaktion mit Ozon zu Jodid umgewandelt wird, das sich wiederum an der Silberanode niederschlägt. Die KJ-Lösung wird von einer Lösungsmittelpumpe langsam erneuert, so dass immer genügend KJ zur Reaktion vorhanden ist. Das Messsignal wurde auf einem Linienschreiber aufgezeichnet.

Als mechanischer Schwachpunkt des Originalgeräts im Schiffsbetrieb zeigte sich die Teflonpumpe zum Ansaugen der Luft, die dem in der Brewer-Mast-Ozonsonde verwendeten Pumpentyp nachgebaut und einem Dauereinsatz von vielen Wochen nicht gewachsen war. Näheres s. unten. Auch die Lösungsmittelpumpe erwies sich als nicht optimal und wurde durch eine Schlauchpumpe ersetzt.

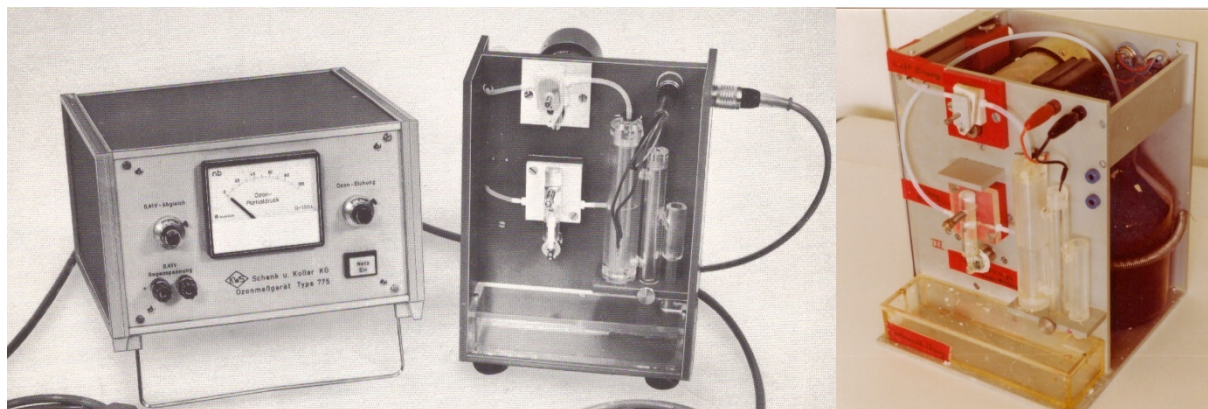


Abb. 2.1: Nasschemisches Ozongerät (Attmannspacher 1971), gebaut vor der Fa. Schenk und Koller. Das Gerät wurde in Anlehnung an die Ozonsonde nach Brewer-Mast entwickelt. Oben befindet sich die Luftpumpe, darunter die Lösungsmittelpumpe. Rechts davon befindet sich der Sprudler mit Platinkathode und Silberanode in getrennten Röhren.

Der Sprudler enthielt eine Platinkathode und eine Silberanode in getrennten Sprudlerröhren. Da sich an der Silberelektrode unlösliches Silberjodid niederschlägt, ist eine regelmäßige Reinigung dieser Elektrode erforderlich. Es wurde daher geprüft, nach welchem Zeitraum diese Reinigung spätestens erfolgen muss, damit die Reaktion vollständig bleibt. Es zeigte sich dabei, dass das Gerät korrekt gemessen hat, wenn es länger als $\frac{1}{2}$ Jahr betrieben wurde. Daher wurde bei längerem Betrieb der Sprudler mit der Pt- und Ag-Elektrode nach $\frac{1}{2}$ Jahr Betriebsdauer komplett ausgetauscht und an einem Ozongenerator auf das korrekte Arbeiten geprüft. In keinem Fall war die Reaktion gestört oder die Silberanode unbrauchbar geworden.

Die Kalibrierung erfolgte in gleicher Weise wie bei den Brewer-Mast-Sonden, insbesondere musste die Durchflussmenge der Ansaugpumpe bestimmt werden. Am Observatorium Hohenpeißenberg lief das nasschemische Verfahren über viele Jahre parallel mit einem UV-Absorptionsgerät mit guter Übereinstimmung. Zusätzlich wurden die Geräte an einem Ozongenerator geprüft, der bei vorgegebenem Durchfluss ein konstantes Ozonmischungsverhältnis lieferte. An diesen Generator wurden die Geräte vor und nach einer Reise angeschlossen, um die Gerätestabilität zu kontrollieren (s. unten).

Querempfindlichkeiten sind bei diesem Verfahren durch oxidierende oder reduzierende Gase zu erwarten. Das Verfahren wurde daher im Labor gegen Störungen durch SO_2 , COS , H_2S und NO_2 untersucht. Bei den Konzentrationen dieser Spurengase, wie sie über dem Ozean angetroffen werden, können Störungen vollkommen ausgeschlossen werden. Störungen traten dagegen auf, wenn Schiffsabgase angesaugt wurden. Dann sank das Messsignal auf Null bis wieder reine Luft angesaugt wurde. Nach 1 – 2 Stunden war wieder ein ungestörtes, stabiles Signal zu verzeichnen, da die in das Gerät gelangten störenden Stoffe dann wieder wegoxidiert worden waren. Beim Auslaufen wurde das Ozongerät erst nach dem Verlassen eines Hafens eingeschaltet. Dennoch konnte durch den oft noch dichten Schiffsverkehr oder vom Land anströmende Luft die Ozonmischungsverhältnisse so stark gestört werden, dass die ersten Messwerte noch verworfen wurden.

Gegenüber den chemischen Störungen erwiesen sich mechanische Störungen als gravierender. Ein größeres Problem ging von den Teflonpumpen aus, mit denen die Luft angesaugt und in den Sprudler gedrückt wurde. Die Fördermenge der Pumpen wurde vor Beginn und nach Ende einer Reise gemessen, da die Kenntnis des Luftdurchsatzes notwendig ist um das Ozonmischungsverhältnis berechnen zu können. Bei diesen Pumpen konnte das Antriebslager gelegentlich ausschlagen, so dass die tatsächliche Fördermenge Luft sich allmählich gegenüber der ursprünglichen Fördermenge verringerte. In den Fällen mit nur geringem Förderverlust von $<10\%$ wurde eine lineare Korrektur vorgenommen, wobei der erste Betriebsmonat als ungestört angesehen wurde. Bei größerem Förderverlust wurde angenommen, dass in den ersten vier Wochen die Fördermenge der Pumpe konstant blieb und spätere Daten wurden dann verworfen, auch wenn sie vielleicht noch brauchbar waren.

Wegen dieser unbefriedigenden Funktionsweise wurde das Gerät in zwei Stufen verbessert:

In der ersten Stufe wurde eine Membranpumpe nach dem Sprudler angebracht und ein Rotameter zur Durchflusskontrolle verwendet. Damit wurde erreicht, dass die Außenluft aus der Ansaugleitung unmittelbar in den Sprudler gelangte und nicht, wie bisher, durch die Teflonpumpe strömte. Dieses Verfahren wurde von 1984 bis 1988 verwendet. Abb. 2 zeigt den schematischen Geräteaufbau, ohne Elektronik.

In der zweiten Stufe wurde statt des Rotameters ein Massendurchflussregler eingesetzt. Die von diesem Regler ausgegebene Spannung wurde auf einem Schreiber aufgezeichnet, wodurch sich die Stabilität des angesaugten Luftstroms kontrollieren ließ. In keinem Fall wurden Durchflussstörungen festgestellt. Dieses Verfahren wurde von 1988 bis 1996 verwendet.

Unabhängig von diesen Verbesserungen wurden die Sprudler nach jeder Schiffsreise an einem Ozongenerator getestet, bevor sie gereinigt wurden.

Als Ansaugleitung wurde ein Teflonschlauch verwendet, der Ozon gegenüber chemisch vollkommen neutral ist. Als Verbindungsstücke am Messgerät wurden Kupplungen aus Glas (Kugel und Kugelpfanne) eingesetzt, die mit Teflonmuffen an den Schlauch angekoppelt wurden.

Während der Fahrt wurden die Instrumente mindestens einmal pro Tag auf einwandfreie Funktion inspiziert und eine Zeitmarke am Schreiber gesetzt. Es wurde geprüft, ob noch ausreichend Reaktionslösung im Vorratsbehälter vorhanden war und im Bedarfsfall nachgefüllt. Wie erwähnt, wurde bei langen Reisen der Sprudler nach einem halben Jahr durch einen neuen ersetzt, der in Plastik eingeschweißt mitgegeben worden war. Die Registrierstreifen und gebrauchte Sprudler konnten in der Regel bei einem Personalwechsel nach Deutschland mit zurückgenommen werden.

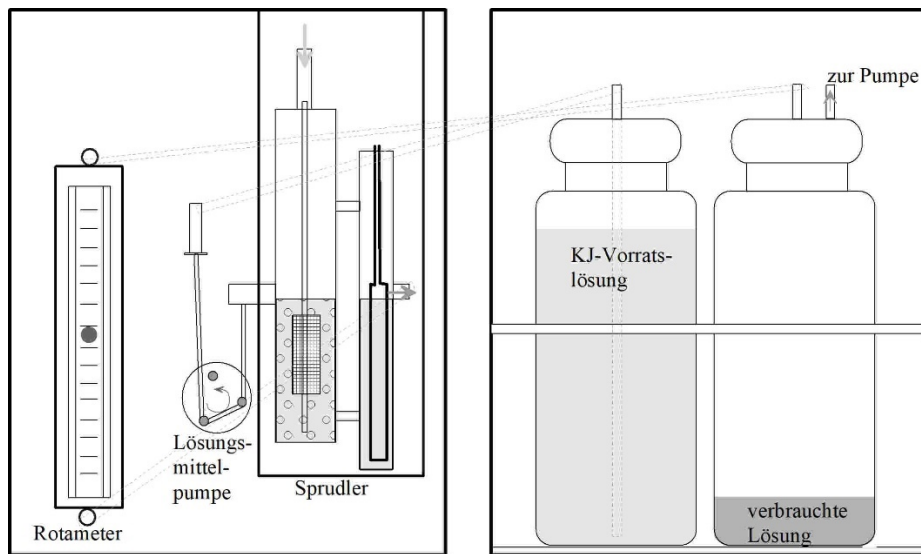


Abb. 2.2: Verbessertes Ozongerät mit Durchflussmesser; neuer Luft- und Lösungsmittelpumpe.

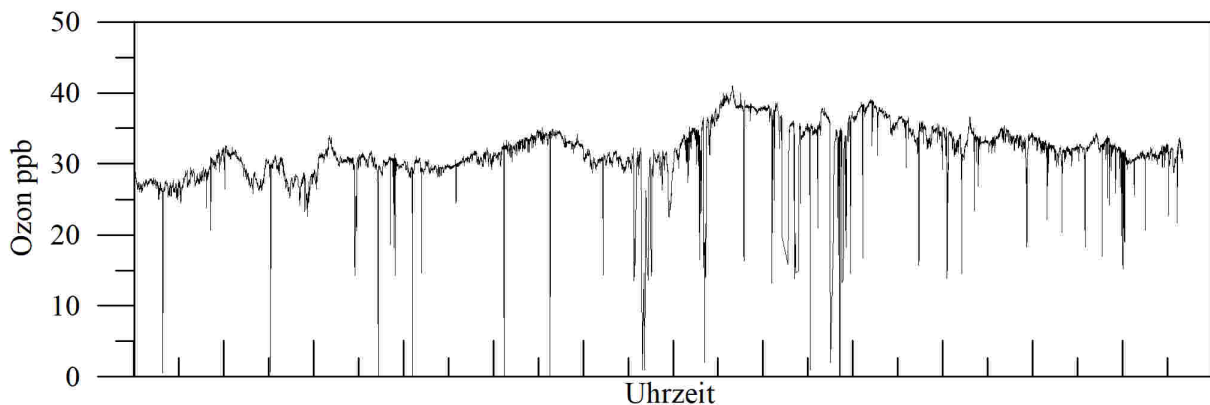


Abb. 2.3: Beispiel einer Originalregistrierung, in der kurzfristige Störungen durch Schiffsabgase auftraten.

Die Abb. 2.3 zeigt die Originalregistrierung einer Datenerfassungsanlage, in der sowohl elektrische Störungen als auch solche durch Schiffsabgase zu sehen sind. Wenn, wie aus der Abbildung ersichtlich, der wahre Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses gut zu erkennen und die Störungen durch Interpolation überbrückbar waren, wurden die interpolierten Messwerte akzeptiert. Als Kriterium galt, dass das Mischungsverhältnis insgesamt nur wenig schwanken durfte. Wenn aber bei leicht achterlichem Wind häufig vom Schiff selbst belastete Luft angesaugt wurde, dann zeigte sich ein insgesamt unruhiger Verlauf. Solche Messwerte wurden verworfen. Aus diesen Gründen wurde die Auswertung grundsätzlich von Hand vorgenommen und auf eine automatische Integration der Messspannung verzichtet. Es wurden Stundenmittelwerte verwendet.

Unter bestimmten Bedingungen konnte es zu Störungen durch Koronaentladungen kommen, die an der UKW-Antenne des Schiffssenders entstanden. Dieser Fall trat auf einer Reise von *Polarstern* auf, bei der die Ansaugstelle in unmittelbarer Nähe der UKW-Antenne gewählt worden war. Da der UKW-Sender im Hafen außer Betrieb war, wurde bei der Prüfung nach dem Geräteaufbau keine Störung festgestellt. Immer, wenn während der Reise der Sender in

Betrieb genommen wurde, traten erhöhte Ozonmischungsverhältnisse auf. Durch die starken elektrischen Felder unmittelbar an der Antenne wurde offenbar Ozon erzeugt. Da die Sendezeiten nicht mehr rekonstruiert werden konnten, wurden alle Messwerte sicherheitshalber verworfen. Die Ansaugstelle wurde auf den folgenden Reisen hinreichend weit weg von der Sendeantenne angebracht.

Die Ansaugleitung wurde nach Möglichkeit zum Peildeck hochgeführt und die nach unten gerichtete Einsaugöffnung durch einen PVC-Trichter geschützt, so dass bei Regen kein Wasser angesaugt wurde. Dadurch war auch die Gefahr, dass bei schwerem Wetter Gischt in großem Umfang angesaugt wurde, relativ gering.

3. DIE ANSAUGSTELLEN AUF DEN VERSCHIEDENEN SCHIFFEN

3.1 FS *Meteor I* (Rufzeichen FGGE)

FS *Meteor I* hatte seinen Heimathafen in Hamburg und war von 1964 bis 1985 im Dienst (DHI 1985). Auf dem Schiff wurde das oberflächennahe Ozon von 1977 bis 1985 während 12 Reisen mit Geräten von Typ 1 und 2 gemessen.

Oberhalb der Brücke befanden sich je ein Peildeckhaus auf der Backbord- und Steuerbordseite. Das Ozongerät wurde im Backbordpeildeckhaus installiert und die Ansaugleitung an der Reling oberhalb angebracht.



Abb. 3.1: Forschungsschiff *Meteor I*, das bis 1985 im Dienst war. Im Peildeckhaus war das Ozongerät untergebracht.

Tab. 3.1: Reisen von *Meteor I*, auf denen Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|-------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|
| 44 | Jan. – Mär. 1977 | Westafrika | Bordwetterwarte |
| 49 | Jul. – Sep. 1978 | Seegebiet westlich von Schottland | Uni. Mainz |
| 51 | Jan. – Feb. 1979 | Westafrika | Bordwetterwarte |
| 52 | Aug. – Okt. 1979 | Spitzbergen; Nordmeer | Bordwetterwarte |
| 53 | Jan. – Apr. 1980 | Westafrika | Bordwetterwarte |
| 56 | Nov. 1980 – Apr. 1981 | Antarktis | Bordwetterwarte |
| 57 | Jul. – Sep. 1981 | Nordatlantik – Azoren | Uni. Mainz |
| 60 | Jan. – Apr. 1982 | Azoren – Westafrika | Bordwetterwarte |
| 61 | Mai – Jul. 1982 | Nordmeer, Spitzbergen | Bordwetterwarte |
| 67 | Jan. – Jul. 1983 | Seegebiet vor Marokko | Bordwetterwarte |
| 71 | Jun. – Aug. 1985 | Nordmeer, Spitzbergen | Bordwetterwarte |
| 72 | Sep. – Okt. 1985 | Westeuropäisches Becken 20°W, 47°N | Bordwetterwarte |

3.2 FS *Meteor II* (Rufzeichen FGGE)

Das 1986 neu in Dienst gestellte Forschungsschiff *Meteor II* (Jacobi et al. 2011) hatte oberhalb der Brücke ein mittiges, für luftchemische Messungen sehr gut geeignetes Peildeckhaus, in dem das Ozongerät installiert werden konnte. Das Schiff war in Hamburg stationiert. Die Ansaugleitung führte zur Reling oberhalb. Auf diesem Schiff wurde das oberflächennahe Ozon auf 17 Reisen gemessen.



Abb. 3.2: *Meteor II*, das 1986 in Dienst gestellt wurde. Über der Brücke befand sich ein Peildeckhaus, in dem das Ozongerät untergebracht war.

Tab. 3.2: Reisen von *Meteor II*, auf denen Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|-------|----------------------|------------------------------------|-----------------|
| 2 | Jun. – Jul. 1986 | HH – Norwegische See – HH | Bordwetterwarte |
| 4 | Okt. – Dez. 1986 | HH – Westafrika – HH | Bordwetterwarte |
| 5 | Jan. – Sep. 1987 | HH – Indischer Ocean – HH | Bordwetterwarte |
| 6 | Nov. – Mai 1988 | HH – Westl. von Afrika – HH | Bordwetterwarte |
| 7 | Jun. – Sep. 1988 | HH – Polarer Atlantik – HH | Bordwetterwarte |
| 8 | Okt. – Dez. 1988 | HH – Nordkap – Südgrönland – HH | Bordwetterwarte |
| 11 | Jun. 1989 – Mär. '90 | HH – Falkland, Antarktis – HH | Bordwetterwarte |
| 13 | Jul. – Aug. 1990 | HH – Norwegische See – HH | Bordwetterwarte |
| 27 | Jan. – Mär. 1994 | HH – Recife, Lissabon – HH | Bordwetterwarte |
| 28 | Mär. – Jun. 1994 | HH – Südatlantik – HH | Bordwetterwarte |
| 29 | Jun. – Sep. 1994 | HH – Buenos Aires, Las Palmas – HH | Bordwetterwarte |
| 30 | Sep. – Dez. 1994 | HH – Kap Farvel, St. Jones – HH | Bordwetterwarte |
| 32 | Mär. – Sep. 1995 | HH – Indischer Ozean – HH | Bordwetterwarte |
| 33 | Sep. – Dez. 1995 | HH – Kapstadt – HH | Bordwetterwarte |
| 34 | Jan. – Apr. 1996 | HH – Recife, Südamerika – HH | Bordwetterwarte |
| 35 | Apr. – Jun. 1996 | HH – Barbados, Atlantik – HH | Bordwetterwarte |
| 36 | Jun. – Aug 1996 | HH – Norwegische See, Island – HH | Bordwetterwarte |

3.3 FFS *Anton Dohrn* (Rufzeichen DBFR)

Das in Bremerhaven stationierte Fischereiforschungsschiff war 1963 gebaut worden. Es handelte sich um die umgebaute ehemalige *Walther Herwig*, die 1973 umbenannt worden war (Sahrhage 1986). Das Fischereiforschungsschiff blieb bis 1986 in Betrieb und wurde dann durch einen Neubau ersetzt wurde.



Abb. 3.3: Fischereiforschungsschiff *Anton Dohrn*.

Tab. 3.3: Reisen von *Anton Dohrn*, auf denen Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|-------|------------------|----------------------------|---------------------------|
| 104 | Okt. – Dez. 1980 | BHV – West-Grönland | Dipl. Met. Kaminski, DWD |
| 110 | Juli – Aug. 1981 | BHV – Spitzbergen | Bordwetterwarte |
| 119 | Juli – Aug 1982 | BHV – Tromsø – Spitzbergen | Dipl. Met. Baugirdis, DWD |

3.4 FFS *Walther Herwig* (Rufzeichen DBFP)

Das Fischereiforschungsschiff *Walther Herwig II* war ein Neubau, der von 1973 bis 1994 eingesetzt wurde (Anonymus 1972). Sie war in Hamburg stationiert. Das Ozongerät wurde im Lotraum neben der Brücke installiert und die Ansaugleitung zur Reling des darüber befindlichen Peildecks geführt. Das oberflächennahe Ozon wurde auf 12 Reisen gemessen (Tabelle 3.4).



Abb. 3.4: Fischereiforschungsschiff *Walther Herwig*. Hinter der Brücke befand sich der Lotraum, in dem das Ozongerät installiert war.

Tab. 3.4: Reisen von *Walther Herwig*, auf denen Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|-------|-----------------------|---|-----------------|
| 31 | Okt. 1977 – Dez. 1978 | HH – Antarktis | MPI Mainz |
| 44 | Dez. 1980 – Apr. 1981 | HH, Rio – Antarktis | Bordwetterwarte |
| 67 | Okt. – Nov. 1984 | HH – Westgrönland – Island – HH | Bordwetterwarte |
| 68 | Dez. 1984 – Mai 1985 | HH – Antarktis | Bordwetterwarte |
| 82 | Apr. – Mai 1987 | HH – West-, Ost-Grönland – HH | Bordwetterwarte |
| 85 | Sep. – Nov. 1987 | NW-Atlantik, Nordsee, Labradorsee | Bordwetterwarte |
| 89 | Mär. – Mai 1988 | HH – Azoren – Madeira – Schottland – HH | Bordwetterwarte |
| 92 | Aug. – Nov. 1988 | HH – Grönland – HH | Bordwetterwarte |
| 96 | Feb. – Mär. 1989 | HH – Atlantik westl. Groß-Britannien – HH | Bordwetterwarte |
| 97 | Mär. – Mai 1989 | HH – NW der Hebriden – HH | Bordwetterwarte |
| 100 | Jul. – Aug. 1989 | HH – NO-Atlantik – HH | Bordwetterwarte |
| 101 | Sep. – Okt. 1989 | HH – Ost-, Westgrönland – HH | Bordwetterwarte |

3.5 FS *Polarstern* (Rufzeichen DBLK)

Das als Eisbrecher gebaute Polarforschungsschiff wurde im Dezember 1982 in Dienst gestellt (Hempel 1983a). Das Ozongerät wurde beim ersten Einsatz im Krähennest installiert. Daraus ergaben sich jedoch keine Vorteile, da hier ebenfalls Abgase vom Schornstein hingelangen und die Bedienung aufwändig war. Auf allen späteren Reisen wurde das Gerät dann im Quergang hinter der Bordwetterwarte aufgebaut und die Ansaugleitung zur Relling des darüber gelegenen Peildecks hochgeführt.



Abb. 3.5: FS Polarstern. Das Ozongerät war in dem Quergang installiert, der von dem Schiffskamin verlief. Am Mast ist das Krähennest zu erkennen (Aufnahme H. Grobe, AWI).

Tab. 3.5: Reisen von *Polarstern*, auf denen Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|--------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|
| ANT-I | Dez. 1982 – Apr. 1983 | Bremerhaven – Atka | Bordwetterwarte |
| ARK-I | Jun. – Jul. 1983 | Bremerhaven – Spitzbergen | Mitarbeiter AWI |
| ANT-II | Sep. 1983 – Apr. 1984 | Bremerhaven – Atka-Bucht | Helas MPI Mz; Bordwetterwarte |

| | | | |
|----------|-----------------------|--|-----------------------------------|
| ARK-II | Mai – Sep. 1984 | BHV – Tromsø – Nordpolarmeer – Spitzbergen | AWI; Bordwetterwarte |
| ANT-III | Okt. 1984 – Apr. 1985 | Bremerhaven – Punta Arenas – Kapstadt – Weddellmeer – Kapstadt – Bremerhaven | Uni Frankfurt, Bordwetterwarte |
| ARK-III | Mai – Aug. 1985 | Grönlandsee | Bordwetterwarte |
| ANT-IV | Sep. 1985 – Mär. 1986 | BHV – Dakar – Rio – AtkaBucht | Bordwetterwarte |
| ANT-V | Jan – Apr 1987 | BHV – Antarktis, Weddellmeer – BHV | Bordwetterwarte |
| ARK-IV | Mai – Aug. 1987 | BHV – Norwegische See, Spitzbergen | Bordwetterwarte |
| ARK-VII | Jun. – Okt. 1990 | BHV – Ostgrönland – BHV | Bordwetterwarte |
| ANT-IX | Okt. 1990 – Mai 1991 | BHV – Antarktis - BHV | Bordwetterwarte |
| ARK-VIII | Jun. – Okt. 1991 | BHV – Barentssee, Spitzbergen – BHV | Bordwetterwarte |
| ANT-X | Nov. 1991 – Jan. 1993 | BHV – Antarktis, Scotia See – BHV | Bordwetterwarte |
| ARK-IX | Feb. – Sep. 1993 | BHV – Polarmeer, Laptewsee – BHV | Bordwetterwarte |
| ANT-XI | Okt. 1993 – Jun. 1994 | BHV – Antarktis – BHV | Bordwetterwarte |
| ARK-X | Jul. – Okt. 1994 | BHV – Grönländische See, Tromsø – BHV | Bordwetterwarte |
| ARK-XII | Okt. 1994 – Jun. 1995 | BHV – Cape Town, Antarktis – BHV | Bordwetterwarte |
| ARK-XI | Jul. – Okt. 1995 | BHV – Norwegische See, Laptewsee – BHV | Bordwetterwarte |
| ANT-XIII | Okt. 1995 – Jun. 1996 | BHV – Kapstadt, Antarktis – BHV | Bordwetterwarte |
| ARK-XII | Jul. – Sep. 1996 | BHV – Lomonossow-Rücken – BHV | Bordwetterwarte |

3.6 Eisbrecher *Akademik Fedorov* (Rufzeichen UQJC)

Der russische Polareisbrecher war 1987 als Forschungsschiff fertiggestellt worden. 1989 nahm er an einem gemeinsamen deutsch-russischen Forschungsprogramm im Weddellmeer teil (Augstein et al. 1991).



Abb. 3.6: Das russische Forschungsschiff *Akademik Fedorov*, auf dem während eines gemeinsamen deutsch-russischen Forschungsprojekts Ozon gemessen werden konnte. Das rechte Bild zeigt den Ort der Geräteaufstellung und die Ansaugstelle (Aufnahme Dr. G. König-Langlo, AWI)

Tab. 3.6: Reise von *Akademik Fedorov*, auf der Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|-------|------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Aug. – Dez. 1989 | Hamburg – Weddellmeer | König-Langlo; Bordpersonal |

3.7 Versorger *Polar Queen* (Rufzeichen LAXK4)

Norwegisches Versorgungsschiff, das vom Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven zum Nachschubtransport zur *Georg-von-Neumayer-Station* gechartert wurde.



Abb. 3.7: Der norwegische Versorger *Polar Queen*, der 1981 zum Mannschaftsaustausch und Materialtransport zur GvN-Station gechartert worden war.

Tab. 3.7: Reise von *Polar Queen*, auf der Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|-------|------------------|-------------------------|------------------------|
| | Nov. - Dez. 1981 | BHV – Rio Grande – Atka | Besatzung; Gravenhorst |

3.8 Versorger *Polarbjörn* (Rufzeichen JXJS)

Norwegisches Versorgungsschiff, das vom Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven beim ersten Antarktiseinsatz des FS *Polarstern* zum raschen Austausch der Überwinterer und Materialtransport zur *Georg-von-Neumayer-Station* gechartert wurde (Hempel 1983b).



Abb. 3.8: Norwegischer eisgängiger Versorger *Polarbjörn*, der 1983 Material zur GvN-Station brachte.

Tab. 3.8: Reise von *Polarbjörn*, auf der Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|-------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Dez. 1982 – Mär. 1983 | Rio – Atka-B. – Bremerhaven | König; Hempel jun. (AWI) |

3.9 S.A. Agulhas (Rufzeichen AGUL)

Der Eisbrecher S.A. *Agulhas* war ein Forschungs- und Versorgungsschiff für die südafrikanische Antarktisstation SANAE, der 1986 vom AWI zur Entlastung von *Polarstern* zum Personalwechsel und zum Materialtransport gechartert worden war, als die *Polarstern* in der Antarktis überwinterte (Ber. Polarforschung Nr. 33-37, S. 22). Das Ozongerät war in einem Raum hinter der Brücke aufgebaut und die Ansaugleitung wurde von dort zum Peildeck 5 m oberhalb der Brücke hochgeführt.



Abb. 3.9: Das südafrikanische Forschungsschiff S.A. *Agulhas*, das 1986 zweimal die Strecke Kapstadt – Antarktis fuhr. Das Ozongerät befand sich in einem Raum hinter der Brücke.

Tab. 3.9: Reise von S.A. *Agulhas*, auf der Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|-------|------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | Jan. – Mär. 1986 | Kapstadt – SANAE – Atka – Kapstadt | Gravenhorst; Schiffsbesatzung |

3.10 Eisbrecher Ymer (Rufzeichen SKIA)

Anlässlich des hundertsten Jubiläums der Forschungsreise des schwedischen Polarforschers Nordenskjöld richtete Schweden eine neue Forschungsreise in das Polargebiet zwischen Franz-Josef-Land, Spitzbergen und Grönland aus (Lannefors et al. 1983; Schytt 1983). Dazu wurde der sonst in der Ostsee operierende Eisbrecher *Ymer* eingesetzt. Auf dem Bugvorbau vor der Brücke waren mehrere Container aufgebaut. In einem luftchemischen Laborcontainer auf der Backbordseite war das Ozongerät installiert, von wo die Ansaugleitung auf die darüber angebrachte Reling geführt war.



Abb. 3.10: Der schwedische Eisbrecher Ymer, der 1980 eine Forschungsreise in die Arktis durchführte. Das Ozongerät war im Backbord-Container auf dem Bugvorbau untergebracht (rechtes Bild).

Tab. 3.10: Reise von Ymer, auf der Ozon gemessen wurde.

| Reise | Zeitraum | Gebiet | Betreuung |
|--------------|------------------|------------------------------------|---------------------|
| Ymer 80 | Juli – Okt. 1980 | Stockholm – Spitzbergen – Grönland | Uni. Mainz; Winkler |

4. BREITENVERTEILUNG DES OBERFLÄCHENNAHEN OZONS

Die mittlere Breitenverteilung oberflächennahen Ozon aus allen Schiffsreisen des ist in Abb. 4.1 dargestellt. In der Nordhemisphäre liegt das Ozonmischungsverhältnis über einen großen Breitenbereich bei etwa 30 ppb mit einem Abfall auf 20 ppb nördlich von 70°N. In der Südhemisphäre ist das Mischungsverhältnis halb so hoch. In beiden Hemisphären treten sekundäre Maxima und Minima in bestimmten Breiten auf. Zur Erklärung der Verteilung dienen die folgenden Überlegungen:

Das oberflächennahe Ozon wird durch Austausch zwischen Stratosphäre und Troposphäre (Danielsen and Mohnen 1977; Shapiro et al. 1987), durch Vertikalaustausch sowie durch lokale photochemische Prozesse und durch Ferntransport von photochemisch erzeugtem Ozon aus Luftverschmutzungsgebieten beeinflusst. Nach Shapiro existieren drei Zonen in verschiedenen Breiten, in denen Tropopausenfaltungen für verstärkten Zustrom stratosphärischen Ozons sorgen: der subtropische Strahlstrom, der Strahlstrom des Westwindgürtels und der polare Strahlstrom. Allerdings mäandrieren diese Strahlströme, weshalb die dort auftretenden Tropopausenfaltungen sich nicht in einer bestimmten Breite, sondern in einem gewissen Breitenbereich gehäuft bilden.

Die Häufigkeit und Intensität von Tropopausenfaltungen ist in der Nordhemisphäre größer als in der Südhemisphäre (Baray et al. 2000; Beekmann et al. 1997; Davies and Schuepbach 1994; Elbern et al. 1998). In der Troposphäre besteht im Allgemeinen eine starke Zunahme des Ozonmischungsverhältnisses mit der Höhe. Strömt z. B. Polarluft nach Süden über wärmeres Wasser, kommt es zu verbreiteter Konvektion, wodurch ozonreiche Luft aus der Höhe rasch in Bodennähe gelangt.

Im Bereich des subtropischen Tropopausenbruchs kann stratosphärische Luft isentropisch, d. h. ohne Energieaufwand, in die Troposphäre überführt werden und in Subtropenhochs mit dem dortigen Absinken ebenfalls in oberflächennahe Schichten gebracht werden (Cau et al. 2007; Jing et al. 2004; Randel et al. 2016). Nach Flugzeugbeobachtungen von Randel im Pazifik (Guam) kommen im absteigenden Ast der Hadley-Zirkulation trockene und ozonreiche Schichten in nahezu 80% der Zeit im Höhenbereich zwischen 3 und 8 km Höhe vor und entstammen daher der Stratosphäre. Sie sind damit deutlich häufiger, als früher vermutet wurde. Diese Schichten stratosphärischen Ursprungs können vertikale Mächtigkeiten von bis zu 7 km erreichen. Vom Atlantik zeigen Untersuchungen zur Häufigkeit von trockenen Schichten aus Radiookkultationen von GPS-Satelliten, dass auf der äquatorwärts gerichteten Seite des Subtropenjets der Winterhemisphäre ein Häufigkeitsmaximum auftritt, das im Sommer in schwächerer Form aber ebenfalls vorhanden ist (Rieckh et al. 2017). Die bei 20°N und 25°S zu erkennenden sekundären Ozonmaxima sind auf diese Intrusionen zurückzuführen.

In der mittleren Troposphäre werden dynamische Prozesse als hauptsächlich bestimmend für den Ozonhaushalt angesehen (Flatøy et al. 1996). Dagegen erfordert eine exakte Modellierung des Ozons in Oberflächennähe genaue Kenntnisse der Randbedingungen, die nur selten verfügbar sind. Somit ist es schwierig, eine Aufschlüsselung der Beiträge von stratosphärischen und nichtstratosphärischen Quellen im Ozonmischungsverhältnis zu erreichen.

In den Breiten der subtropischen Tropopausenbrüche (25°N und 25°S) gelangt Ozon durch isentropischen Transport in die Troposphäre und durch Absinken in den Subtropenhochs in

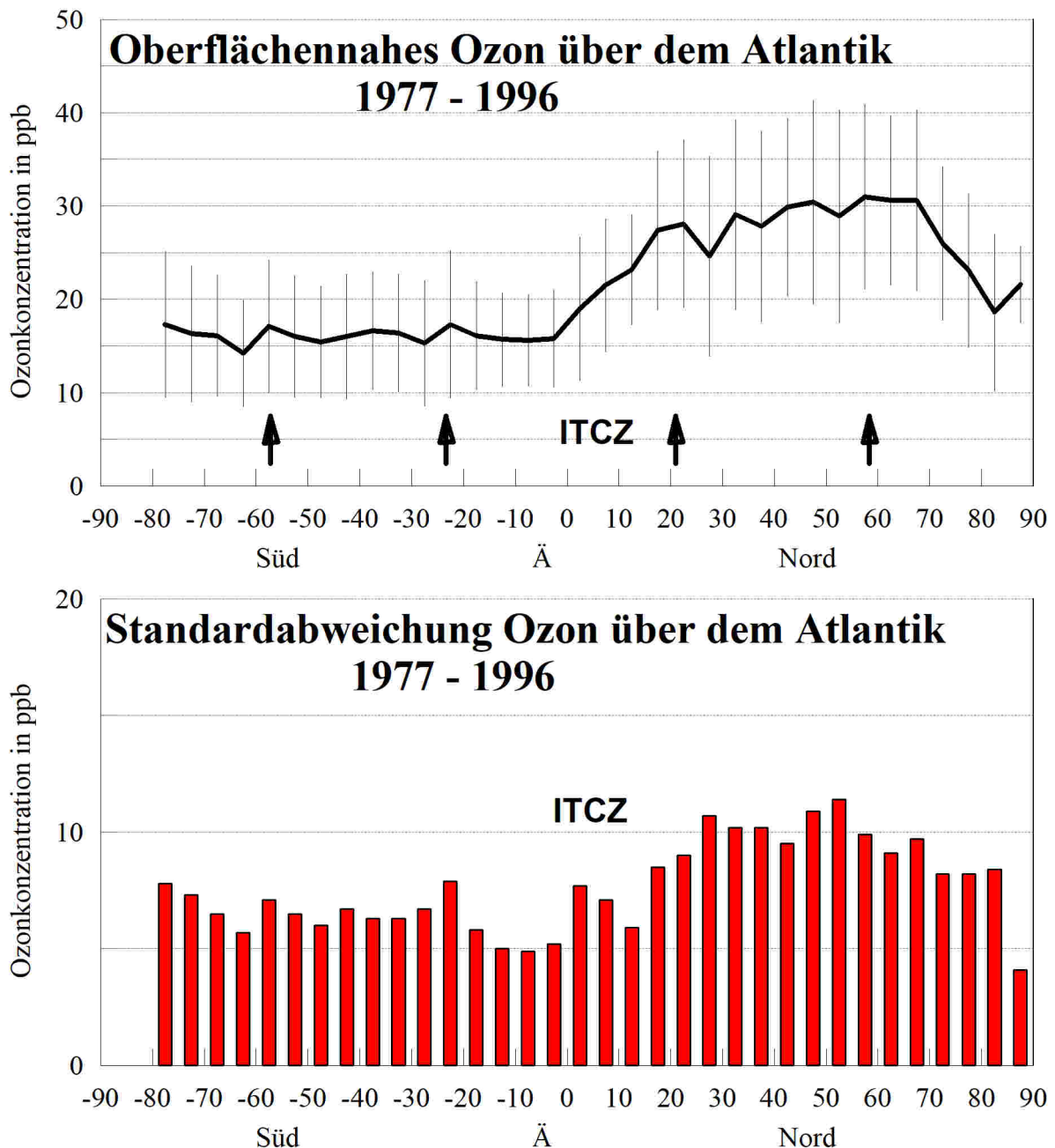


Abb. 4.1: Mittlere Nord-Süd-Verteilung des oberflächennahen Ozons über dem Atlantik. Die Pfeile geben Breiten an, in denen mit erhöhtem Stratosphären-Troposphären-Austausch zu rechnen ist. Unten: Breitenverteilung der Standardabweichung.

Bodennähe. Hier besteht aber die Möglichkeit, dass zu Zeiten von Biomassenverbrennung photochemisch gebildetes Ozon gelegentlich aus Südafrika zunächst konvektiv in die Höhe gelangt, dort mit der Höhenströmung westwärts transportiert wird und über dem Atlantik wieder absinkt (Krishnamurti et al. 1993). Wie häufig dies auftritt, ist unbekannt. Eine Untersuchung, in der das troposphärische Ozon und Aerosol aus Satellitenmessungen ermittelt wurde (Thompson et al. 2001), ergab für Afrika keinen durch Biomassenverbrennung verursachten Trend im Untersuchungszeitraum 1980 bis 1992. Ein paralleler Gang des troposphärischen Ozons im Tropenbereich (5°N – 5°S) und der Brandaktivität ließ sich mit dieser Methode für Afrika nicht nachweisen, für Südamerika ergab sich nur ein schwacher Zusammenhang. Doch

ließ sich dabei nicht ausschließen, dass ein Teil des Ozons aus dem Ferntransport von Afrika stammte. Die Satellitenmethode lässt allerdings keine Höhenauflösung des troposphärischen Ozons zu, für das Flugzeugmessungen gezeigt haben, dass aus Biomassenverbrennung stammende Ozonschichten nur einige 100 m dick sind.

An der Polarfront bei 55 – 60°N bzw. 55 – 60°S gelangt häufig stratosphärisches Ozon durch Tropopausenfaltungen in die Troposphäre. Die Breitenverteilung des Ozons weist an diesen Stellen sekundäre Maxima auf. Die Standardabweichung zeigt in diesen Gebieten ebenfalls Maxima in der Variabilität (Abb. 4.1, unten).

Neben den verstärkten stratosphärischen Intrusionen besteht auch eine höhere photochemische Ozonproduktion in der Nordhemisphäre infolge der höheren anthropogenen Emissionen von Vorläufergasen. Modellrechnungen ergaben im globalen Mittel ein Konzentrationsmaximum für Ozon zwischen 20 und 30°N und von da nach Norden einen allmählichen Abfall auf 25 ppb (Crutzen et al. 1994). Solche Prozesse scheinen über dem Atlantik nicht ausgeschlossen zu sein, dürften aber im Messzeitraum auch nicht vorherrschend gewesen sein. Zu den Modellrechnungen ist anzumerken, dass die Gitterweite des Modells grob war und die Aussagen daher bestenfalls qualitativen Charakter haben. Wenn die Gitterweite des Modells z. B. von 8°×10° auf 4°×5° halbiert wurde, wurden Tropopausenfaltungen besser beschrieben und der Zustrom stratosphärischer Luft in die Troposphäre verdoppelte sich (Velthoven and Kelder 1996).

Vom Erscheinungsbild der Ozonverteilung bei den Einzelreisen als Funktion der geographischen Breite lassen sich noch zwei Haupttypen unterscheiden: Die folgende Abbildung (Abb. 4.2) enthält zwei mittlere Breitenverteilungen von je 11 bzw. 14 Reisen mit ähnlichem Erscheinungsbild des oberflächennahen Ozons, die sich phänomenologisch deutlich unterscheiden.

In beiden Fällen liegt das Ozonmischungsverhältnis in der Südhemisphäre auf vergleichbarem Niveau. In der Südhemisphäre ist im Fall 1 (Abb. 4.2, unten) die Ozonverteilung gleichmäßig bei relativ einheitlicher Streuung. Im 2. Fall (Abb. 4.2, oben) weist die Südhemisphäre im Mittel relativ ähnliche Mischungsverhältnisse auf, doch zeigen sich bei 20°, 40° und 57°S etwas erhöhte Mischungsverhältnisse verbunden mit größerer Streubreite. Das bedeutet, dass in der Nordhemisphäre besondere Bedingungen vorhanden sind, die für starke Schwankungen der hemisphärischen Ozonmischungsverhältnisse und ihrer Verteilung sorgen.

An der ITCZ scheint im 1. Fall (Abb. 4.2 oben) das Ozonmischungsverhältnis erhöht, allerdings tritt dies nicht bei jeder Einzelreise auf.

In der Nordhemisphäre ist im 2. Fall (Abb. 4.2, unten) das Ozonmischungsverhältnis nördlich von 20°N deutlich erhöht, die Variabilität ist relativ einheitlich. Im oberen Fall ist das Nord-Süd-Profil wiederum stärker strukturiert mit Spitzen bei 20°N und 30°N. Im Bereich der ITCZ zeigt sich im Mittel ein Ozonanstieg, im Fall 1 dagegen ein Maximum. Inzwischen liegen hochauflösende Modellierungen zu Cumulonimben an der ITCZ vor, welche die tropische Tropopause durchstoßen und die von Newell als stratosphärische Fontäne charakterisiert wurden. Daraus ergeben sich Hinweise, dass hier stratosphärische Luft in die obere Troposphäre eingemischt wird (Frey et al. 2015; Newell and Gould-Stewart 1981). Ein speziell entwickeltes Modell mit einer Gitterweite von nur 333 m bestätigte diesen Vorgang speziell für den Tropenbereich (Sherwood and Dessler 2001). Ozonsondierungen im Tropengürtel zeigten, dass in der Troposphäre bei starker Gewittertätigkeit mit Überschießen über die Tropopause erhöhtes Ozon gemessen wird, im Gegensatz zu Bedingungen, bei denen die Atmosphäre ohne überschießende Gewitter behandelt wird.

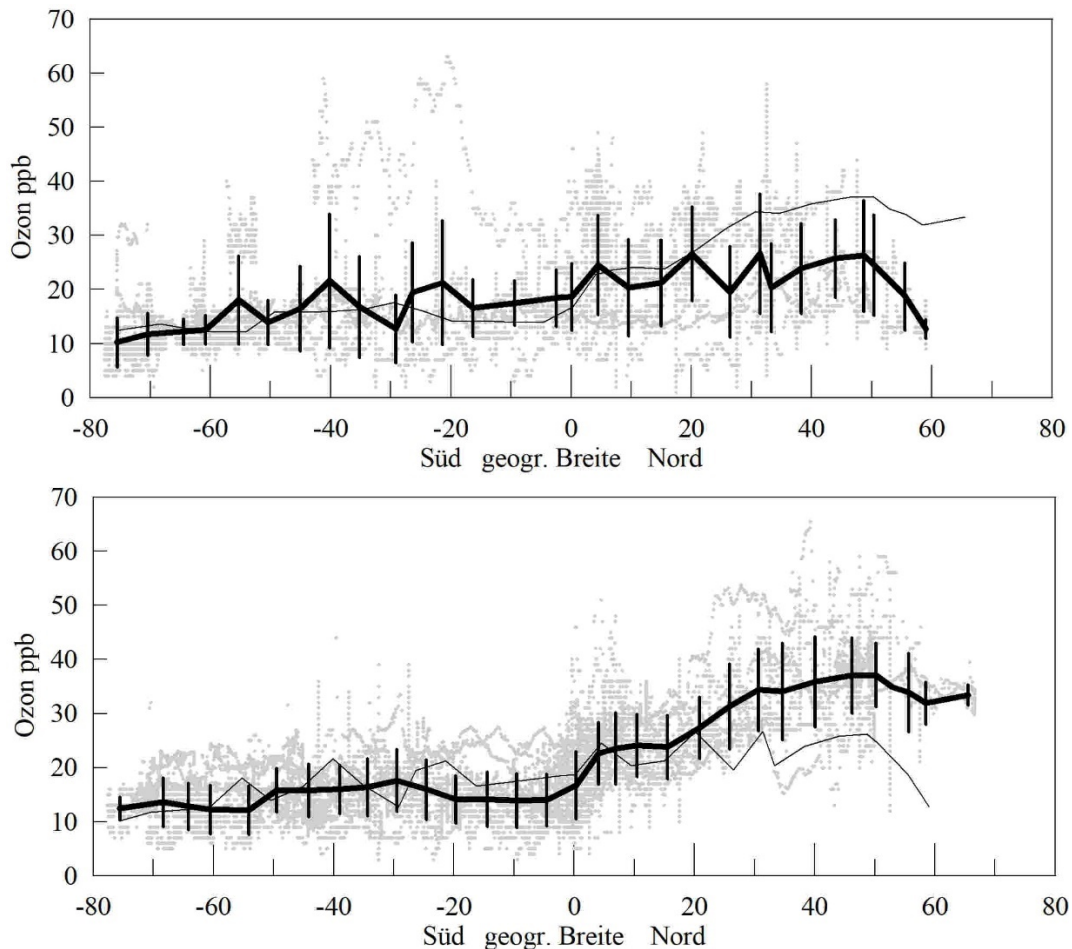


Abb. 4.2: Oben: NH und SH zeigen ähnliche Mischungsverhältnisse (Mittel über 11 Fahrten). Breiten, in denen Intrusionen vorkommen, zeichnen sich durch deutliche Sekundärmaxima aus. Unten: NH zeigt deutlich höhere Mischungsverhältnisse als SH (Mittel über 14 Fahrten). Das jeweils andere Profil ist dünn hinzugezeichnet.

Ob solche Luftpakete stratosphärischen Ursprungs durch Vertikalaustausch (downdrafts) in Schauern und Gewittern bis in Oberflächennähe gelangen können und als Erklärung von hier bei Einzelreisen beobachteten Ozonspitzen festgestellt werden können, bleibt noch zu bestätigen, ist aber auch nicht auszuschließen. Diese Möglichkeit wird im Kapitel 9 über die ITCZ noch ausführlicher behandelt.

Die Standardabweichung des Ozonmischungsverhältnisses ist in der Südhemisphäre im Mittel geringer als in der Nordhemisphäre und ist möglicherweise ein Ausdruck dafür, dass die dortigen größeren Landmassen zur Variabilität beitragen. Auffallend ist, dass im Fall 2, wenn in der Nordhemisphäre deutlich höhere Ozonmischungsverhältnisse vorliegen, die Standardabweichung im Mittel in allen Breiten relativ einheitlich ist und nur zwischen 25 und 55°N etwas erhöht ist (Abb. 4.3). Im Fall 1, also in den Situationen, in denen die Nord- gegenüber der Südhemisphäre kaum erhöhte Mischungsverhältnisse aufweist, variiert die Standardabweichung mit der Breite stärker und ist in beiden Hemisphären höher, als im andern Fall 2. Auf diesen phänomenologischen Sachverhalt kann hier nur hingewiesen werden, zur Erklärung wären sehr viel umfangreichere meteorologische Analysen erforderlich.

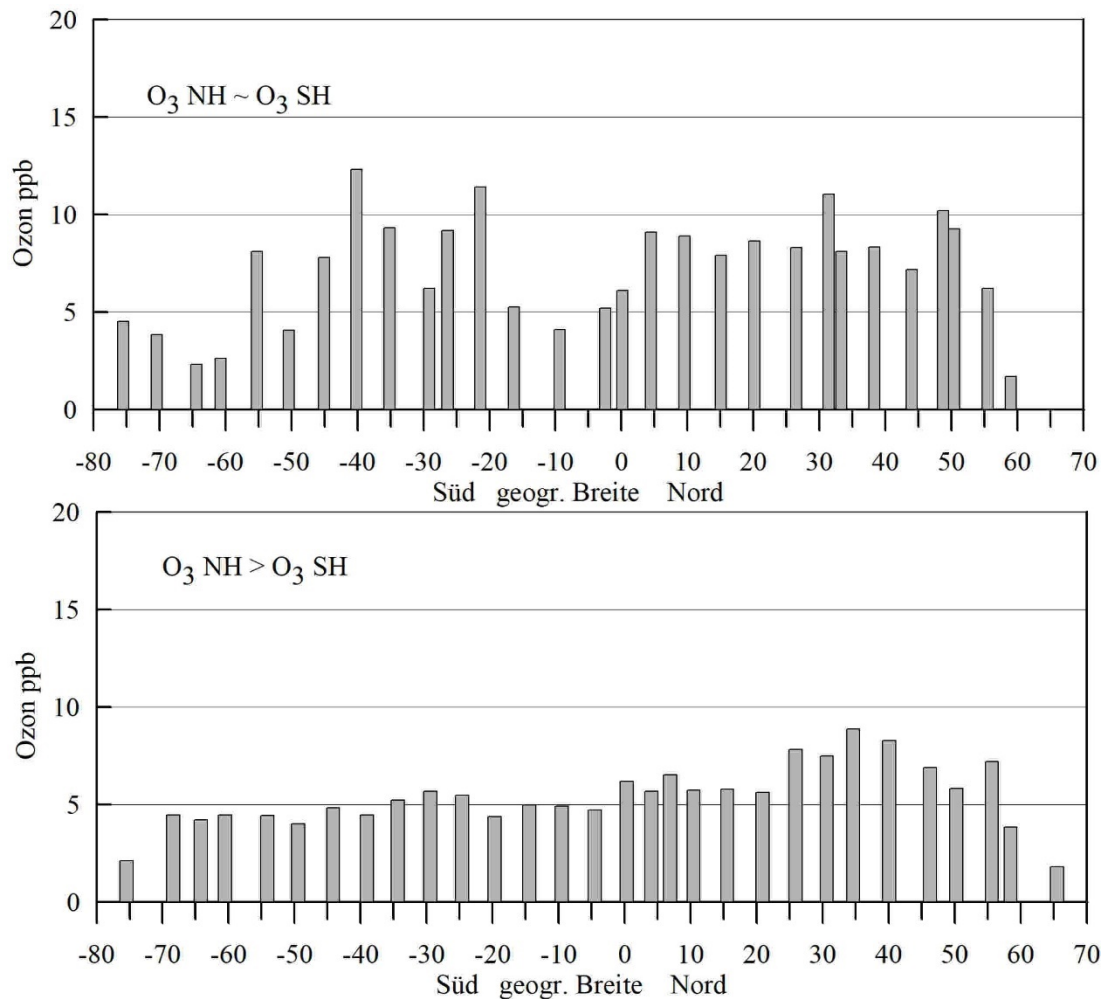


Abb. 4.3: Breitenverteilung der Standardabweichung der Ozonmischungsverhältnisse: oben: Fälle, in denen sie das Ozonmischungsverhältnis in beiden Hemisphären nur wenig unterscheidet; unten: Fälle, in denen die Nordhemisphäre eine nahezu doppelt so hohe Ozonmischungsverhältnisse aufweist, wie die Südhemisphäre.

Der atmosphärische Zustand und die Dynamik der Gesamtatmosphäre variieren offenbar von Zeit zu Zeit, wobei aus den Ozon-Breitenschnitten keine jahreszeitlich bedingte Veranlassung zu erkennen ist, welche für die große oder geringe Unterschiede im Mischungsverhältnis beider Hemisphären verantwortlich gemacht werden könnten. Unter den einen Bedingungen (Fall 2) scheinen in der Nordhemisphäre die stratosphärischen Intrusionen zu starker Zufuhr ozonreicher Luft aus der Stratosphäre sehr variabel zu sein, wobei gleichzeitig eine intensive hemisphärische Vermischung für eine einheitliche Verteilung des Ozons sorgt. Im anderen Fall 1 dagegen sind die stratosphärischen Intrusionen seltener oder weniger intensiv, doch machen sie sich in bestimmten Breiten deutlich ausgeprägter im Ozonmischungsverhältnis bemerkbar. Die innerhemisphärische Durchmischung scheint in diesem Zustand weniger intensiv zu verlaufen zu sein als im anderen Fall (2).

Tropopausenfaltungen sind eine wichtige Quelle für stratosphärische Ozonintrusionen (Danielsen and Mohnen 1977; Pan et al. 2010). Sie tragen im Norden und im Frühjahr viel stratosphärisches Ozon in die Troposphäre ein (Appenzeller et al. 1996). In der Südhemisphäre ist der stratosphärische Eintrag durch Tropopausenfaltungen insgesamt geringer als in der Nordhemisphäre.

Tropopausenfaltungen in Verbindung mit Tiefdruckgebieten oder Kaltlufttropfen bringen ozonreiche Luft aus der Stratosphäre bis in niedrigere Höhen in die Troposphäre, wo sie durch turbulente Mischung verteilt werden (Ancellet et al. 1994; Danielsen et al. 1987; Danielsen and Hipskind 1980; Danielsen and Mohnen 1977; Nieto et al. 2005; Price and Vaughan 1993; Song et al. 2016). Eine Situation mit erhöhtem Ozoneintrag durch einen Kaltlufttropfen wurde auch für den Atlantik anhand von Beobachtungen am Observatorium Izana auf Teneriffa dokumentiert (Kentarchos et al. 2000).

Außerdem können brechende Schwerewellen turbulente Mischung (clear-air-turbulence) in Tropopausenhöhe auslösen, wie vielfache Erfahrungen aus dem Flugverkehr belegen. Diese Vorgänge sind eher kleinräumiger Natur und dauern nur wenige Stunden an. Über die Häufigkeit wurden keine Literaturangaben gefunden, ebenso wenig wie über den damit verbundenen Zustrom aus der Stratosphäre in die Troposphäre. Die gelegentlichen besonders turbulenten Verhältnisse unterhalb der Tropopause waren schon früh an einer verringerten Steiggeschwindigkeit von Pilotballonen bemerkt worden (Schmauß 1921). Auch hierbei wird ozonreiche stratosphärische Luft nur für kurze Zeitspannen und nur in einem begrenzten Höhenbereich in die Troposphäre eingemischt und die Ozonopause liegt dann einige hundert Meter tiefer als die Temperaturtropopause (Claude et al. 2004).

Wie aus umfangreichen Trajektorienanalysen erkannt wurde, können im oberen Bereich von Tiefdruckgebieten nach Abregnen des Wasserdampfes relativ trockne Schichten entstehen. Wenn die beispielsweise im Islandtief aufgestiegene und trocken gewordene Luftmassen in der Hochtroposphäre anschließend nach Süden gelangen und im Subtropenhoch absinken, können sie trocken und ozonarm sein (Cau et al. 2007). Wird in eine solche Schicht durch clear-air-turbulence im Tropopausenbereich jedoch stratosphärisches Ozon zugemischt, kann eine trockne Schicht auch mit vermehrtem Ozon kombiniert sein und in den Subtropenhochs wieder bis zur Erdoberfläche absinken.

In der Atmosphäre existieren verschiedene, großräumig schwingende Systeme wie die NAO, AO, QBO, die 40 – 50-tägige Madden-Julian Oszillation (Reyes and Ramirez 1987), ENSO usw. Bei den Wechselwirkungen und Überlagerungen der verschiedenen Prozesse dürfte es zu unregelmäßig auftretenden ruhigeren und unruhigeren Zuständen der Troposphäre kommen, die sich in der Breitenverteilung des Ozons widerspiegeln und möglicherweise zu den oben dargestellten Situationen 1 und 2 beitragen. Entsprechende Untersuchungen zu den schwingen Systemen und den Auswirkungen in hemisphärischen Mischungsprozessen deuten diese Möglichkeit an (Brönnimann 2007; Hurrell and Deser 2010; Marshall et al. 2001; Sanchez-Santillan et al. 2007). Die Intensität und Häufigkeit der Tiefdruckbildung und die atmosphärische Stabilität im Gebiet des Atlantiks können also durch Fernwirkung von Zirkulationsmustern in anderen Gebieten beeinflusst werden. Sogar die Häufigkeit von arktischem Stratus, der eine stabile oberflächennahe Luftschicht mit geringem Austausch oben begrenzt, variiert mit ENSO infolge von Fernwirkungen. Die Meeresoberflächentemperatur unterliegt ebenfalls Schwankungen mit Auswirkungen auf die Konvektion und die vertikale Durchmischung. Davon wird natürlich auch das Ozonmischungsverhältnis in der Grenzschicht beeinflusst, ohne dass in dieser Arbeit eine Verifikation vorgenommen werden konnte, wie dies vorstattengeht.

Für den Bereich der Passatwinde ist außerdem eine Untersuchung von Augstein et al. von Bedeutung (Augstein et al. 1973), die nachgewiesen haben, dass die horizontale Massendivergenz absinkender Luft ein Minimum zwischen 700 und 850 hPa aufweist und erst unterhalb von 950 hPa ihr Maximum erreicht. Unterhalb der Passatinversion herrscht wegen der Konvektion (Passatkumuli) gute Vertikaldurchmischung. Das bedeutet, dass in der Höhe aus der Stratosphäre isentropisch einfließende ozonreiche Luftschichten bis in Bodennähe gelangen und nicht oberhalb der Passatinversion verbleiben. Vielmehr durchsetzt der Absinkprozess vollständig die Passatinversion, die durch Konvektion von unten in ihrer typischen Höhe gehalten wird.

In der Südhemisphäre kann troposphärisches Ozon photochemisch durch Biomassenverbrennung und NO_x aus Blitzen vor allem in Südafrika entstehen (Cros et al. 1988; Crutzen and Andreae 1990; Galanter et al. 2000; Marufu et al. 2000). Von Biomassenverbrennung in Südamerika beeinflusste Luftmassen gelangen in wenigen Tagen in stark verdünnter Form ebenfalls auf den Südatlantik (Crutzen and Andreae 1990; Holanda et al. 2020; Marufu et al. 2000; Thornhill et al. 2018). Ob bei einer Einzelreise mit photochemisch entstandenem Ozon gerechnet werden muss, hängt aber von der Jahreszeit und den großräumigen Transportprozessen ab und kann aus dem Ozonschnitt im Einzelfall nicht ohne aufwändige Zusatzanalysen nachgewiesen werden. Blitze sind für die troposphärische Ozonbildung aus NO_x eine wichtigere Quelle als Biomassenverbrennung (Sauvage et al. 2007).

Der stratosphärische Anteil am troposphärischen Ozon wird in manchen Untersuchungen als gering eingeschätzt, vorausgesetzt, dass die Austauschvorgänge an der Tropopause richtig modelliert wurden (Edwards 2003). Man muss zwar annehmen, dass die Tropopausenfaltungen inzwischen gut modelliert werden können, kleinräumige Austauschvorgänge bei clear-air-turbulence jedoch kaum richtig beschrieben werden, da sich in Tropopausenhöhe brechende Kelvin-Helmholz-Wellen und die Heftigkeit der damit verbundenen Turbulenz noch immer nicht für den Flugverkehr als Gefahr zuverlässig vorhersagen lassen. Krishnamurti zeigte demgegenüber, dass stratosphärische Intrusionen durch brechende Wellen einen bedeutenden Anteil zum troposphärischen Ozon beitragen (Krishnamurti et al. 1993).

Manche Klima-Chemie-Modelle lassen vermuten, dass stratosphärisches Ozon nur 15 % zum bodennahen Ozon beiträgt (Roelofs and Lelieveld 1997), wobei jedoch davon auszugehen ist, dass subskalige Austauschvorgänge nicht korrekt erfasst wurden. Subskalige Prozesse wie Brechen von Schwerewellen, die nur kurze Zeit andauern, aber häufig sein können, dürften noch unterschätzt sein und einen deutlich höheren Zufluss von stratosphärischem Ozon ausmachen, als luftchemische Transportmodelle mit geringer horizontaler Auflösung vermuten lassen. Lelieveld and Dentener (2000) bestätigen, dass die zugrundeliegenden meteorologischen Reanalysen des EZMWF keine hinreichend geringe Gitterweite hatte, um Tropopausenfaltungen aufzulösen. Es wird vermutet, dass die mit dem Klimawandel einhergehende Veränderung der stratosphärischen Zirkulation zu einer kleinen aber deutlichen Verstärkung des Zustroms von stratosphärischem Ozon in die Troposphäre führt (Neu et al. 2014).

In der oberflächennahen Schicht über dem Ozean verursacht die Photolyse von Ozon unter bestimmten meteorologischen Bedingungen, d.h. hohe UV-Intensität und geringe Vertikaldurchmischung, einen deutlichen Ozonverlust (Paluch and Lenschow 1991). Aufgrund solcher Abbauvorgänge treten auf manchen Reisen ausgeprägte Tagesgänge auf, bei anderen Reisen oder auf anderen Fahrtabschnitten dagegen nicht.

Die hier angegebene Literatur ist nur ein Ausschnitt aus dem weit umfangreicheren Bestand an verfügbaren Veröffentlichungen. Es sollte damit eine kleine Übersicht über die Prozesse gegeben werden, die für das Verständnis des oberflächennahen Ozons und seiner Breitenverteilung über dem Atlantik bedeutsam sind. Es sollte deutlich geworden sein, dass die Vorgänge komplex sind und die Messergebnisse von Einzelreisen im Detail nicht leicht zu interpretieren sind. Einige Erscheinungen von mittleren Nord-Süd-Verteilungen lassen sich jedoch deuten. Typischerweise greifen die oben geschilderten meteorologischen und luftchemischen Vorgänge ständig ineinander und tragen mit wechselnden Anteilen zum Mischungsverhältnis und zur Variabilität des oberflächennahen Ozons bei. Messungen sind daher wichtig, da sie die Kombination und Überlagerung aller dieser Transport- und Mischungs Vorgänge sowie luftchemischer Quellen und Senken enthalten. In den nachfolgenden Kapiteln werden weitere Vorgänge von mehr lokaler Bedeutung behandelt. Auch wenn die Aufklärung dieser komplexen Vorgänge weit vorangeschritten ist, kann die Forschung keineswegs als abgeschlossen gelten, denn aus den Breitenverteilungen des Ozons ergeben sich Anzeichen, dass die geschilderten unterschiedlichen Vorgänge von Jahr zu Jahr mit variablem Gewicht zum Verhalten des Ozons beitragen. Dies besser zu verstehen, wäre eine wichtige Aufgabe der Zukunft.

5. TAGESGÄNGE IN DER NORD- UND SÜDHEMISPHERE

Die Ausbildung von Tagesgängen hängt von luftchemischen und meteorologischen Prozessen ab, die sich gegenseitig verstärken oder hemmen können: photochemische Prozesse benötigen intensive Strahlung. Herrscht starker Wind mit hoher Turbulenz und starker Bewölkung, können sich Tagesgänge dagegen kaum ausbilden.

Zur Berechnung der mittleren Tagesgänge wurde die wahre Ortszeit verwendet, um Unterschiede, die bei Aufenthalten des Schiffes auf unterschiedlichen Längengraden entstehen, auszugleichen.

Bei der Bewertung von mittleren Tagesgängen in einer bestimmten geographischen Breite ist zu bedenken, dass Situationen, die günstig für photochemische Prozesse sind, mit allen übrigen Situationen gemittelt werden. Das ist für die Westwindzone typisch, in der wechselhaftes Wetter vorherrscht. Hier könnte eine Trennung des Datenkollektivs in Situationen mit hoher oder geringer Strahlung zu verschiedenen Tagesgängen führen. In Breiten wie den Subtropen oder in der Passatzzone, wo typischerweise hohe Einstrahlung vorherrscht, dürften die mittleren Tagesgänge als typisch anzusehen sein. Es gibt auf manchen Fahrtabschnitten Bereiche, in denen Tagesgänge ausgeprägt sind, auf anderen Abschnitten dagegen nicht. Ein Beispiel mit deutlichen Tagesgängen zeigte sich bei der Reise von *Akademik Fedorov* im Zeitraum 29.8. bis 3.9.1989 (Abb. 5.1), der durch photochemischen Abbau zur Mittagszeit im Breitenbereich 15°N bis 15°S bedingt war. Andere Autoren berichten ebenfalls über unterschiedliche Tagesgänge (Boylan et al. 2015), um nur einige zu nennen, doch ist ein Maximum am frühen Morgen als typisch anzusehen, dem ein Minimum um die Mittagszeit folgt, um dann abends und nachts wieder anzusteigen. Im relativ windschwachen Bereich der Kalmen prägen sich photochemische Vorgänge stärker aus als in den übrigen Breiten.

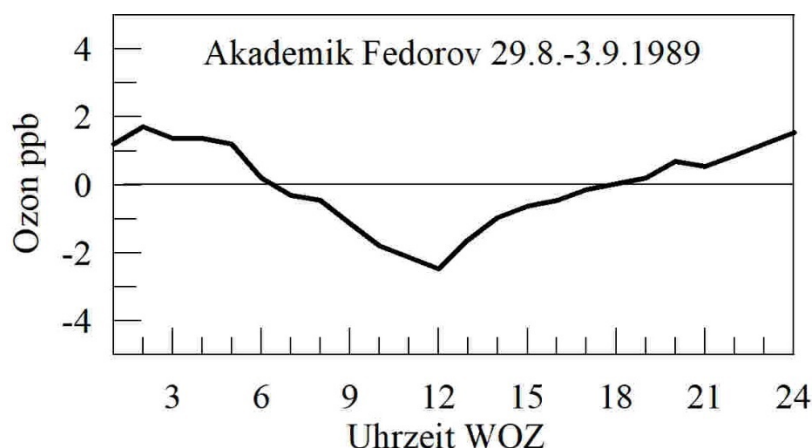
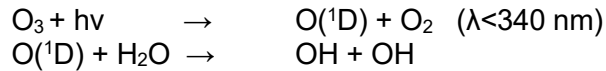


Abb. 5.1: Mittlerer Tagesgang des oberflächennahen Ozons an Bord von *Akademik Fedorov* im Breitenbereich 15°N bis 15°S, wobei die Tagesvariation von +2 bis -2 ppb Abweichung vom Mittelwert erreicht.

Unter Reinluftbedingungen bzw. unter NO_x-armen Verhältnissen wird Ozon durch HO₂ abgebaut vermöge der folgenden wesentlichen Reaktionen (Ayers et al. 1992; Conley et al. 2011; Crutzen et al. 1999; Hu et al. 2010):



Durch Reaktion von OH mit CO oder CH₄ entsteht HO₂ welches Ozon in OH umwandelt.



In den Tropen und in unmittelbarer ITCZ-Nähe sollte dieser Prozess intensiv ablaufen, wobei die Abbaurate in der Größenordnung von 1 – 2 ppb/Tag befunden wurde. Bei hoher Sonneneinstrahlung zur Mittagszeit erreicht der Ozonabbau sein Maximum und erzeugt ein Ozonminimum im Tagesverlauf. In Konkurrenz zu diesem photochemischen Abbau stehen meteorologische Mischungsvorgänge, die etwa durch Konvektion Ozon aus höheren Luftschichten nach unten oder horizontal aus Nachbargebieten mit höheren Ozonmischungsverhältnissen herantransportieren und den photochemisch bedingten Ozonverlust auffüllen (Laat and Lelieveld 2000). In der realen Atmosphäre überlagern sich diese Vorgänge. Ist die Meeresoberflächentemperatur niedrig, wie über den Auftriebsgebieten vor der Westküste Afrikas, dann wird der konvektive Vertikalaustausch gering sein und der photochemische Ozonabbau kann überwiegen. In labil geschichteter Luft ist der Vertikalaustausch dagegen hoch und der photochemische Ozonabbau dürfte in solchen Gebieten weniger ausgeprägt in Erscheinung treten.

Bei der erwähnten Konkurrenz im Bereich der ITCZ stehen sich photochemischer Abbau und Ozonzufuhr aus der Höhe gegenüber, wobei sich zusätzlich die mehr oder weniger stark ausgeprägte ITCZ auswirkt. Unter wolkenarmen Bedingungen mit hoher Einstrahlung und geringem Vertikalaustausch überwiegt der photochemische Ozonabbau und es kommt zu einem Ozonminimum in der Grenzschicht. Dabei kann das Mischungsverhältnis auf nahe Null absinken. Bei starkem Vertikalaustausch kann dagegen aus höheren Schichten der Troposphäre Ozon rasch nach unten gebracht werden und den photochemischen Abbau, der bei vorhandener Konvektionsbewölkung gering ist, überkompensieren und ein oberflächennahes Ozonmaximum im Bereich der ITCZ erzeugen (s. Kapitel 9 zur ITCZ). Verstärkt wird der Vorgang, wenn durch den subtropischen Tropopausenbruch ozonreiche Luftschichten, erkennbar auch an der gleichzeitigen Trockenheit, zum Äquator gelangt.

Aus Modellierungen in den Tropen ergab sich das Postulat nach einem weiteren Ozonabbauprozess in diesem Bereich, wofür Halogene infrage kommen. Dies konnte durch eine längerfristige Messkampagne auf den Kapverden bestätigt werden (Read et al. 2008). Durch Berücksichtigung eines zusätzlichen Halogenabbaus konnten Tages- und Jahresgänge in den Tropen von den Modellen in besserer Übereinstimmung mit der Realität wiedergegeben werden. Unklar ist noch, ob Küsteneffekte, wobei starker Algenbesatz die Halogenemission erhöht, eine Rolle spielen, oder ob auch über dem freien Ozean ebenso hohe Halogenemissionen vorhanden sind, die den Ozonabbau verstärken.

Der Tagesgang des oberflächennahen Ozons variiert mit der geographischen Breite und mit der Jahreszeit. Für alle Schiffs-Reisen wurden mittlere Tagesgänge für jeweils zwei Monate und 15 Breitengrade ausgewertet, sofern mehr als 25 Messtage verfügbar waren (Abb. 5.3 bis 5.10). Wenn weniger Messtage verfügbar waren, wurde der Tagesgänge gestrichelt dargestellt. Die einzelnen Tagesstunden waren nicht gleich häufig, weil manchmal Störungen durch Schiffsabgase vorlagen. Dadurch kann der mittlere Tagesgang etwas unruhiger als in Wirklichkeit erscheinen.

In polaren Breiten besteht die Möglichkeit eines totalen Ozonabbaus durch BrO im arktischen Frühling (Barrie et al. 1988), wodurch ebenfalls nicht alle Tagesstunden gleichermaßen betroffen sein müssen und eine Unruhe im Tagesgang verursacht werden kann. Die folgende Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die die mittlere Tagesvariation in den verschiedenen Breiten und Jahreszeiten.

Man sieht, dass die Tagesschwankung in den meisten Breiten im Mittel normalerweise innerhalb ± 2 ppb oder sogar ± 1 ppb bleibt (Abb. 5.2). In hohen Breiten ist die Tagesschwankung besonders gering. Das schließt nicht aus, dass in diesen Breiten gelegentlich stärkere Tagesschwankungen vorkommen, doch sind sie offenbar selten. Die auffallend starke Tagesvariation im Bereich $0 - 15^\circ\text{N}$ im März und April dürfte durch Ozonspitzen zu erklären sein, die gelegentlich 40 ppb überschreiten und bei starken Vertikalaustausch auftreten. Auch in anderen Breiten kommen große Tagesschwankungen vor, die 2 ppb überschreiten und wahrscheinlich durch hohe Ozonmaxima entstanden sind, die nur bei einzelnen Reisen angetroffen wurden und den normalerweise geringen Tagesgang über dem Atlantik völlig maskiert haben. Eine Klimatologie von ungestörten Tagesgängen im Jahresverlauf setzt eine noch größere Häufigkeit von Reisen voraus, die im Verlauf dieser Arbeit nicht erreicht wurde. In hohen Breiten bleibt die Tagesschwankung in der Regel unter ± 1 ppb. Aus den Breitenschnitten der Einzelreisen wird ersichtlich, dass manchmal erhöhte Ozonmischungsverhältnisse über große Breitenbereiche beobachtet wurden, die sich natürlich auch im mittleren Tagesgang auswirken. Es zeigt sich in den nachfolgenden Abbildungen der Tagesgänge die Vielfalt der meteorologischen und luftchemischen Vorgänge in einer besseren Übersicht, die sich aus Einzelreisen nicht ergeben kann. Vom Pazifik werden Tagesvariationen in ähnlicher Größenordnung gemeldet (Thompson 1994).

Tab. 5.1: Tagesschwankung der mittleren Tagesgänge in verschiedenen Breiten, sofern mehr als 25 Messtage verfügbar waren. n gibt die Anzahl der verfügbaren Messtage an.

| Jahreszeit Breite | Jan-Feb Max/Min [n] | Mär-Apr Max/Min [n] | Mai-Jun Max/Min [n] | Jul-Aug Max/Min [n] | Sep-Okt Max/Min [n] | Nov-Dez Max/Min [n] |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 75 – 90°N | | | 0,6/-0,4 190 | 0,2/-0,2 235 | 1,9/-1,5 42 | 0,8/-0,7 52 |
| 60 – 75°N | | | 1,0/-0,8 160 | 0,5/-0,7 300 | 0,3/-0,6 120 | |
| 45 – 60°N | 1,7/-1,6 38 | 0,9/-0,7 112 | 0,4/-0,6 48 | 0,8/-0,6 94 | 1,3/-0,7 56 | 3,0/-1,5 28 |
| 30 – 45°N | 1,4/-1,4 92 | 1,1/-1,2 79 | 1,5/-1,3 26 | 1,2/-1,4 33 | 0,8/-1,0 39 | 1,6/-2,0 30 |
| 15 – 30°N | | 1,6/-1,5 63 | | | 1,2/-0,6 58 | 0,9/-0,9 31 |
| 0 – 15°N | 0,6/-1,0 68 | 2,4/-3,1 47 | | | 1,6/-2,0 38 | 0,7/-0,9 32 |
| 0 – 15°S | 1,0/-1,3 28 | | 1,6/-1,8 46 | | 0,4/-0,4 35 | 1,4/-1,1 38 |
| 15 – 30°S | 0,8/-0,9 28 | | 1,8/-1,8 47 | | | |
| 30 – 45°S | 0,6/-0,5 42 | 1,9/-2,7 27 | | | 0,7/-1,1 35 | 0,4/-0,7 46 |
| 45 – 60°S | 0,2/-0,3 92 | 0,3/-0,4 75 | | 0,8/-1,0 30 | 0,8/-0,7 47 | 0,5/-0,5 93 |
| 60 – 75°S | 0,3/-0,3 226 | 0,2/-0,3 104 | 0,7/-0,7 45 | 0,4/-0,4 76 | 0,5/-0,7 69 | 0,5/-0,7 159 |
| >75°S | 0,5/-0,5 55 | | | | | 1,0/-1,0 28 |

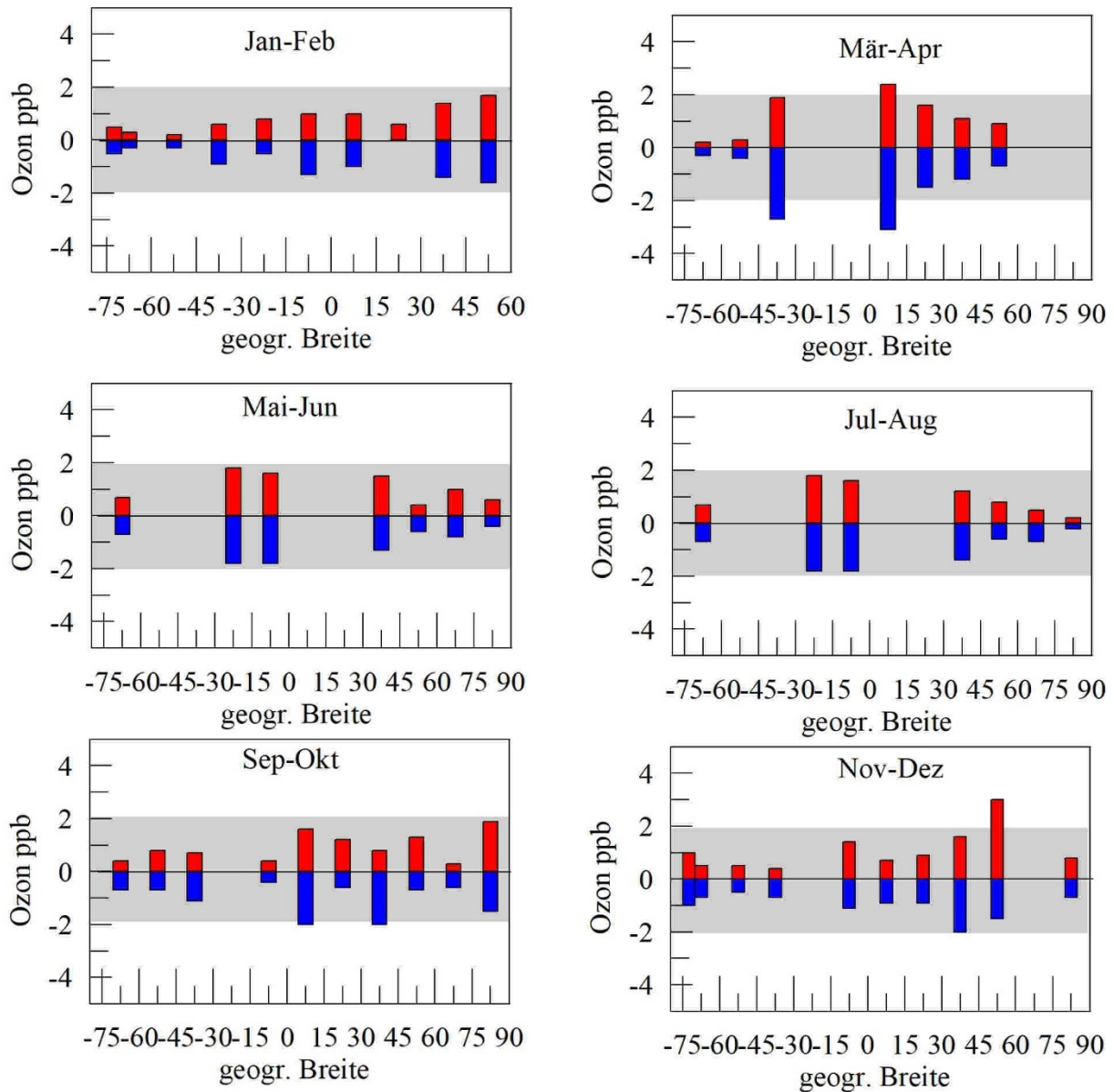


Abb. 5.2: Mittlere Tagesvariation (Maximum und Minimum des Tagesganges) des oberflächennahen Ozons für jeweils zwei Monate und 15 Breitengrade. Die Anzahl der verfügbaren Tage ist aus Tabelle 5.1 ersichtlich. Die schattierte Fläche charakterisiert die Schwankungsbreite von ± 2 ppb.

Die folgenden Abbildungen 5.3 bis 5.10 zeigen die mittleren Tagesgänge des oberflächennahen Ozons über dem Atlantik, jeweils gemittelt über zwei Monate und 15 Breitengrade, sofern eine Häufigkeit von mehr als 25 Tagen verfügbar war. Eine gewisse Unruhe ist noch dadurch bedingt, dass nicht alle Tagesstunden in gleicher Häufigkeit abgedeckt waren oder auch dadurch, dass in Breiten der Tropopausenbrüche häufige stratosphärischen Intrusionen für eine hohe Tagesvariabilität sorgen, da ihr Auftreten nicht an eine bestimmte Tageszeit gebunden ist. In den meisten Fällen liegen die Nachtwerte höher als um die Mittagszeit, doch gibt es auch Abweichungen davon. Ozon aus Tropopausenfaltungen gelangt nicht zu einer bestimmten Tageszeit in die Nähe der Ozeanoberfläche und kann daher die Lage des Tagesmaximums verschieben und den Tagesgang stark verändern.

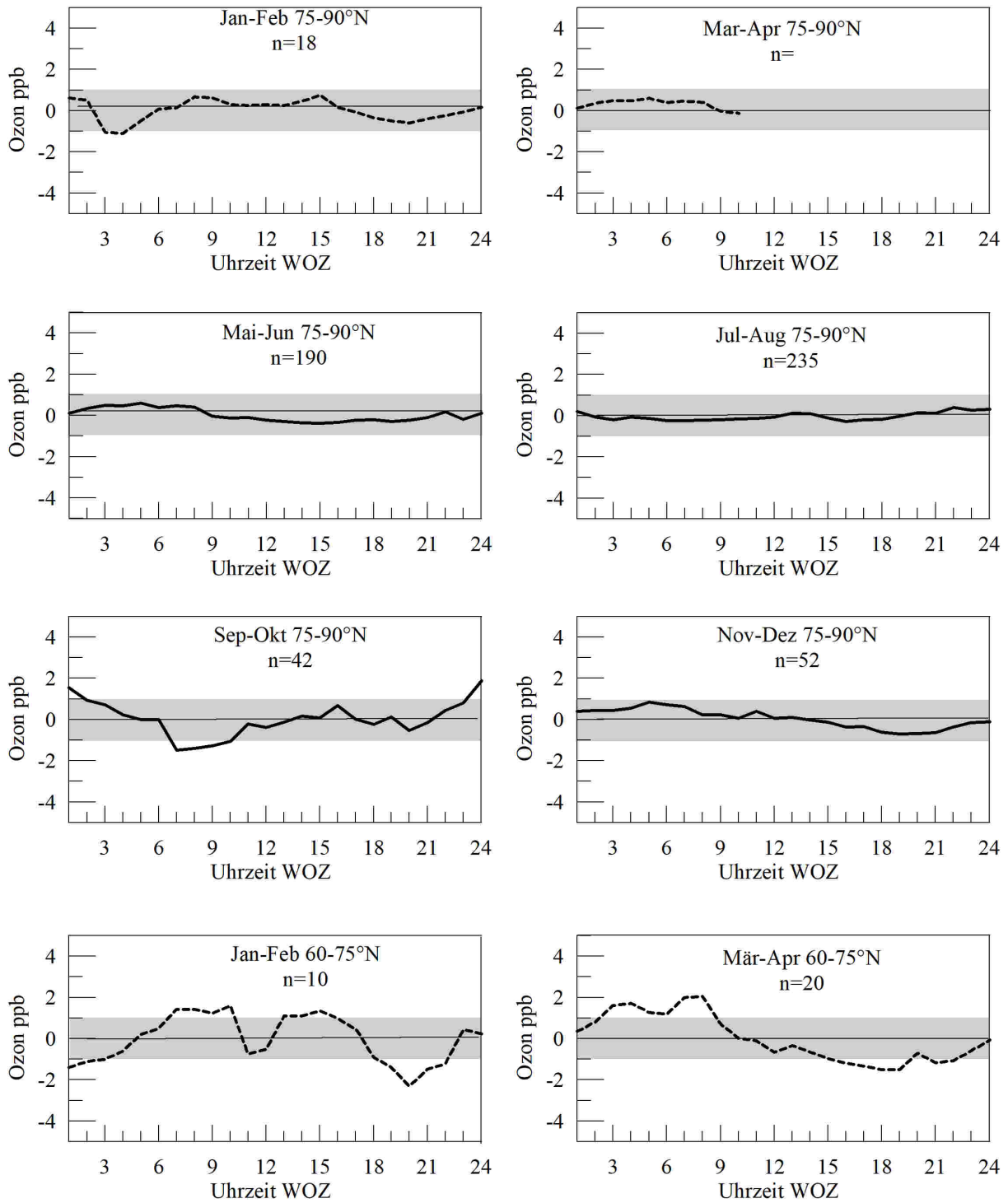


Abb. 5.3: Mittlere Tagesgänge des oberflächennahen Ozons (Abweichung vom Tagesmittel) über dem Atlantik, für jeweils 2 Monate und 15 Breitengrade. Bei weniger als 25 Fällen ist der Tagesgang gestrichelt.

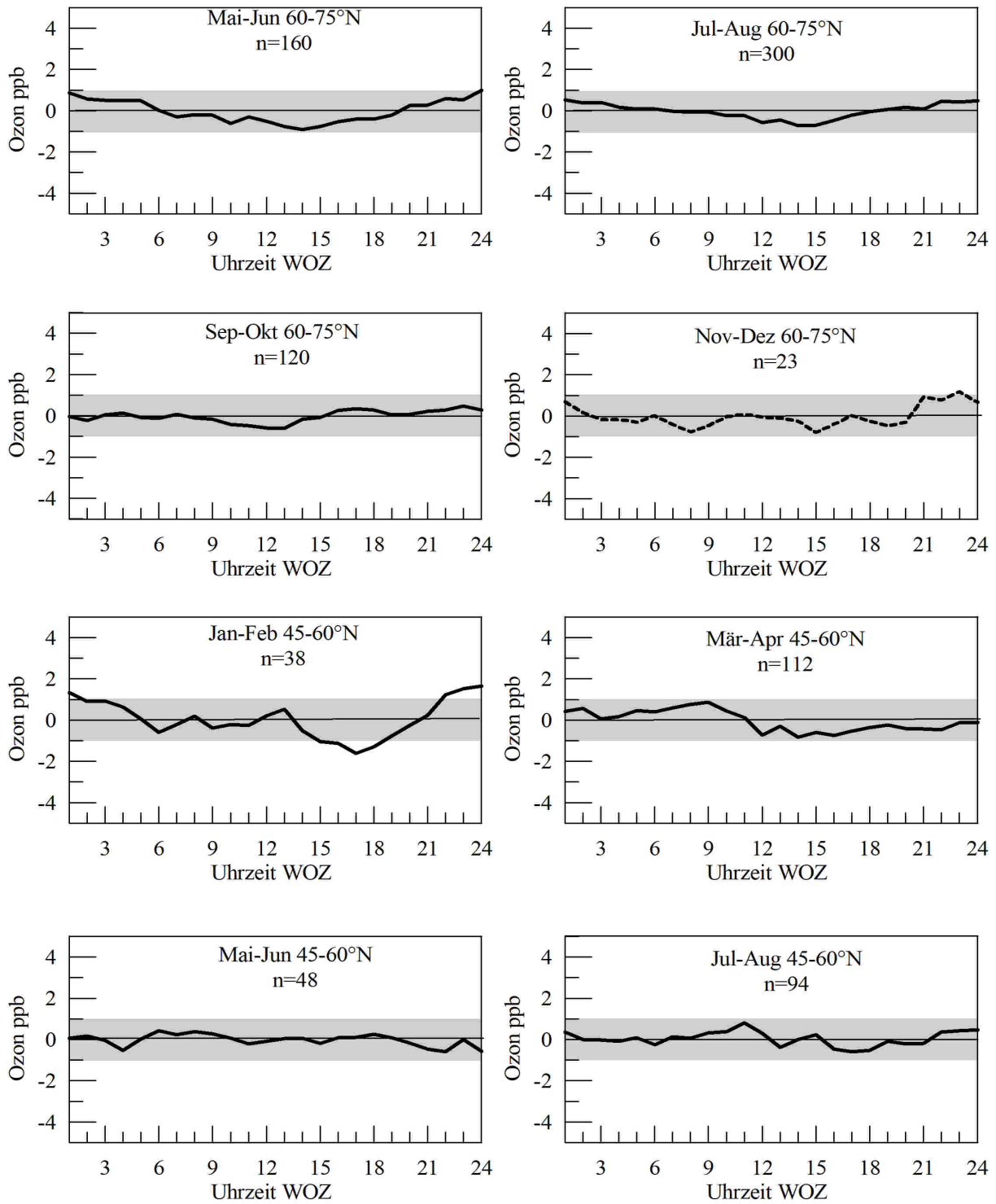


Abb. 5.4: Fortsetzung von Abb. 5.3: Mittlere Tagesgänge des oberflächennahen Ozons (Abweichung vom Tagesmittel) über dem Atlantik, für jeweils 2 Monate und 15 Breitengrade.

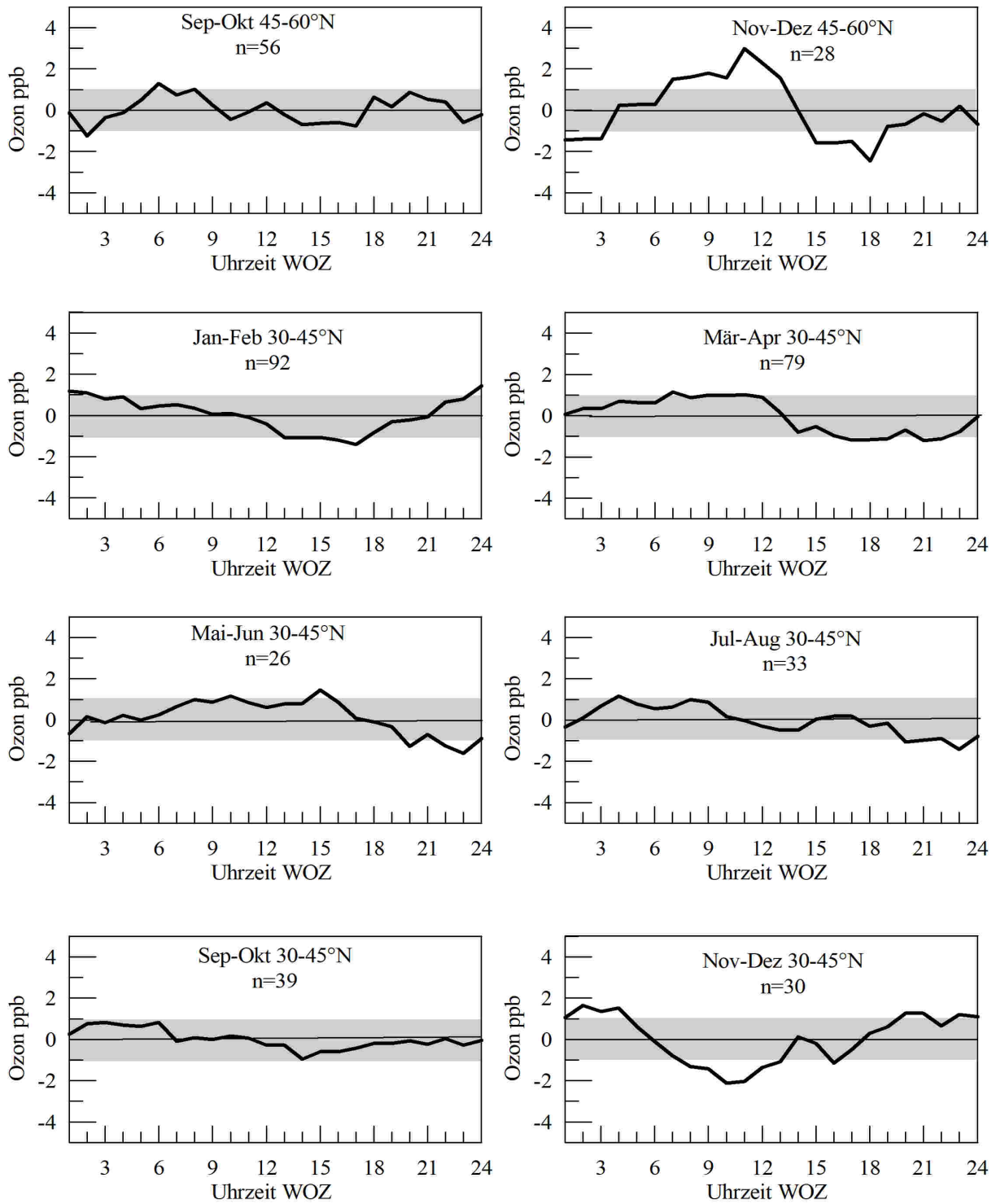


Abb. 5.5: Fortsetzung von Abb. 5.3: Mittlere Tagesgänge des oberflächennahen Ozons (Abweichung vom Tagesmittel) über dem Atlantik, für jeweils 2 Monate und 15 Breitengrade.

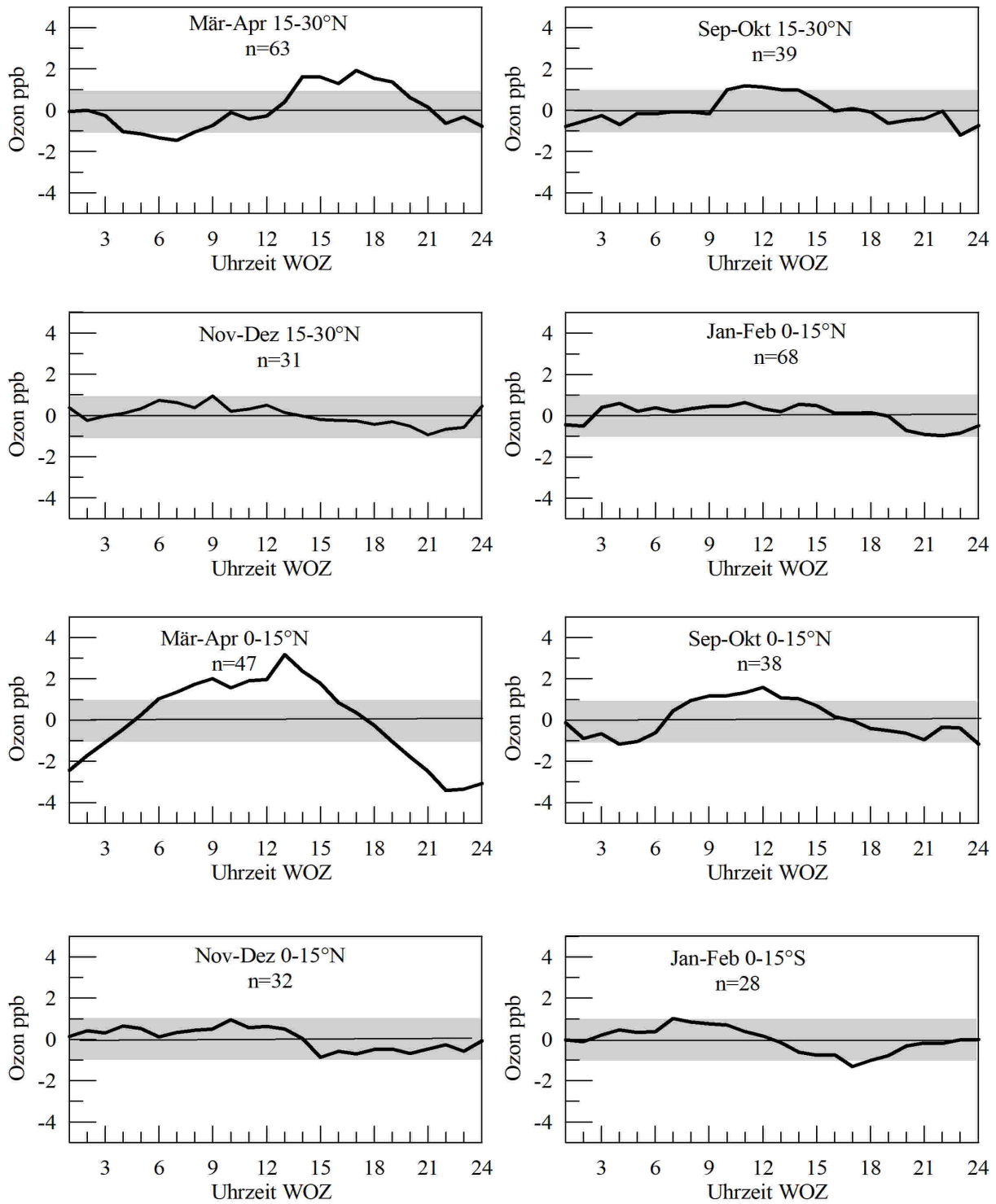


Abb. 5.6: Fortsetzung von Abb. 5.3: Mittlere Tagesgänge des oberflächennahen Ozons (Abweichung vom Tagesmittel) über dem Atlantik, für jeweils 2 Monate und 15 Breitengrade. Im Bereich März – April in 0 – 15°N weicht der Tagesgang durch einzelne, im Bereich der ITCZ auftretende hohe Ozonspitzen vom sonst üblichen Tagesgang deutlich ab. Das Mittagmaximum ist in abgeschwächter Ausprägung auch im September und Oktober noch vorhanden.

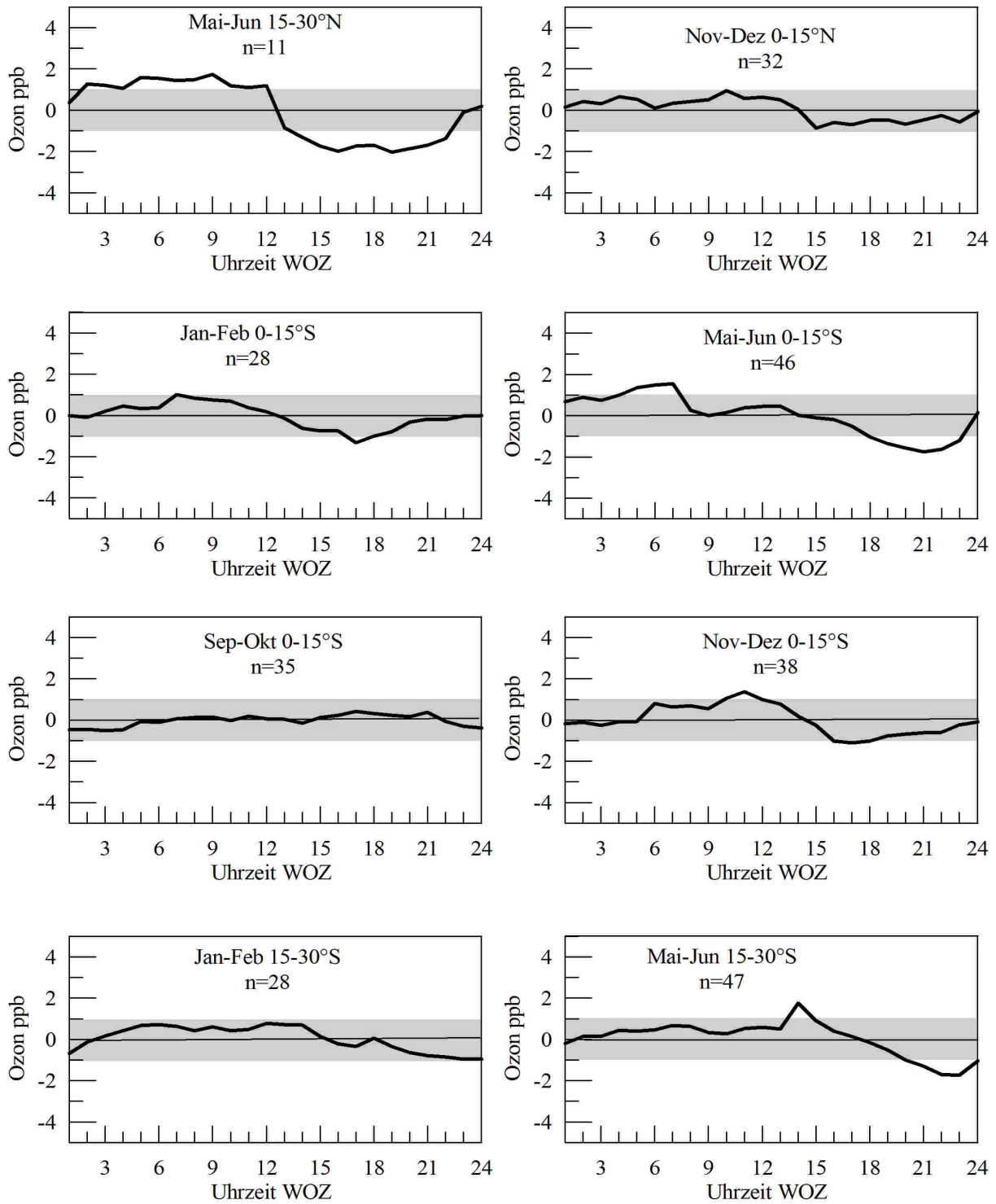


Abb. 5.7: Fortsetzung von Abb. 5.3: Mittlere Tagesgänge des oberflächennahen Ozons (Abweichung vom Tagesmittel) über dem Atlantik, für jeweils 2 Monate und 15 Breitengrade.

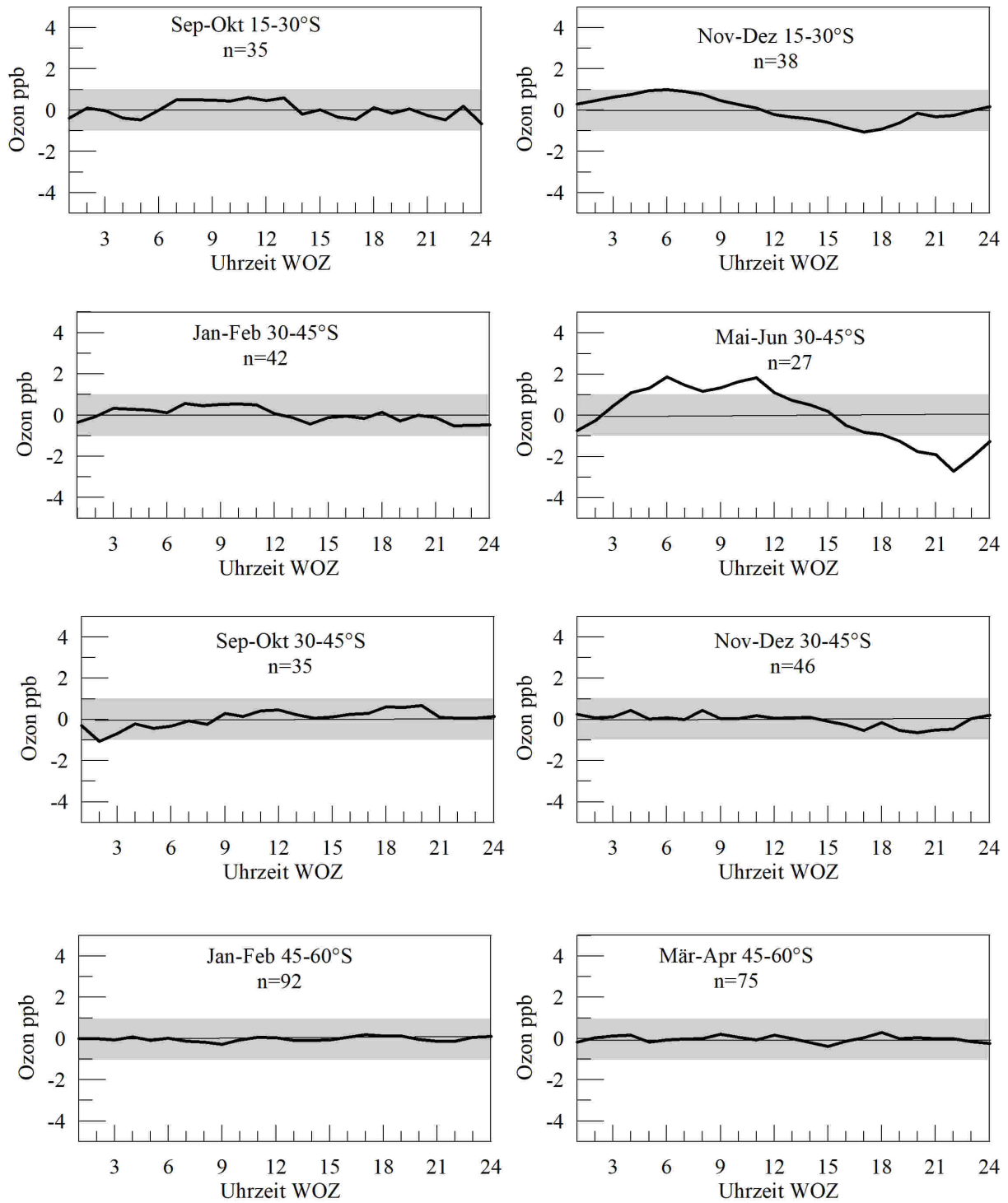


Abb. 5.8: Fortsetzung von Abb. 5.3: Mittlere Tagesgänge des oberflächennahen Ozons (Abweichung vom Tagesmittel) über dem Atlantik, für jeweils 2 Monate und 15 Breitengrade.

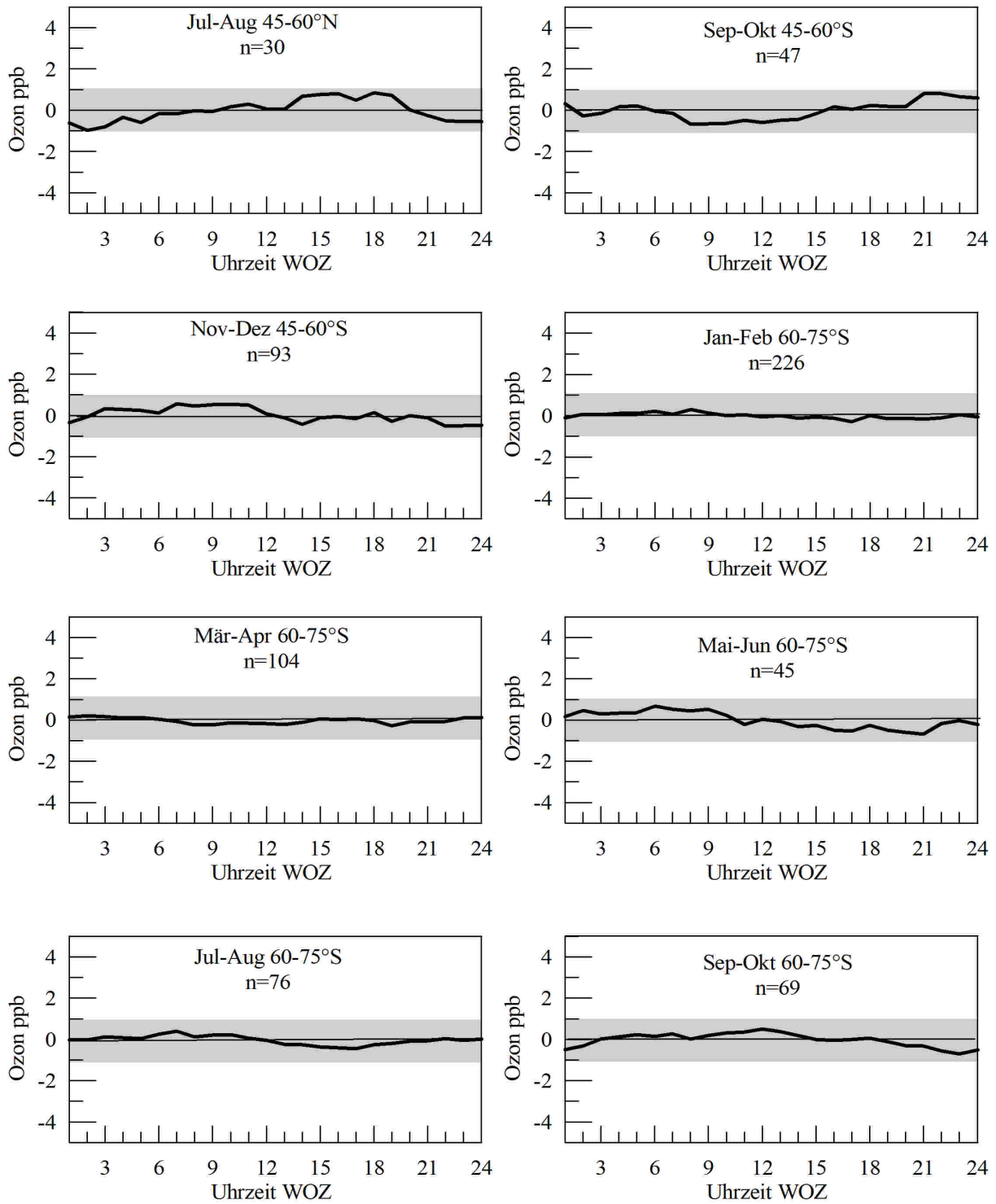


Abb. 5.9: Fortsetzung von Abb. 5.3: Mittlere Tagesgänge des oberflächennahen Ozons (Abweichung vom Tagesmittel) über dem Atlantik, für jeweils 2 Monate und 15 Breitengrade.

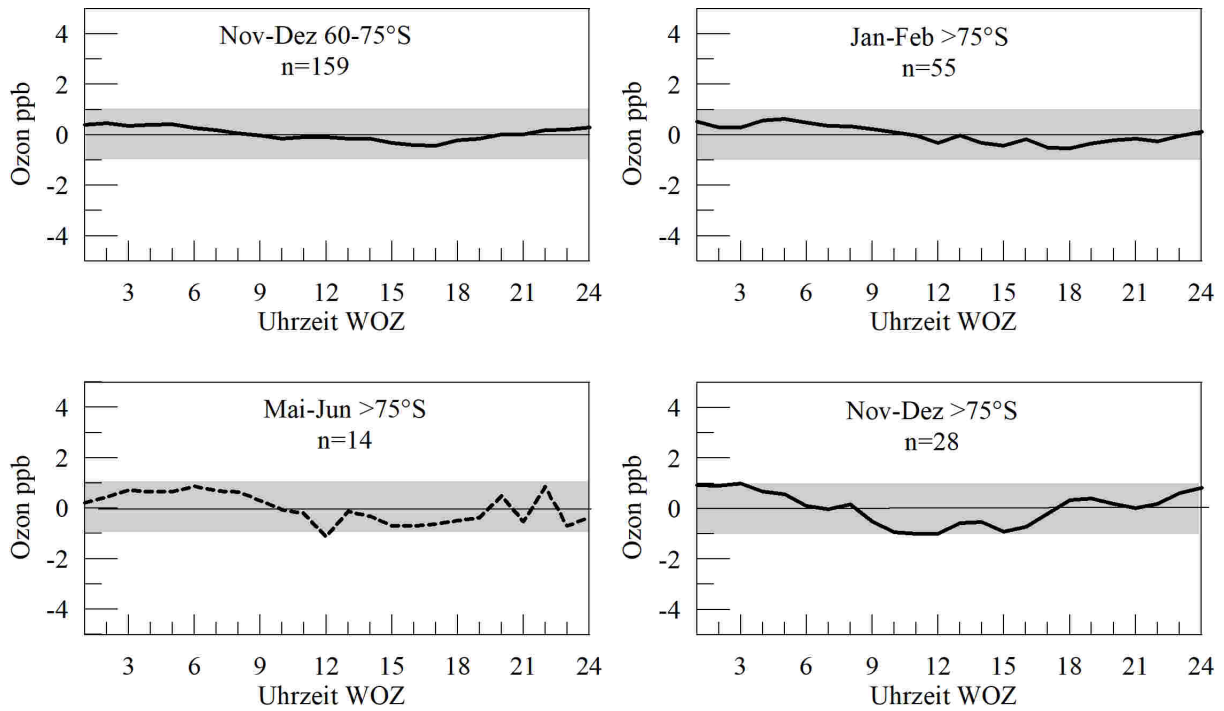


Abb. 5.10: Fortsetzung von Abb. 5.3: Mittlere Tagesgänge des oberflächennahen Ozons (Abweichung vom Tagesmittel) über dem Südatlantik und dem Weddellmeer, für jeweils 2 Monate und 15 Breitengrade. Bei weniger als 25 Fällen ist der Tagesgang gestrichelt.

6. JAHRESGÄNGE IN DER NORD- UND SÜDHEMISPHERE

Die Jahresgänge des oberflächennahen Ozons sind für beide Hemisphären getrennt zu betrachten. In der Nordhemisphäre ist der Zufluss von Ozon aus der Stratosphäre durch Tropopausenfaltungen höher als in der Südhemisphäre. Für die Nordhemisphäre zeichnete sich in zahlreichen Untersuchungen ab, dass Tropopausenfaltungen keinem jahreszeitlichen Gang unterliegen (z. B. Monks 2000). Wohl aber ist die Atmosphäre im Frühling häufiger labil geschichtet, wodurch in der oberen Troposphäre immer vorhandene hohe Ozonmischungsverhältnisse zu dieser Jahreszeit rasch in Bodennähe gelangen und sich in unverschmutzter Atmosphäre typischerweise ein Frühjahrsmaximum ergibt.

6.1 Nordhemisphäre

Von den Reisen bis 1986 hatte eine frühere Auswertung deutliche Jahresgänge in der Nordhemisphäre ergeben (Winkler 1988), die mit dem erweiterten Datenmaterial wenig ausgeprägt ausfielen. Die Nordhemisphäre ist insgesamt sehr unruhig. Es lässt sich aus den verfügbaren 77 Schiffsreisen über dem Atlantik kein klarer Jahresgang nachweisen, denn die Schiffsreisen sind zu selten und die Variabilität des oberflächennahen Ozons ist zu hoch. Insbesondere ist die Beobachtungshäufigkeit in den verschiedenen Monaten unterschiedlich groß. Hohe nördliche Breiten wurden vor allem in den Sommermonaten häufig besucht, in den Wintermonaten dagegen nur in einzelnen Jahren. Beim Zeichnen der Jahresgänge wurden Monate, von denen kaum Messungen vorhanden waren, weniger stark gewichtet.

Bemerkenswert ist der zweigipflige Jahresgang des oberflächennahen Ozons zwischen 68 und 80°N, der auf Spitzbergen und in den Schiffsmessungen gleichermaßen auftritt und durch die Ozonsondierungen in Ny Ålesund bestätigt wird (Christiansen et al. 2017).

6.2 Südhemisphäre

In der Südhemisphäre herrschen eindeutigeren Verhältnisse: in allen Breiten ist ein klarer und ähnlicher Jahresgang festzustellen. Das Jahresmaximum tritt in Breiten von 0°S bis 40°S im Mai, zwischen 50° und 70°S im Juni und an der GvN-Station im Juli, also im Südwinter auf. Für die Südhemisphäre insgesamt gilt, dass die Schiffsreisen überwiegend im Südsommer stattfanden und die Wintermonate weniger gut abgedeckt wurden.

Zum Vergleich sind in Abb. 6.1 für die Jahresgänge in beiden Hemisphären Jahresgänge einiger Küsten- oder Inselstationen eingetragen, die auf mehrjährigen, kontinuierlichen Messungen beruhen und zeigen, dass das von Schiffsreisen gewonnene Material noch nicht umfassend genug ist, den Jahresgang über dem Atlantik sicher genug darzustellen. Die Messungen an den Landstationen stammen zum Teil aus anderen Jahren als die von den Schiffsreisen und gelten nur für eine bestimmte Breite, während die Jahresgänge vom Atlantik Mittelwerte über jeweils 15 Breitengrade darstellen.

An Kontinentalstationen der Nordhemisphäre hat sich das Jahresmaximum, das ursprünglich im Frühling beobachtet wurde, in die Sommermonate verschoben, da wegen der hier vorhandenen hohen NO_x Emissionen vor allem im Sommer eine deutliche photochemische Produktion stattfindet (Cooper et al. 2014). Die Ozonmessungen auf dem Atlantik bestätigen für den Zeitraum 1977 bis 1996 noch keine derartige Verschiebung, so dass hier noch weitgehend ungestörte Bedingungen vorhanden waren.

In der Südhemisphäre ist das Jahresmaximum nach Beobachtungen an Landstationen zu im Südfrühling erwarten, was sich aus den Schiffsbeobachtungen nicht bestätigen lässt. Der Grund für die Diskrepanz dürfte sein, dass in Kapstadt und Ushuaia sich bereits Ozon, welches bei der Biomassenverbrennung entsteht, bemerkbar macht. Das Maximum der südhemisphärischen Biomassenverbrennung fällt in die Monate Juli bis Oktober.

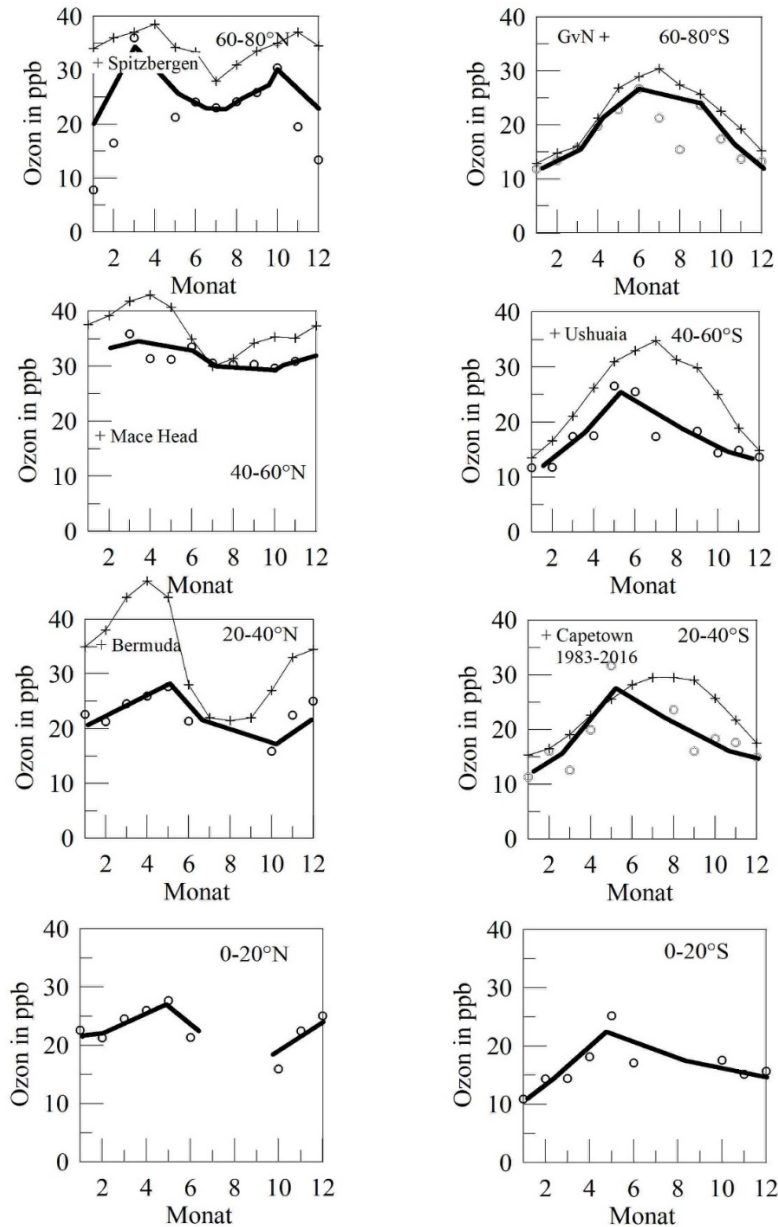


Abb. 6.1: Jahresgänge des oberflächennahen Ozons auf dem Atlantik, gemittelt über 20 Breitengrade. Zusätzlich sind Jahresgänge einiger Bodenstationen eingetragen: Spitzbergen (Rummukainen et al. 1996); Bermuda (Oltmans and Levy 1992); Mace Head (Derwent et al. 2007); Kapstadt (Brunke and Scheel 1998); Ushuaia (Nadzir et al. 2018); GvN-Station (Abb. 10.6).

7. TRENDS IN DER NORD- UND SÜDHEMISPHERE

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ozonmischungsverhältnisse in verschiedenen Breitenzonen im zeitlichen Verlauf, um Trends zu erkennen (Abb. 7.1 – 7.4). Das Ergebnis unterscheidet sich für beide Hemisphären. Anzumerken ist, in den Breitenzonen Jahressgänge vorhanden sind, die nicht reduziert wurden. Wenn in einem Jahr also von einem Monat Daten vorliegen, in den anderen Jahren dagegen nicht, führt der Jahressgang zu Variationen, die bei einer strengen Betrachtung beseitigt werden müssten. Da die Jahressgänge aber von Jahr zu Jahr ebenfalls unterschiedlich verlaufen können, wurde eine solche Reduktion unterlassen.

Die Trendanalysen zeigen in der NH keine langfristige Veränderung der Ozonmischungsverhältnisse, abgesehen vom Zeitraum vor 1985, in dem eine Zunahme festzustellen war. Lediglich nördlich von 80°N ist eine leichte Zunahme im gesamten Zeitraum festzustellen. Es wurden keine Signifikanzuntersuchungen vorgenommen, da sie wegen der jahreszeitlich ungleichmäßigen Datenlage zu wenig aussagekräftig ausfallen würden.

Zu einem ähnlichen Befund kamen Cooper et. al. bei der Trendanalyse von Ozonmessungen an Landstationen, wobei sie in den 80er Jahren ausgeprägtere Trends fanden als danach (Cooper et al. 2014). Kasibhatla et al. schlossen aus Modellierungen, dass über dem Atlantik das Ozonmischungsverhältnis doppelt so hoch sein müsse, als in vorindustrieller Zeit (Kasibhatla et al. 1996). Andere Autoren fanden dagegen ebenfalls aus Modelldaten, dass die Abluffahne von Nordamerika über 2000 km in 1 km Höhe vorhanden sein sollte, eine Ozonerhöhung in der Grenzschicht aber wenig deutlich sein würde (Savoie et al. 1992).

Für die Station Barbados schlossen Savoie et al. aus den Verläufen von Ozon sowie aus ²¹⁰Pb und NO₃⁻, dass ein gewisser Anteil des Ozons aus der Biomassenverbrennung in den Savannen südlich der Sahara stammen dürfte (Schnell et al. 1991).

Anders zeigen sich die Verhältnisse in der Südhemisphäre, wo in allen Breiten ein Anstieg über den gesamten Beobachtungszeitraum vorhanden ist, der nach Süden hin sich im betrachteten Zeitraum noch stärker ausfällt:

Tab. 7.1: Trend der oberflächennahen Ozonmischungsverhältnisse in ppb/a in der Südhemisphäre 1978 – 1996.

| Breite | 0 – 10°S | 10 – 20°S | 20 – 30°S | 30 – 40°S | 40 – 50°S | 50 – 60°S | 60 – 70°S |
|----------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Trend ppb/a | 0,3 | 0,35 | 0,29 | 0,34 | 0,51 | 0,52 | 0,60 |
| R ² | 0,12 | 0,122 | 0,054 | 0,088 | 0,12 | 0,174 | 0,26 |

Die Daten erlauben keine Aussage, ob der Trend in allen Jahreszeiten gleich ist. So wurde für den Südpol im Südsommer eine Abnahme des Ozonmischungsverhältnisses um 17% zwischen 1976 und 1990 festgestellt. Gleichzeitig hatte die Bewölkung um 25 % am Südpol zugenommen (Schnell et al. 1991). Zur Erklärung wurde angegeben, in der unteren Troposphäre müsse Ozon photochemisch zerstört worden sein, da wegen des Ozonlochs mehr UV tiefer in die Troposphäre eindringen konnte und damit Ozon abgebaut werden konnte. Somit würde vermehrt ozonarme Luft aus der unteren Troposphäre im Tiefdruckgürtel in die obere Troposphäre gehoben und mit der hochtroposphärischen Konvergenz zum Südpol transportiert. Die Grenzschicht, aus der die hier behandelten Schiffsbeobachtungen stammen, sollte davon aber nicht betroffen gewesen sein.

Die von Schnell et al. gegebene Deutung zur Abnahme des oberflächennahen Ozons für den Südpol im Südsommer ist noch unbefriedigend, denn die Schiffsbeobachtungen bestätigen dies nicht. Die Sonnenelevation ist zudem gering, sodass viel UV wegen der großen durchstrahlten Luftmasse absorbiert wird und ein hoher photochemischer Ozonabbau nicht sehr wahrscheinlich ist. An der *Georg-von-Neumayer-Station* zeigten die Sommermonate zwischen 1983 und 1987 eine Ozonzunahme, von 1988 bis 1991 aber eine leichte Abnahme (Abb. 10.10). Wahrscheinlicher ist, dass Variationen der stratosphärischen Intrusionen die Verhältnisse am Südpol stärker beeinflussen, als bisher angenommen wurde.

Während die eigenen Schiffsozonnmessungen 1996 eingestellt wurden, nahm das MPI in Mainz solche Messungen vor allem auf Handelsschiffen verstärkt auf. Trendanalysen bestätigten, dass nördlich von 40°N kein Trend festzustellen war, südlich davon aber ein Anstieg nachgewiesen werden konnte (Lelieveld et al. 2004). In der Südhemisphäre zeigte sich bis 2003 der höchste Trend zwischen 20 und 40°S im Ostatlantik, während er im Westatlantik schwächer ausfiel. Der Trend verläuft aber nicht gleichmäßig linear, sondern es sind überlagerte mehrjährige Perioden mit stärkerer und schwächerer Zunahme zu erkennen. Wie hier die Variationen in der Nord-Süd-Breitenverteilungen hineinspielen, die zeitweise sehr deutliche und zeitweise ausgeglichenen hemisphärische Konzentrationsunterschiede zwischen Nord- und Südhemisphäre aufweisen, ist noch ungeklärt.

Eine weitere Trendanalyse wurde von Oltmans vorgenommen, der die langfristigen Veränderungen an Landstationen untersuchte (Oltmans et al. 2006), wobei oberflächennahe Messungen und Sondierungen ausgewertet wurden. Auch hier wurde festgestellt, dass der Trend uneinheitlich verlief, hemisphärische Unterschiede auftraten und besonders in der Nordhemisphäre die vor 1985 festgestellte deutliche Zunahme des Ozons in ein Gleichbleiben wechselte oder sich gar in eine Abnahme umkehrte. Hier wirkten sich Luftreinhaltemaßnahmen natürlich positiv aus und können sich wegen der Ferntransporte von photochemisch gebildetem Ozon auch in die Reinluftatmosphäre des Atlantiks ausgewirkt haben.

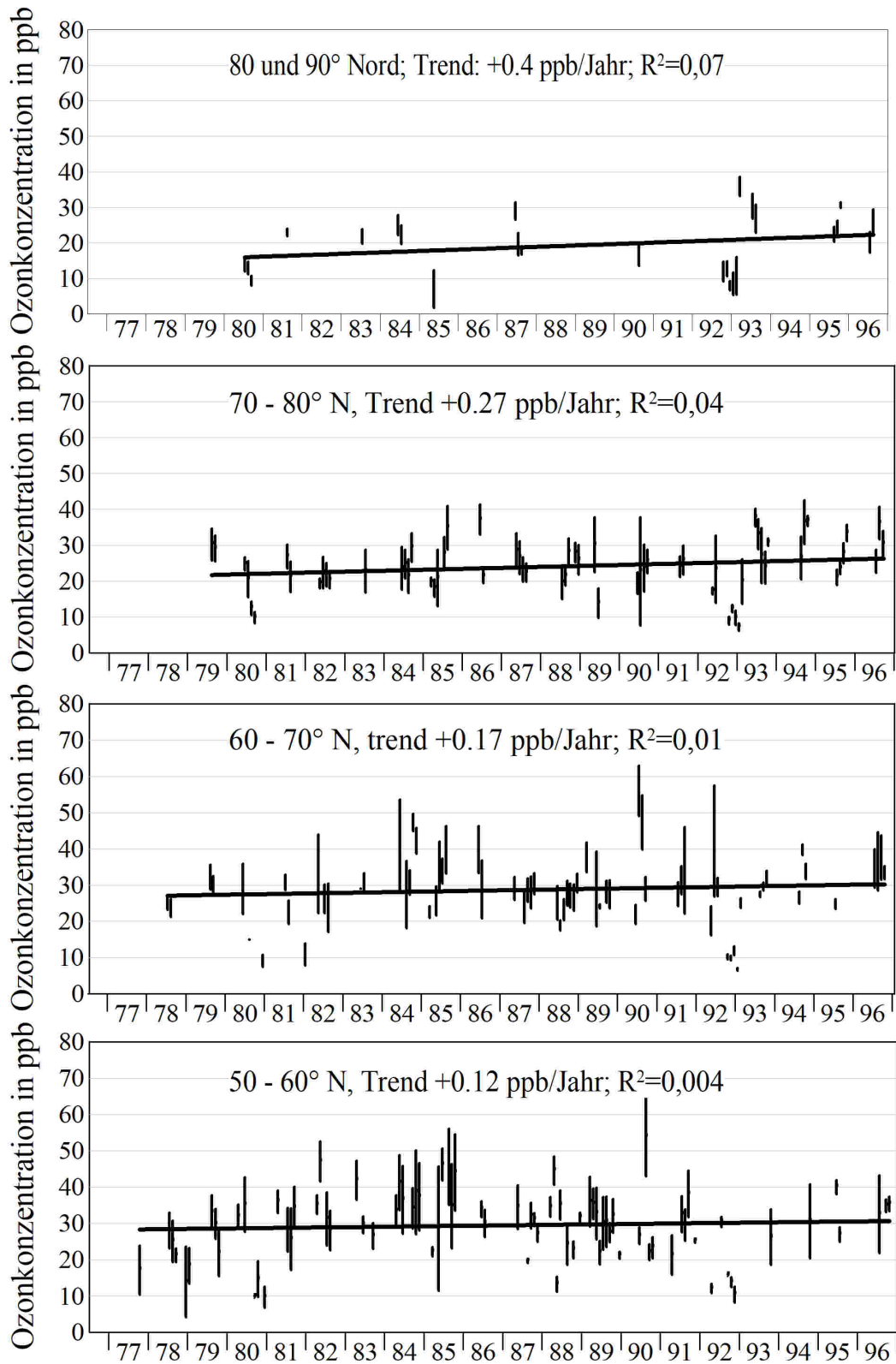


Abb. 7.1: Trends des oberflächennahen Ozons über dem Atlantik in den Breiten 50°N bis 90°N.

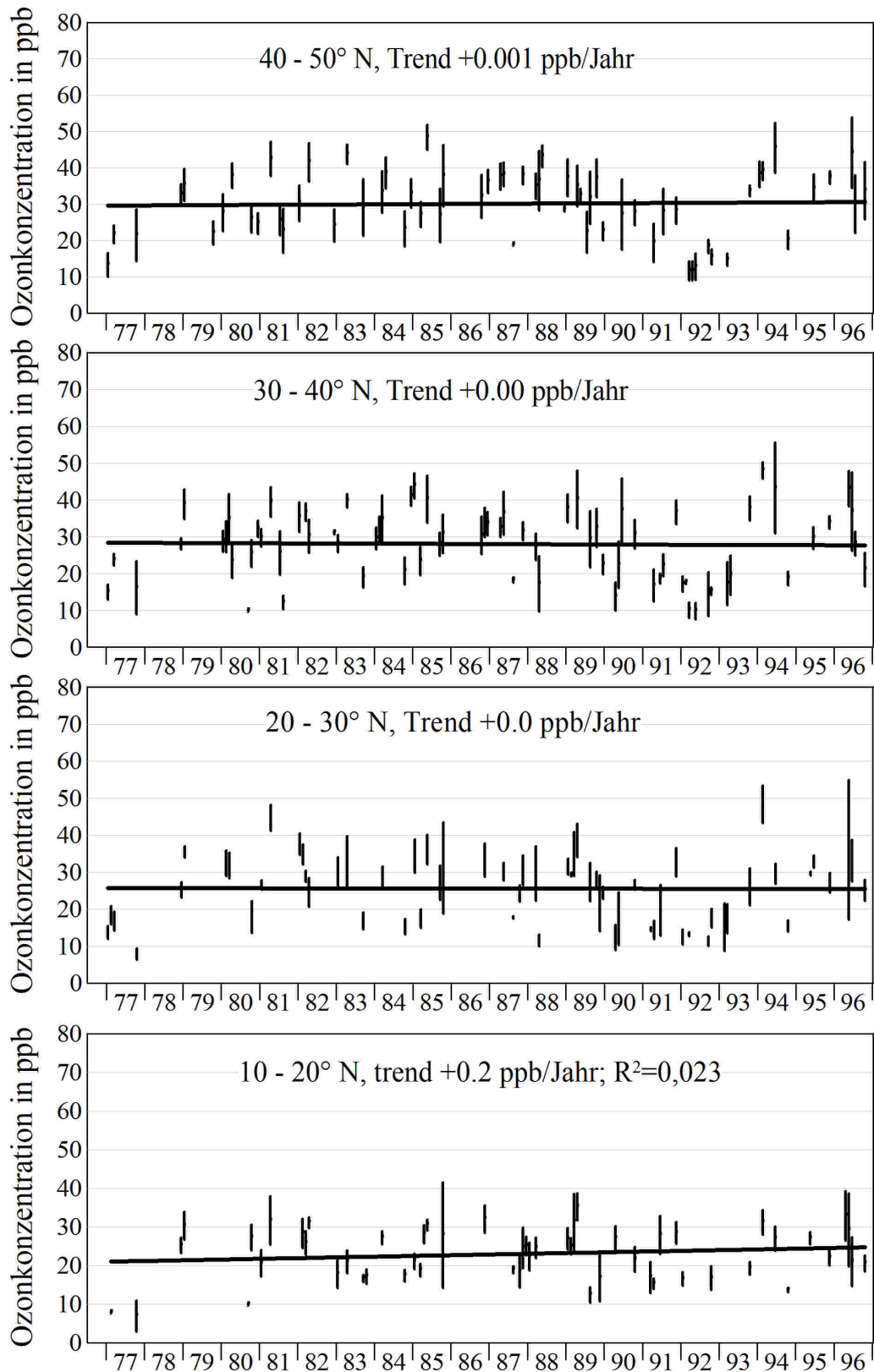


Abb. 7.2: Trends des oberflächennahen Ozons über dem Atlantik in den Breiten 10°N bis 50°N.

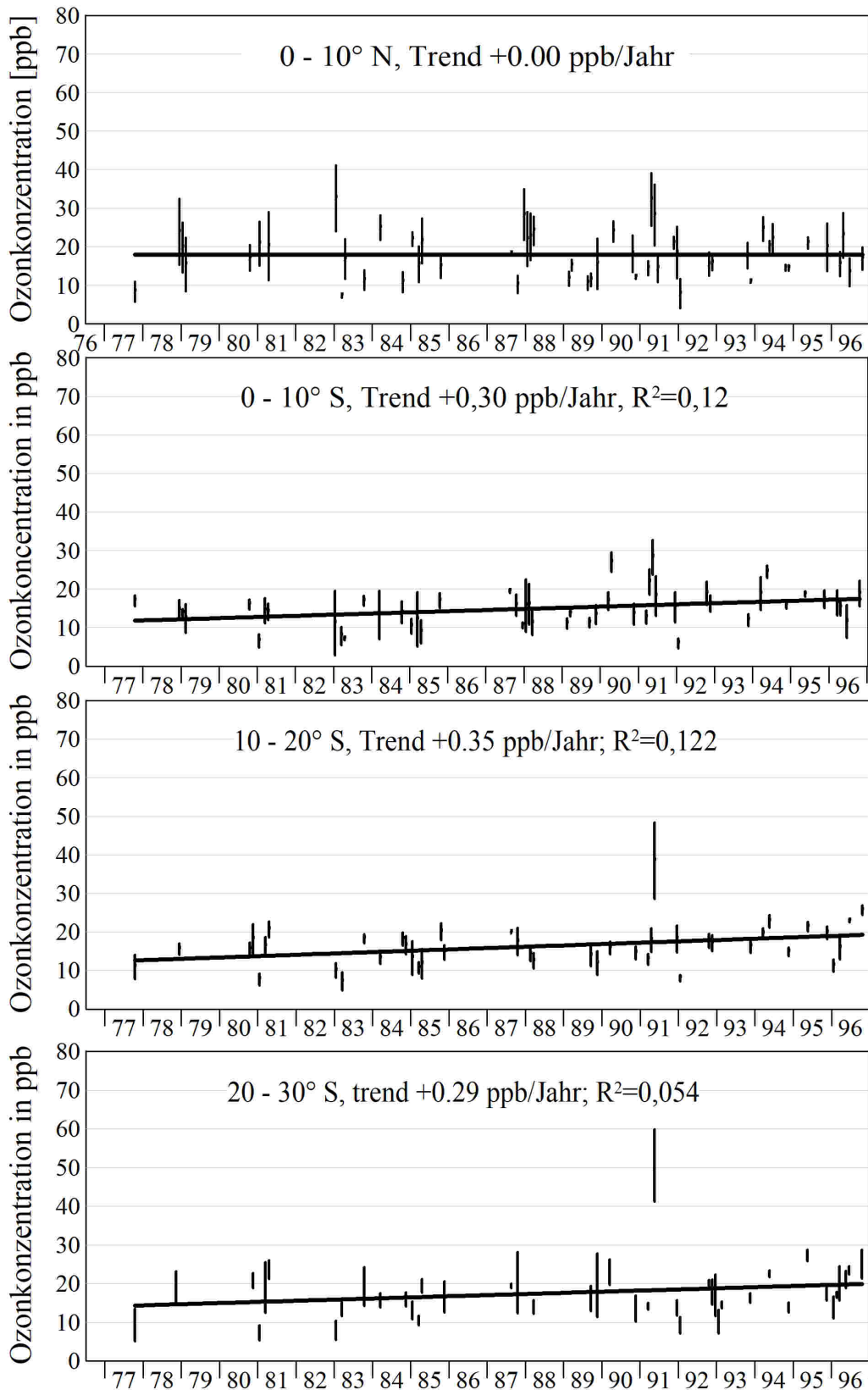


Abb. 7.3: Trends des oberflächennahen Ozons über dem Atlantik in den Breiten 30°S bis 10°N.

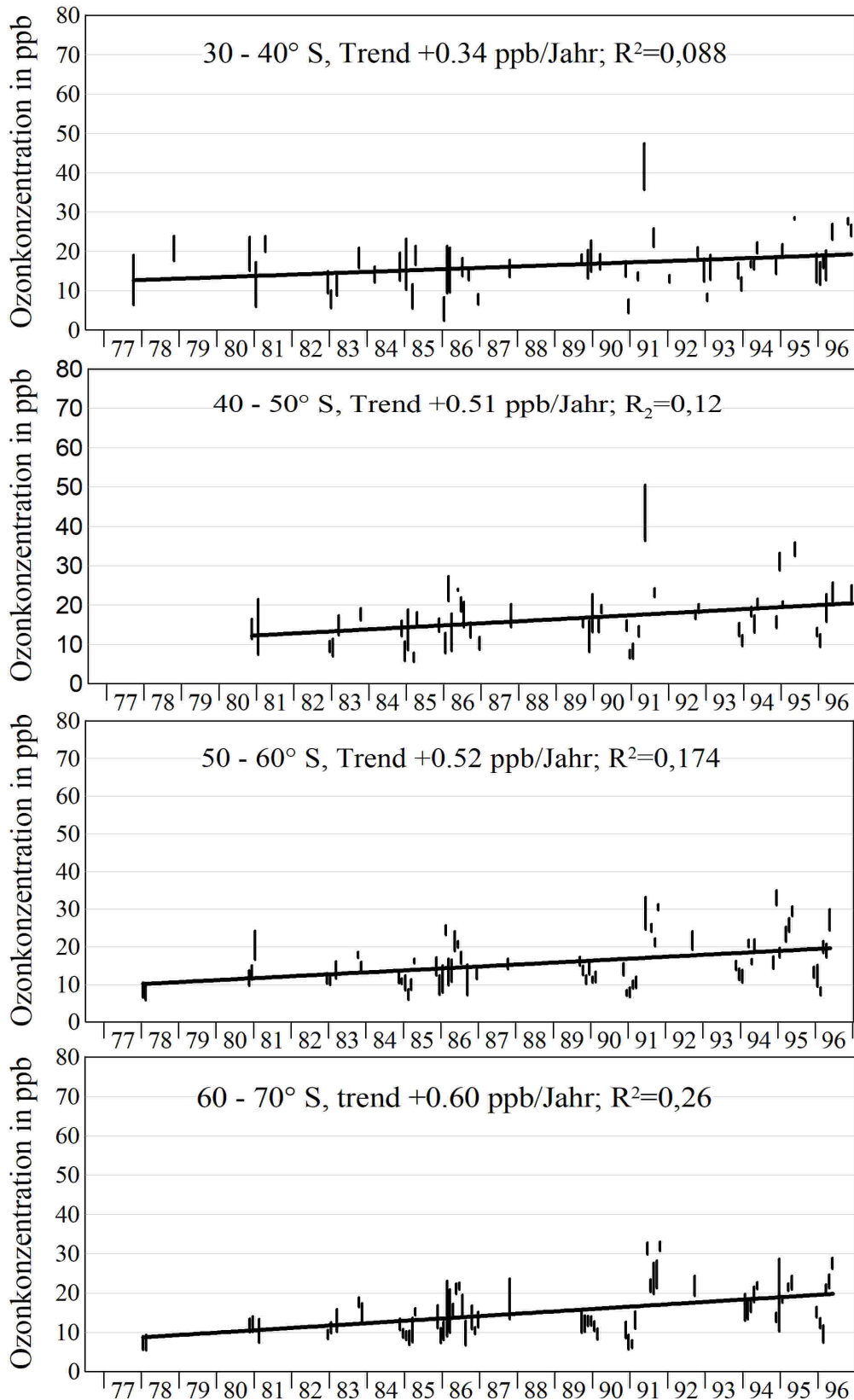


Abb. 7.4: Trends des oberflächennahen Ozons über dem Atlantik in den Breiten 30°S bis 70°S.

8. FERNTRANSPORT

Auf fünf Schiffsreisen wurde von Institut für Umweltphysik in Heidelberg Krypton-85 gemessen, das natürlicherweise nicht in der Atmosphäre vorkommt und nahezu ausschließlich aus Kernkraftwerken und Wiederaufbereitungsanlagen wie Sellafield oder La Hague stammt (Weiss et al. 1982; Weiss et al. 1983; Winger et al. 2005). Die Bildung von Kr-85 aus kosmischer Strahlung ist demgegenüber vernachlässigbar. Das nur dem radioaktiven Zerfall unterliegende Kr-85 verbleibt in der Atmosphäre, da die Löslichkeit im Ozean sehr gering ist. Es bietet somit einen Anhaltspunkt, um zu erkennen, ob kontinental verschmutzte Luft zum Messort auf dem Ozean gelangte (Winkler 1988). Kr-85 wurde an einzelnen Tagen gemessen, wobei die Sammeldauer 24 Stunden betrug (Weiß, persönliche Mitteilung). Zum Vergleich wurde die Ozonmischungsverhältnisse für den entsprechenden Zeitraum gemittelt.

Es zeigte sich auf einigen Reisen abschnittsweise eine positive Korrelation, auf anderen Fahrtabschnitten dagegen eine Antikorrelation, wobei eine gleichsinnige oder gegenläufige Abweichung beider Luftbeimengungen von einer mittleren Nord-Süd-Verteilung zu erkennen ist. Diese gedachte mittlere Verteilung würde sich einstellen, wenn die Troposphäre gleichmäßig durchmischt wäre. Wegen der begrenzten Anzahl von nur sechs Nord-Süd-Schnitten lassen sich keine mittleren Verteilungen berechnen und es wurden in den Abbildungen 8.1 bis 8.4 Hilfslinien eingezeichnet, die einen wahrscheinlichen mittleren Verlauf andeuten sollen. An den senkrechten Linien ist dann eine gleichsinnige oder gegenläufige Abweichung von Kr-85 bzw. Ozon vom gedachten mittleren Verlauf abzulesen.

Die gleichsinnige positive Abweichung ist als ein klares Zeichen zu werten, dass bei geeigneten meteorologischen Bedingungen auf dem Atlantik photochemisch entstandenes Ozon aus Industriegebieten dem natürlichen Pegel überlagert sein kann. In anderen Situationen wird auf dem Atlantik unbeeinflusste Reinluft vorgefunden, wofür eine gegenläufige Abweichung von Ozon und Kr-85 vom gedachten mittleren Verlauf spricht. Die photochemische Ozonbildung muss nicht am gleichen Emissionsort wie Krypton-85 stattgefunden haben, sondern Ozon kann auf dem Transportweg aus den Vorläufergasen auch später entstanden sein, wenn dazu günstige Strahlungsbedingungen vorlagen.

Eine positive Abweichung sagt aus, dass ein Teil des Ozons aus Abluftfahnen von Industriegebieten stammen kann, das sich dem über dem Ozean natürlicherweise vorhandenen Ozon überlagert hat. Die Abweichung allein lässt keine Trennung in den natürlichen bzw. anthropogenen Anteil zu. Eine Schwierigkeit bei der Interpretation besteht darin, dass Krypton-85 ebenso wie Ozon in der Nordhemisphäre eine deutlich höhere Konzentration aufweist als in der Südhemisphäre. Bei Kr-85 liegen die Quellen in den Industriegebieten, von wo es sich durch interhemisphärischen Austausch in die Südhemisphäre verbreitet. Ozon besitzt in der Nordhemisphäre ein höheres Mischungsverhältnis wegen des hier häufiger stattfindenden stratosphärischen Zustroms in Tropopausenfaltungen. Somit besteht a priori eine gewisse positive Korrelation zwischen Ozon und Kr-85, die aber nicht auf gleiche Quellgebiete hinweist. Die folgenden vier Abbildungen (Abb. 8.1 bis 8.4; Kr-85 Daten nach Weiß, pers. Mitteilung) lassen erkennen, dass auf einigen Abschnitten Kr-85 und gleichzeitig Ozon erhöhte Werte aufweisen. In dem Fall ist zu schließen, dass die Luftmasse relativ rasch vom Kontinent zum Messort gelangte und ein Teil des auf dem Schiff gemessenen Ozons photochemisch gebildet wurde. Stamme das Ozon aus der Stratosphäre, dann sollte Kr-85 gleichzeitig geringe Konzentrationen aufweisen (Beispiel Abb. 8.1, geographische Breite 40°N).

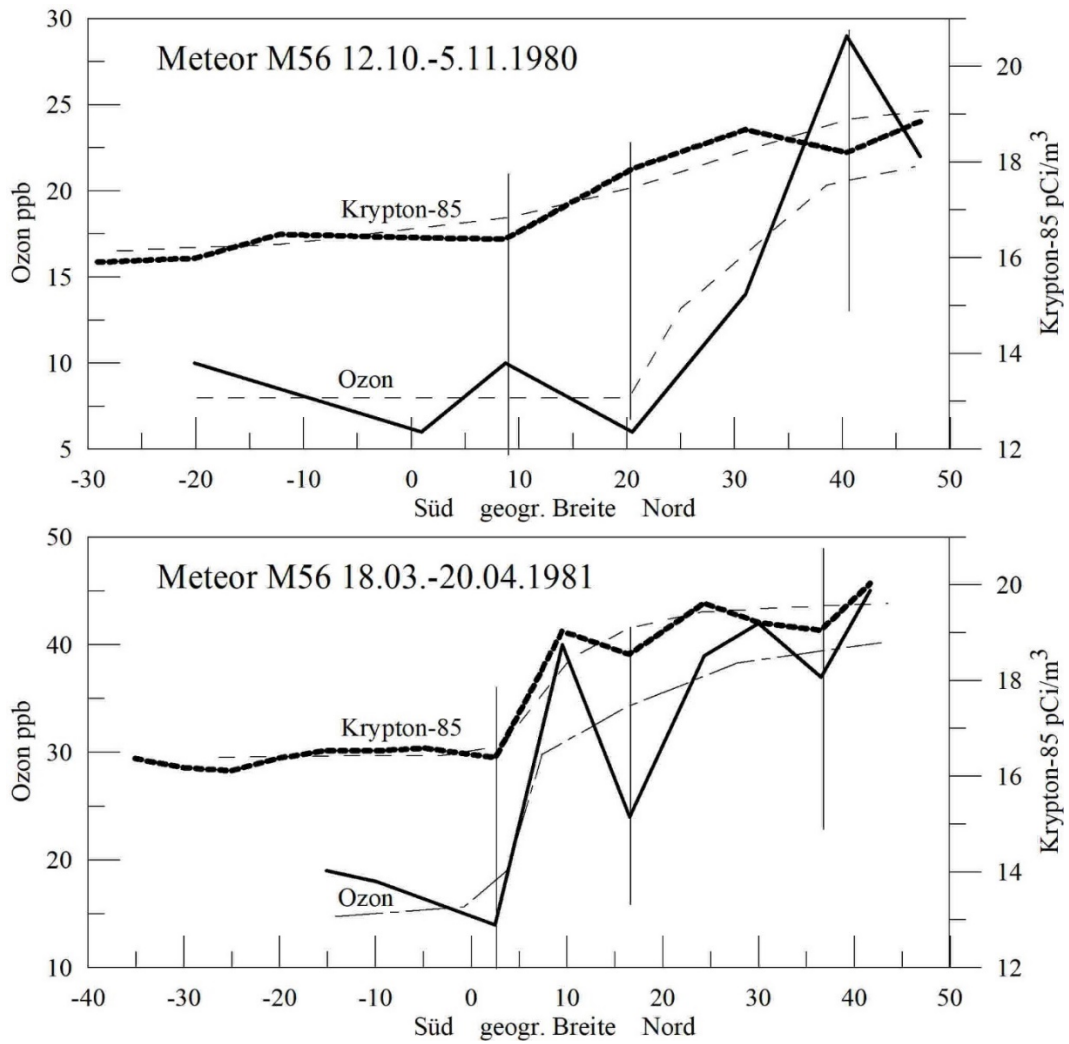


Abb. 8.1: Simultane Ozon und Krypton-85 Messungen während der Reise Meteor M56. Im linken Teil gehen zwei Ozonspitzen mit einem Kr-85 Minimum einher, sind also natürlichen Ursprungs. Im rechten Teil ist der parallele Anstieg bei 8°N von Ozon und Kr-85 durch den Übertritt von der Südhemisphäre in die Nordhemisphäre bedingt. Zu dieser Jahreszeit ist mit keiner Biomassenverbrennung zu rechnen, doch kann ein kleiner Anteil des Ozons durch Ferntransport aus Industriegebieten verursacht worden sein, da Kr-85 ein relatives Konzentrationsmaximum zeigt. Der parallele Anstieg beider Gase nördlich von 40°N deutet auf verschmutzte Luft hin, wobei die Ozonbildung wahrscheinlich erst auf dem Transportweg erfolgte.

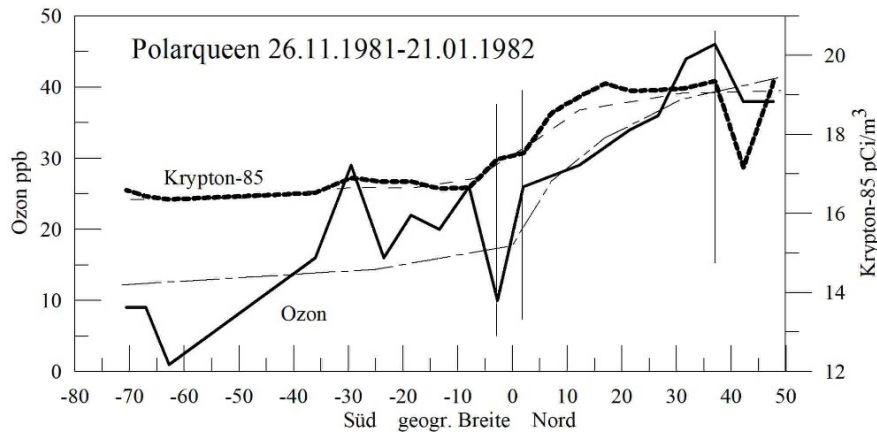


Abb.8.2: Simultane Ozon und Krypton-85 Messungen während der Reise von Polar Queen 1981. Das Mischungsverhältnismaximum von Ozon zwischen 30 und 40°N ist wahrscheinlich durch verschmutzte Luft bedingt, wobei die Ozonbildung möglicherweise erst auf dem Transportweg und nicht direkt im Quellgebiet erfolgt. Die Ozonspitzen in der Südhemisphäre können stratosphärischen Intrusionen zugeschrieben werden, da Kr-85 im Rahmen der Messgenauigkeit als konstant anzusehen ist.

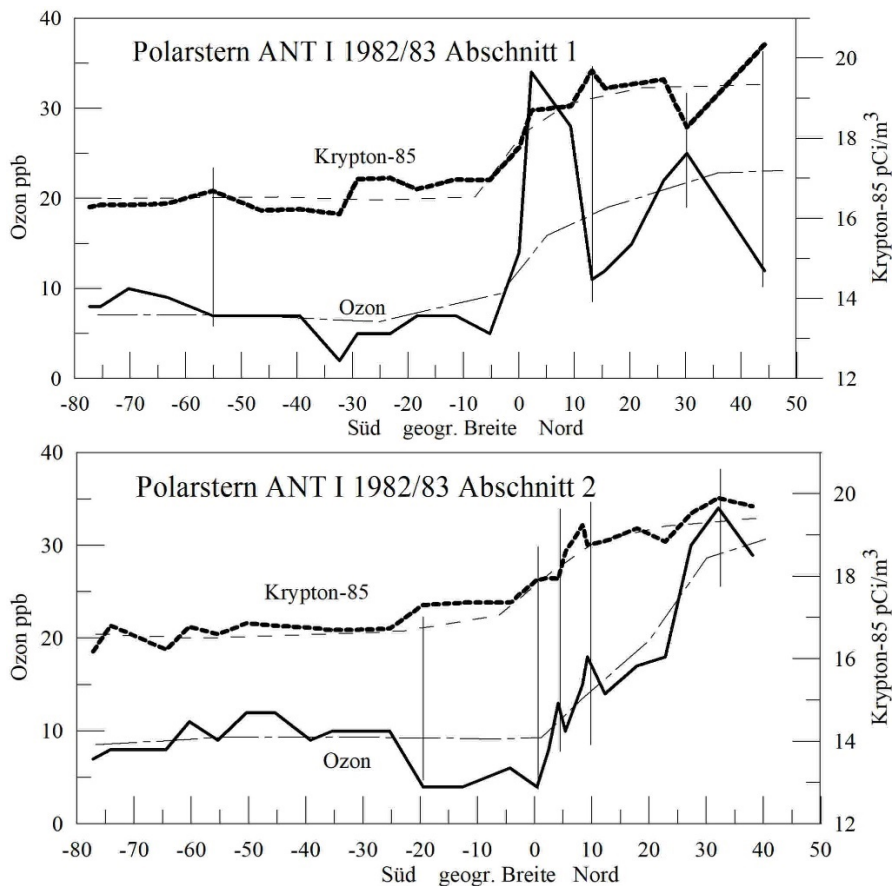


Abb. 8.3: Simultane Messung von Kr-85 und Ozon auf der Reise von Polarstern ANT-I 1982-1983. Die hohen Ozonmischungsverhältnisse auf dem 1. Abschnitt (links) gehen nicht mit erhöhten Kr-85 Werten einher, sind also wohl der Stratosphäre als Quelle zuzuschreiben.

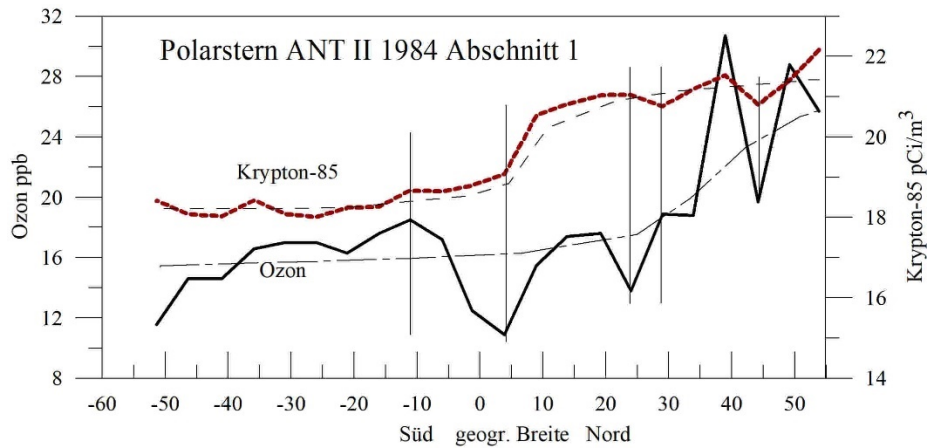


Abb. 8.4: Simultane Messung von Kr-85 und Ozon auf der Reise von Polarstern ANT-II 1984. Die Konzentrationsspitze des Ozonmischungsverhältnisses bei 40°N wird von erhöhten Kr-85 Werten begleitet, ein Teil des Ozons kann also über dem Kontinent photochemisch entstanden sein. (O₃ Profil weicht wegen der diskreten Probennahmestellen von der Breitenverteilung Polarstern ANT-III ab). An der ITCZ weist Ozon ein Minimum auf, bedingt durch Ozonphotolyse und photochemischen Abbau. Der deutliche Wiederanstieg des Ozons südlich von 3°S ist auf natürliche Quellen zurückzuführen.

Zum interhemisphärischen Austausch ist festzuhalten, dass er nicht auf gleichmäßiger Diffusion beruht, etwa durch nordhemisphärische Luft, die in Gewittern an der ITCZ in die Höhe steigt, im Gewitterambos aber dann auch in die Südhemisphäre ausströmt. Es gibt zusätzlich Situationen, bei denen in der Nordhemisphäre Kaltluftausbrüche weit nach Süden vorstoßen und die ITCZ dabei durchbrechen. Die ITCZ bildet sich dann wieder neu, doch ist ein großes Luftmassenpaket in die Südhemisphäre gelangt. In solchen Ereignissen gelangen große nordhemisphärische Luftpakete direkt in die Südhemisphäre und werden erst nach und nach vermischt. Solche Ereignisse könnten gelegentlich beobachtete hohe Ozonmischungsverhältnisse südlich der ITCZ erklären, die für diese Breiten untypisch sind (z. B. Meteor M34; Abb. 12.33). Um dies zu beweisen, sind jedoch aufwändigere Analysen erforderlich. Der interhemisphärische Austausch unterliegt einem Jahresgang und ist im Nordsommer etwa doppelt so hoch wie im Nordwinter (Levin and Hesshaimer 1996).

9. OBERFLÄCHENNAHES OZON AN DER ITCZ

Man kann aus den Ozon-Beobachtungen an der innertropische Konvergenzzone (ITCZ) auch die Frage formulieren: Was lernen wir aus den einzelnen Ozonschnitten über die ITCZ?

Die ITCZ trennt die meteorologische Nordhemisphäre von der Südhemisphäre. Im Atlantik liegt die ITCZ in der Regel nördlich des Äquators, im Nordsummer bei 7 – 10°N und im Nordwinter bei 0 – 2°N (Byrne et al. 2018). Sie ist nicht einheitlich ausgeprägt, sondern reicht weiter nördlich nahe Afrika und nähert sich im westlichen Atlantik etwas zum Äquator hin. Die ITCZ wird nicht nur am Wechsel vom Nordost- zum Südwestpassat charakterisiert, sondern auch durch ein Starkregenband. Für die Lage und Ausprägung der ITCZ ist neben der Stärke der Konvergenz auch Verteilung der Meeresoberflächentemperatur von Bedeutung, die sich mit den Mäandrierungen der Meeresströme verschiebt (Chiang et al. 2002). Manchmal lassen sich zwei Konvergenzonen nachweisen (Abb. 9.1).

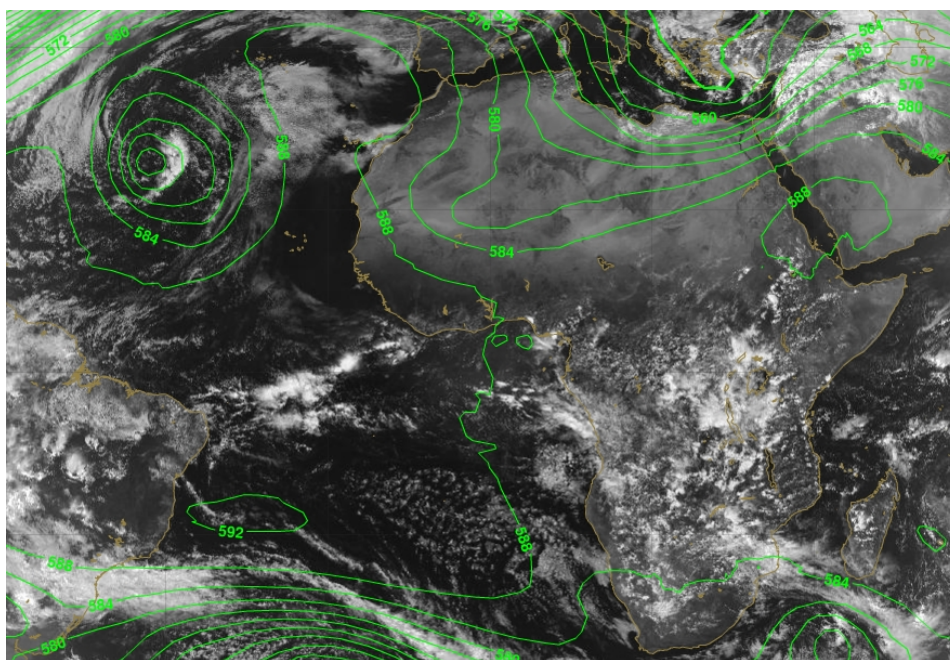


Abb. 9.1: Das Satellitenbild vom 20.03.2015 (©EUMETSAT 2015) zeigt eine doppelte ITCZ, in West-Ost Richtung unterschiedlich stark ausgeprägt. An der nördlichen ITCZ steigen die Gewitter höher auf, erkennbar an der kälteren Wolkenobergrenze (helleres Weiß). Der südliche Ast ist im Wolkenbild nur im Westen gut ausgeprägt und die Gewitter scheinen vertikal weniger mächtig ausgebildet zu sein.

Aus Satellitenbildern ist weiterhin ersichtlich, dass zwischen einzelnen heftigen Gewittern konvektionsärmere Bereiche liegen. Die Stärke der Konvergenz variiert somit und es bestehen zusätzlich Einflüsse durch die NAO (Souza and Cavalcanti 2009). Die pazifisch-südamerikanische Julian-Madden Oszillation und die davon wieder abhängige Konvektionsintensität über dem Amazonasbecken im Frühling wirkt sich ebenfalls auf die atlantische ITCZ durch Auslösung von ostwärts wandernden Kelvinwellen aus (Tomaziello et al. 2016; Ventrice et al.

2011; Wang and Fu 2007). Schließlich wirkt sich auch die Southern Oscillation (ENSO) auf die Niederschlagstätigkeit an der ITCZ aus und führt zu periodischen Schwankungen (Reiter 1979). Es ergibt sich daraus, dass die ITCZ eine große Variabilität in Lage, Ausprägung und Intensität von Jahr zu Jahr erwarten lässt.

Die Konvergenz zwingt die Luft an der ITCZ zum Aufsteigen und zur Ausbildung von Schauern und hochreichenden Gewittern. Letztere durchstoßen zum Teil die Tropopause und sind dort Anlass für turbulente Mischungsvorgänge, die durch dabei entstehende brechende Schwellen ausgelöst werden.

Gelegentlich wird von einer doppelten ITCZ im Pazifik und Indischen Ozean berichtet, wofür die Ausbildung einer Kaltwasserzunge zu bestimmten Jahreszeiten verantwortlich gemacht wird. Da im Atlantik die Kaltwasserzunge nur schwach ausgebildet ist, kommt es angeblich zu keiner doppelten ITCZ (Zhang 2001). Satellitenbilder (wie Abb. 9.1) zeigen allerdings auch hier gelegentlich eine doppelte ITCZ und einzelne Ozontranssekte bestätigen dieses Phänomen. Im Golf von Guinea wird aber sehr wohl eine Kaltwasserzunge festgestellt (Fahrback and Bauernfeind 1982), die für die gelegentliche Ausbildung einer doppelten ITCZ verantwortlich sein dürfte.

Mit fortschreitendem Klimawandel scheint sich die ITCZ zu intensivieren, ohne dabei ihre Lagen zu ändern (Byrne et al. 2018). Die Intensivierung ist nachvollziehbar, weil durch die Erwärmung der Meere die Verdunstung steigt und die zunehmende Freisetzung von Kondensationswärme an der ITCZ einen Energiegewinn bedeutet.

Die dynamischen Vorgänge beeinflussen also die Ozonmischungsverhältnisse und ihren Verlauf an der ITCZ über dem Atlantik. Hinzu kommen luftchemische Prozesse. Die Variation und Herkunft des oberflächennahen Ozons wurde inzwischen aus verschiedenen Aspekten untersucht und erklärt:

- durch Vertikalaustausch aus der oberen Troposphäre oder der unteren Stratosphäre können örtlich Ozonmaxima nahe der Ozeanoberfläche entstehen (Stallard et al. 1975; Davies and Schuepbach 1994; Sherwood and Dessler 2001; Suhre et al. 1997).
- durch photochemische Produktion bei der Biomassenverbrennung (Freitas et al. 2005; Galanter et al. 2000; Roelofs and Lelieveld 1997).
- durch photochemische Ozonbildung aus der NO_x Produktion in tropischen Gewittern (Edwards 2003; Sauvage et al. 2007). Die Ozonbildung setzt erst in einiger Entfernung vom Gewitterambos ein, während die hochtroposphärische Ausflussregion eines Gewitters durch niedrige Ozonwerte ausgezeichnet ist (Huntrieser et al. 2011).
- Photolytische Ozonerstörung kann bei schwacher oder fehlender Konvektion in der Grenzschicht ein örtliches Ozonminimum bewirken (Boylan et al. 2015; Piotrowicz et al. 1986).
- In meteorologischer Hinsicht sind Fluktuationen der Passatwinde in der Größenordnung von 3 Wochen zu erwarten, die aus einem Wechselspiel zwischen Verdunstung in der Passatregion und dem späteren Niederschlag an der ITCZ resultieren (Kraus 1959). Hinzu kommen Variationen aus der Überlagerung der Walker-Zirkulation.
- Auf einigen Reisen von *Polarstern* wurden Ozonsonden gestartet und in den Tropen konnten ebenfalls trockne und ozonreiche Schichten nachgewiesen werden, die 3 – 4 km Mächtigkeit erreichten (Weller et al. 1996; Weller et al. 1998). Auch wenn keine Trajektorienanalysen vorgenommen wurden, ist es wahrscheinlich, dass es sich um Luftpakete handelte, die am subtropischen Tropopausenbruch isentropisch, d.h. ohne zusätzlichen Energieaufwand, aus der Stratosphäre in die Troposphäre einströmten. An der ITCZ können dabei starke Ozongradienten auftreten.

Wie erwähnt, ist die Meeresoberflächentemperatur für die Breitenlage der ITCZ von Bedeutung (Marshall et al. 2001). An der Afrikanischen Küste entstehen durch die ablandigen Passatwinde Auftriebsgebiete, in denen kühles Tiefenwasser nach oben dringt. Dadurch tritt Absinken in der Atmosphäre verbunden mit einer oberflächennahen Divergenz in der Küsten-

nähe von Südafrika ein (Höflich 1972), die sich auch auf das oberflächennahe Ozonmischungsverhältnis auswirkt.

Die Vielfalt der Entwicklung der Ozonmischungsverhältnisse an der ITCZ wird in den Abb. 9.2 bis Abb. 9.5 dargestellt. Wie die fast 30 Nord-Südschnitte zeigen, gleicht kaum ein Verlauf dem anderen. Das liegt zum einen an der Variabilität der ITCZ selbst, zum andern in der uneinheitlich ausgeprägten ITCZ im West-Ost-Verlauf. Die Lage der ITCZ im Meeresniveau wird durch einen Pfeil angegeben, der meist auf Lokalisierungen der Bordwetterwarte beruht. In der Realität erstreckt sich die ITCZ über einen breiteren Bereich, der einige Grade geographischer Breite überdecken kann. Dies ist aus Satellitenbildern unmittelbar ersichtlich. Wenn keine direkten Angaben zur ITCZ vorlagen, wurde die Lage aus den Synop-Daten der Bordwetterwarte anhand des Windrichtungswechsels erschlossen. Zum Teil fanden sich auch Angaben zur Lage der ITCZ in Publikationen von Fahrtteilnehmern.

Viele Untersuchungen zum Verhalten des oberflächennahen Ozons über dem tropischen Ozean entstanden erst nach dem Ende der hier beschriebenen Schiffsreisen. Die Erkenntnisse sind aber ohne weiteres auf den früheren Zeitraum übertragbar.

Je nachdem also, ob die Fahrtroute eines Schiffes durch die ITCZ in der Nähe starker Gewitter oder weiter davon entfernt verläuft, ist mit unterschiedlich starkem Vertikalaustausch zu rechnen (Stallard et al. 1975; Suhre et al. 1997). Dabei können hohe Spitzen des Ozonmischungsverhältnisses von über 40 ppb auftreten, Beispiele dafür sind *Meteor II*, Reisen Nr. 6 (1987; Abb. 9.2, Abb. 12.20); Reise Nr. 16 (1991; Abb. 9.2, Abb. 12.28) oder *Polarstern* ANT-III (1985; Abb. 9.4, Abb. 12.42). Smit (KFA Jülich) hat auf zwei Polarsternreisen simultane Sondierungen von Ozon und der relativen Feuchte vorgenommen und konnte, wie schon Weller et al. Beispiele zur Existenz von trockenen, ozonreichen Filamenten dokumentieren (Smit 2004). Auch bei Sondierungen des AWI von 1993 und 1994 (Weller et al. 1996) wurden trockene und ozonreiche Schichten zwischen 4 und 7 km Höhe bei 12°S nachgewiesen. Solche trockene Filamente können aus großer Entfernung stammten, wie dies anhand von Rückwärtstrajektorien in den Subtropen nachgewiesen wurde (Cau et al. 2007). Wenn sie gleichzeitig ozonreich sind, können sie aus dem dem subtropischen Tropopausenbruch advehiert sein oder aus kleinräumigen Einfaltungen stratosphärischer Luft in der Nachbarschaft von hochreichenden Gewittern mit die Tropopause durchstoßenden, überschießenden Köpfen (Newell and Gould-Stewart 1981) stammen. Um dies im Einzelfall zu klären, bedarf es einer aufwändigeren meteorologischen Analyse. Zudem wird die tropische Tropopause inzwischen als Übergangszone über einen großen Höhenbereich von mehreren Kilometern und nicht als starre Grenzfläche in einer bestimmten Höhe gesehen und es sind keineswegs alle Vorgänge in diesem Bereich bisher vollständig verstanden (Fueglistaler et al. 2009). Während Cau et al. den Ursprung trockener Schichten in den Subtropen nach Island zurückverfolgten (Cau et al. 2007), wo durch starke Niederschläge Wasserdampf ausgeschieden wurde, muss es als unwahrscheinlich gelten, dass solche Luftpakete bis zur ITCZ gelangen. Stattdessen kommt isentropisches Einströmen im Bereich des subtropischen Tropopausenbruchs infrage, wobei diese Schichten im Abwärtsast der Hadleyzelle absinken (Randel et al. 2016). Dabei ist auch ein Südwardstransport zur ITCZ hin nachgewiesen worden.

Neben Austauschvorgängen treten natürlich auch luftchemische Reaktionen im Zusammenhang mit der Ozonphotolyse auf, über die inzwischen mehrere Untersuchungen vor allem aus dem Pazifik vorliegen (Conley et al. 2011; Piotrowicz et al. 1986). Grundsätzlich sind die Ergebnisse auf den Atlantik übertragbar. An der ITCZ ist bei Situationen mit geringem Vertikalaustausch in der Grenzschicht mit einem Ozonabbau zu rechnen. Beispielsweise zeigte sich bei der Polarsternreise ANT-XIII (1996; Abb. 9.5, Abb. 12.57) ein Ozonrückgang auf weniger als 3 ppb südlich der ITCZ, allerdings trat dies nur bei dieser einen Reise auf. Minima zwischen 5 und 10 ppb wurden auf den Reisen *Walther Herwig* WH 30 (1977; Abb. 12.59), WH 44 (1981; Abb. 9.6, Abb. 12.61) und *Polarstern* ANT-I (1983; Abb. 12.38) gemessen. Der photolytische Ozonabbau ist in den Tropen begünstigt, weil bei hohem Sonnenstand und geringem Gesamt Ozon die UV-Strahlung wegen der geringen durchstrahlten Luftmasse besonders intensiv sein kann.

Die Biomassenverbrennung hat einen Schwerpunkt in der Südhemisphäre während der Trockenzeit in den Monaten Juli bis November. Die Rauchwolken bleiben typischerweise unterhalb von 2.000 m, können im Einzelfall aber auch 5.000 m erreichen, wie Satellitenauswertungen über Südamerika ergaben (Gonzalez-Alonso et al. 2019). In Afrika erreicht die Biomassenverbrennung ihren Höhepunkt im August und September. Das dabei entstehende Aerosol wird regelmäßig in ungefähr 10 Tagen bis Südamerika transportiert und erreicht Transporthöhen von 4 km (Holanda et al. 2020). Es handelt sich dabei um Schichten von bis zu 500 m Dicke. Das Ozonmischungsverhältnis kann in einer solchen Schicht 50 ppb erreichen. Gerät eine solche Schicht in den Absinkbereich eines Subtropenhochs, gelangt Ozon aus Biomassenverbrennung in die Nähe der Meeresoberfläche. Nach Untersuchungen von Tompson (Tompson et al. 2001) zeigen sich Ozon- und Aerosolbildung in den Abluffahnen als entkoppelt. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass solche Situationen außerhalb des unmittelbaren ITCZ-Bereiches liegen, wie aus mehreren Publikationen hervorgeht (Cros et al. 1988; Crutzen and Andreae 1990; Edwards 2003; Thompson et al. 2000). Zu den verschiedenen ITCZ-Transsekten wurde im Rahmen dieser Arbeit keine weitergehende Detailanalyse vorgenommen, ob mit einem Vorherrschen luftchemischer oder dynamischer Prozesse beim Zustandekommen des Ozonmischungsverhältnisses gerechnet werden kann. Jedoch zeigt die Vielfalt der beobachteten Variationen in den Ozon-Transsekten, dass sich luftchemische und dynamische Vorgänge in mannigfaltiger Weise kombinieren und es schwierig ist, zu beweisen, dass ein einziger Prozess typisch für den Bereich der ITCZ ist.

In blitzreichen tropischen Gewittern wird NO_x erzeugt, das zur photochemischen Ozonbildung beiträgt. Es ist keine Literatur bekannt geworden, dass in Gewittern unmittelbar an der ITCZ durch Ozonerzeugung aus NO_x Ozonspitzen in der Grenzschicht nachgewiesen worden wären.

Der Passat unterliegt ebenfalls Intensitätsschwankungen, die sich wiederum auf die Meeresoberflächentemperatur auswirken (Panitz and Speth 1986). Das dürfte zeitweise die Bildung hochreichender Gewitter an der ITCZ hemmen. Die tropische Troposphäre ist bei schwacher ITCZ stabiler geschichtet und in Oberflächennähe kann sich infolge von Ozonphotolyse ein Minimum des Ozonmischungsverhältnisses ausbilden, das nicht unmittelbar an der ITCZ selbst auftreten muss (Beispiel *Polarstern* ANT-XIII in Abb. 9.5). Wenn hohe Wassertemperaturen sich mit starker Passatkonvergenz kombinieren, kommt es zu verbreiteter Schauer- und Gewitterbildung, die einen kräftigen Vertikalaustausch bewirken und zu einem Maximum des Ozonmischungsverhältnisses an der ITCZ führen.

Aus den Häufigkeiten eines bestimmten Profiltyps bei den einzelnen Ozonschnitten kann nicht auf die wirkliche Häufigkeit im statistischen Sinn geschlossen werden. Es ist eher wahrscheinlich, dass die einzelnen oben aufgelisteten Prozesse an unterschiedlichen Abschnitten der ITCZ sogar gleichzeitig ausgeprägt sind.

Es lässt sich aus den Nord-Südschnitten des Ozons keine typische jahreszeitliche Abhängigkeit erkennen. Ebenso wenig zeigen sich typische Unterschiede, je nachdem, ob die Fahrtroute über Kapstadt, also in Afrikanähe, oder nach Rio de Janeiro mehr durch den Zentral- oder westlichen Atlantik führte.

Mehrere im östlichen Pazifik vorgenommene Nord-Süd-Schnitte, bei denen das oberflächennahe Ozon gemessen wurde, zeigten ebenfalls eine ausgeprägte Variabilität an der ITCZ (Tompson et al. 1993) und bestätigen die hier gezogenen Schlussfolgerungen, dass innerhalb weniger Tage sich das Nord-Südprofil des Ozons gegenüber anderen Abschnitten der ITCZ deutlich unterscheiden kann.

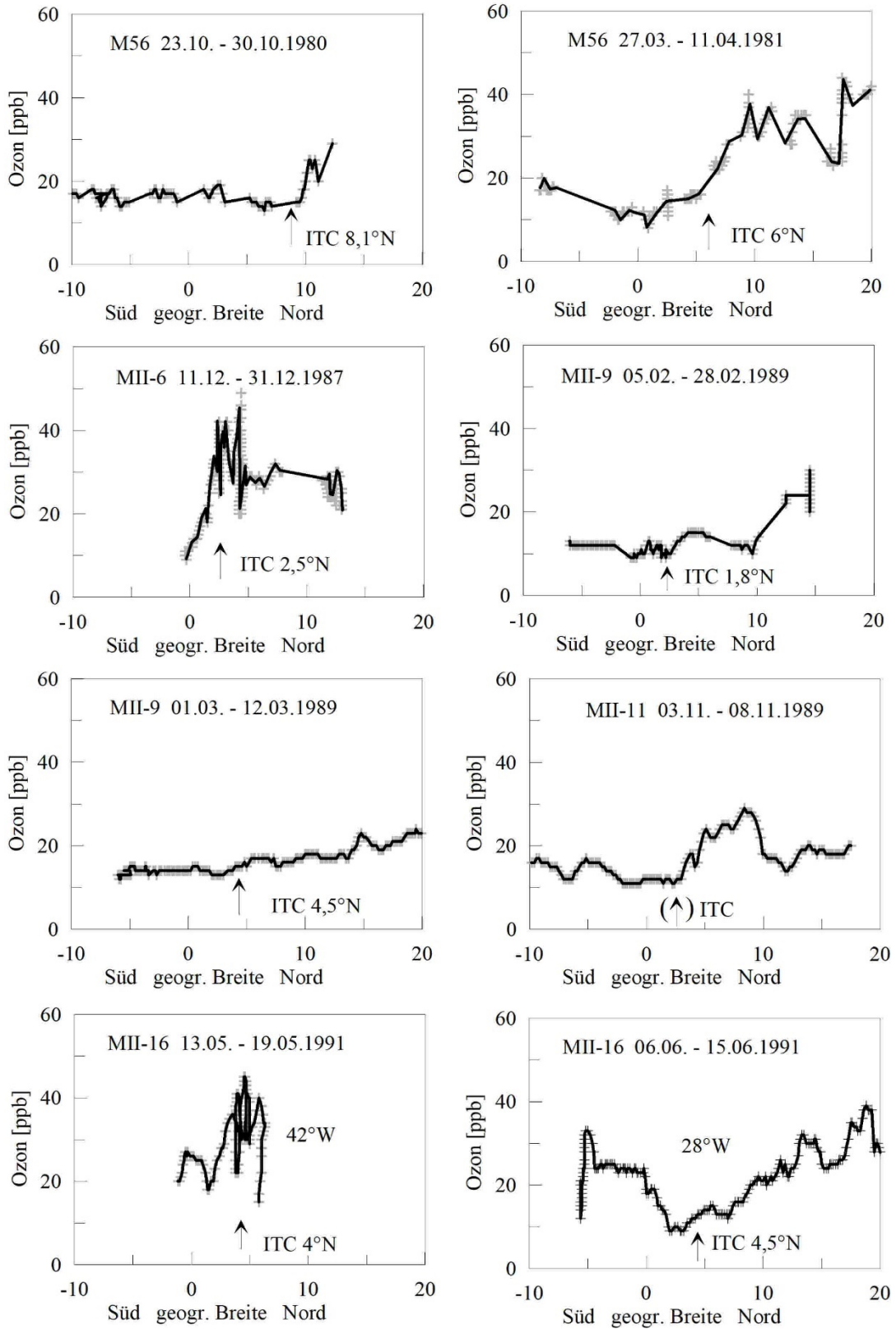


Abb. 9.2: Ozonschnitte durch die ITCZ an Bord von FS Meteor I und II.

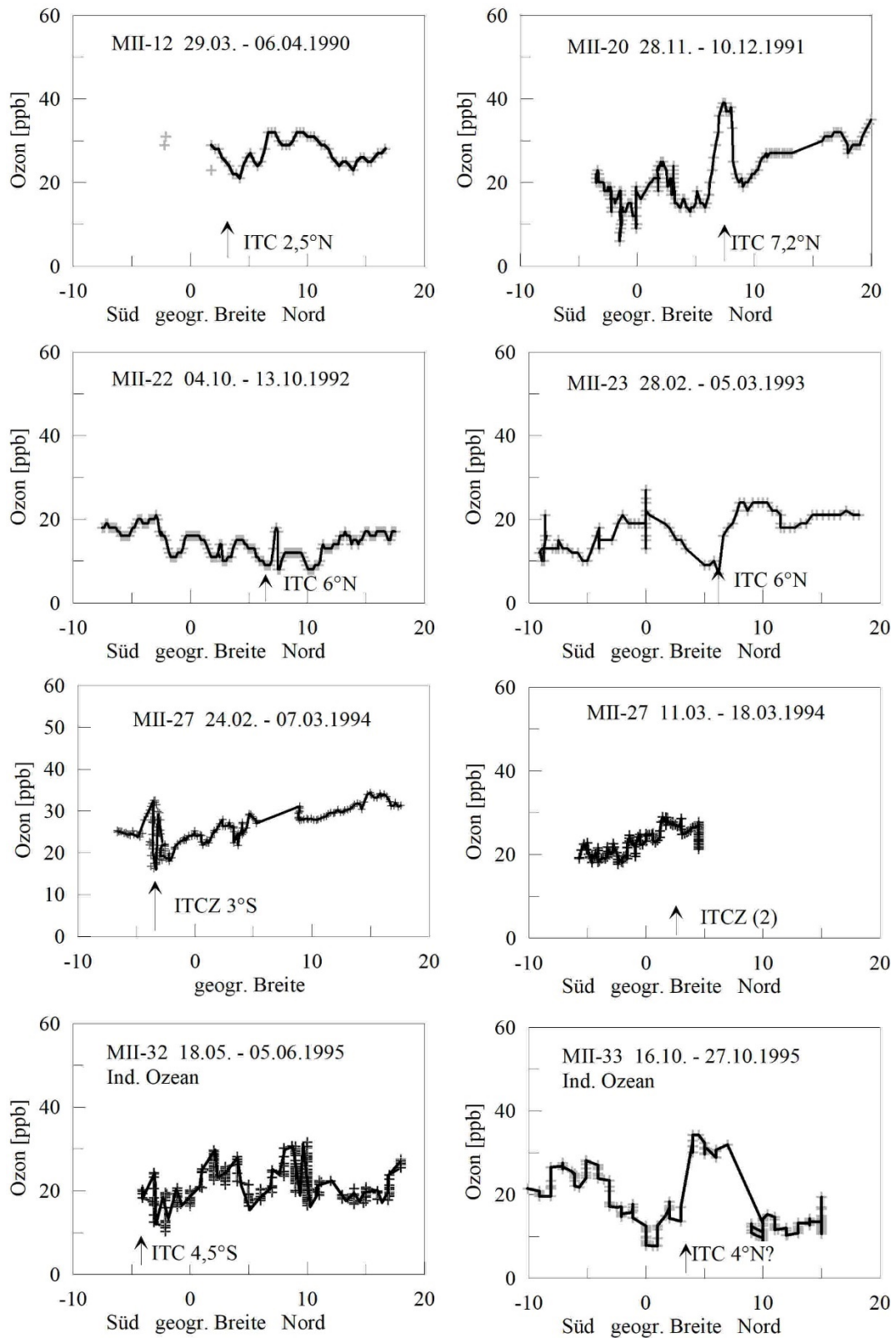


Abb. 9.3: Ozonschnitte durch die ITCZ an Bord von FS Meteor II.

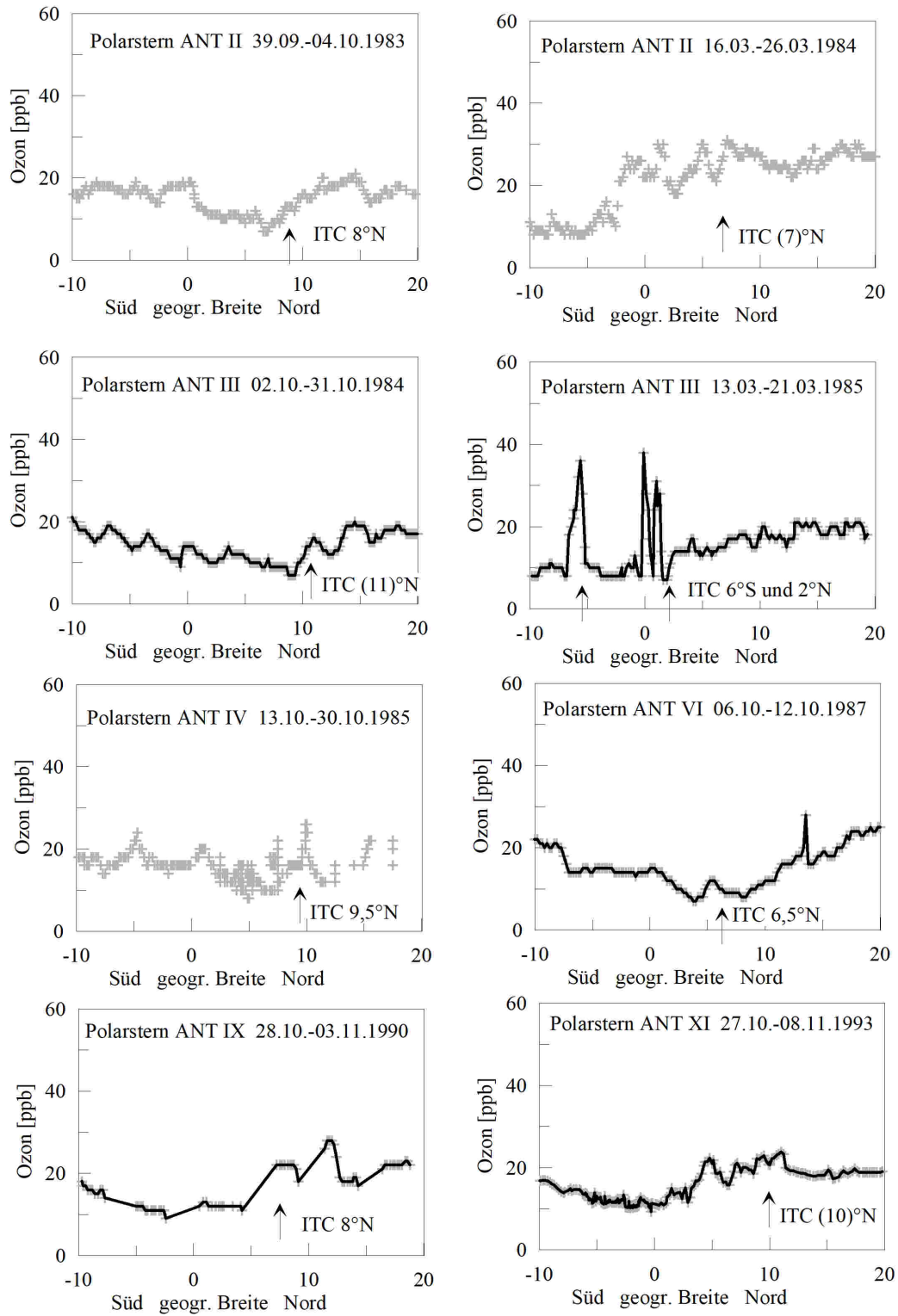


Abb. 9.4: Ozonschnitte durch die ITCZ an Bord von FS Polarstern.

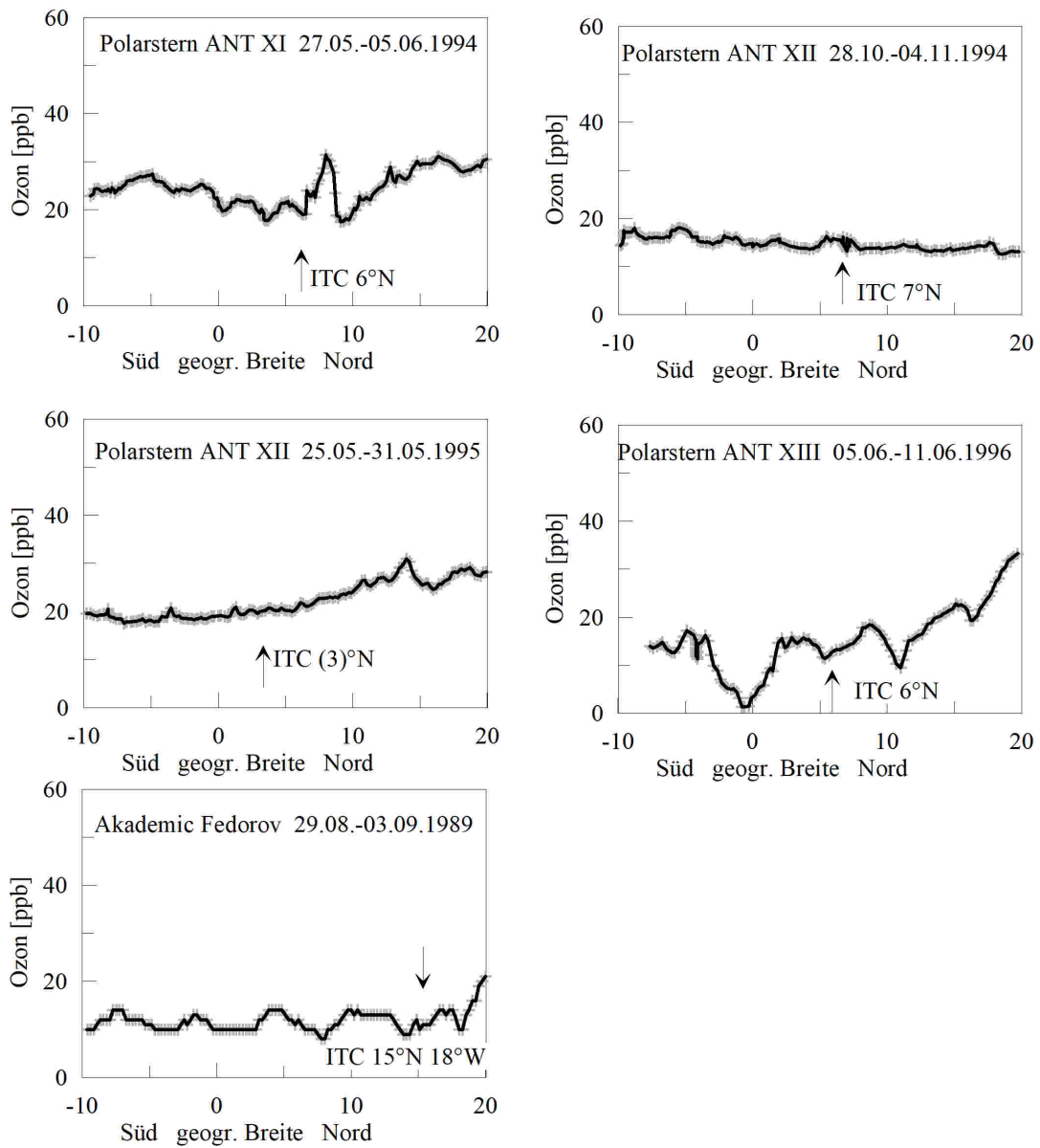


Abb. 9.5: Ozonschnitte durch die ITCZ an Bord der FS Polarstern und Akademik Fedorov.

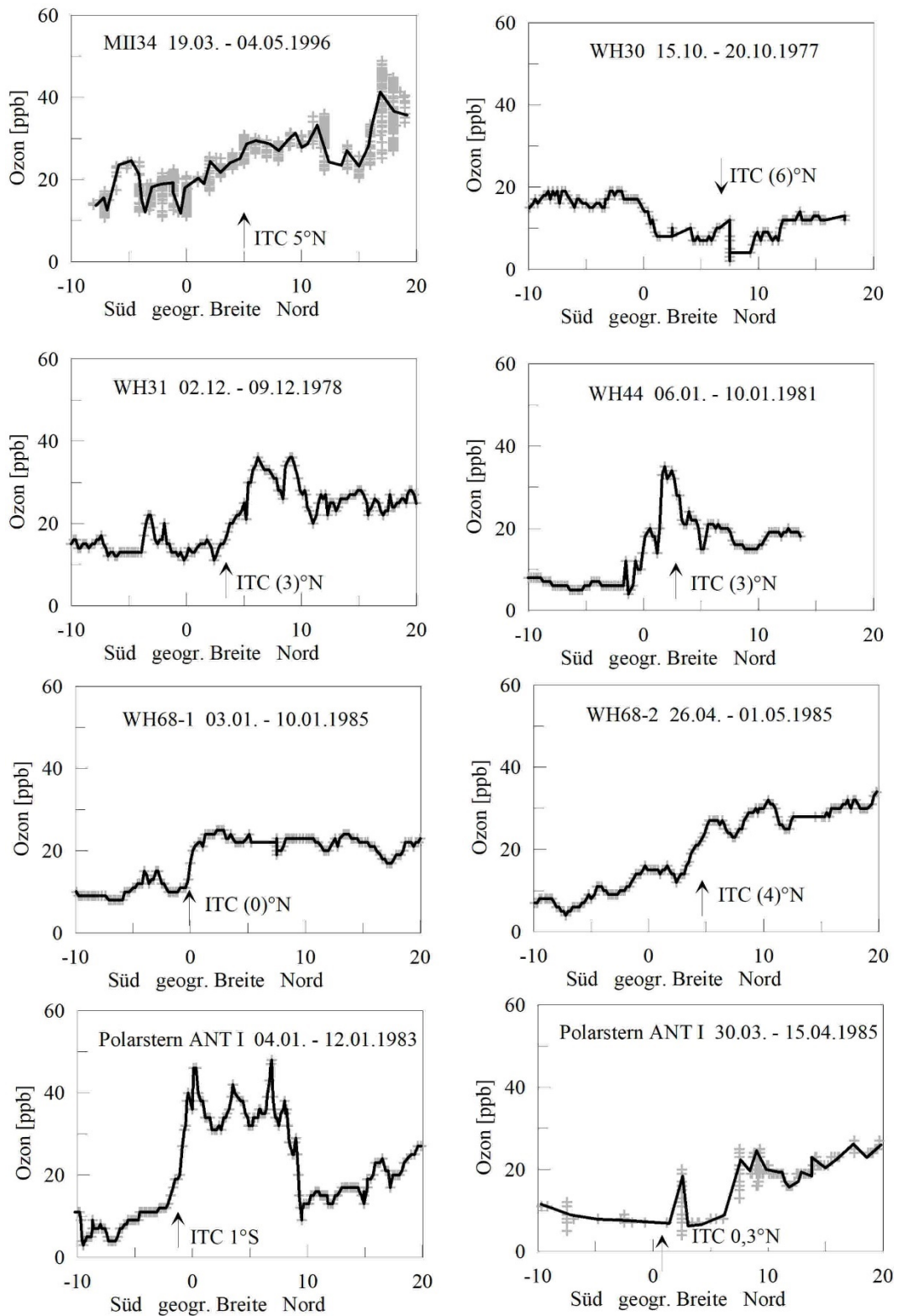


Abb. 9.6: Ozonschnitte durch die ITCZ an Bord von Meteor II, FFS Walther Herwig und FS Polarstern.

10. ERGEBNISSE DER OZONMESSUNGEN AN DER GEORG-VON-NEUMAYER-STATION 1982 – 1996

Im Jahr 1982 wurden an der *Georg-von-Neumayer-Station* auf dem Ekström-Schelfeis in der Antarktis Ozonmessungen begonnen und bis 1996 fortgeführt. Die Station lag etwa 15 km von der Eiskante entfernt.

Abb. 10.1 gibt eine Übersicht über die Anlage. Die Hauptstation lag komplett unter der der Schneeoberfläche.

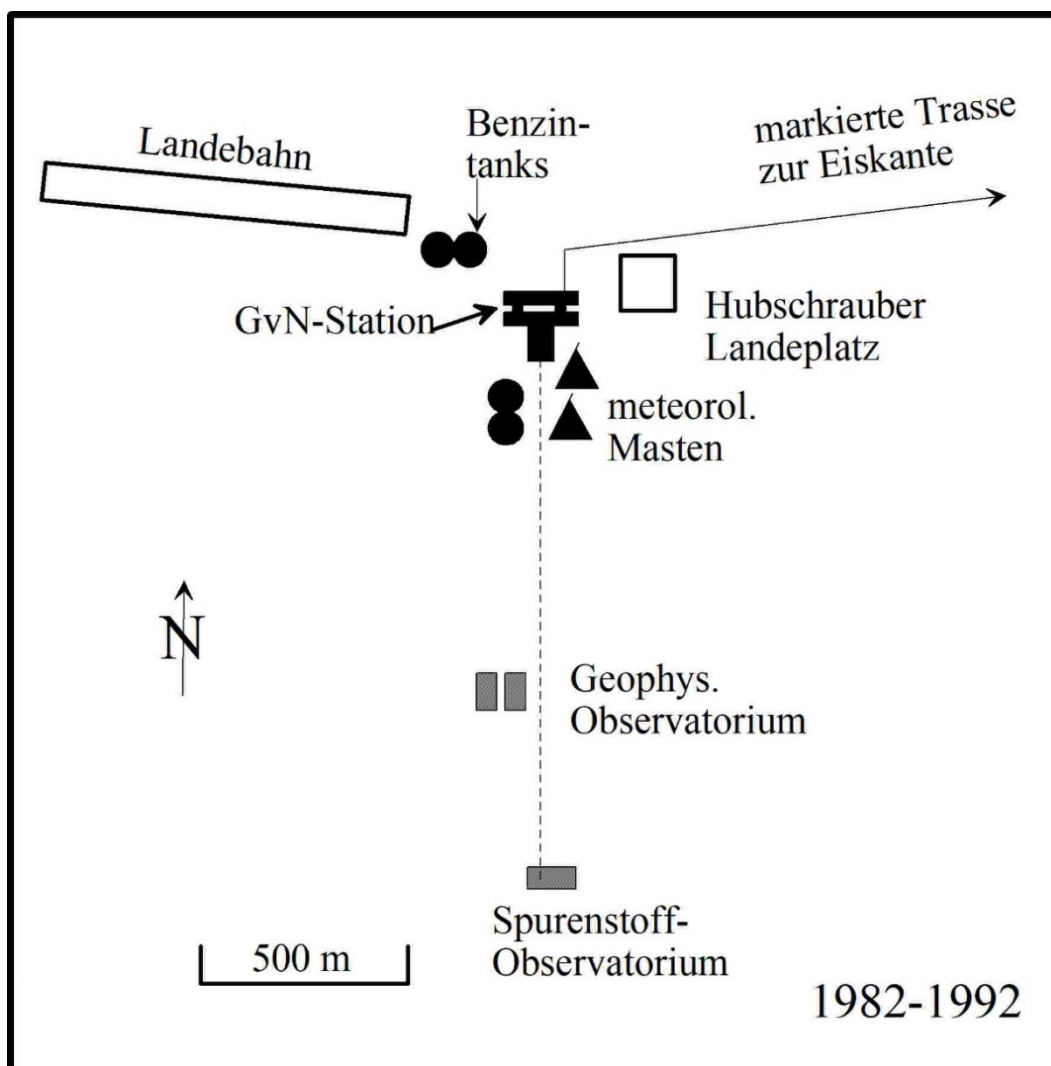


Abb. 10.1: Übersicht über die GvN-Station und das südlich davon gelegene Spurenstoffobservatorium, in dem das Ozongerät installiert war.

Im ersten Jahr war 1,5 km südlich der Station ein sogenanntes Spurenstoffobservatorium von der Universität Heidelberg eingesetzt worden (Weller et al. 2006), um luftchemische Proben

vielfältiger Art nehmen zu können (Abb. 10.2). Unter den extremen Bedingungen musste einige Erfahrung gesammelt werden. So setzte sich im Luftansaugschacht für einige Geräte Reif ab. Das Ozongerät verfügte über eine eigene Ansaugleitung aus Teflon, die problemlos funktionierte. Dagegen war der Sprudler empfindlich gegen direktes Sonnenlicht, wodurch sich die Anzeige sprunghaft änderte. Dies wurde erfolgreich durch einen Sonnenschutz aus Pappe unterbunden. Am Ausgang des Gerätes war ein Aerosolfilter angebracht, um im Sprudler entstehende Lösungströpfchen abzuscheiden, damit Aerosolmessgeräte und insbesondere ein Partikelzähler nicht gestört werden konnten. Das Ozongerät überstand auch einen Notstrombetrieb, bei dem die Temperatur im Spurenstoffobservatorium auf -22°C gesunken war.

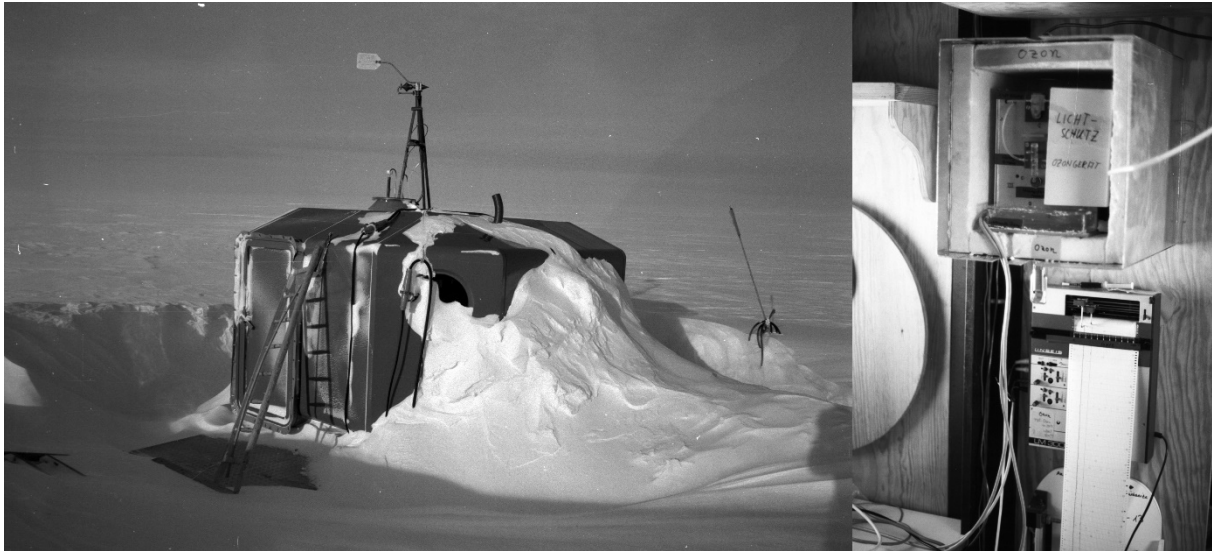


Abb.10.2: Spurenstoffobservatorium südlich der GvN-Station 1982 und das dort eingebaute Ozongerät (Photos: Überwinterer G. König-Langlo; AWI). Diese Messstelle war bis 1992 in Betrieb.

1992 wurde die *Georg-von-Neumayer-Station* durch einen Neubau etwa 10 km südsüdwestlich der ersten Station ersetzt (Kohlberg and Janneck 2006). Im Januar 1992 kam es wegen häufiger Fahrten zwischen GvN und dem Neubau *Neumayer-II* immer wieder zu Störungen der Spurenstoffmessungen, so dass zeitweise der Betrieb ganz eingestellt wurde.

Am 28. August 1982 wurde erstmals ein plötzliches Absinken des Ozonmischungsverhältnisses von 18 ppb auf 1 ppb bei Nordwind beobachtet, der jedoch nicht durch Abgase von der Hauptstation verursacht war. Ein gleichzeitig arbeitender Partikelzähler hätte Stationsabluft durch stark erhöhte Anzahldichten anzeigen müssen, was nicht der Fall war. Das Ozon-Gerät schien auch richtig zu funktionieren, da das Signal von selbst wieder anstieg. Sicherheitshalber wurde das Gerät gründlich überprüft, ohne dass das Ozon auf die früheren Werte angestiegen wäre. Anfängliche Vermutungen, die Küstenpolynia könnte zu verstärktem Ozonabbau an der Meeresoberfläche führen, ließen sich nicht bestätigen. Außerdem ist die Depositionsgeschwindigkeit über Meerwasser zu gering, um einen vollständigen Ozonabbau zu erklären. In der Literatur wurde 1986 erstmals über einen ähnlichen Ozonabbau in Bodennähe berichtet. Während im ersten Messjahr 1982 über die Ursache gerätselt wurde, konnte erst einige Jahre später geklärt werden, dass hohe Brom-Konzentrationen dafür verantwortlich waren (Simpson et al. 2007). Das sehr reaktive Ozon oxydiert Br zu BrO, verbunden mit einem weiträumigem Ozonabbau. Da die Konzentration von BrO in kurzer Zeit sehr rasch ansteigen kann, werden solche Situationen als Bromid-Explosionen bezeichnet.

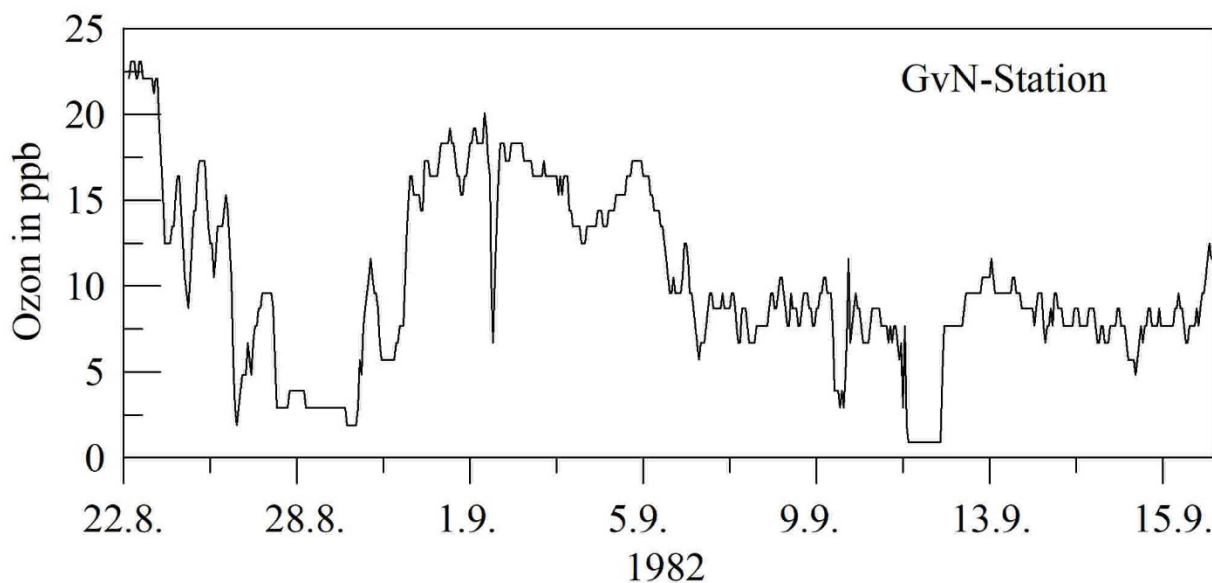


Abb. 10.3: Erstmalige Entdeckung eines totalen Ozonabbaus an der GvN-Station Ende August 1982. Über ein solches Ereignis war bisher nicht in der Literatur berichtet worden.

Derartige Situationen kommen nicht in jedem Jahr vor. Die folgende Tabelle 10.1 listet die monatliche Anzahl von ozonarmen Stunden nach Wiederaufgehen der Sonne (Monate August bis Oktober) auf, soweit die Messungen zuverlässig waren, d.h. kein Ausfall vorhanden war. In Zeiträumen mit Geräteausfall können solche Situationen entgangen sein. Häufiger sind in den Monaten August bis Oktober Zeiten zu bemerken, in denen das Ozonmischungsverhältnis auf 15 ppb oder weniger erniedrigt war. Das kann bedeuten, dass der Ozonabbau in größerer Entfernung stattfand und infolge von turbulenter oder konvektiver Durchmischung ein Teil des Ozonverlustes bereits aus höheren Luftschichten wieder ergänzt worden war. In manchen Jahren war der Ozonabbau sehr ausgeprägt, in anderen Jahren überhaupt nicht bemerkbar. Das kann bedeuten, dass Situationen mit Bromidexplosionen zwar auftraten, die ozonarme Luft aber nicht zur GvN-Station gelangte.

Tab. 10.1: Anzahl der Stunden mit $O_3 < 10$ ppb pro Monat, in denen Ozon durch Brom abgebaut war, in den Jahren 1982-1994.

| Monat | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1992 | 1993 | 1994 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Aug. | 90 | - | >35 | - | 100 | 44 | - | - | - | 12 | >7 | kA |
| Sept. | >23 | 2 | - | 15 | - | 96 | - | - | 17 | - | 12 | - |
| Okt. | - | ~20 | 16 | 2 | - | 79 | - | - | - | - | 46 | - |

kA – keine Angabe

Es ist festzuhalten, dass auch im November noch Situationen mit verringertem Ozonmischungsverhältnis vorkommen, doch ohne totalen Ozonverlust. Somit ist die Hauptphase, in welcher ein massiver Ozonabbau durch Brom entstehen kann, im Wesentlichen auf die Monate August bis Oktober beschränkt, wobei die Temperatur eine wichtige Rolle spielt.

Später wurde auch in der Arktis von *Polarstern* aus eine Situation mit totalem Ozonabbau durch Halogene beobachtet (Abb. 10.4). Die ozonarme Luft entstand nicht unbedingt durch Abbau am Messort, sondern kann auch über große Entfernungen verfrachtet werden. Da die Schichtung meist stabil und turbulenzarm ist, kann die ozonarme Luft in Oberflächennähe über weite Strecken transportiert werden, ohne dass das Ozon wieder aufgefüllt wird (Wessel et al. 1998). Mittels Ozonsonden wurde nachgewiesen, dass die ozonarme Luftschicht eine Mäch-

tigkeit von 1.000 m erreicht und Rückwärtstrajektorien zeigten, dass die ozonarme Luft früher über eisbedeckte und sonnenbeschienene Gebiete geströmt war. Helmig et al. bestimmten die vertikale Mächtigkeit von ozonarmen Luftschichten zu 400 bis 800 m (Helmig et al. 2006).

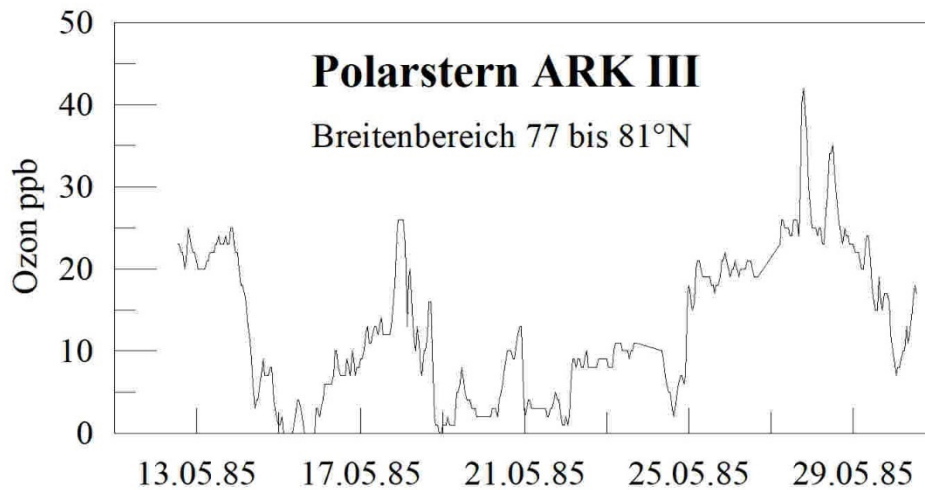


Abb. 10.4: Totaler Ozonabbau in der Registrierung des Ozons auf Polarstern im Mai 1985 im arktischen Eis.

Situationen mit totalem Ozonabbau in Oberflächennähe treten demnach auf, wenn in arktischen Breiten die Sonne im Frühling wieder erscheint. Weitere Untersuchungen ergaben, dass sogenannte Eisblumen bei der Freisetzung von Brom eine Rolle spielen, wobei es als wahrscheinlich anzusehen ist, dass die Eisblumen Brom-haltiges Aerosol freisetzen, aus dem mithilfe von Sonnenlicht gasförmiges Br freigesetzt wird, welches dann den Ozonabbau bewirkt (Kalnajs and Avallone 2006). Zur Freisetzung von Brom aus der kondensierten Phase, also aus Schnee auf dem Meereis, in die Luft können hohe elektrische Feldstärken beitragen, wie sie bei Driftschnee und hoher Windgeschwindigkeit auftreten (Tkachenko and Kozachkov 2012). Die Feldstärke ist hier normalerweise gering, wenn jedoch Driftschnee hinzukommt, werden Feldstärken von 30 kV/m erreicht, die in der Lage sind, chemische Prozesse auszulösen.

Die Ozonmischungsverhältnisse in der Antarktis schwanken innerhalb eines Monats nur sehr wenig, die Standardabweichungen liegt zwischen 2 und 3 ppb, abgesehen von den Monaten August, September und Oktober. Hier steigen sie auf 3,9, 4,0 und 3,6 ppb an. Diese erhöhte Variabilität ist durch den Ozonabbau durch Brom bedingt. Die normalerweise geringe Variabilität bedeutet, dass das Ozonmischungsverhältnis über weite Gebiete relativ einheitlich sein muss.

Tab. 10.2: Jahresgang der Standardabweichung der monatlichen Mittelwerte der bodennahen Ozonkonzentration. In den schattierten Monaten kann zeitweise ein vollständiger Ozonabbau durch BrO eintreten, weshalb die Standardabweichung höher ausfällt.

| Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2,1 | 1,8 | 2,1 | 2,4 | 2,3 | 2,1 | 2,2 | 3,9 | 4,0 | 3,6 | 2,9 | 2,6 |

Im Jahr 1984/1985 wurde das Ozongerät nicht im Spurenstoffobservatorium, sondern direkt in der Station in einem speziellen Spurenstofflabor untergebracht. Die Ansaugleitung wurde im Ausstiegskamin der Station nach außen verlegt. Durch Bildung eines Schneepfropfens in der Ansaugleitung kam es zu Beginn zur Unterbindung der Luftzufuhr. So wurde nach und nach Erfahrung im Gerätebetrieb gesammelt.

Im November 1984 wurden kurzfristige Spitzen bis zu 40 ppb beobachtet. Es ergab sich ein Verdacht, ob starke elektrische Felder, wie sie bei Schneetrift auftreten, zu Sprühentladungen an Metallteilen führen und dabei lokal hohe Ozonbildung auftreten kann. Tatsächlich konnten an manchen Triftlagen vom Antennenkabel „eindrucksvolle“ Entladungen zur Fingerkuppe durch Überwinterer festgestellt werden. Dies ist ein Beleg für das zeitweise Auftreten hoher elektrischer Feldstärken bei Schneetrift, wie sie auch andernorts gemessen wurde (Radock 1970). Auch wenn keine Feldstärkemessungen vorgenommen wurden, ist es naheliegend, dass zeitweise Sprühentladungen an Teilen des Ausstiegsschachtes auftraten, bei denen Ozon erzeugt wurde und in die Ansaugleitung geriet. Die merkwürdigen Spitzen wurden daher als keine natürlichen Messwerte eingestuft.

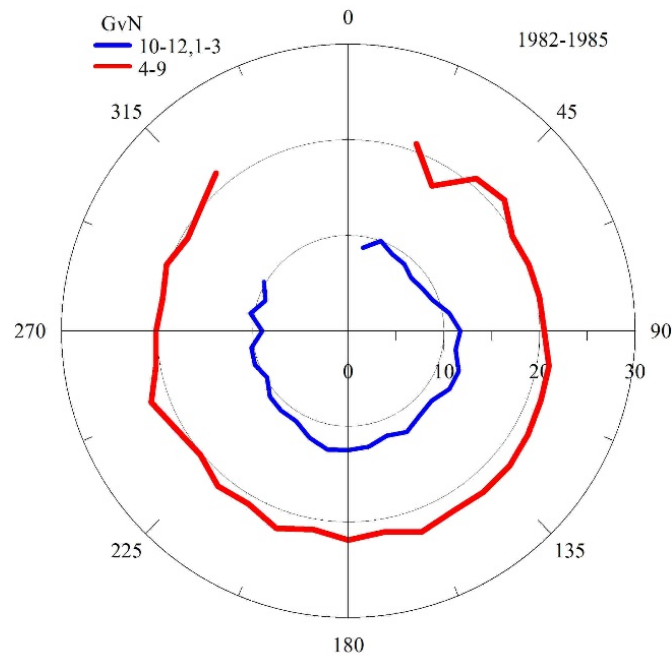


Abb. 10.5: Windrichtungsabhängigkeit der Ozonmischungsverhältnisse an der Georg-von-Neumayer-Station für das Südsommer-Halbjahr (blau) und das Südwinterhalbjahr (rot). Erhöhte Werte treten bei Süd- und Südostwind auf. Der Nordsektor ist wegen zu geringer Fallhäufigkeiten ausgelassen.

Eine Windrichtungsanalyse des Ozonmischungsverhältnisses ergab nur eine geringe Abhängigkeit. Im Sektor 100° bis 210° waren die Ozonmischungsverhältnisse etwas höher als für die übrigen Richtungen. Im Sektor NNO-N waren die Fallhäufigkeiten sehr gering, weshalb keine Daten angegeben wurden. Wenn der Wind aus dem Südost-Sektor kommt, ist häufig ein katabatischer Wind vom Inlandeis vorausgegangen, mit dem Luft mit höherem Ozonmischungsverhältnis aus der höheren Atmosphäre ins Meeresniveau gelangt.

Wenn katabatischer Wind auftritt, wird die vom Inlandeis abfließende Luft an der Küste der Antarktis auf Ost bis Südost abgelenkt. Mit dem katabatischen Wind fließt ozonreichere Luft aus 2.000-3.000 m Höhe nach unten. Das höhere Mischungsverhältnis sollte bei Vertikalbewegungen erhalten bleiben. Ob diese Erwartung berechtigt ist, wurde durch einen Vergleich der Jahresgänge an der Südpolstation und der GvN-Station geprüft. In Abb. 10.6 wird der Jahresgang des Ozonmischungsverhältnisses an der Südpol-Station (Oltmans and Komhyr 1986) mit dem an der Georg-von-Neumayer-Station gezeigt. Die Zeiträume unterscheiden sich allerdings: während die Daten vom Südpol das Mittel der Jahre 1975 bis 1984 darstellen, umfassen die Daten der GvN-Station nur die vier Jahre 1982 bis 1985. Man sieht, dass lediglich in den Monaten Mai bis Juni, also in der ersten Winterhälfte, die Ozonmischungsverhältnisse an beiden Stationen auf ähnlichem Niveau liegen. In den übrigen Monaten ist das Ozon-

mischungsverhältnis im Meeresniveau deutlich niedriger. Das bedeutet, dass durch turbulente Zumischung ozonärmerer Luft an der Obergrenze der katabatischen Windschicht sich das Ozonmischungsverhältnis beim Abfluss verringert. Die Mächtigkeit der katabatischen Schicht ist nicht sehr hoch, so dass turbulente Zumischung einen deutlichen Rückgang des Ozonmischungsverhältnisses bewirkt.

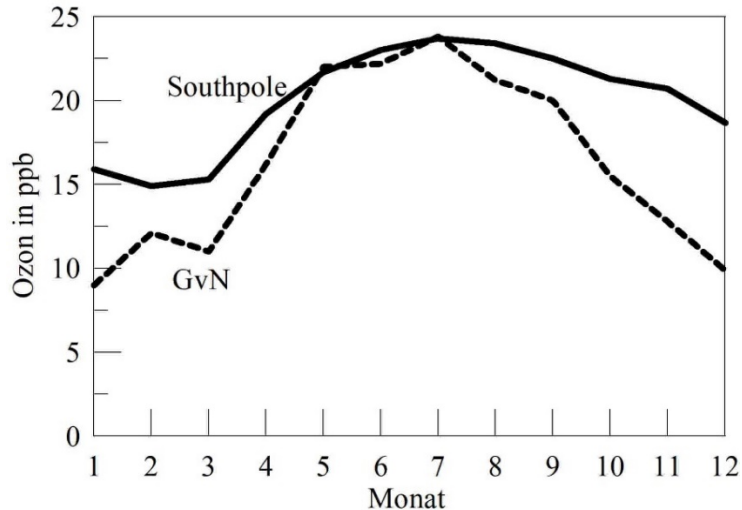


Abb. 10.6: Mittlerer Jahresgang der Ozonmischungsverhältnisse an der Südpolstation (1974 – 1984; (Oltmans and Komhyr 1986) und an der Georg-von-Neumayer-Station (1982 – 1985).

Durch die katabatisch vom Plateau ständig abfließende Luft wird eine großräumige Zirkulation über dem antarktischen Kontinent erzeugt, wobei in der Höhe die Luft spiralig zum Pol einströmt, an den Abhängen des Inlandeises abfließt und im Meeresniveau ausströmt. Zum Nachweis dieses Vorganges wurde ein auf konstante Höhe eingestellter Ballon in Neuseeland gestartet, der mit der Westzirkulation den Pol mehrfach umrundete und sich über einen Zeitraum von zwei Monaten in immer höhere Breiten zum Pol hinbewegte. Der Polabstand verringerte sich mit jeder Umrundung, wie aus Abb. 10.7 deutlich wird (Schwerdtfeger 1984).

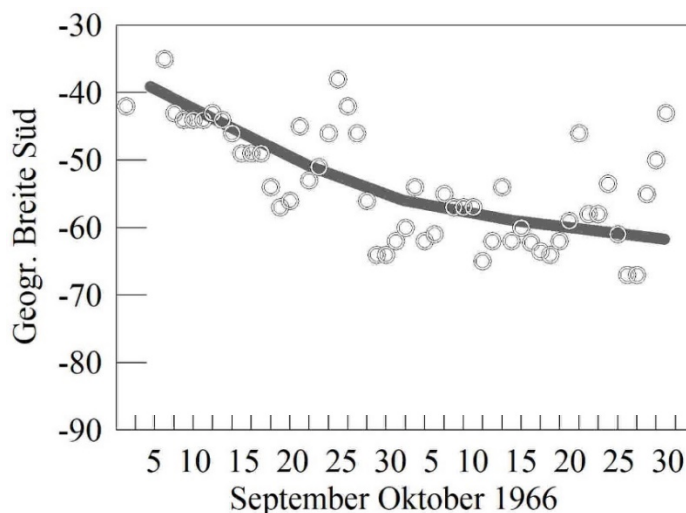


Abb. 10.7: Polabstand eines in Neuseeland gestarteten niveaunkonstanten Ballons, der in 200 hPa den Südpol mehrfach umrundete. Natürlich sind in diese Zirkulation Hochs und Tiefs eingebettet, die immer wieder starke meridionale Verfrachtungen bewirken, wie an dem Trift-Verhalten des Ballons zu sehen ist.

Die hochtroposphärische Konvergenz und niedertroposphärische Divergenz bestätigte sich auch bei Untersuchungen zur Massenbilanz (Rubin and Weyant 1963). Oberhalb von 650 hPa wurde Konvergenz, unterhalb davon Divergenz nachgewiesen. Die hochtroposphärische Konvergenz erwies sich im Südwinter als größer als im Südsommer. Als Konsequenz herrscht über dem Eisschild im Mittel ein Absinken der Luft mit einem Maximum zwischen 600 und 400 hPa, das im Südwinter mit knapp -40 cm/s ausgeprägter als im Südsommer (~ -30 cm/s). Da in polaren Breiten eine photochemische Ozonproduktion kaum stattfindet, kann auf eine Lebensdauer des Ozons von 3 – 4 Wochen geschlossen werden. Das Ozonmischungsverhältnis ergibt sich daher aus der Bilanz zwischen dem Zufluss aus der Stratosphäre und dem Ozonabbau in Bodennähe.

Eine Analyse des Windfeldes unmittelbar über dem Eis zeigte, dass an der GvN-Station der Abfluss nicht vom Plateau unmittelbar stammt, sondern von dem Eis-Höhenrücken bei 75°S (Parish and Bromwich 1987). An der Küste dreht die Strömung auf Ost bis Südost. Daher ist ein Übereinstimmen der Ozonmischungsverhältnisse am Südpol und der GvN-Station ohnehin nicht zu erwarten. Für die russischen Stationen *Molodezhnaya* und *Mirny* wurde gezeigt, dass vom späten Südsommer bis Herbst bei insgesamt verringerter zyklonaler Aktivität die Richtung und Stärke des katabatischen Windes den Tagesgang des oberflächennahen Ozons beeinflusst (Gruzdev et al. 1993). Dies dürfte auch an der GvN-Station zutreffen.

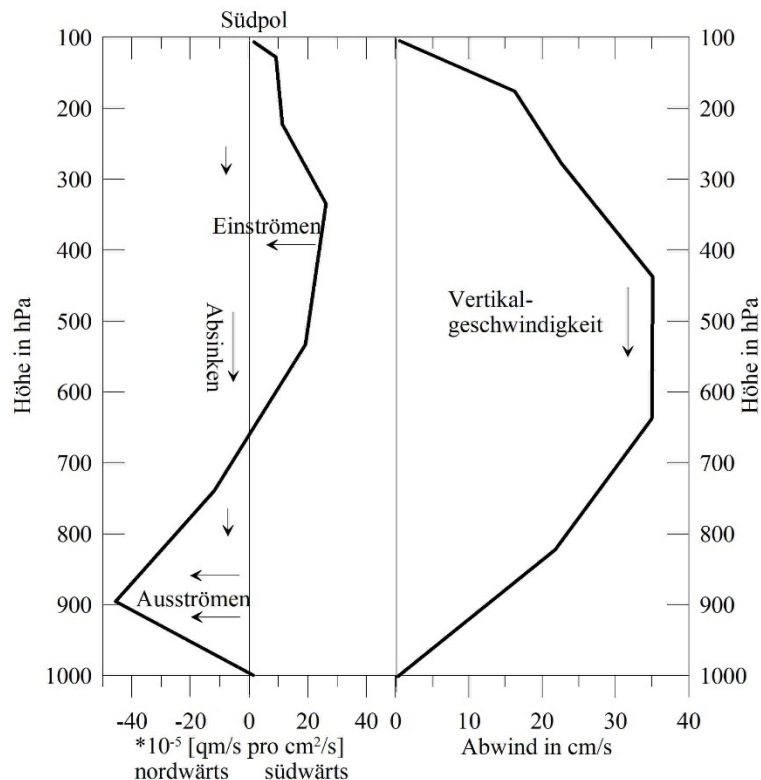


Abb. 10.8: Links: Massenhaushalt der Luft als Funktion der Höhe über der Antarktis mit Konvergenz zwischen 750 und 100 hPa. Rechts: Die Vertikalgeschwindigkeit zeigt ein maximales Absinken zwischen 430 und 630 hPa. Beide Verteilungen nach (Rubin and Weyant 1963).

Der Transport von Ozon durch die antarktische Tropopause erfolgt nicht allein durch Faltungsprozesse in Verbindung mit Tiefdruckgebieten, sondern auch durch Schwerewellen. Letztere konnten mit einem Radar an der japanischen Station *Syowa* nachgewiesen werden. Die Schwerewellen führen zur Bildung einer mehrfachen Tropopause (Shibuya et al. 2015). Sie werden vor allem im Winter, wenn die Stratosphäre nur eine geringe statische Stabilität

aufweist, an stufenartigen Geländesprüngen erzeugt. Auf der gegenüberliegenden Seite der Antarktis entstehen Schwerewellen in noch größerem Umfang im Lee der Anden und der Antarktischen Halbinsel (Hupe et al. 2019). Damit ist natürlich im Winter eine erhöhte Ozonzufuhr aus der Stratosphäre verbunden, die den Jahresgang des bodennahen Ozons an der GvN-Station verständlich werden lässt. Die stratosphärische Intrusion von Ozon durch Schwerewellen konnte bereits auf einem Flug über das Ellesworth Gebirge sogar im Südsommer im Dezember 1978 nachgewiesen werden (Robinson et al. 1983).

In der letzten Dezemberwoche 1988 traten an der GvN-Station auffällige Ozonvariationen zwischen 13 und 0 ppb auf, die mit Windrichtungsänderungen verbunden waren. Maxima traten bei der Windrichtung SO bis S auf. Damit können mehr oder weniger große Auswirkungen des katabatischen Windes verbunden gewesen sein.

Eine ähnlich auffallende Ozonregistrierung entstand auf FFS *Walther Herwig* im Jahr 1978 in der Nähe der Station *Esperanza* auf der antarktischen Halbinsel (Abb. 10.9), die wahrscheinlich durch Schwerewellen verursacht wurden.

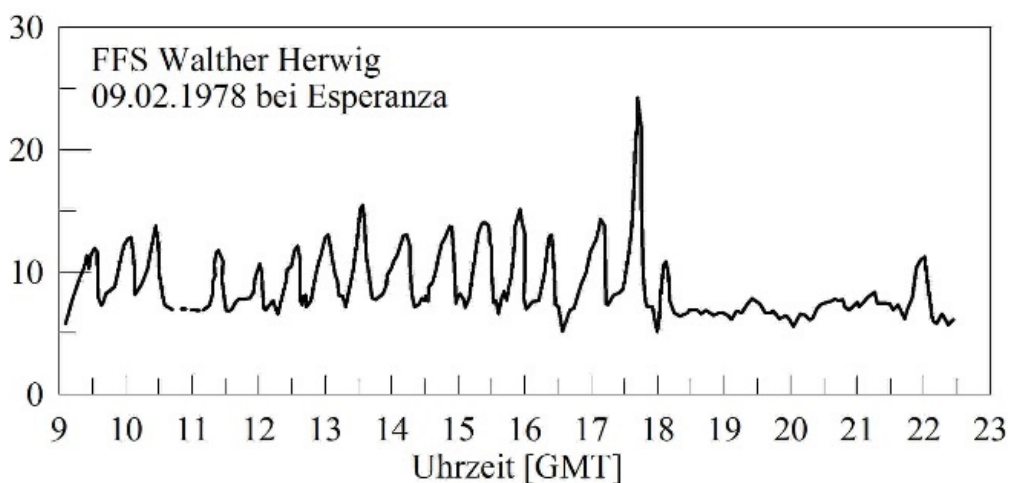


Abb. 10.9: Ozonmischungsverhältnis, gemessen an Bord von FFS *Walther Herwig* in der Nähe von *Esperanza* auf der Antarktischen Halbinsel.

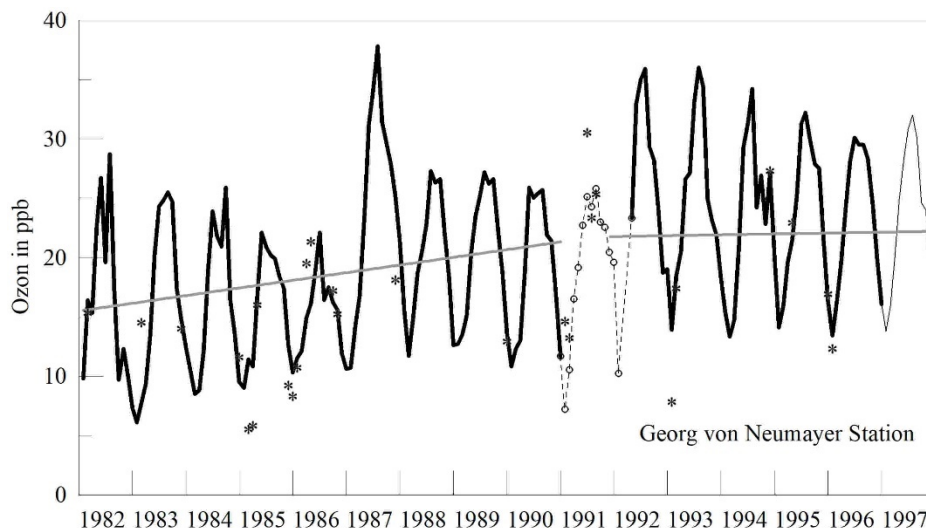
Während dieser Zeit war der Himmel weithin mit arktischen Stratus bedeckt, der über dem schneefreien, felsigen Untergrund der antarktischen Halbinsel durch Wolkenstraßen aufgebrochen war, die von der hier einfallenden Sonnenstrahlung in Gang gehalten wurden. Die Cumuli erzeugten einen stärkeren Vertikalaustausch, mit dem ozonreichere Luftpakete von oberhalb in die ozonärmere, stabil geschichtete Grundschicht gebracht wurden und dort für einen kurzzeitigen Anstieg des Ozonmischungsverhältnisses sorgten. Ein Kaltfrontdurchgang um 18 Uhr beendete diese Situation. Dies ist, wie schon beim katabatischen Wind, ein weiteres Beispiel für die Vielfalt atmosphärischer Prozesse, die durch Vertikalaustausch für den Transport von Ozon in die oberflächennahe Luftschicht sorgen.

Im Jahr 1995 begann das Alfred-Wegener-Institut mit eigenen Ozonmessungen, wozu ein UV-Absorptionsgerät eingesetzt wurde. Nach zwei Jahren Parallelbetrieb wurden die Messungen des DWD mit dem nasschemischen KJ Verfahren beendet.

An der Südpolstation und in *Dumont d'Urville* zeigte sich im Jahresgang des oberflächennahen Ozons eine auffällig hohe Variabilität des Mischungsverhältnisses in den Monaten November und Dezember, die als photochemische Ozonproduktion interpretiert wurden, da gleichzeitig hohe NO-Konzentrationen registriert wurden (Crawford, J. H. Davis, D. D. et al. 2001; Legrand et al. 2009). NO sollte in der Schneedecke absorbiert und mit zunehmender Erwärmung wieder freigesetzt werden. In einer flachen Schicht könnte also bei hoher UV-Strahlung Ozon photo-

chemisch gebildet werden. Solche starken Schwankungen des Ozonmischungsverhältnisses wurden mit dem nasschemischen Verfahren nicht beobachtet. Daher ist auch die Deutung möglich, dass es sich um eine Querempfindlichkeit des UV-Absorptionsverfahrens zur Ozonmessung gegen Quecksilber handeln kann. Hg wird ebenfalls in der Schneedecke über viele Monate hinweg absorbiert und bei ausreichender Sonnenstrahlung wieder in die Gasphase überführt. Das UV-Absorptionsverfahren nutzt eine Quecksilberabsorptionslinie zur Ozonbestimmung. Ist gleichzeitig gasförmiges Hg vorhanden, entsteht eine starke zusätzliche Absorption, die nicht von Ozon verursacht wird. Es sind nach jetzigem Kenntnisstand zusätzliche Untersuchungen erforderlich, um zwischen photochemischer Ozonproduktion und einer Quecksilber-Querempfindlichkeit des Messverfahrens unterscheiden zu können.

Die 15-jährige Registrierung des Jahrgangs ist in Abb. 10.10 gezeigt. Im Jahr 1991 waren die Messwerte unsicher und sind nur gestrichelt eingezeichnet, auch wenn sie zum Teil durch Schiffsmessungen bestätigt werden. Man erkennt einen zunehmenden Trend, wie er auch bei den Schiffsreisen im Südatlantik in vergleichbarem Maß beobachtet wurde. Zum Vergleich sind die Ozonmischungsverhältnisse angezeigt, wie sie auf verschiedenen Schiffen bei den Versorgungsreisen zur GvN-Station beobachtet wurden, während sie in der Atka-Bucht lagen oder in ähnlicher geographischer Breite operierten. Die Übereinstimmung ist nicht ganz vollkommen, weil von der *Georg-von-Neumayer-Station* Monatsmittelwerte angegeben sind, von den Schiffen dagegen Mittelwerte für die Dauer der Liegezeit oder aus ähnlicher Breite im Weddellmeer, also in großer Entfernung. Dennoch bestätigen die Messungen an Bord der Schiffe im Großen und Ganzen die Ergebnisse der *Georg-von-Neumayer-Station*.



*Abb. 10.10: Monatliche Mittelwerte des oberflächennahen Ozons an der GvN-Station von 1982 bis 1986. Die grauen Sterne * bedeuten Messergebnisse an Bord von Schiffen in der Atka-Bucht oder im Weddellmeer im Breitenbereich um 70°S. Die Messwerte für 1997 stammen vom AWI, welches die Messreihe fortführt.*

In den ersten 10 Jahren zeigt sich eine Zunahme der Jahresmittel des Mischungsverhältnisses, die von 1992 bis 1996 nicht mehr zu sehen ist. Die Jahresminima stiegen ebenfalls an. Bei den Jahresmaxima ist für jeweils mehrere Jahre eine Abnahme zu verzeichnen, danach steigt das Maximum sprunghaft an, um wieder über mehrere Jahre rückläufig zu sein. Dies könnte mit mehrjährigen Variationen der Intrusionen aus der Stratosphäre zusammenhängen, wozu aber keine anderweitigen Untersuchungen vorliegen. Aus den Ozonmessungen der Südpolstation von 1975 bis 1986 geht hervor (Komhyr et al. 1988), dass dort die Jahresmaxima zwar langfristig anstiegen, zwischendurch aber Perioden auftraten, wo die Maxima für einige Jahre rückläufig waren. Die Intensität oder Häufigkeit der stratosphärischen Intrusionen könnte

daher durch Wechselwirkungen mit anderen großräumigen Phänomenen (z.B. ENSO) beeinflusst worden sein. Nach Analysen des DLR in Oberpfaffenhofen ist der Bereich zwischen den Süd-Anden und der Antarktischen Halbinsel weltweit der Ort mit der stärksten Schwerewellenaktivität in der oberen Troposphäre (Rapp et al. 2020). Sobald hier die Schwerewellen brechen, kommt es zu einem irreversiblen Ozontransport von der Stratosphäre in die Troposphäre (Lamarque et al. 1996). Solche Situationen können an der Südspitze Südamerikas entstehen, wenn Tiefdruckgebiete, die Tropopausenfaltungen ohnehin begünstigen, die Drake Straße durchwandern. Schwerewellen entstehen auch an einem hochtroposphärischen Strahlstrom. Damit sollte östlich der Drake-Straße ein verstärkter Transport von stratosphärischem Ozon in die Troposphäre verknüpft sein. Hierzu dürften in Zukunft noch weitere Aufschlüsse zu erwarten sein, insbesondere besteht Bedarf nach besseren Informationen zum jahreszeitlichen Gang der Schwerewellenaktivität. Eine Bestätigung für die verstärkte Zufuhr von Luft hochtroposphärischen oder stratosphärischen Ursprungs in Oberflächennähe ergibt sich aus dem Jahresgang des Isotopenverhältnisses $^7\text{Be}/^{10}\text{Be}$ an der GvN-Station (Wagenbach et al. 1988), das in der Stratosphäre einen höheren Wert besitzt. An der GvN-Station wurde ein Maximum im Südwinter nachgewiesen, ebenso wie für das bodennahe Ozon. Dies weist auf einen höheren Zustrom von stratosphärischem Ozon im Südwinter hin. Detailliertere Analysen der Radionuklide ^7Be , ^{10}Be , und ^{210}Pb ergaben weitergehende Aussagen zum stratosphärischen Eintrag und Ferntransport vom Kontinent. Die Beryllium Isotope weisen ein Maximum in Februar-März auf und scheinen mit dem solaren Zyklus zu variieren. ^{210}Pb ist ein Indikator für Ferntransport von kontinental beeinflussten Luftmassen, die einen erhöhten Anteil von Krustenmaterial aufweisen (Elsässer et al. 2011). ^{210}Pb besitzt ein Jahresminimum im Zeitraum März/April und ein Jahresmaximum im November/Dezember. Dieses Isotop weist eine mehrjährige Periode von 4 – 6 Jahren auf. Dies kann als Hinweis gelten, dass die ungleichmäßigen Jahresgänge von Ozon an der GvN-Station durch solche großräumigen Schwankungen der allgemeinen Zirkulation beeinflusst werden.

Es sei zusätzlich angemerkt, dass kürzerperiodische Frequenzanalysen der Zeitreihen von Ozon, Temperatur und ^{222}Rn periodische Schwankungen in den bodennahen Ozonmischungsverhältnissen ergaben (Winkler and Brylka 1992). Dabei wurden Perioden von ca. 30, 18-19 und 13-14 Tagen im Südwinter der Jahre 1983 und 1987 nachgewiesen, die auch bei der Temperatur vorhanden waren, ebenso beim Radon-222, hier jedoch schwächer. Hier soll darauf nicht näher eingegangen werden.

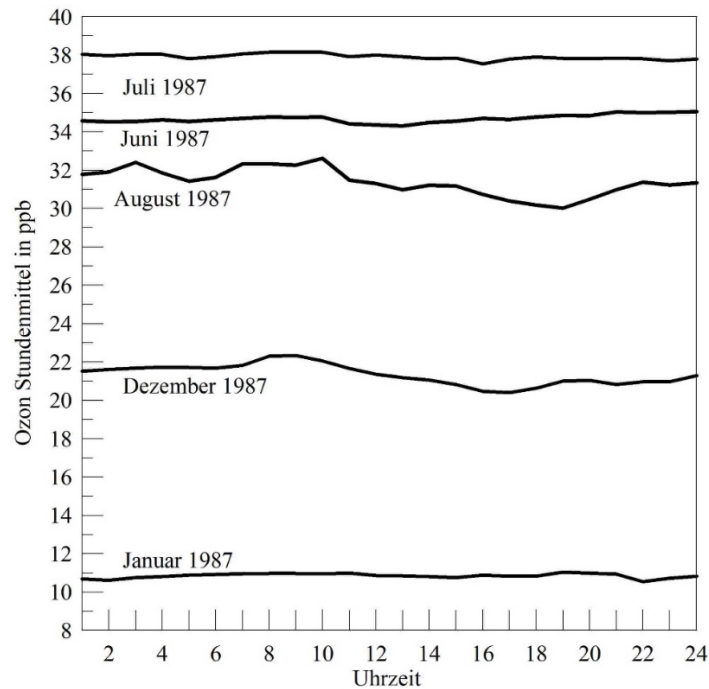


Abb. 10.11: Mittlere monatliche Tagesgänge des oberflächennahen Ozons an der Georg-von-Neumayer-Station. Die Tagesvariation ist sehr gering, abgesehen von den Monaten, in denen Episoden mit Ozonzerstörung durch Bromid auftreten, wie am Beispiel August deutlich ist.

Es soll weiterhin darauf aufmerksam gemacht werden, dass Ozon von der Schneedecke absorbiert und wieder abgegeben werden kann. Auch eine photochemische Ozonbildung wird für wahrscheinlich gehalten, die einige ppb pro Tag erreichen kann und auf dem antarktischen Plateau höher als an der Küste sein soll (Gros et al. 1998).

Die Schneedecke kann im Prinzip eine Senke für Ozon sein, allerdings ist die Depositionsgeschwindigkeit mit etwa 0,01 cm/s sehr gering (Helmig et al. 2006).

Der Tagesgang des Ozons wird daher vom turbulenten Transport, von der Deposition, die wiederum von oxidablen Verunreinigungen im Schnee abhängt, und von eventueller photochemischer Produktion beeinflusst. Im Winter kommt es wegen fehlender Einstrahlung nicht zu photochemischen Vorgängen. Im Sommer ist dagegen ein schwacher Tagesgang festzustellen. Abb. 10.11 zeigt für 1987 mittlere monatliche Tagesgänge für Januar, Juni, Juli, August und Dezember.

In den Wintermonaten ohne Sonneneinstrahlung Juni und Juli beträgt die Variation innerhalb eines Tages weniger als ein ppb. Im August ist der Tagesgang unruhig, da an einigen Tagen Ozonabbau durch Brom einsetzte, wie bereits oben aus Abb. 10.11 zu ersehen ist. Im Südsommer weist der Dezember einen geringen Tagesgang auf, aber im Januar betrug die Tagesvariation wieder weniger als ein ppb.

Die Tagesgänge können als typisch angesehen werden, jedoch könnten sich Hinweise auf weitere meteorologische Einflüsse ergeben, wenn Strahlungstage gesondert untersucht würden oder Tage mit Advektion vom Ozean ausgewählt würden.

11. DIE WICHTIGSTEN ERGEBNISSE IN KURZFORM

Es wurden von 1977 bis 1996 Ozonmessungen auf 77 Schiffsreisen über den Atlantik vorgenommen.

Die Nord-Süd-Breitenverteilung ergab in der Nordhemisphäre etwa doppelt so hohe Mischungsverhältnisse wie in der Südhemisphäre. Es gibt jedoch auch Situationen, in denen das Mischungsverhältnis in beiden Hemisphären relativ ähnlich war. Während der stratosphärisch-troposphärische Austausch in der Nordhemisphäre typischerweise höher ist als in der Südhemisphäre, scheint es Phasen zu geben, in denen die stratosphärischen Intrusionen in der Nordhemisphäre weniger Ozon in die Troposphäre transportieren. Im Norden sinken die Ozonmischungsverhältnisse in der Regel zum Pol hin etwas ab.

In der Nordhemisphäre war bis 1986 ein Anstieg des Ozon-Mischungsverhältnisses festzustellen, im gesamten Messzeitraum bis 1996 trat kein Trend auf, abgesehen von einer Zunahme in hohen geographischen Breiten. In der Südhemisphäre wurde in allen Breiten eine anhaltende Zunahme festgestellt.

In der Nordhemisphäre konnten im Gesamtmittel keine Jahresgänge festgestellt werden, abgesehen von hohen Breiten, wo ein zweigipfliger Jahresgang nachgewiesen wurde. In der Südhemisphäre lag ein Ozonmaximum im Südherbst.

Die Tagesgänge sind in allen Jahreszeiten und allen Breiten gering. Das Tagesmaximum tritt in der Regel am Morgen auf, das Minimum am Nachmittag oder Abend. Die Tagesvariation ist gering und beträgt meist weniger als ± 1 ppb, selten übersteigt sie ± 2 ppb.

Das Ozonmischungsverhältnis erwies sich an der ITCZ als sehr variabel. Typischerweise wurde ein deutlicher Anstieg von geringen Werten in der Südhemisphäre zu hohen Werten in der Nordhemisphäre gemessen. Es wurden aber auch Situationen beobachtet, in denen an der ITCZ Ozonspitzen auftraten, wobei wahrscheinlich durch starken Vertikalaustausch ozonreiche Luftpakete aus der Hochtroposphäre in Gewitternähe rasch in die oberflächennahe Schicht gelangten. In seltenen Fällen, wenn die ITCZ schwach ausgebildet ist, kann es auch zu einem photochemischen Abbau von Ozon kommen, wobei die Werte bis nahe Null absinken.

Aus parallelen Messungen von Krypton-85, das nur anthropogene Quellen besitzt, konnte erkannt werden, dass in Industriegebieten photochemisch entstandenes Ozon episodenhaft durch Ferntransport auf dem Atlantik durch erhöhte Mischungsverhältnisse festzustellen ist, die sich dem natürlichen Wert überlagern.

An der *Georg-von-Neumayer-Station* wurde Ozon von 1982 bis 1996 gemessen mit einem Wintermaximum und Sommerminimum. Als typisch wurde von Anfang an eine sehr geringe Variation des Ozons beobachtet, doch fiel im August 1982 das Mischungsverhältnis zeitweise auf Null oder nahe Null ab, ohne dass ein augenscheinlicher Grund erkennbar war. Erst 1986 erschienen Berichte, dass hier ein Abbau durch Brom vorlag, das aus Eisblumen freigesetzt wird. Von August bis Oktober wurden auch in den Folgejahren Episoden festgestellt, in denen Ozon vollständig durch Reaktion mit Brom abgebaut wurde. Diese Situationen traten von Jahr zu Jahr unterschiedlich häufig auf und können in manchen Jahren fehlen. Sie treten unregelmäßig auf, wobei der Abbau nicht unbedingt in Stationsnähe stattfindet, sondern auch ozonverarmte Luftpakete von anderswoher herantransportiert werden.

Wie über dem Südatlantik, nahm das Mischungsverhältnis von 1982 bis etwa 1990 zu um danach konstant zu bleiben. Die monatliche Variation ist im Winter gering, im Sommer höher. Die Tagesgänge sind ebenfalls gering und können in den Monaten, in denen ein vollständiger Ozonabbau durch Brom stattfindet, unruhiger verlaufen.

Das oberflächennahe Ozon vermittelt wegen seiner über dem Ozean vergleichsweise langen Lebensdauer Einblick in atmosphärische Mischungs- und Austauschvorgänge. Neben dem Austausch und großräumigen Transport von Ozon finden photochemische Umsetzungen mit Ozonabbau und Ozonbildung statt. Im Einzelfall ist es nur durch aufwändige Analysen oder zusätzliche Modellrechnungen möglich, zu unterscheiden, ob Ozon aus natürlichen Vorgängen stammte oder durch menschlichen Aktivitäten, wie etwa der Biomassenverbrennung in den Tropen, beeinflusst wurde. Durch eine umfangreichere meteorologische Analyse, die im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden konnte, können weitere Details aufgeklärt werden, um Transportvorgänge und photochemische Umsetzungen besser zu unterscheiden.

12. ANHANG: ERGEBNISSE DER EINZELREISEN 1977 – 1996

Ozon wurde auf zehn verschiedenen Schiffen gemessen. In der Liste in Tabelle 12.1 sind insgesamt 77 Reisen in zeitlicher Reihenfolge aufgeführt, auf denen auf einem Teil oder auf den ganzen Reise das oberflächennahe Ozon gemessen werden konnte.

Tab. 12.1: Reisen von 10 Forschungsschiffen und Versorgern, auf denen Ozon gemessen wurde.

| Nr. | Beginn and Ende | Schiff | Reise Nr. | Reisegebiet |
|------------|--------------------------|-----------------------|------------------|--|
| 1 | 04.01. – 10.03.1977 | <i>Meteor I</i> | 44 | HH – Atlantik westl. Schottland |
| 2 | 05.07. – 11.09.1978 | <i>Meteor I</i> | 49 | HH – Atlantik westl. Schottland |
| 3 | 08.10.1977 – 07.02.1978 | <i>Walther Herwig</i> | 30 A, B | Bhv – Buenos Aires – Antarktische Halbinsel |
| 4 | 26.11. – 05.12.1978 | <i>Walther Herwig</i> | 31 | Rio de Janeiro – Bhv |
| 5 | 10.01. – 24.02.1979 | <i>Meteor I</i> | 51 | HH – Westafrika |
| 6 | 07.08. – 20.20.1979 | <i>Meteor I</i> | 52 | HH – Spitzbergen |
| 7 | 16.01. – 09.04.1980 | <i>Meteor I</i> | 53 | HH – Westafrika |
| 8 | 26.06. – 03.10.1980 | <i>Ymer</i> | Ymer 80 | Stockholm – Spitzbergen – Nordmeer |
| 9 | 20.10. – 19.11.1980 | <i>Anton Dohrn</i> | 104 | Bhv – Neufundland, St. Jones – W.-Grönland |
| 10 | 08.10.1980 – 30.04.1981 | <i>Meteor I</i> | 56 | HH – Rio – Antarktische Halbinsel |
| 11 | 28.12.1980 – 13.04.1981 | <i>Walther Herwig</i> | 44 | Bhv – Rio de Janeiro – Antarktische Halbinsel |
| 12 | 09.07. – 02.08.1981 | <i>Anton Dohrn</i> | 110 | Bhv–Spitzbergen |
| 13 | 14.07. – 03.09.1981 | <i>Meteor I</i> | 57 | HH – N-Atlantik – Azoren |
| 14 | 26.11.1981 – 21.01.1982 | <i>Polar Queen</i> | | HH – Atka-Bucht |
| 15 | 01.01. – 20.04.1982 | <i>Meteor I</i> | 60 | HH – Westafrika – Azoren |
| 16 | 19.05. – 06.07.1982 | <i>Meteor I</i> | 61 | HH – Spitzbergen |
| 17 | 09.07. – 09.08.1982 | <i>Anton Dohrn</i> | 119 | Bhv – Tromsø – Bäreninsel |
| 18 | 28.12. 1982 – 22.04.1983 | <i>Polarstern</i> | ANT-I | Bhv – Recife – Atka-Bucht – Kapstadt |
| 19 | 21.12.1982 – 12.03.1983 | <i>Polarbjörn</i> | | HH – Rio de Janeiro – Atka-Bucht – Kapstadt – HH |
| 20 | 27.06. – 19.07.1983 | <i>Polarstern</i> | ARK-I | Bhv – Spitzbergen – Grönlandsee |
| 21 | 11.01. – 24.03.1984 | <i>Meteor I</i> | 67 | HH – Westafrika |
| 22 | 28.09.1983 – 04.04.1984 | <i>Polarstern</i> | ANT-II | Bhv – Recife – Atka-Bucht – Kapstadt |
| 23 | 10.05. – 19.09.1984 | <i>Polarstern</i> | ARK-II | Bhv – Neufundland – westl. Spitzbergen |
| 24 | 09.10. – 24.11.1984 | <i>Walther Herwig</i> | 67 | W-Grönland – Neufundland – O-Grönland – Island |
| 25 | 20.10.1984 – 03.03.1985 | <i>Polarstern</i> | ANT-III | Bremerhaven – Rio de Janeiro – Ushuaia |
| 26 | 04.05. – 30.05.1985 | <i>Polarstern</i> | ARK-III | Bremerhaven – Spitzbergen – Kiel |
| 27 | 29.11.1984 – 10.05.1985 | <i>Walther Herwig</i> | 68 | Bhv – Rio de Janeiro – Antarktische Halbinsel |

Oberflächennahes Ozon über dem Atlantik und an der Georg-von-Neumayer-Station 1977 – 1996

| Nr. | Beginn and Ende | Schiff | Reise Nr. | Reisegebiet |
|------------|-------------------------|-------------------------|------------------|---|
| 28 | 13.06. – 22.08.1985 | <i>Meteor I</i> | 71 | HH – Spitzbergen |
| 29 | 09.09. – 29.10.1985 | <i>Meteor I</i> | 72 | HH – Atlantik / westeurop. Becken |
| 30 | 03.01. – 28.03.1986 | <i>S.A. Agulhas</i> | | Kapstadt – SANAÉ – Atka-Bucht |
| 31 | 19.06. – 15.07.1986 | <i>Meteor II</i> | 2 | HH – norwegische Küste |
| 32 | 05.09.1985 – 12.03.1986 | <i>Polarstern</i> | ANT-IV | Bhv – Rio – Weddellmeer – Kapstadt |
| 33 | 19.06. – 15.07.1986 | <i>Meteor II</i> | 4 | HH – norwegische Küste |
| 34 | 03.10. – 06.12.1986 | <i>Meteor II</i> | 5 | HH – Westafrika – Dakar |
| 35 | 09.04. – 19.05.1987 | <i>Walther Herwig</i> | 82 | Bhv – Nord-östl. Zentralatlantik |
| 36 | 23.08.1987 – 27.10.1987 | <i>Academic Fedorov</i> | | HH – Rio de Janeiro – Weddellmeer |
| 37 | 01.09. – 19.11.1987 | <i>Walther Herwig</i> | 85 | Bhv – W-Grönland – O-Grönland – Island |
| 38 | 05.06.1986 – 07.04.1987 | <i>Polarstern</i> | ANT-V | Weddellmeer – Kapstadt |
| 39 | 14.05. – 02.09.1987 | <i>Polarstern</i> | ARK-IV | Nordmeer – Spitzbergen |
| 40 | 21.10.1987 – 09.04.1988 | <i>Polarstern</i> | ANT-VI | Bhv – Rio Grande – Weddellmeer – Kapstadt |
| 41 | 18.03. – 17.05.1988 | <i>Walther Herwig</i> | 89 | Bhv – Schottland – Azoren |
| 42 | 26.08. – 22.11.1988 | <i>Walther Herwig</i> | 92 | Bhv – W-Grönland – O-Grönland |
| 43 | 01.11.1987 – 06.05.1988 | <i>Meteor II</i> | 6 | HH – Westafrika – Abidjan |
| 44 | 01.06. – 28.09.1988 | <i>Meteor II</i> | 7 | HH – Nordmeer |
| 45 | 27.10. – 17.12.1988 | <i>Meteor II</i> | 8 | HH – Nordmeer |
| 46 | 28.02. – 21.03.1989 | <i>Walther Herwig</i> | 96 | Bhv – Westhebridische Gewässer |
| 47 | 30.04. – 09.05.1989 | <i>Walther Herwig</i> | 97 | Biskaya – westirischer Atlantik |
| 48 | 21.07. – 25.08.1989 | <i>Walther Herwig</i> | 100 | Bhv – Westafrika – westl. Schottland |
| 49 | 05.09. – 02.10.1989 | <i>Walther Herwig</i> | 101 | Labradorsee – Westgrönland |
| 50 | 29.12.1988 – 17.03.1989 | <i>Meteor II</i> | 9 | HH – Azoren – Dakar – Teneriffa – Kapverden |
| 51 | 19.03. – 31.08.1989 | <i>Meteor II</i> | 10 | HH – Island – Kanaren |
| 52 | 24.10.1989 – 20.01.1990 | <i>Meteor II</i> | 11 | HH – NO-Atlantik – Antarktische Halbinsel |
| 53 | 13.03. – 30.06.1990 | <i>Meteor II</i> | 12 | Kapstadt – HH |
| 54 | 08.06. – 03.10.1990 | <i>Polarstern</i> | ARK-VII | Bhv – Nordmeer Ostgrönland |
| 55 | 07.07. – 24.08.1990 | <i>Meteor II</i> | 13 | HH – Norwegische See – Spitzbergen |
| 56 | 27.03. – 08.07.1991 | <i>Meteor II</i> | 16 | Walfischbucht – Recife – HH |
| 57 | 20.10.1990 – 13.05.1991 | <i>Polarstern</i> | ANT-IX | Bhv – Ushuaia – Atka-Bucht – Kapstadt |
| 58 | 01.06. – 08.10.1991 | <i>Polarstern</i> | ARK-VIII | Bhv – Spitzbergen – Barentssee – Franz-Josef-Land |
| 59 | 15.07. – 28.08.1991 | <i>Meteor II</i> | 17 | HH – Nordmeer |
| 60 | 02.09. – 25.09.1991 | <i>Meteor II</i> | 18 | Island – Kap Farwell – HH |

| Nr. | Beginn and Ende | Schiff | Reise Nr. | Reisegebiet |
|-----|-------------------------|-------------------|-----------|--|
| 61 | 18.11. – 31.12.1991 | <i>Meteor II</i> | 22 | HH – Westafrika – Recife – Rio de Janeiro |
| 62 | 29.09.1991 – 22.02.1993 | <i>Polarstern</i> | ANT-X | Weddellmeer – Kapstadt – Ushuaia – Bhv |
| 63 | 04.02. – 12.04.1993 | <i>Meteor II</i> | 23 | Kapstadt – Rio de Janeiro – Recife – Kanaren |
| 64 | 23.06. – 05.10.1993 | <i>Polarstern</i> | ARK-IX | Bhv – Spitzb. – Jan Mayen – Framstraße – Laptewsee |
| 65 | 28.12.1993 – 26.03.1994 | <i>Meteor II</i> | 27 | HH – Azoren – Recife |
| 66 | 18.10.1993 – 17.06.1994 | <i>Polarstern</i> | ANT-XI | Bhv – Kapstadt – Punta Arenas – Antarktis – Kapstadt |
| 67 | 06.06. – 06.10.1994 | <i>Polarstern</i> | ARK-X | Bhv – Ostgrönland – Framstraße – Tromsø |
| 68 | 18.10.1994 – 11.06.1995 | <i>Polarstern</i> | ANT-XII | Bhv – Punta Arenas – Halley – Kapstadt – Recife |
| 69 | 30.12.1994 – 22.03.1995 | <i>Meteor II</i> | 31 | HH – Mittelmeer – Rotes Meer |
| 70 | 23.03. – 19.09.1995 | <i>Meteor II</i> | 32 | Arabische See – Muscat |
| 71 | 07.07. – 29.10.1995 | <i>Polarstern</i> | ARK-XI | Bhv – Murmansk – Laptewsee – Tromsø – Framstr. |
| 72 | 22.09. – 29.12.1995 | <i>Meteor II</i> | 33 | Muscat – Arabische See – Kapstadt |
| 73 | 29.10.1995 – 20.10.1996 | <i>Polarstern</i> | ANT-XIII | Bhv – Kapstadt – Atka-Bucht – Punta Arenas |
| 74 | 03.01. – 15.04.1996 | <i>Meteor II</i> | 34 | Kapstadt – Recife |
| 75 | 18.04. – 18.05.1996 | <i>Meteor II</i> | 35 | Trop. Atlantik – Puerto Rico – Bermudas |
| 76 | 06.06. – 17.08.1996 | <i>Meteor II</i> | 36 | Bermudas–Bergen–Nordmeer–Reykjavik |
| 77 | 12.07. – 23.09.1996 | <i>Polarstern</i> | ARK-XII | Bhv – Murmansk – Lomonosow Rücken |

Die Auswertung der Ozonmischungsverhältnisse wurde nach WOZ vorgenommen.

Die Leistung der Luftpumpen und die zuverlässige Prüfung der Sprudler wurde vor und nach jeder Reise geprüft.

Ebenso wurde der Schreiber durch eine Testspannung vor und nach der Reise überprüft.

Nachfolgend werden in den Abbildungen 12.1 bis 12.73 die einzelnen Fahrten mit der Fahrtroute und dem zeitlichen Ozonverlauf dargestellt. Zusätzlich sind Nord-Süd-Schnitte angegeben, wobei meist für Breitenbereiche von meistens 5° Mittelwerte und Standardabweichung der Ozonmischungsverhältnisse berechnet wurden. Die Reisen sind nicht chronologisch, wie in Tabelle 12.1, sondern nach Schiffsnamen geordnet (Tabelle 12.2).

Die nachfolgenden Darstellungen der Ergebnisse der Einzelreisen sind nach Schiffen geordnet. Für manche Reisen stand die geographische Breite nicht kontinuierlich, sondern nur in 5° Abschnitten zur Verfügung.

Soweit aus der Literatur bekannt wurde, sind Publikationen über luftchemische Messergebnisse anderer Institute erwähnt, die auf einer der Schiffsreisen vorgenommen wurden.

Tabelle 12.2: Übersicht über die Ergebnisse, geordnet nach Schiffen, Reise-Nr. und Abbildung

| Schiffsreise Nr. | Abb. | Schiffsreise Nr. | Abb. | Schiffsreise Nr. | Abb. |
|-------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| <i>S.A. Agulhas</i> | 12.1 | <i>Meteor II 12</i> | 12.26 | <i>Polarstern ANT-X</i> | 12.51 |
| <i>Akademik Fedorov</i> | 12.2 | <i>Meteor II 13</i> | 12.27 | <i>Polarstern ARK-IX</i> | 12.52 |
| <i>Anton Dohrn 104</i> | 12.3 | <i>Meteor II 16</i> | 12.28 | <i>Polarstern ANT-XI</i> | 12.53 |
| <i>Anton Dohrn 110</i> | 12.4 | <i>Meteor II 17, 18</i> | 12.29 | <i>Polarstern ARK-X</i> | 12.54 |
| <i>Anton Dohrn 119</i> | 12.5 | <i>Meteor II 22</i> | 12.30 | <i>Polarstern ANT-XII</i> | 12.55 |
| <i>Meteor I 44</i> | 12.6 | <i>Meteor II 23</i> | 12.31 | <i>Polarstern ARK-XI</i> | 12.56 |
| <i>Meteor I 49</i> | 12.7 | <i>Meteor II 27</i> | 12.32 | <i>Polarstern ANT-XIII</i> | 12.57 |
| <i>Meteor I 51</i> | 12.8 | <i>Meteor II 34</i> | 12.33 | <i>Polarstern ARK-XII</i> | 12.58 |
| <i>Meteor I 52</i> | 12.9 | <i>Meteor II 35</i> | 12.34 | <i>Walther Herwig 30</i> | 12.59 |
| <i>Meteor I 53</i> | 12.10 | <i>Meteor II 36</i> | 12.35 | <i>Walther Herwig 31</i> | 12.60 |
| <i>Meteor I 56</i> | 12.11 | <i>Polarbjörn</i> | 12.36 | <i>Walther Herwig 44</i> | 12.61 |
| <i>Meteor I 57</i> | 12.12 | <i>Polar Queen</i> | 12.37 | <i>Walther Herwig 67</i> | 12.62 |
| <i>Meteor I 60</i> | 12.13 | <i>Polarstern ANT-I</i> | 12.38 | <i>Walther Herwig 68</i> | 12.63 |
| <i>Meteor I 61</i> | 12.14 | <i>Polarstern ARK-I</i> | 12.39 | <i>Walther Herwig 82</i> | 12.64 |
| <i>Meteor I 67</i> | 12.15 | <i>Polarstern ANT-II</i> | 12.40 | <i>Walther Herwig 85</i> | 12.65 |
| <i>Meteor I 71</i> | 12.16 | <i>Polarstern ARK-II</i> | 12.41 | <i>Walther Herwig 89</i> | 12.66 |
| <i>Meteor I 72</i> | 12.17 | <i>Polarstern ANT-III</i> | 12.42 | <i>Walther Herwig 92</i> | 12.67 |
| <i>Meteor II 2</i> | 12.18 | <i>Polarstern ARK-III</i> | 12.43 | <i>Walther Herwig 96, 97</i> | 12.68 |
| <i>Meteor II 4</i> | 12.19 | <i>Polarstern ANT-IV, V</i> | 12.44 | <i>Walth. Herwig 100,101</i> | 12.69 |
| <i>Meteor II 6</i> | 12.20 | <i>Polarstern ANT-V</i> | 12.45 | <i>Ymer-80</i> | 12.70 |
| <i>Meteor II 7</i> | 12.21 | <i>Polarstern ARK-IV</i> | 12.46 | <i>Meteor II 31</i> | 12.71 |
| <i>Meteor II 8</i> | 12.22 | <i>Polarstern ANT-VI</i> | 12.47 | <i>Meteor II 32</i> | 12.72 |
| <i>Meteor II 9</i> | 12.23 | <i>Polarstern ARK-VII</i> | 12.48 | <i>Meteor II 33</i> | 12.73 |
| <i>Meteor II 10</i> | 12.24 | <i>Polarstern ANT-IX</i> | 12.49 | | |
| <i>Meteor II 11</i> | 12.25 | <i>Polarstern ARK-VIII</i> | 12.50 | | |

12.1 S.A. Agulhas

Kapstadt – SANAE – Atka-Bucht – Kapstadt

03. Januar – 28. März 1986

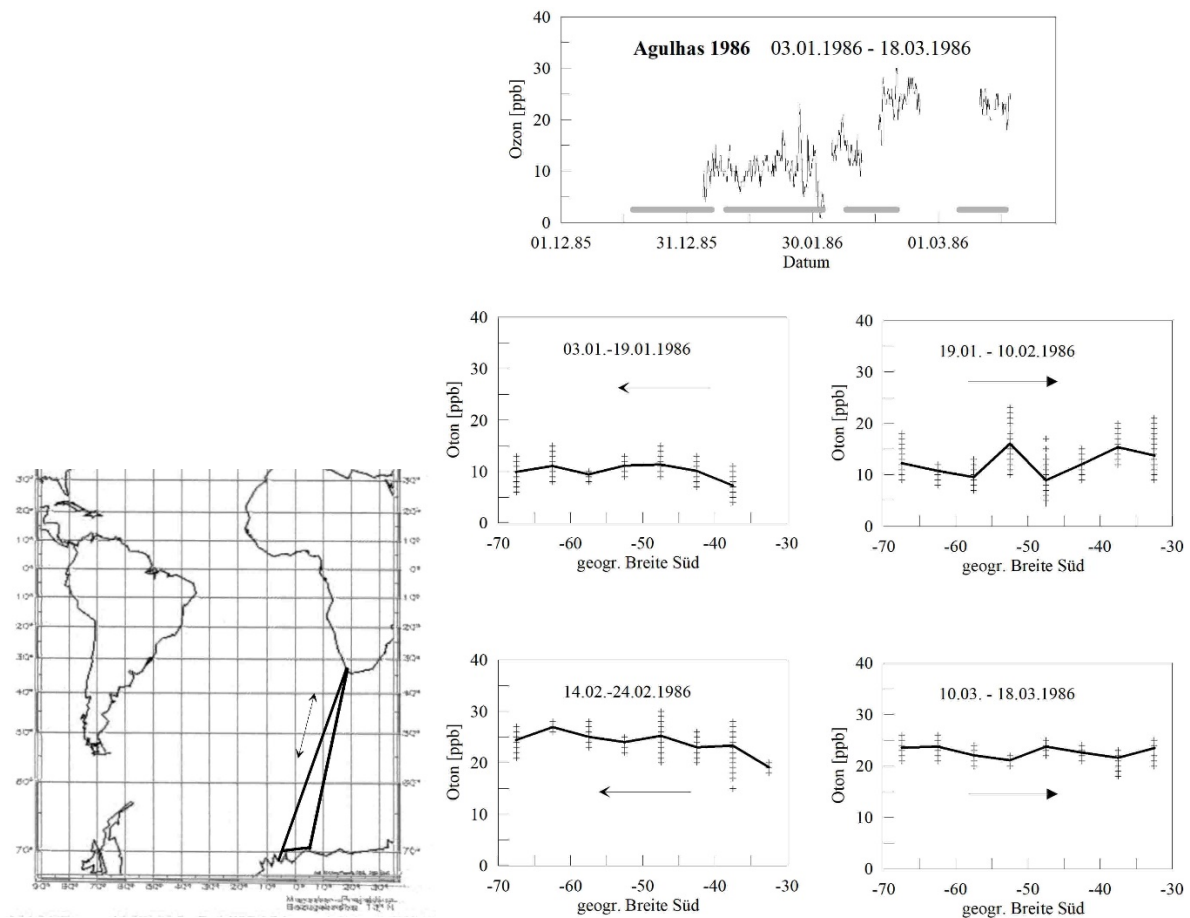


Abb. 12.1: Links: Fahrtverlauf der Versorgungsfahrten von S.A. Agulhas. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Reise des südafrikanischen Forschungsschiffs S.A. Agulhas diente dem Austausch der Mannschaft an der GvN-Station und der Material-Versorgung der Stationen SANAE und GvN; sie bestand aus zwei Fahrtabschnitten zwischen der Kapstadt und der Atka-Bucht. Auf der Fahrt im März war das Ozonmischungsverhältnis deutlich höher als im Januar, wie es nach dem typischen Jahresgang zu erwarten ist. Es traten keine ausgeprägten Nord-Süd-Gradienten auf.

12.2 Akademik Fedorov

Hamburg – Rio de Janeiro – Weddellmeer

23. August 1989 – 27. Oktober 1989

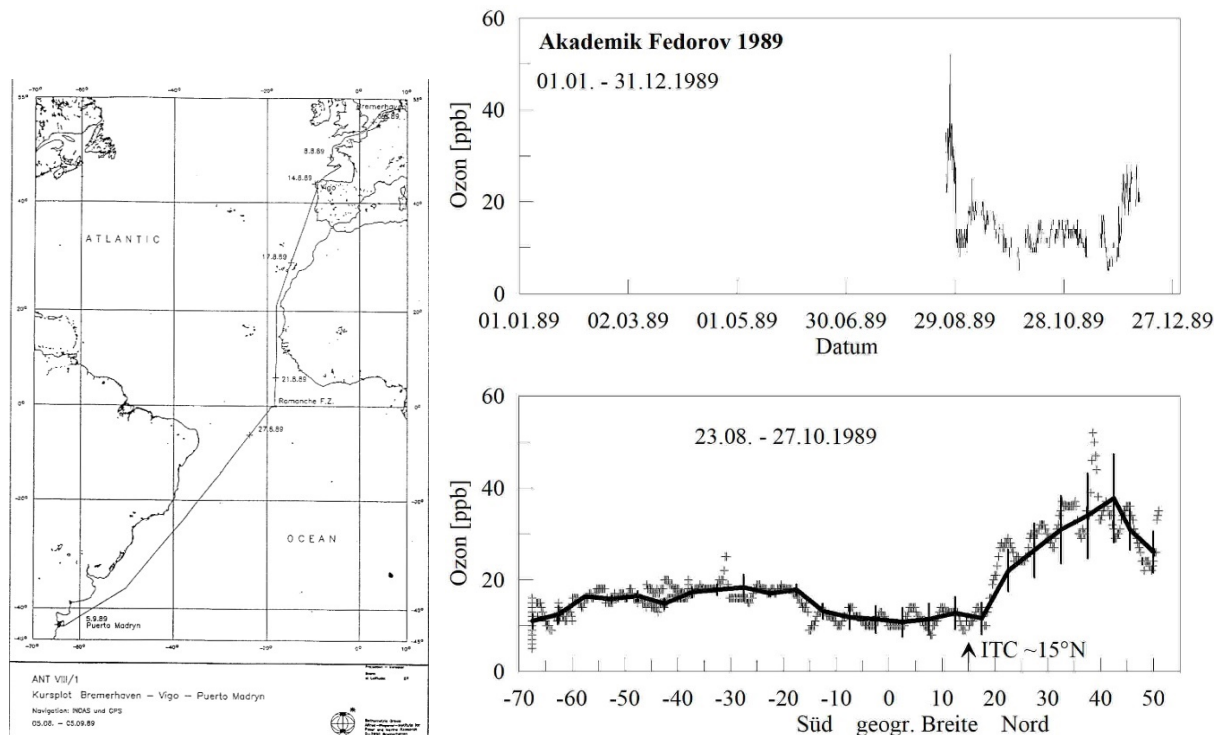


Abb. 12.2: Links: Fahrtverlauf von Akademik Fedorov. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Der russische Eisbrecher *Akademik Fedorov* startete ab Hamburg zur Antarktis zu einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit *Polarstern* (s. *Polarstern* ANT-VIII) (Augstein et al. 1991). Das Ozonmischungsverhältnis weist in der Nordhemisphäre und weiter bis 15° Süd einen deutlichen Tagesgang auf (Abb. 5.1). Das Schiff legte pro Tag etwa 5 Breitengrade zurück. Ab 20° Süd sind Tagesgänge nicht mehr erkennbar.

In der Nordhemisphäre treten im allgemeinen höhere Ozonmischungsverhältnisse auf, die oft bis zur ITCZ reichen, bei diesem Nord-Süd-Schnitt aber nur bis 20°N reichen. *Polarstern*, die vorausfuhr, passierte die ITCZ am 18./19.8.1989 bei 15°N. Diese Position wurde für die Fahrt von *Akademik Fedorov*, die 10 Tage später fuhr, bestätigt (Augstein, E. et al. 1991, S. 40).

Vom 11. bis 22. Dezember 1987 fand die Kampagne TROPOZ I statt, bei der vom Flugzeug aus Ozon aus Biomassenverbrennung nördlich der ITCZ gemessen wurde (Jonquières et al. 1998). In Oberflächennähe gab es keine Anhaltspunkte für photochemisch gebildetes Ozon.

Das Gerät wurde von Dr. G. König-Langlo (AWI) betreut.

12.3 Anton Dohrn Reise Nr. 104

Bremerhaven – Neufundland, St. Jones – West-Grönland

20. Oktober – 19. November 1980

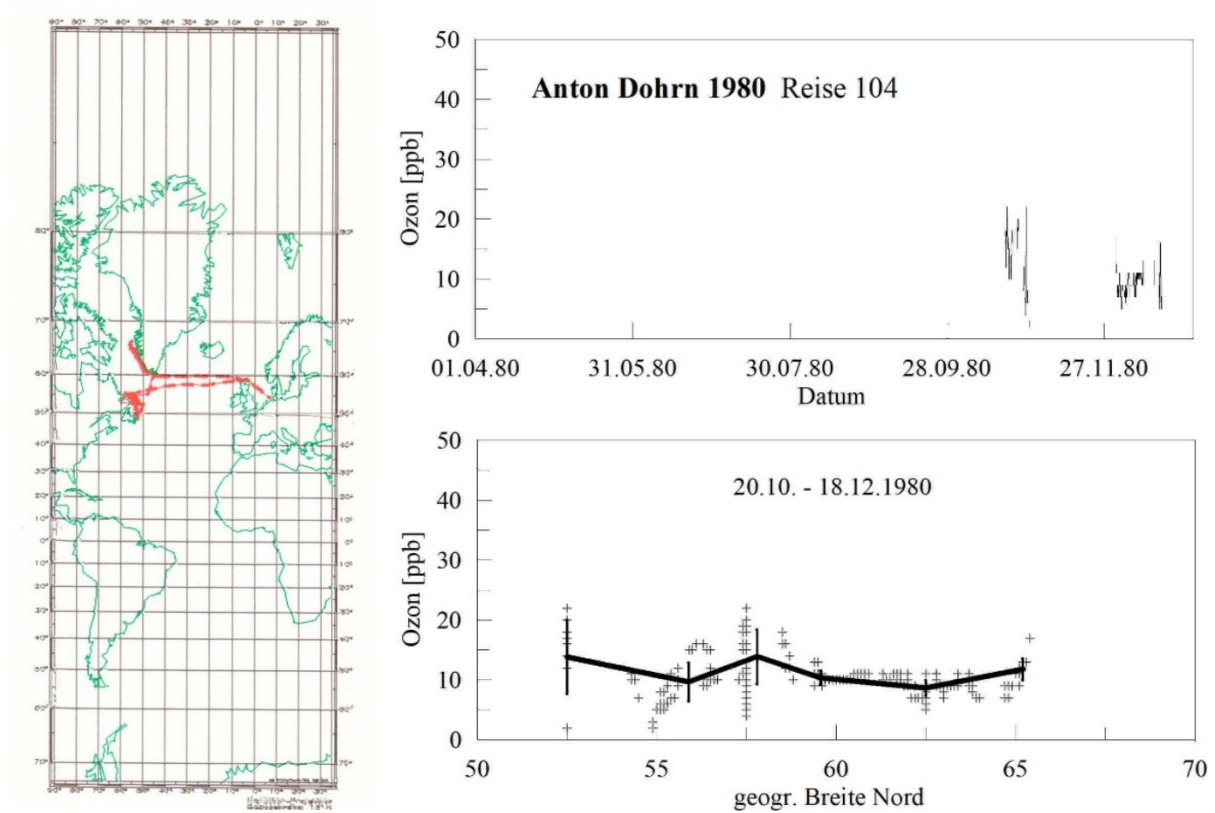


Abb. 12.3: Links: Fahrtverlauf von Anton Dohrn während der 104. Reise. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 3-5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Fahrt des Fischerforschungsschiffs *Anton Dohrn* verlief hauptsächlich in Ost-West-Richtung. Die Veränderungen des Mischungsverhältnisses sind im Wesentlichen durch meteorologische Vorgänge bedingt. Das Gerät arbeitete zuverlässig. Der Betreuer war U. Kaminski (DWD).

12.4 Anton Dohrn Reise Nr. 110

Bremerhaven – Spitzbergen

09. Juli – 02. August 1981

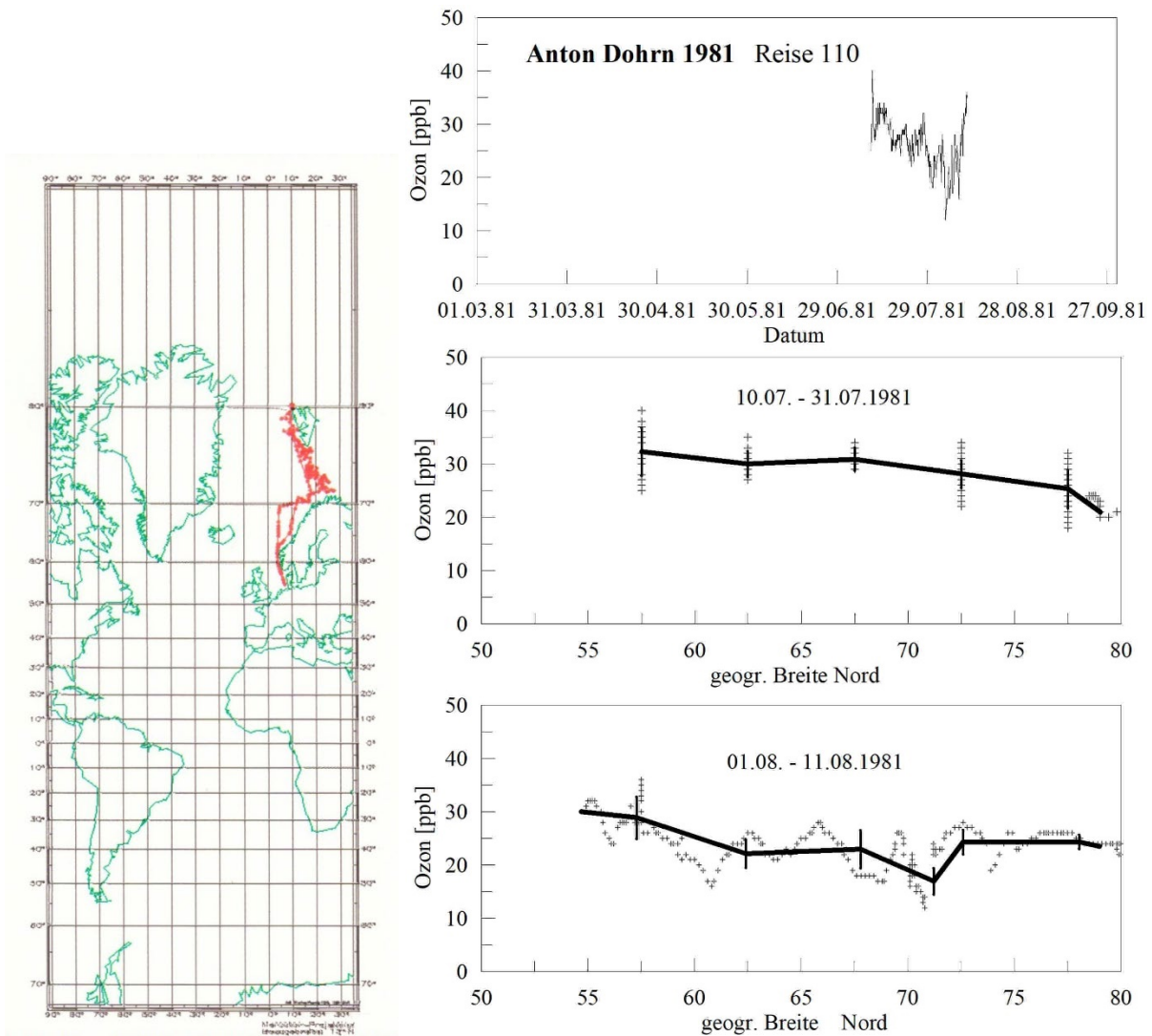


Abb. 12.4: Links: Fahrtverlauf der 110. Reise von Anton Dohrn. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 3-5 Breitengrade.

Anmerkungen

Es zeigt sich im Mittel eine Abnahme des Ozons nach Norden hin ab, sowohl auf der Hin- als auch auf der Rückreise. Die Variationen sind meteorologisch bedingt. Das Gerät arbeitete zuverlässig.

(Zum Zweck der Reise s. Informationen für die Fischwirtschaft, Bde. 28-31; 1981; S. 164)

12.5 Anton Dohrn Reise Nr. 119

Bremerhaven – Tromsø – Barentssee – Bäreninsel

09. Juli – 09. August 1982

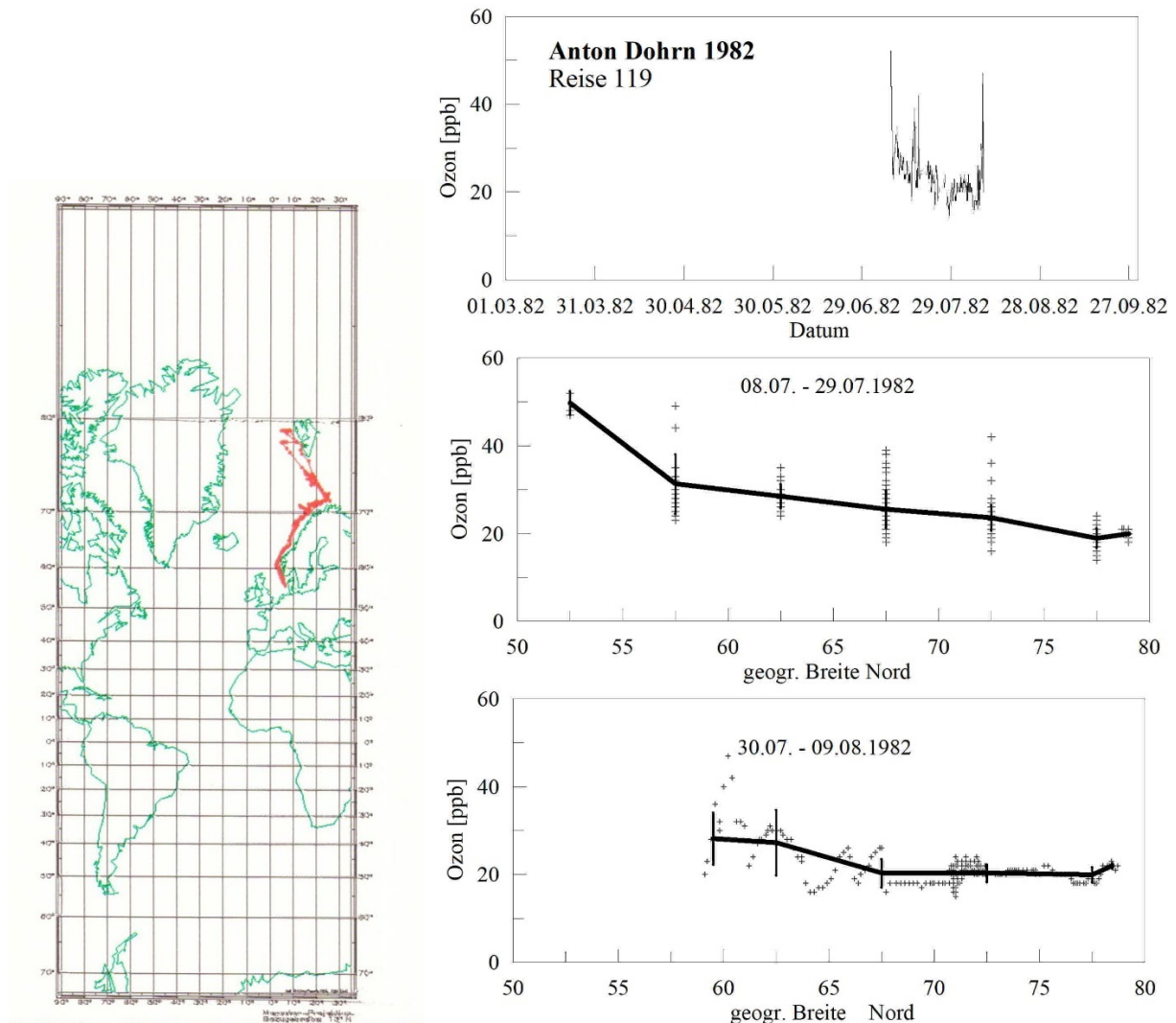


Abb. 12.5: Links: Fahrtverlauf der 119. Reise von Anton Dohrn. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Reise des Fischereiforschungsschiffs diente der Untersuchung von Fischvorkommen.

Am 8.8.1982 zeigte sich eine markante Spitze im Ozonmischungsverhältnis im Zusammenhang mit der Passage einer Okklusion während der Rückreise. Das Ozonmischungsverhältnis nahm sowohl auf der Hin- als auch auf der Rückreise generell nach Norden hin ab. Das Gerät arbeitete zuverlässig.

12.6 Meteor / Reise Nr. 44

Hamburg – Westafrika

04. Januar – 10. März 1977

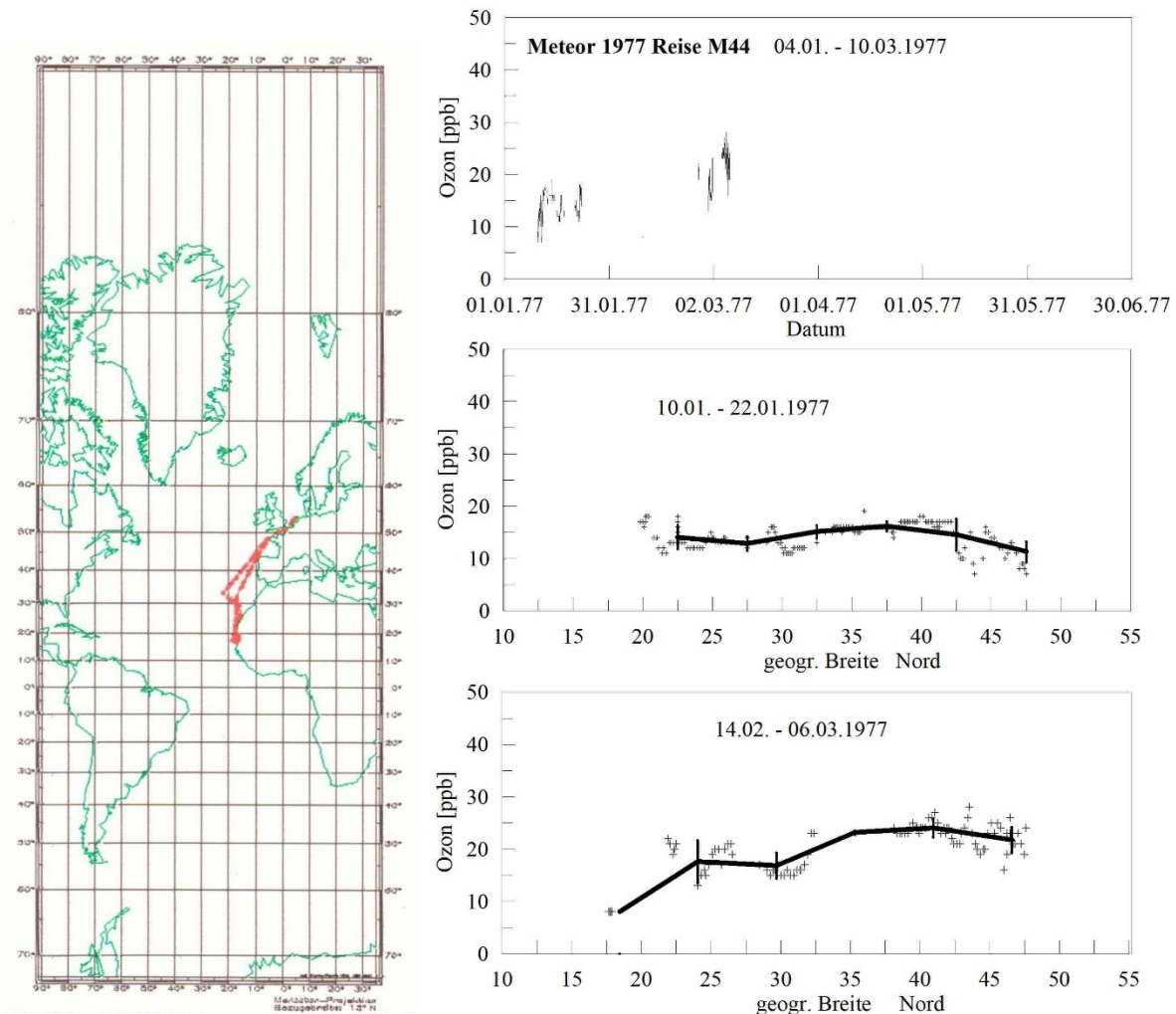


Abb. 12.6: Links: Fahrtroute der 44. Reise von Meteor I.. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Reise diente der Vermessung des Kontinentalschelfs vor Westafrika, d.h. das Schiff fuhr zeitweise nahe an die Küste heran. Aus diesem Grund wurden Ozonmessungen, die näher als 50 km von der Küstenlinie gewonnen wurden, verworfen. Auf der Rückreise erwiesen sich die Ozonmesswerte mit der Einfahrt in den Ärmelkanal wegen achterlichem Wind als gestört und wurden ebenfalls verworfen.

Da das oberflächennahe wie das gesamt troposphärische Ozonmischungsverhältnis einen Jahresgang aufweisen, waren die Messwerte auf der Rückreise höher als im Januar.

12.7 Meteor / Reise Nr. 49

Operationsgebiet war der Atlantik westlich von Schottland

05. Juli – 11. September 1978

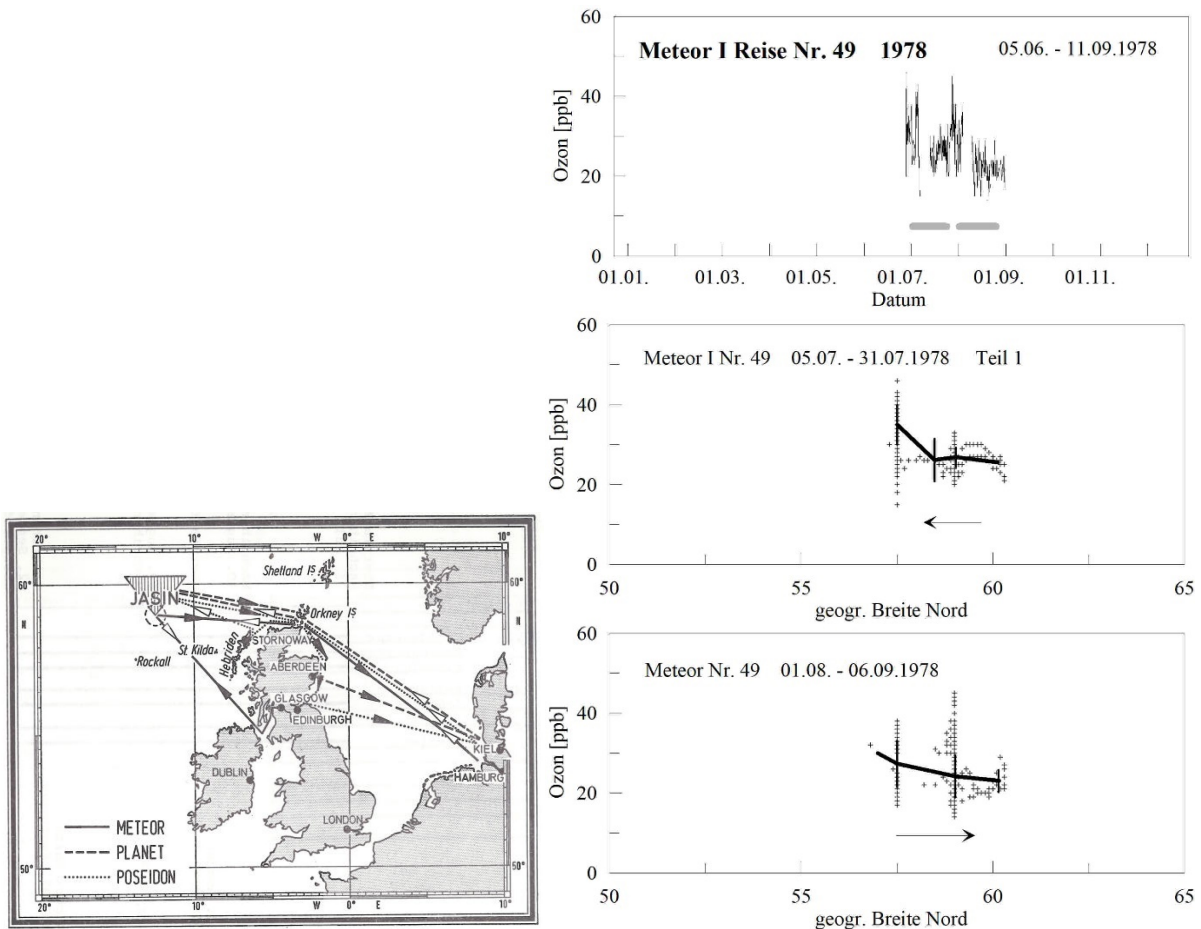


Abb.12.7: Links: Fahrtverlauf der 49. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Reise fand im Rahmen des internationalen Forschungsprojektes JASIN (Joint Air-Sea Interaction Project) statt, das der Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre gewidmet war. Außer Meteor waren die Schiffe mit WFS Planet, FS Poseidon, das Forschungsflugzeug Mystere und 11 ausländischen Schiffe sowie zwei weitere Flugzeuge beteiligt. Als Zwischenhafen wurde Glasgow angelaufen.

Die Universität Mainz führte ein eigenständiges luftchemisches Messprogramm zum Aerosol durch (Davidson and Schütz 1983; Haaf and Jaenicke 1980). Mitarbeiter des Instituts betreuten das Ozongerät. Das Gerät arbeitete stabil.

Das Arbeitsgebiet befand sich nordwestlich von Schottland zwischen 59° N und 60,5° N. Auf der Hin- bzw. Rückreise waren die Messungen erst ab etwa 57° N ungestört. Im Stationsgebiet fielen die meisten Messdaten bei der Position 59° N an. Der geringe Breitenabschnitt erlaubt eine Aussage zur Variabilität des Ozons im jahreszeitlichen Verlauf.

12.8 Meteor / Reise Nr. 51

Hamburg – Westafrika

10. Januar 1979 – 24. Februar 1979

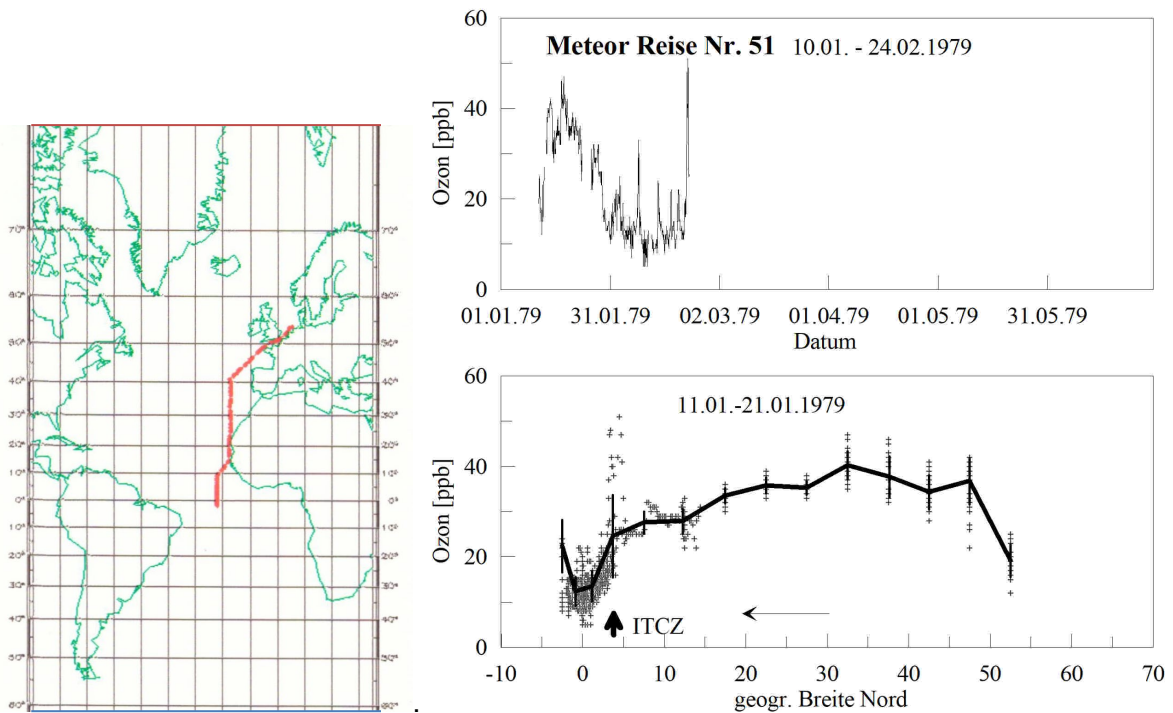


Abb. 12.8: Links: Fahrtverlauf der 51. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Ozon konnte nur während der Fahrtabschnitte 1-3 bis zum 21. Februar 1979 gemessen werden.

Die ITCZ befand sich zu dieser Zeit bei 3-4°N. Meteor durchfuhr die ITCZ mehrfach auf 22°W, um meeresbiologische und meereschemische Daten bis 250 m Tiefe zu sammeln (Bauernfeind et al. 1983). An der ITCZ wurden Cumulonimben beobachtet, wobei zeitweise erhöhte Ozonmischungsverhältnisse zwischen 40 und 50 ppb gemessen wurden. Durch starken Vertikalaustausch dürfte hochtroposphärische ozonreiche Luft in die Grenzschicht gemischt worden sein. Unmittelbar südlich davon sank das Ozonmischungsverhältnis stark ab. Bei hoher Einstrahlung und geringem Vertikalaustausch kann Ozon photolytisch abgebaut worden sein.

Im Ärmelkanal kann die Erniedrigung der Ozonmischungsverhältnisse mit dem dichten Schiffsverkehr zusammenhängen.

Das Arbeitsgebiet von Meteor befand sich im Zentralatlantik. Auf der Marschfahrt dorthin konnte im Zeitraum 11.01. – 30.01.1979 ein Breitenschnitt des Ozonmischungsverhältnisses zwischen 53°N und 1°S gemessen werden. Von der KFA Jülich wurden auf der Reise leichte Kohlenwasserstoffe untersucht (Rudolph and Ehhalt 1981). Im Operationsgebiet fanden im Zeitraum bis zum 22.2.1979 fünf weitere Querungen der innertropischen Konvergenzzone statt, die um diese Jahreszeit bei 3,5°N lag (Speth and Panitz 1983); (Molinari et al. 1983).

Ab März fiel das Messgerät aus, daher liegen von der Rückreise keine Messdaten vor.

12.9 Meteor / Reise Nr. 52

Hamburg – Nordsee – Spitzbergen

07. August 1979 – 20. Oktober 1979

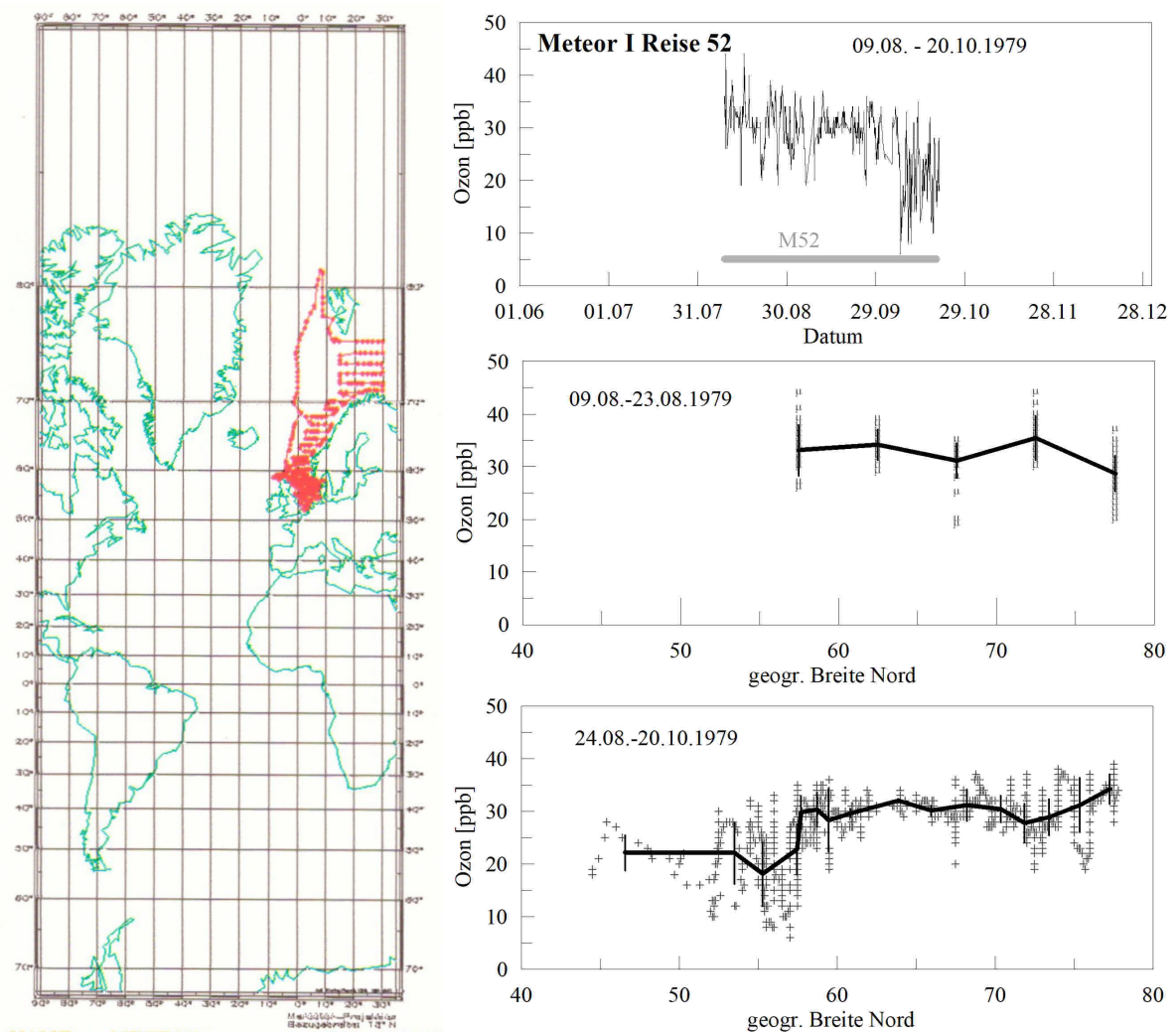


Abb. 12.9: Links: Fahrtverlauf der 52. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

In der südlichen Nordsee schwankte das Ozonmischungsverhältnis deutlich (um etwa 10 ppb) und lag im Mittel niedriger als nördlich von 58°N. Dies könnte auf den Ozonabbau über Land auf den Britischen Inseln und die dortigen Industrieabgase zurückzuführen sein, wovon die Abluffahne über die südliche Nordsee reichte. Im Nordmeer erreichte die Meteor die Eiskante bei 78°N, wo nur auf dem ersten Abschnitt eine Absenkung der Ozonmischungsverhältnisse festzustellen war, nicht jedoch auf dem zweiten Fahrtabschnitt. Die beobachteten Variationen sind meteorologisch bedingt und wurden wahrscheinlich von stratosphärischen Intrusionen verursacht.

Das Gerät lief anfangs stabil, fiel am 22. Februar 1979 aber aus. Auf dieser Reise wurden von der KFA Jülich leichte Kohlenwasserstoffe gemessen (Rudolph and Ehhalt 1981).

12.10 Meteor / Reise Nr. 53

Hamburg – Westafrika

16. Januar – 09. April 1980

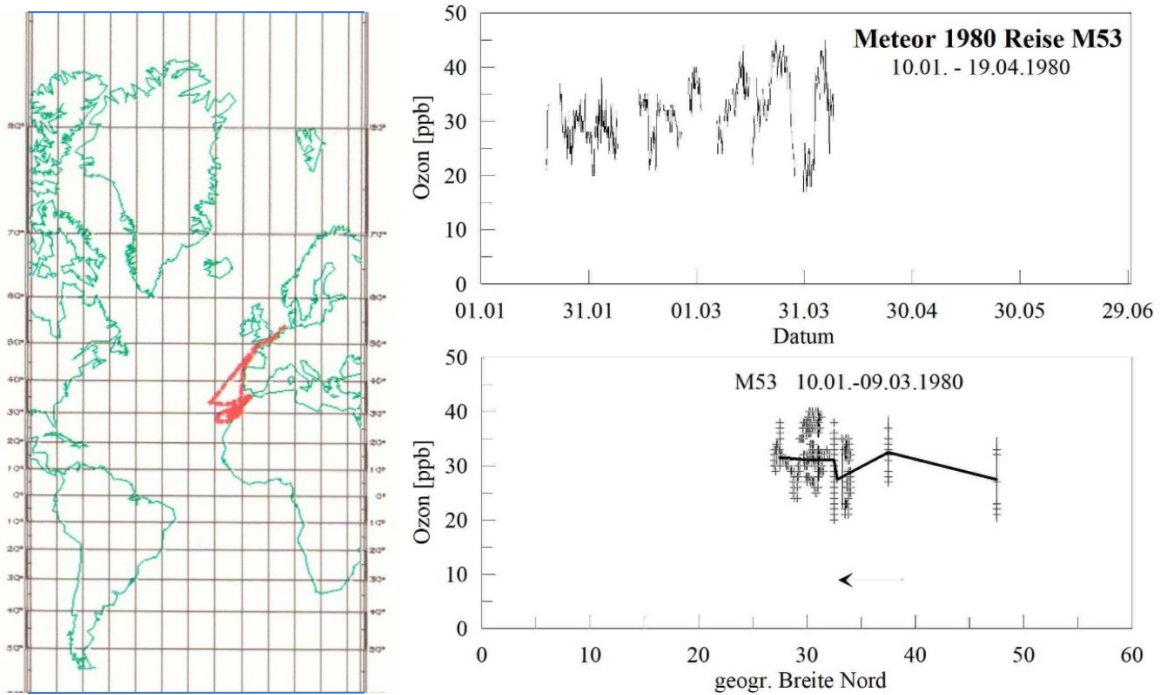


Abb. 12.10: Links: Fahrtverlauf der 53. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis unterlag ausgeprägten Schwankungen, die mit stratosphärischen Intrusionen zusammenhängen können.

12.11 Meteor / Reise Nr. 56

Hamburg – Rio de Janeiro – Antarktische Halbinsel

08. Oktober 1980 – 30. April 1981

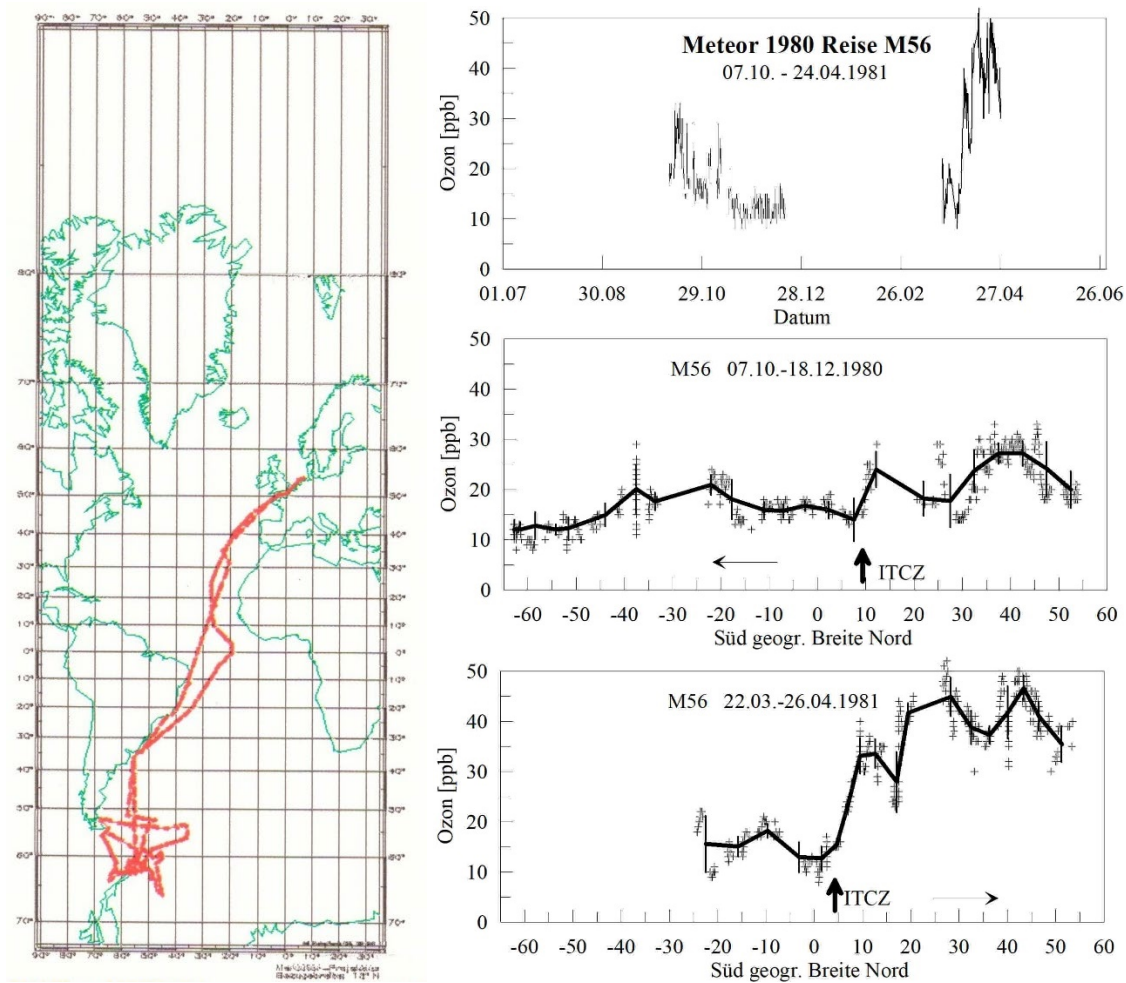


Abb. 12.11: Links: Fahrtverlauf der 56. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zum Reiseprogramm s. Piatkowski and Klages (1983)

Auf der Hinreise zeigt Ozon an der ITCZ eine hohe Variabilität. Es wurden Cumulonimben gesichtet. Die Unterschiede im Mischungsverhältnis zwischen Nord- und Südhemisphäre waren nicht sonderlich ausgeprägt. Nach dem Bericht der Bordwetterwarte lag die ITCZ zwischen 9-11°N (Zeitzschel and Zenk 1981).

Auf der Rückreise wies das Ozonprofil südlich der ITCZ ein Minimum auf und stieg nach der Passage der ITCZ bei 4°N um etwa 20 ppb auf hohe Mischungsverhältnisse in der Nordhemisphäre an. Cumulonimben wurden auf der Rückreise an der ITCZ nicht gesichtet.

Das Gerät lief zuverlässig. Die Parallelmessung mit dem UV-Absorptionsgerät des Max-Planck-Instituts Mainz zeigte übereinstimmende Werte für Ozon (Daten von W. Seiler, pers. Mitteilung). Außerdem wurde gasförmiges Quecksilber und CO gemessen (Slemr et al. 2003).

12.12 Meteor / Reise Nr. 57

Hamburg – Nordatlantik – Azoren

14. Juli – 03. September 1981

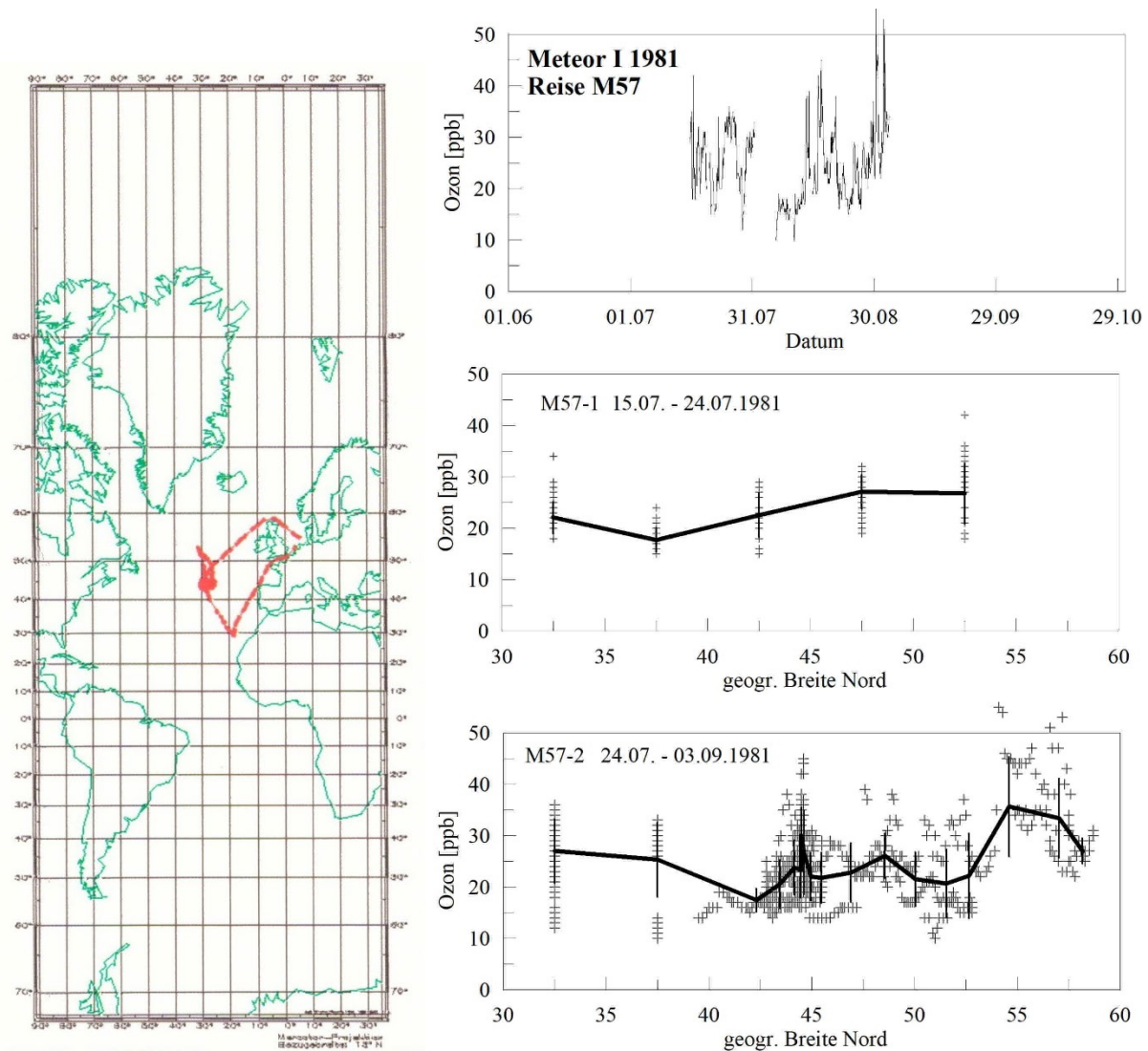


Abb. 12.12: Links: Fahrtverlauf der 57. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis wies auf dem 1. Fahrtabschnitt im Juli insgesamt eine hohe Variabilität auf. In der südlichen Nordsee waren die Ozonmischungsverhältnisse etwas geringer als im nördlichen Teil (vgl. Abb. 12.9).

Zur Gerätefunktion: Auf dem 1. Fahrtabschnitt lief die Pumpe für die Reaktionslösung unzuverlässig, Lösung musste daher per Hand nachgefüllt werden. Die Luftpumpe war am Ende der Reise etwas ausgeschlagen, der Leistungsverlust während des 2. Fahrtabschnitts war auf 7% angewachsen und wurde korrigiert.

12.13 Meteor / Reise Nr. 60

Hamburg – Azoren – Westafrika

01. Januar – 20. April 1982

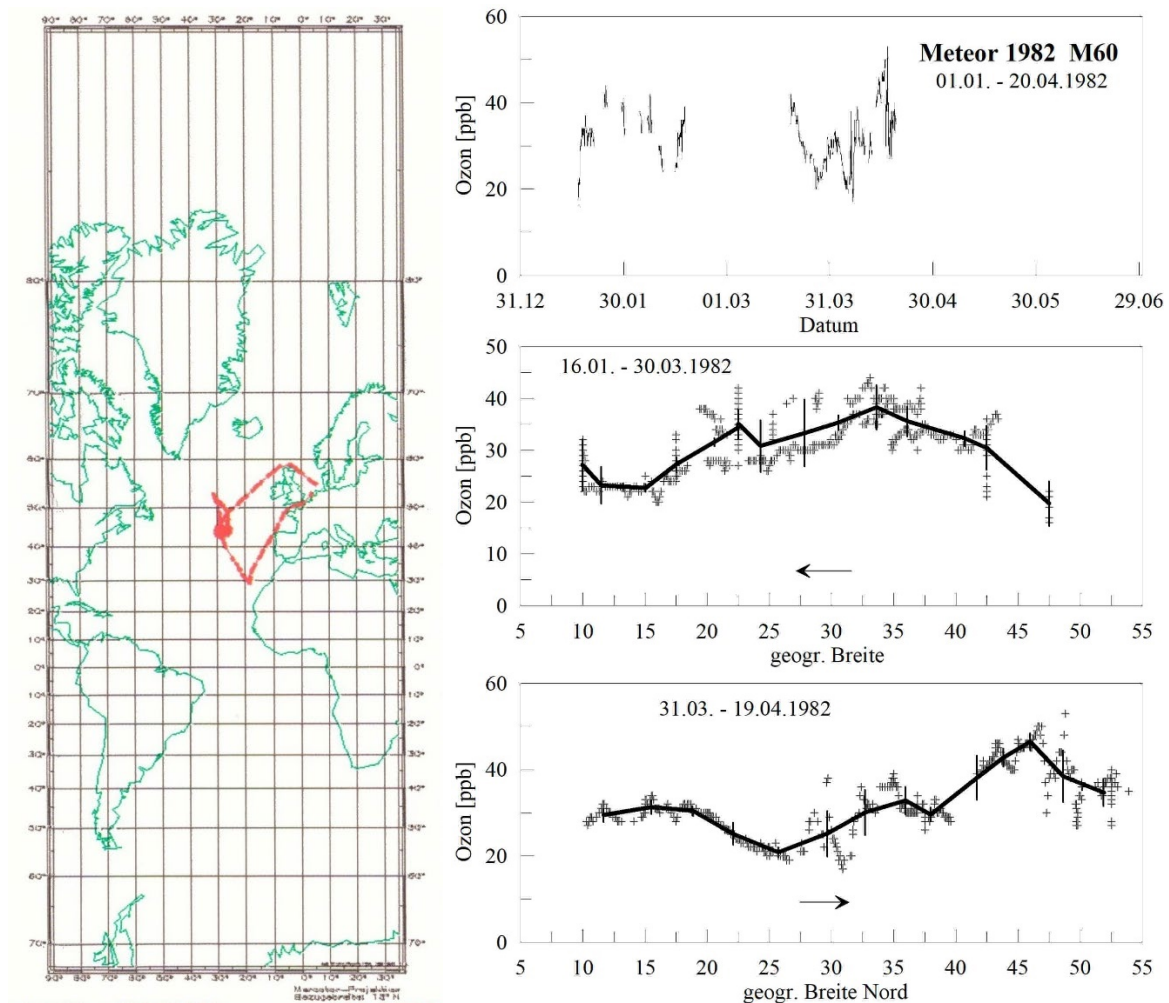


Abb. 12.13: Links: Fahrtverlauf der 60. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Am 5./6. April 1982 trat bei einer Kaltfrontpassage eine markante Ozonspitze auf.

Am 7. April wurde beim Durchgang des postfrontalen Trogos eine weitere Ozonspitze registriert. Verantwortlich war in beiden Fällen der kräftige Vertikalaustausch, mit dem Ozon aus der höheren Troposphäre nach unten gemischt wurde.

Zur Gerätefunktion: Am Schreiber hakte zeitweise der Schlitten mit der Schreibfeder. Durch Ölen konnte das Problem behoben werden.

12.14 Meteor / Reise Nr. 61

Hamburg -Spitzbergen

19. Mai – 06. Juli 1982

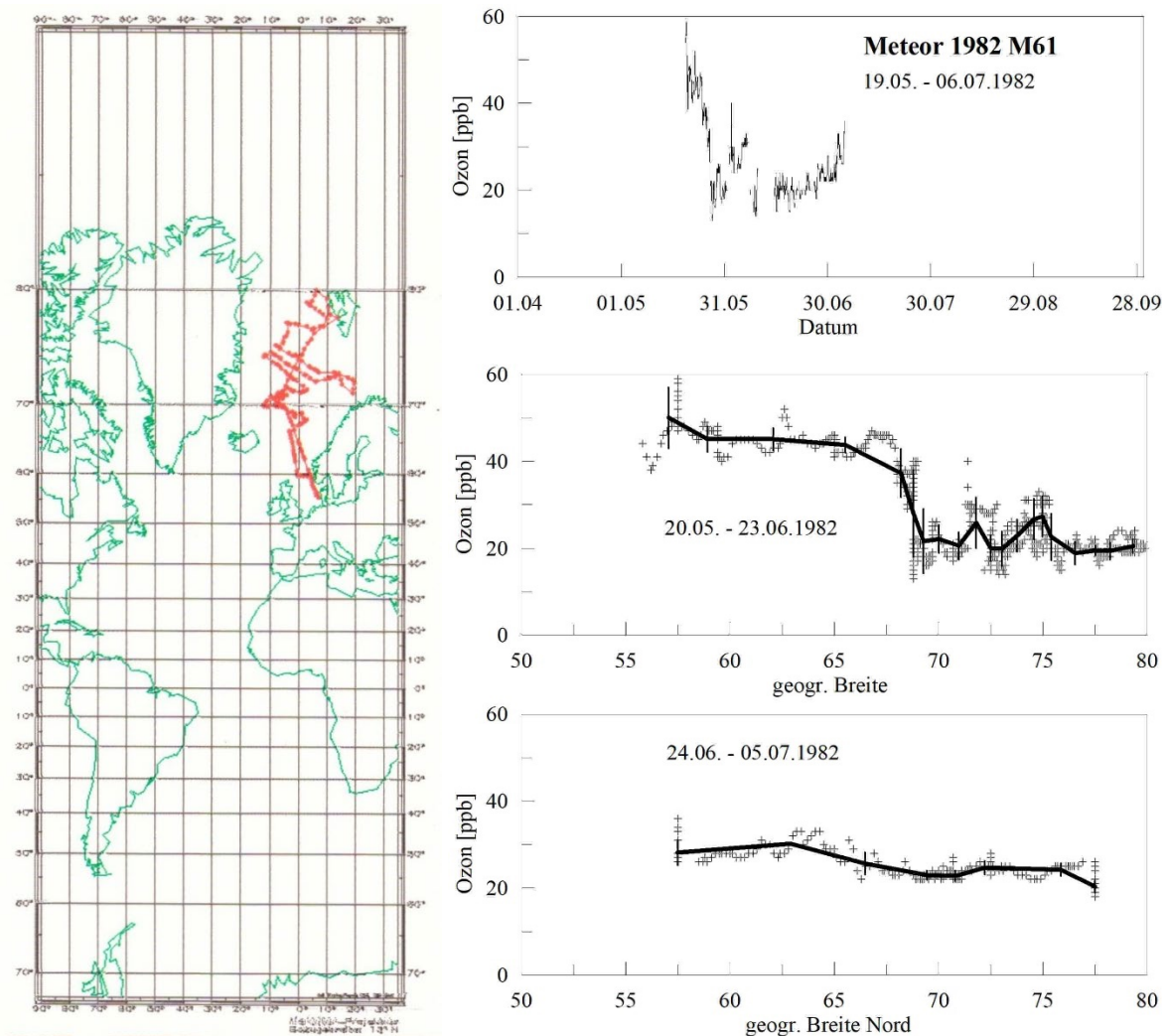


Abb. 12.14: Links: Fahrtverlauf der 61. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auffallend ist die Halbierung der Ozonmischungsverhältnisse nördlich von 67°N bei anfänglich noch großen Schwankungen. Die hohen Mischungsverhältnisse wurden auf einer Trogvorderseite gemessen. Bei der Trog-Passage am 26. Mai 1982 sank das Ozonmischungsverhältnis von 32 auf 21 ppb. Am 1. Juni 1982 wurde eine Ozonspitze bei einem Okklusionsdurchgang beobachtet. Auf der Rückreise trat der auf der Hinreise festgestellte Anstieg im Mischungsverhältnis nicht mehr auf, die Variabilität war auf diesem Fahrtabschnitt insgesamt gering. Das Gerät arbeitete zuverlässig.

12.15 Meteor / Reise Nr. 67

Hamburg – Seegebiet westlich von Marokko

11. Januar – 24. März 1984

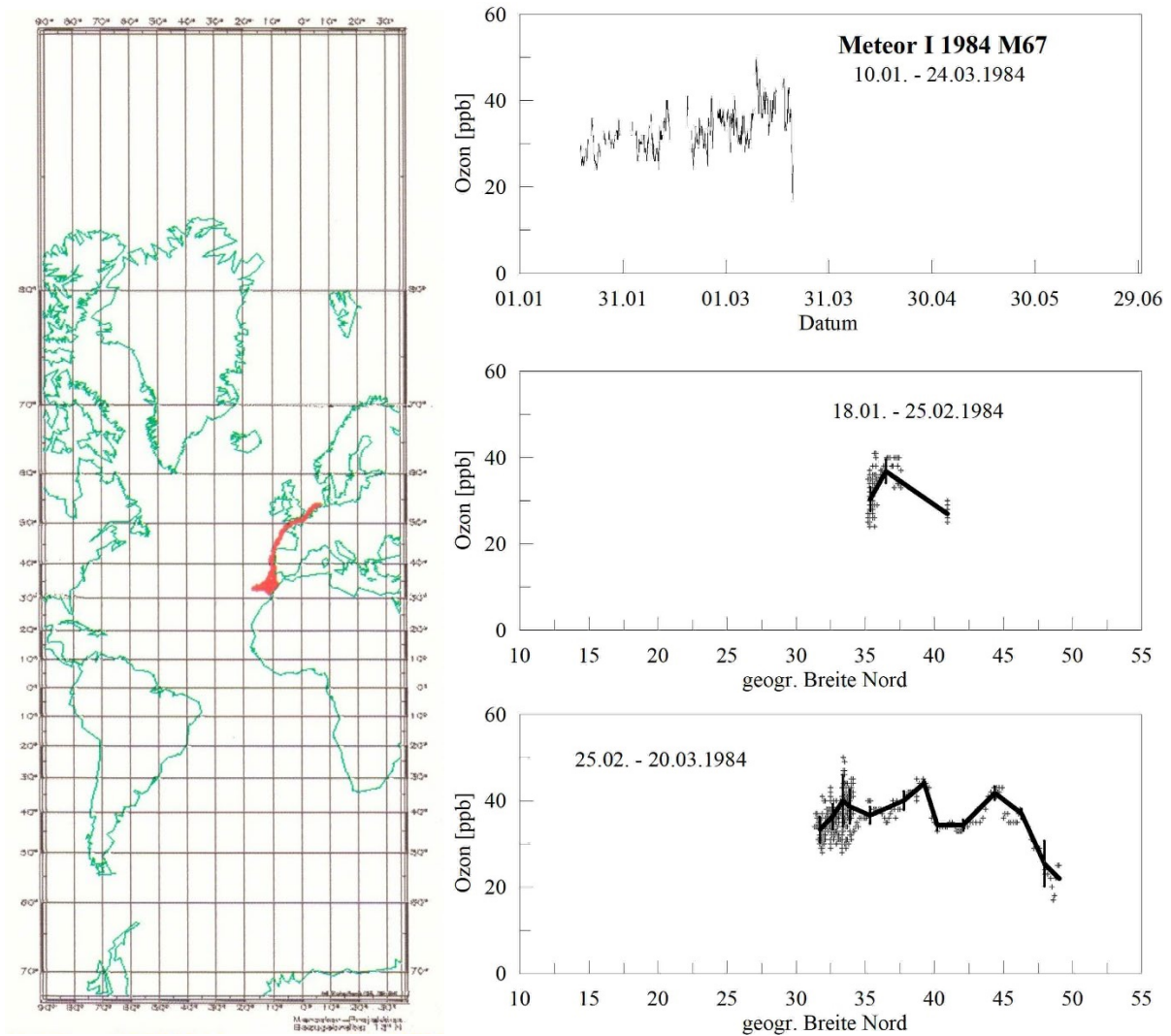


Abb. 12.15: Links: Fahrtverlauf der 67. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis sank am Ende der Reise mit der Einfahrt in den Ärmelkanal infolge einer Gerätestörung deutlich ab. Die Ozonpumpe lief stabil; die Anzeige am Schreiber war um 4% erhöht und wurde korrigiert.

12.16 Meteor / Reise Nr. 71

Hamburg – Norwegische See – Spitzbergen

13. Juni – 22. August 1985

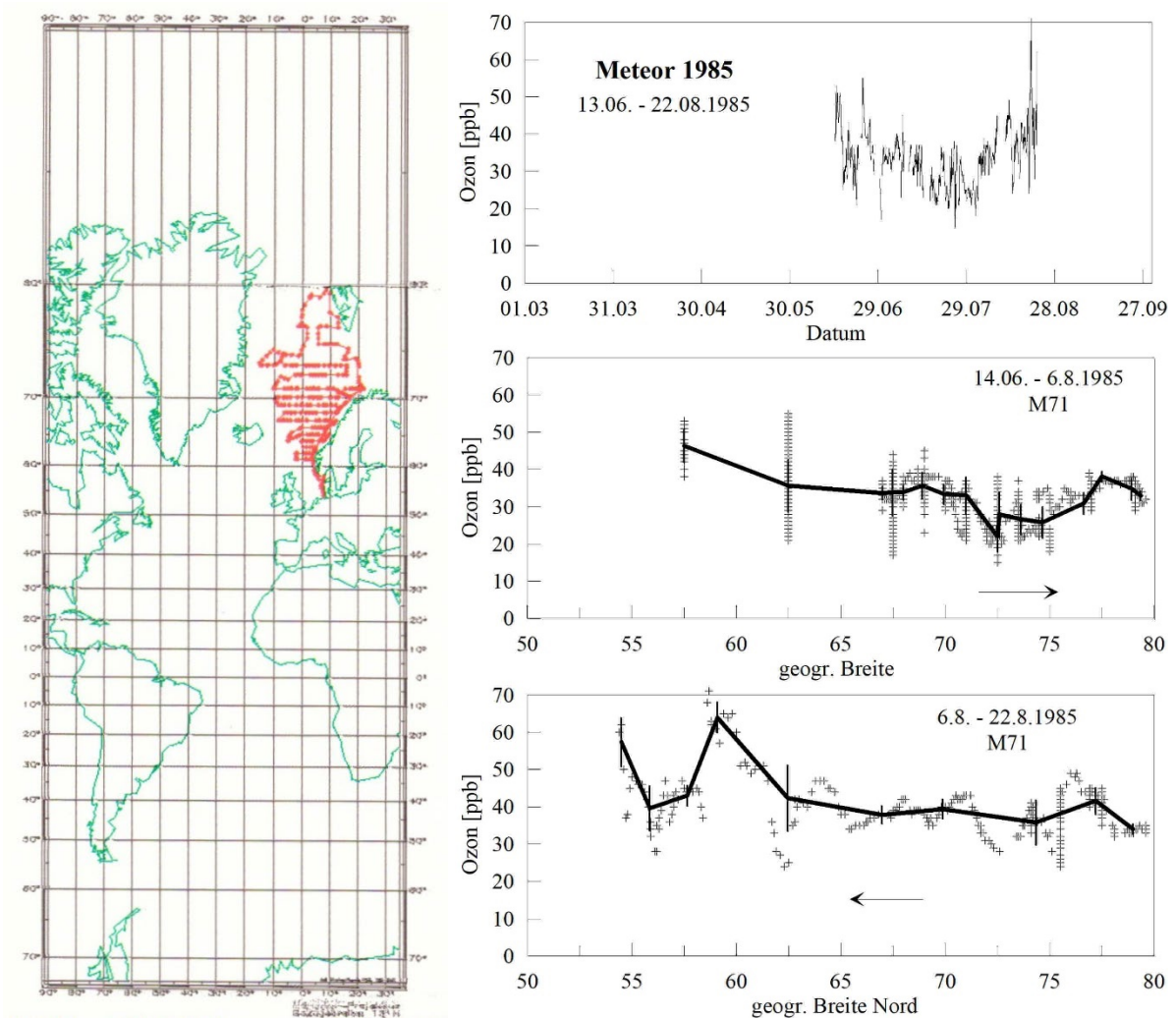


Abb. 12.16: Links: Fahrtverlauf der 71. Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis war auf der gesamten Reise ausgesprochen hoch bei insgesamt hoher Variabilität. Verantwortlich dürfte eine Serie von stratosphärischen Intrusionen gewesen sein.

12.17 Meteor / Reise Nr. 72

Hamburg – Atlantik – westeuropäisches Becken

09. September – 29. Oktober 1985

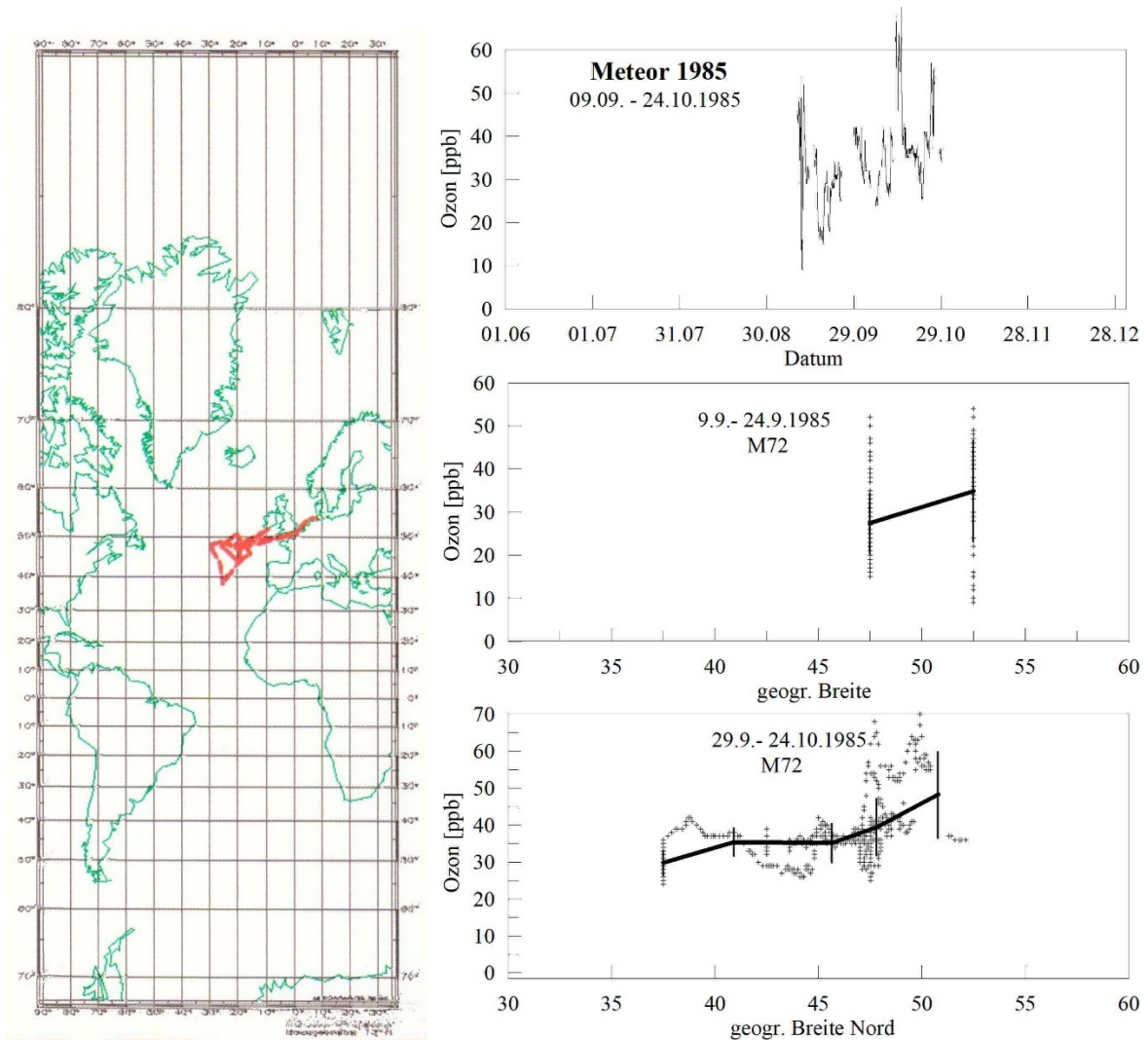


Abb. 12.17: Links: Fahrtverlauf der 72 Reise von Meteor I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Nördlich von 47°N war eine hohe Variabilität des Ozonmischungsverhältnisses zu verzeichnen, die durch stratosphärische Intrusionen verursacht sein dürften. Bei der Anreise zu den Azoren (Punta Delgada) herrschte sehr stürmisches Wetter im Bereich des Ex-Tropensturmes Gloria, wobei Wellenhöhen bis 11 m vorkamen.

12.18 Meteor II Reise Nr. 2

Hamburg – Norwegische Küste

19. Juni – 15. Juli 1986

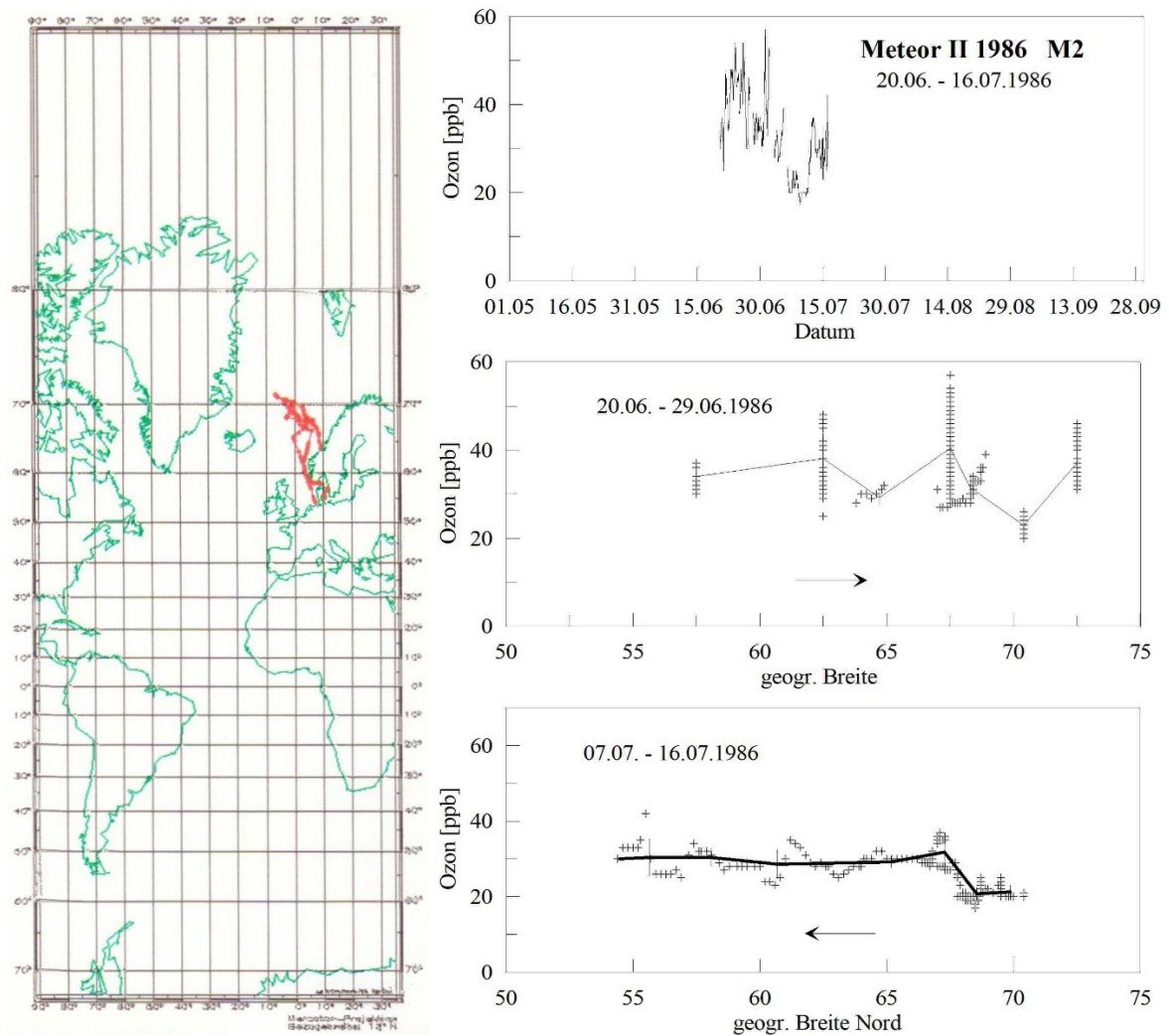


Abb. 12.18: Links: Fahrtverlauf der 2. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auf dem ersten Fahrtabschnitt war die Variabilität des Ozons sehr hoch, wofür einige stratosphärische Intrusionen die Ursache waren. Auf der Rückreise blieb der Verlauf des Mischungsverhältnisses ruhig.

12.19 Meteor II Reise Nr. 4

Kiel – Westafrika – Dakar

03. Oktober – 06. Dezember 1986

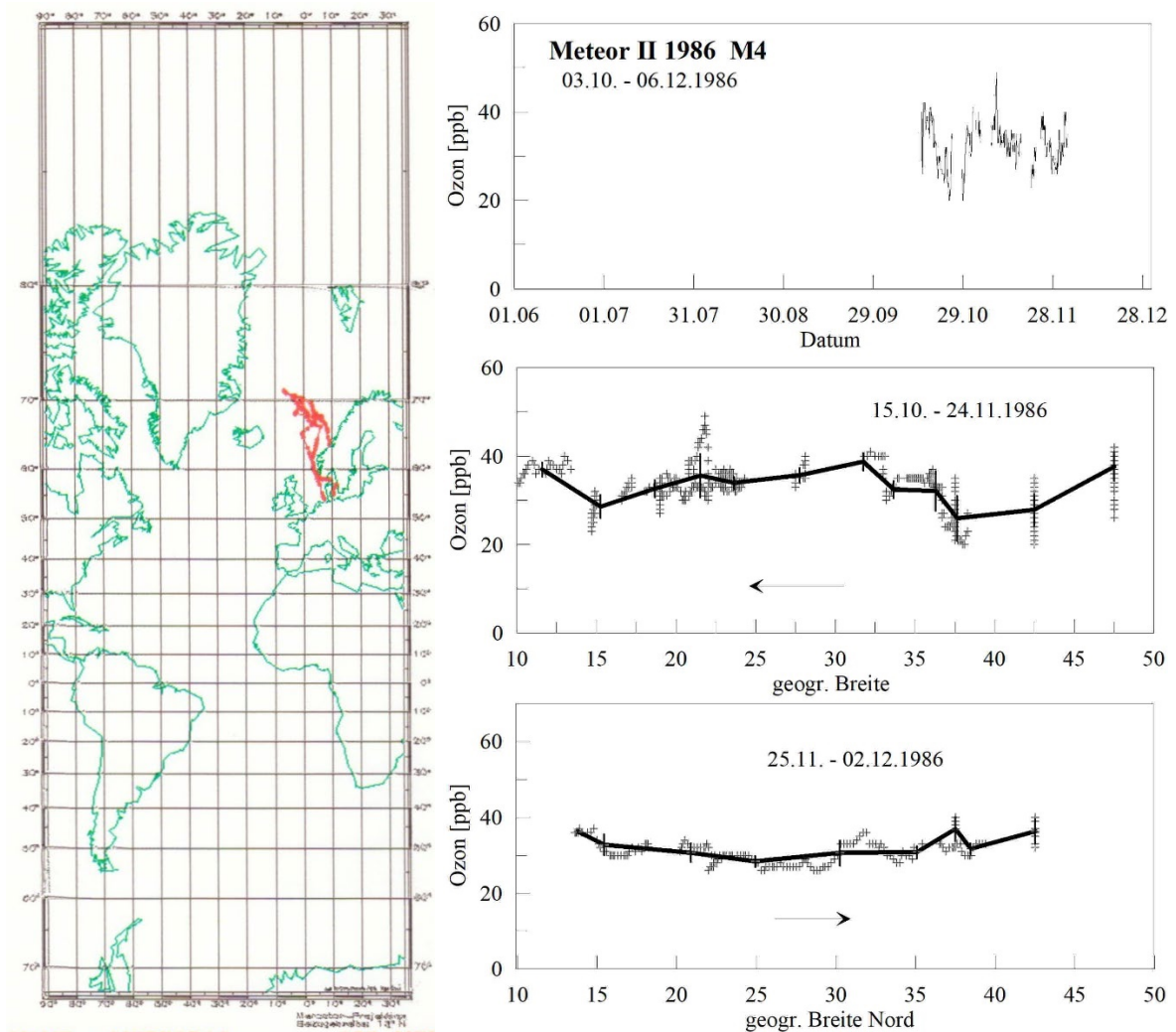


Abb. 12.19: Links: Fahrtverlauf der 4. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Während auf dem 1. Fahrtabschnitt noch eine gewisse Variabilität des Ozons zu bemerken war, wies das Mischungsverhältnis auf dem 2. Abschnitt kaum noch Schwankungen auf. Das inzwischen umgebaute Ozongerät arbeitete zuverlässig.

12.20 Meteor II Reise Nr. 6

Hamburg – Westafrika (Dakar, Abidjan)

01. November 1987 – 06. Mai 1988

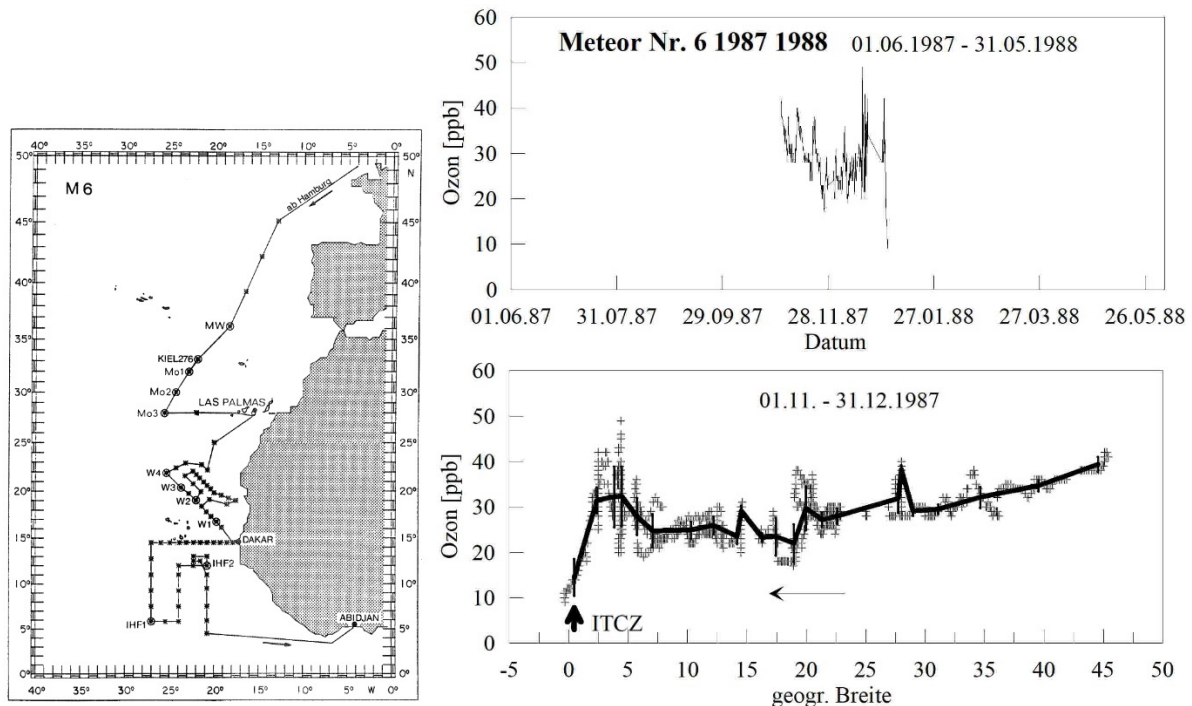


Abb. 12.2: Links: Fahrtverlauf der 6. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auf der Reise wurden Untersuchungen zur tropischen Warmwassersphäre vorgenommen (Müller et al. 1988). Das Max-Planck-Institut für Luftchemie Mainz und das Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg und die Universität Bremen nahmen luftchemische Messungen für zahlreiche Spurengase (HCHO, H₂O₂, NO₂; CO) in der oberflächennahen Schicht vor (Burkert et al. 2001).

Ozon konnte nur auf dem ersten Fahrtabschnitt bis Abidjan gemessen werden, auf der Rückreise fiel das Gerät aus. *Meteor* durchschnitt an der südlichsten Stelle eben die ITCZ. Nördlich davon stieg das Ozonmischungsverhältnis stark an.

Von Januar bis März 1988 wurde mehrfach die ITCZ gekreuzt und so in relativ kurzen Abständen der Ozonverlauf aufgezeichnet (s. Kapitel 9 zur ITCZ). Die Variabilität des Vertikal-austausches zeigt sich somit in seiner Auswirkung auf das Ozonmischungsverhältnis in der Nähe der Erdoberfläche. Man erkennt an den einzelnen Querschnitten, dass der Transport von Ozon aus der oberen Troposphäre zur Oberfläche in der Nähe von Cumulonimben sich offenbar nur kurzzeitig nachweisen lässt, bevor die allgemeine Turbulenz hohe Ozonmischungsverhältnisse in solchen Luftpaketen mit den geringeren Mischungsverhältnissen in der Umgebung wieder vermischt und nivelliert.

12.21 Meteor II Reise Nr. 7

Nordmeer

01. Juni – 28. September 1988

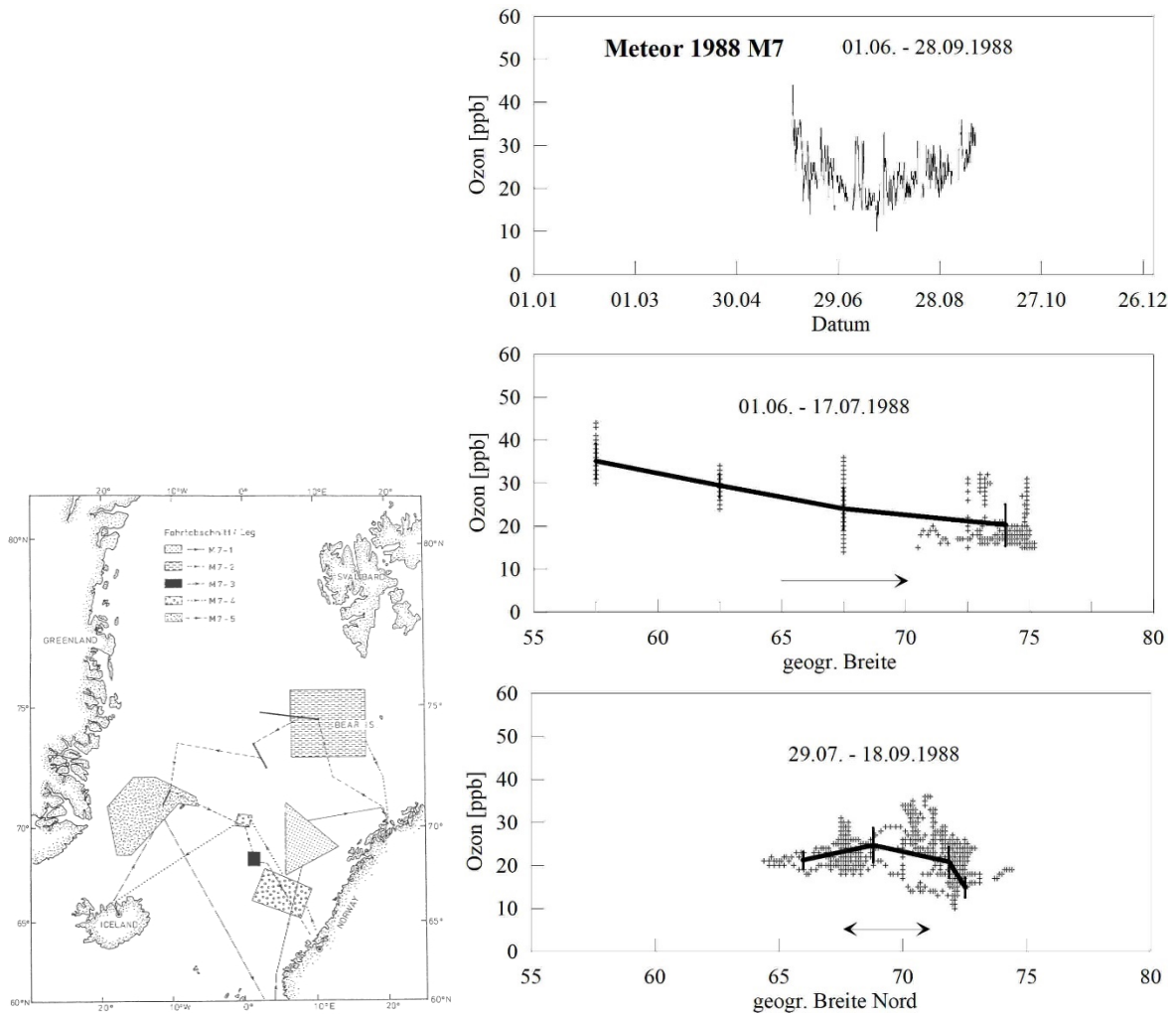


Abb. 12.21: Links: Fahrtverlauf und Operationsgebiete der 7. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis zeigte eine Abnahme nach Norden hin, wie dies auch schon bei früheren Reisen festgestellt wurde.

12.22 Meteor II Reise Nr. 8

Hamburg – Nordmeer

27. Oktober – 17. Dezember 1988

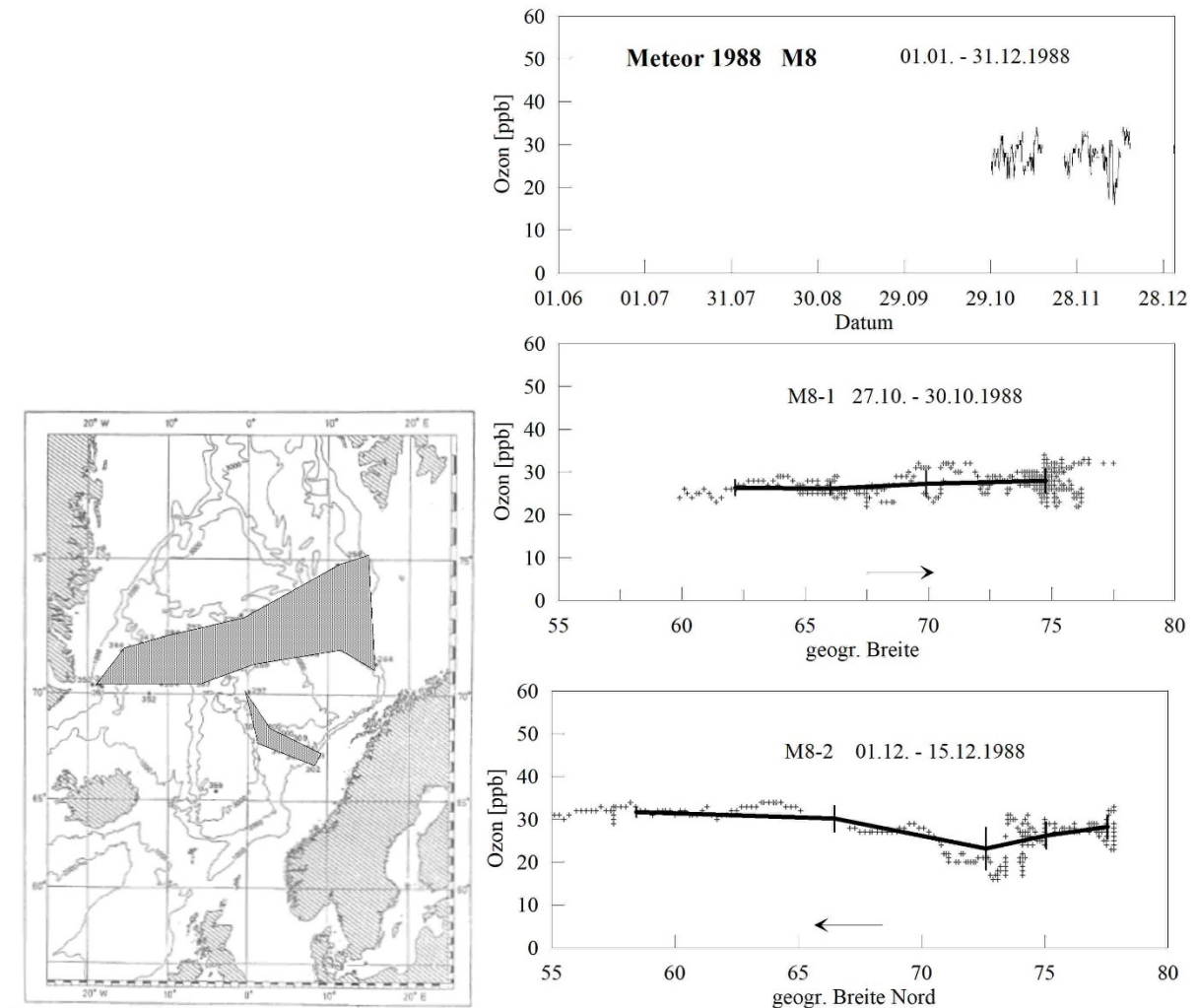


Abb. 12.22: Links: Fahrtverlauf und Operationsgebiete der 8. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Im Operationsgebiet lagen viele Messstationen, die nach und nach angefahren wurden. Das Ozonmischungsverhältnis wies eine ausgesprochen geringe Variabilität aus.

Karte nach (Fütterer 1994).

12.23 Meteor II Reise Nr. 9

Hamburg – Azoren – Dakar – Teneriffa – Kap Verde

29. Dezember 1988 – 17. März 1989

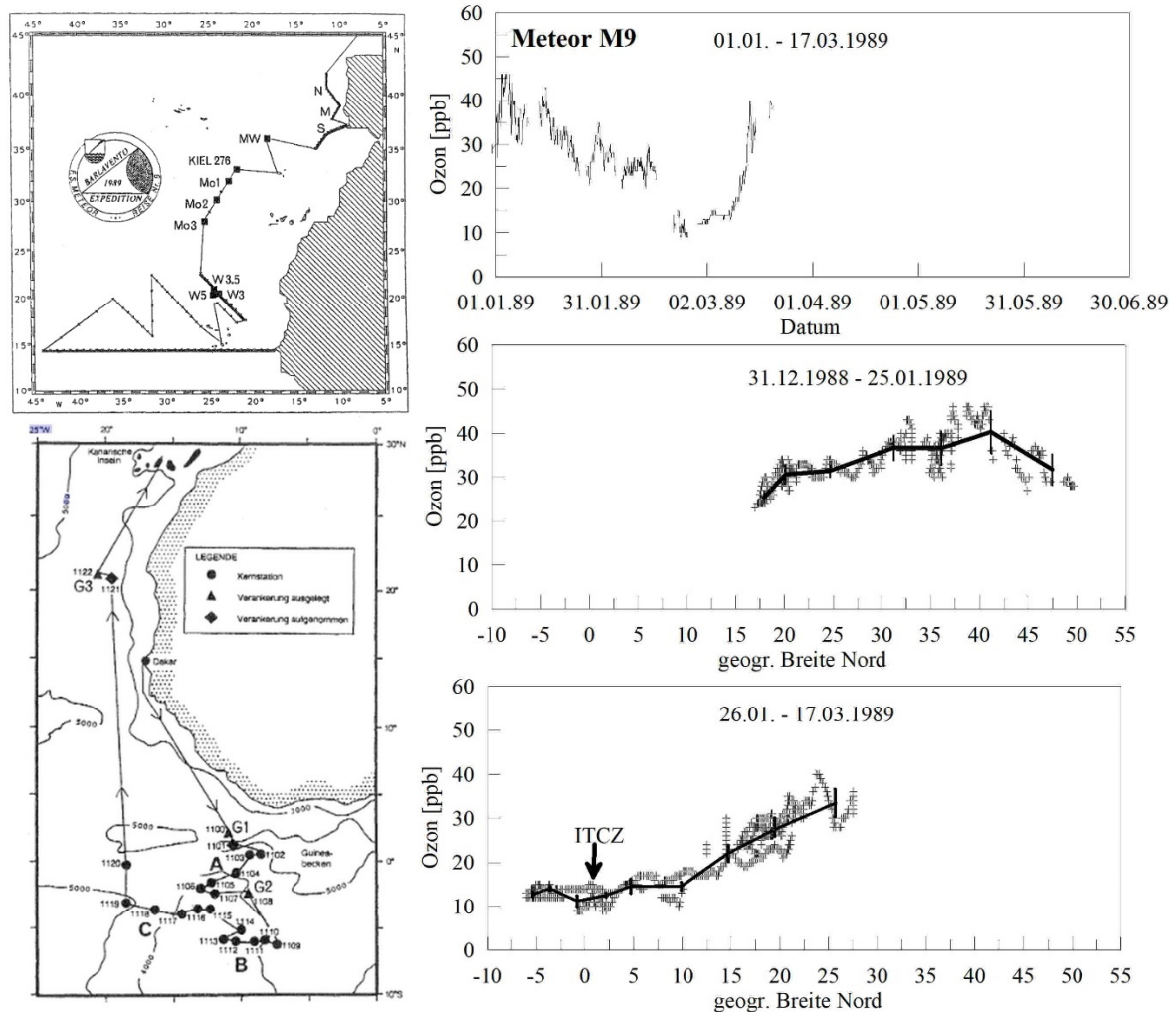


Abb. 12.23: Links: Fahrtverlauf der 9. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis war einheitlich ohne auffällige Variationen und nahm nach Süden hin ab. Bei der Querung der ITCZ blieb das Ozonmischungsverhältnis einheitlich konstant. Die ITCZ war nach Berichten von Fahrteilnehmern nicht besonders stark ausgeprägt, doch wurden einzelne Cumulonimben gesichtet (M. Krämer, S. Matthias in: (Zenk et al. 1989).

12.24 Meteor II Reise 10

Kanaren - Kapverden – Island – Hamburg

19. März 1989 – 31. August 1989

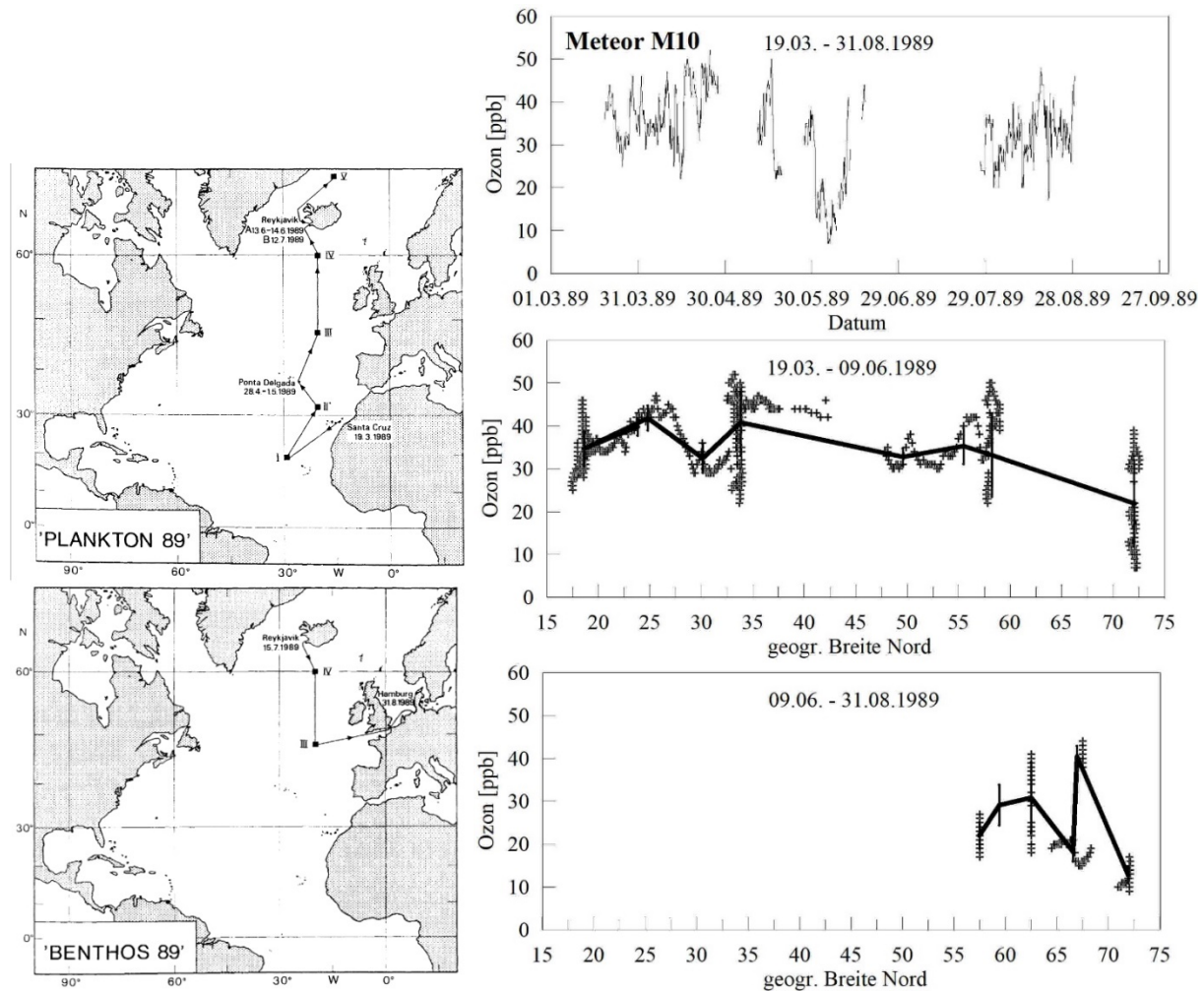


Abb. 12.24: Links: Fahrtverlauf der 10. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonprofil war insgesamt unruhig. Nach Norden hin nahm das Mischungsverhältnis ab. An der Eiskante nördlich von 70°N traten niedrige Mischungsverhältnisse unter 10 ppb auf, die möglicherweise durch Ozonerstörung durch Reaktion mit Halogenverbindungen (Brom) verursacht worden waren. Da das Mischungsverhältnis nicht auf null absank, ist anzunehmen, dass die Ozonerstörung bereits in größerer Entfernung stattgefunden hatte.

12.25 Meteor II Reise Nr. 11

Hamburg – NO-Atlantik – Punta Delgada – Rio de Janeiro – Ushuaia – Antarktische Halbinsel – Ushuaia – Kapstadt

24. Oktober 1989 – 20. Januar 1990

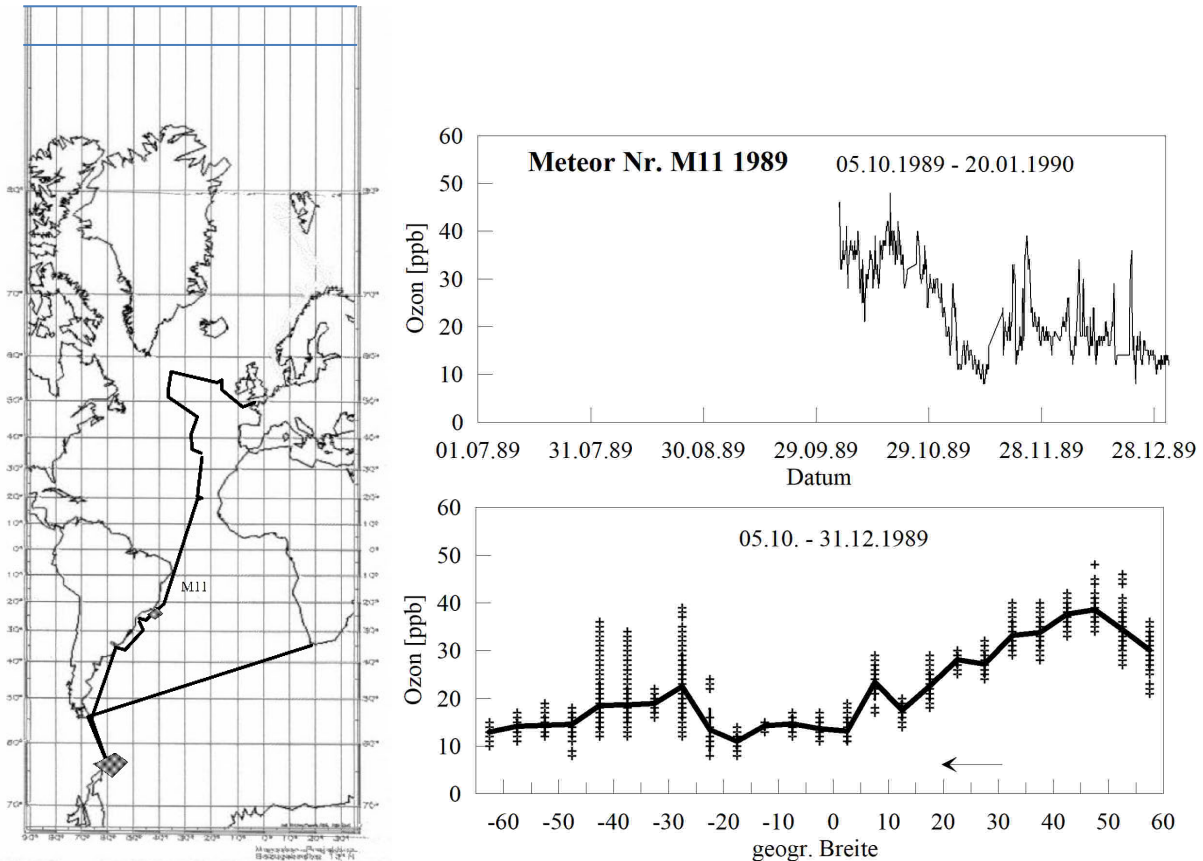


Abb. 12.25: Links: Fahrtverlauf der 11. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zu den Forschungszielen s. (Boje et al. 1990).

Zur genauen Lokalisierung der ITCZ waren keine Synop-Daten verfügbar, doch dürfte die Lage um 3°N anzusetzen sein (Bericht des Fahrtleiters T. Müller, Meteor-Berichte M11-2, 1989, S. 19). In der Südhemisphäre war die Variabilität zwischen 25°S und 45°S auffallend hoch.

Mitarbeiter der MPI für Luftchemie in Mainz führten vom 9. – 22. September 1989 acht Messflüge im Gebiet 27°–35°W, 2°N–11°S im Höhenbereich zwischen 1.000 und 5.400 m Höhe durch und fanden Abluffthannen von jeweils 100- 300 m Mächtigkeit, deren Ursprung sie Gebieten mit Biomassenverbrennung in Afrika und Südamerika zuordnen konnten (Andreae et al. 1994). In der Schicht erreichte das Ozonmischungsverhältnis 90 ppb. Die auf dem Schiff gemessenen Ozonwerte lassen keinen Einfluss von photochemisch entstandenem Ozon aus Biomassenverbrennung erkennen. Als die Querung des Gebietes durch Meteor vier Wochen später erfolgte, dauerte die Brandsaison noch an.

12.26 Meteor II Reise Nr. 12

Kapstadt – Hamburg

13. März – 30. Juni 1990

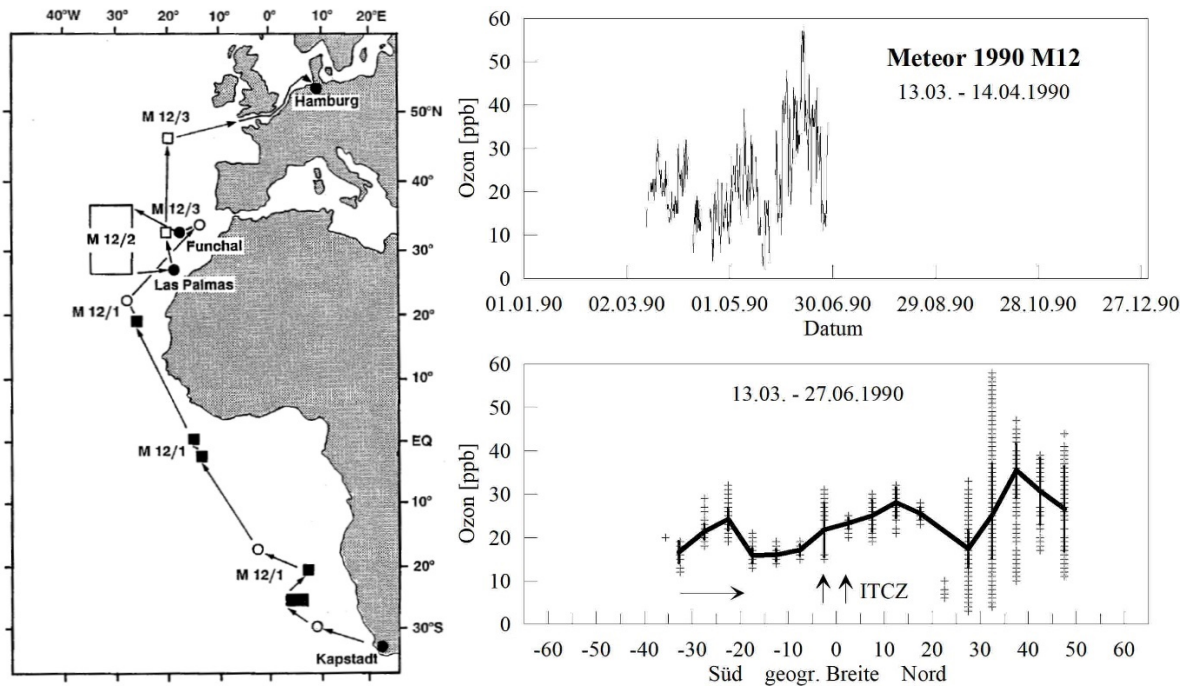


Abb. 12.26: Links: Fahrtverlauf der 12. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Bordwetterwarte diagnostizierte eine doppelte ITCZ, deren südlicher Ast bei 3° Süd lag und mit leichten Gewittern verbunden war (Bericht des Wettertechnikers Bassek). Hier könnten die erhöhten Mischungsverhältnisse durch Zufuhr hochtroposphärischer Luft bei starkem Vertikalaustausch bedingt sein. Der nördliche Ast war an hohen Bewölkung im Satellitenbild erkennbar aber lokal nicht weiter wetterwirksam. Die starken Schwankungen des Mischungsverhältnisses zwischen 30 und 40°N waren mit Polarluftausbrüchen verbunden, wobei zusätzlich im Lee von Madeira Föhn verbunden war. Daher kam es zu starkem Vertikalaustausch, der immer wieder ozonreiche Luft aus der höheren Troposphäre nach unten brachte (Weigel et al. 1991). Laut Bericht der Bordwetterwarte war die ITCZ auf dem Atlantik weiter im Westen nur noch schwach ausgeprägt.

12.28 Meteor II Reise Nr. 16

Südafrika – Recife – Las Palmas Bremerhaven

27. März – 08. Juli 1991

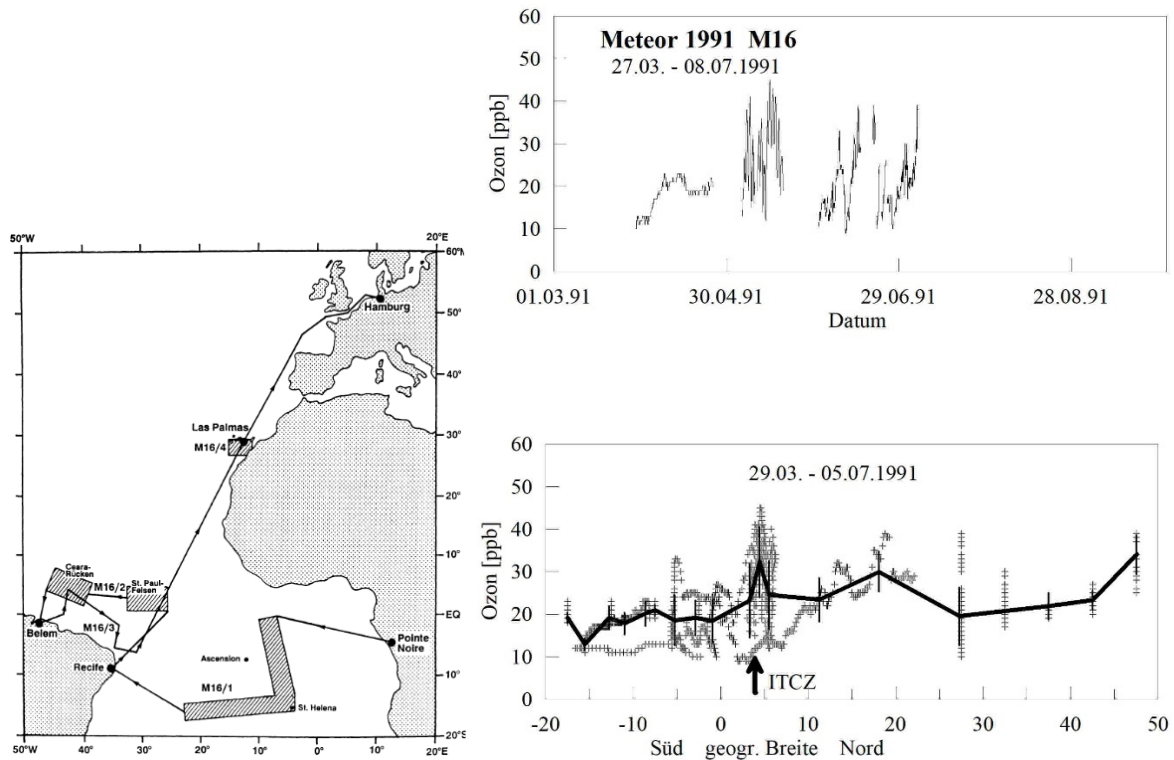


Abb. 12.28: Links: Fahrtverlauf der 16. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

FS Meteor hielt sich längere Zeit im Bereich der ITCZ auf, die bei 4°N lag und erstmals am 7. April bei Gewittern erreicht wurde. Bereits am Vortag waren Ferngewitter beobachtet worden. Durch den starken Vertikalaustausch überstieg das Ozonmischungsverhältnis deutlich 40 ppb. Bei der letzten Durchquerung der ITCZ zwischen dem 6. und 15. Juli wurde ein Ozonminimum beobachtet. Dies zeigt, wie stark sich in einem Zeitraum von zwei Monaten das Ozonprofil verändern kann.

12.29 Meteor II Reisen Nr. 17 und Nr. 18

Tromsø – Reykjavik – Tromsø – Hamburg M17; M18;

02. September – 25. September 1991

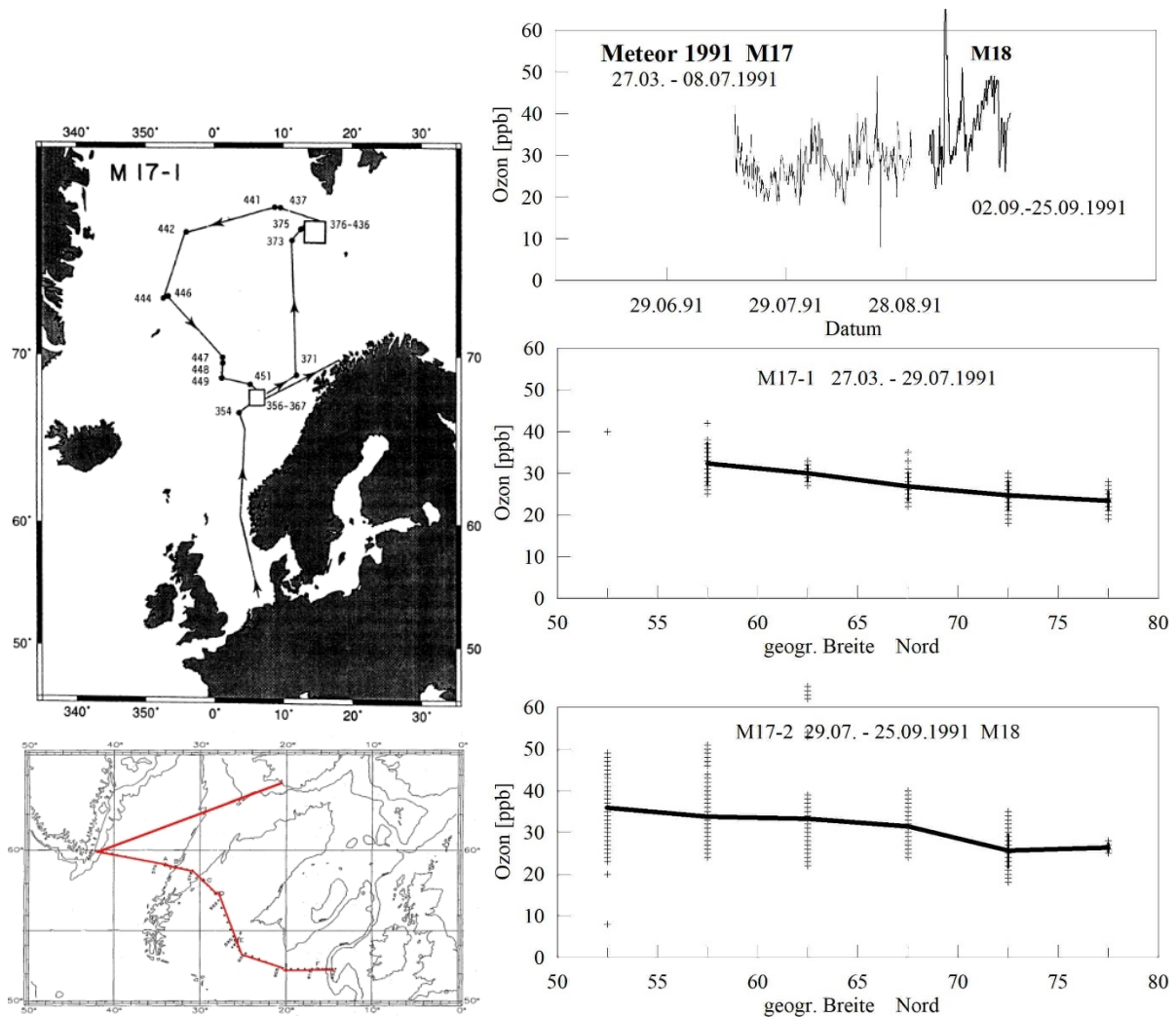


Abb.12.29: Links: Fahrtverlauf der 17. und 18. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auf der 17. Reise verlief das Ozonmischungsverhältnis ruhig ohne große Variationen. Auf der 18. Reise traten größere Schwankungen auf. Reiseroute M17 nach: (Suess and Altenbach 1992) und M18 nach (Meincke 1993). Auf beiden Reisen war eine allgemeine Abnahme des Ozonmischungsverhältnisses nach Norden hin zu verzeichnen, wie es auch bei anderen Reisen ins Nordmeer beobachtet worden war.

12.30 Meteor II Reise Nr. 22

Hamburg – Recife – Kapstadt

18. November 1991 – 31. Dezember 1992

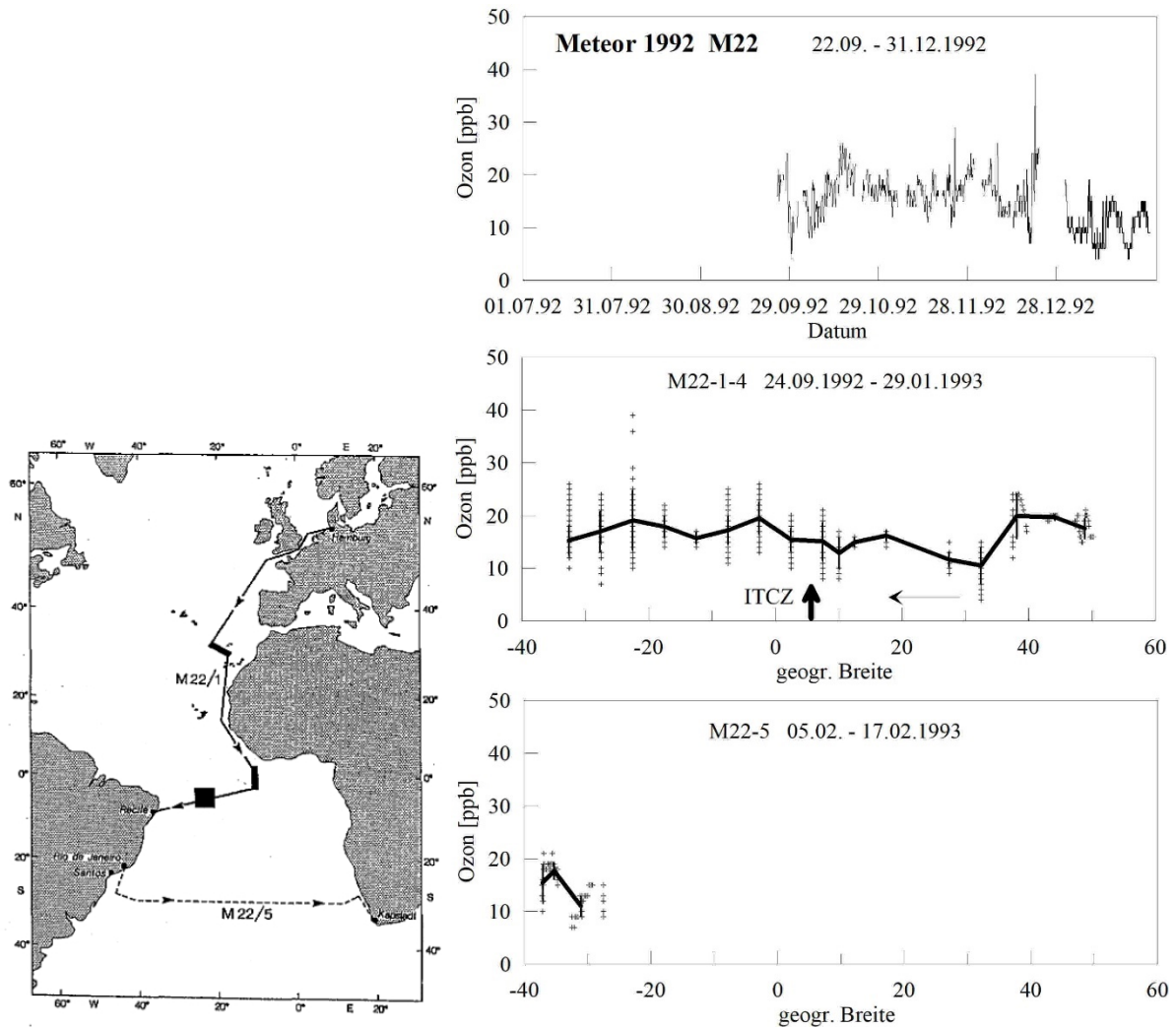


Abb. 12.30: Links: Fahrtverlauf der 22. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Fahrtabschnitte 1-4 verliefen über Recife bis Rio de Janeiro, auf dem fünfte Abschnitt wurde der Atlantik von West nach Ost überquert und endete in Kapstadt. Das Ozonmischungsverhältnis war insgesamt niedrig. Nord- und Südhemisphäre wiesen kaum Unterschiede im Ozonmischungsverhältnis auf.

Bei der Passage der ITCZ am 8. Oktober 1992 war die Ozonmessung gestört.

Laut Bordwetterbericht herrschte in der Südhemisphäre häufig Tiefdruckwetter mit starken Böen. Fronten wirkten bis nördlich von 20°S. Die zum Teil hohe Variabilität des Ozons könnte also von stratosphärischen Intrusionen verursacht worden sein.

12.31 Meteor II Reise Nr. 23

Kapstadt – Rio de Janeiro – Recife – Las Palmas

04. Februar – 12. April 1993

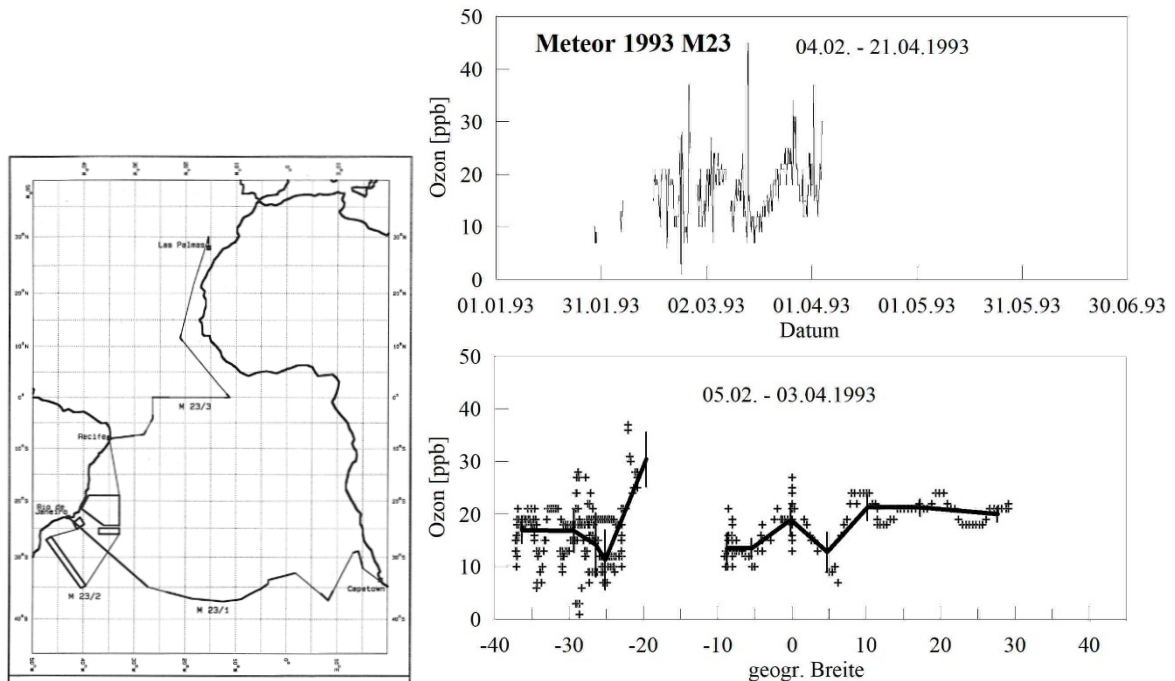


Abb. 12.31: Links: Fahrtverlauf der 23. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Es wurde eine Atlantikquerung von Kapstadt nach Südamerika vorgenommen, wobei das Ozonmischungsverhältnis zeitweise bis nahe Null absank. Auf der Rückreise fuhr *Meteor II* eine größere Strecke auf dem Äquator nach Osten, wobei sich Variationen im Ozonmischungsverhältnis von mehr als 15 ppb zeigten. An der ITCZ, die bei ca. 6°N zu vermuten ist, traten sehr niedrige Ozonmischungsverhältnisse von deutlich unter 10 ppb auf.

12.32 Meteor II Reise Nr. 27-1

Hamburg – Punta Delgada – Recife
28. Dezember 1993 – 26. März 1994

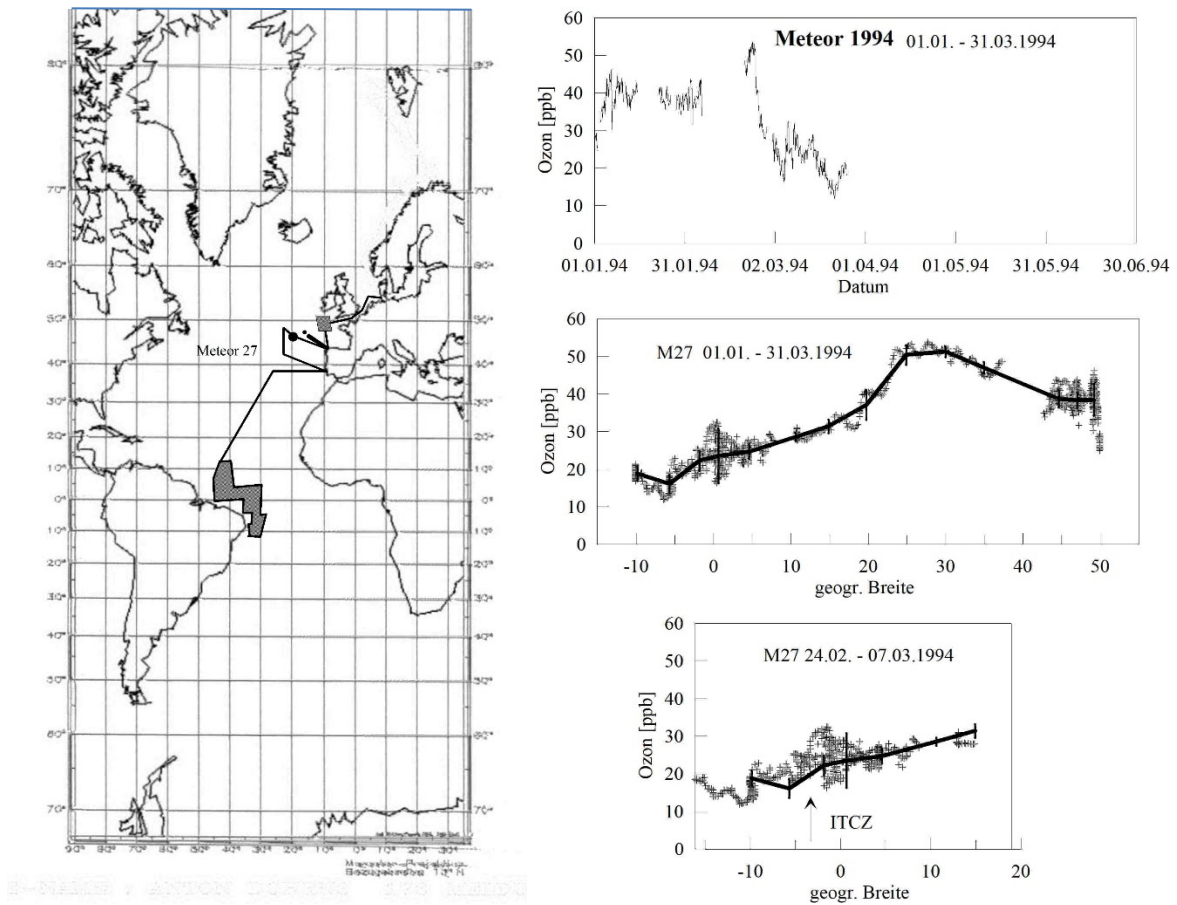


Abb. 12.32: Links: Fahrtverlauf der 27. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zwischen 15 und 35°N sind Tagesgänge erkennbar.

Bei 47°N erreicht die Windgeschwindigkeit fast Orkanstärke; nach einem Kaltfrontdurchgang setzte rege Schauerstätigkeit ein, wobei zeitweise leichter Hagel auftrat (Bordwetterbericht in (Schott et al. 1994).

Die ITCZ nördlich von Recife lag bei 3,5°S und war mit kräftiger Schauerstätigkeit verbunden, doch wurden keine Ozonspitzen festgestellt. Daraus ist zu folgern, dass die Schauer nicht die Tropopause erreichten oder durchstießen und eventuell eingemischte stratosphärische Luft nicht zur Meeresoberfläche vordringen konnte.

Auf den Fahrtabschnitten 2 und 3 wurde kein Ozon gemessen.

12.33 Meteor II Reise Nr. 34

Kapstadt – Walfischbucht – Recife

03. Januar 1996 – 15. April 1996

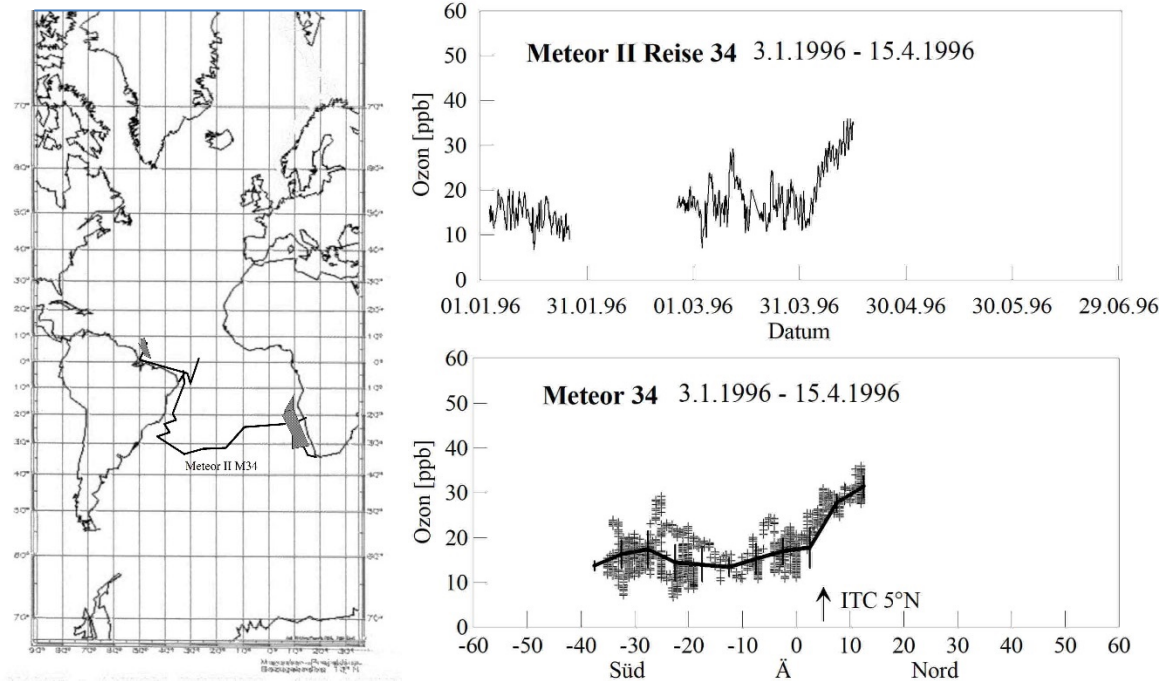


Abb. 12.33: Links: Fahrtverlauf der 34. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die ITCZ war vor Südamerika wenig ausgeprägt; zeitweise waren zwei ITCZ zwischen 5°S und 5°N festzustellen, wobei die südliche bei 3,6°S am 29.3.1996 lag. Die nördliche ITCZ wurde bei 5°N durchfahren. Die Nordhemisphäre wies höhere Ozonmischungsverhältnisse als die Südhemisphäre auf.

Karte nach Wefer et al. (1997); die Lage der ITCZ ergab sich aus dem Bericht der Bordwetterwarte von Flechsenhaar, (ebd. S. 239).

12.34 Meteor II Reise Nr. 35

Barbados – Puerto Rico – Bermuda

18. April 1996 – 18. Mai 1996

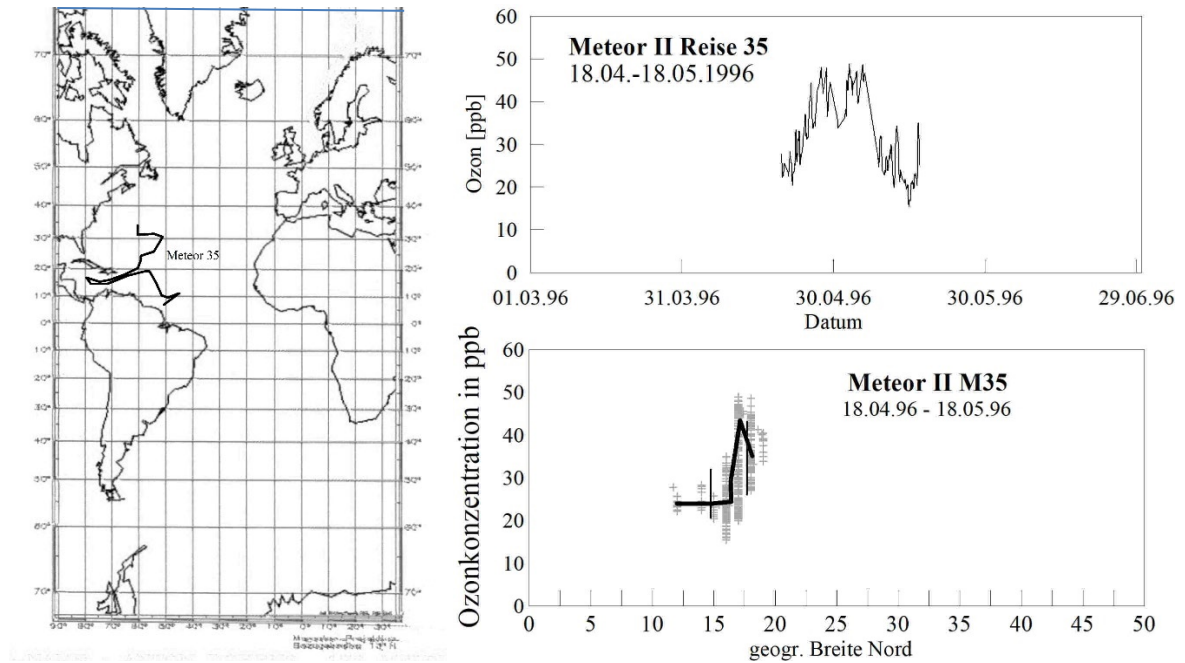


Abb. 12.34: Links: Fahrtverlauf der 35. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die relativ hohen Ozonmischungsverhältnisse im Bereich der Karibik können durch photochemisch gebildetes Ozon in den USA beeinflusst worden sein, welches über dem Kontinent entstand und anschließend in die Karibik transportiert wurde.

12.35 Meteor II Reise Nr. 36

Las Palmas – Bergen – Nordmeer – Reykjavik

6. Juni – 17. August 1996

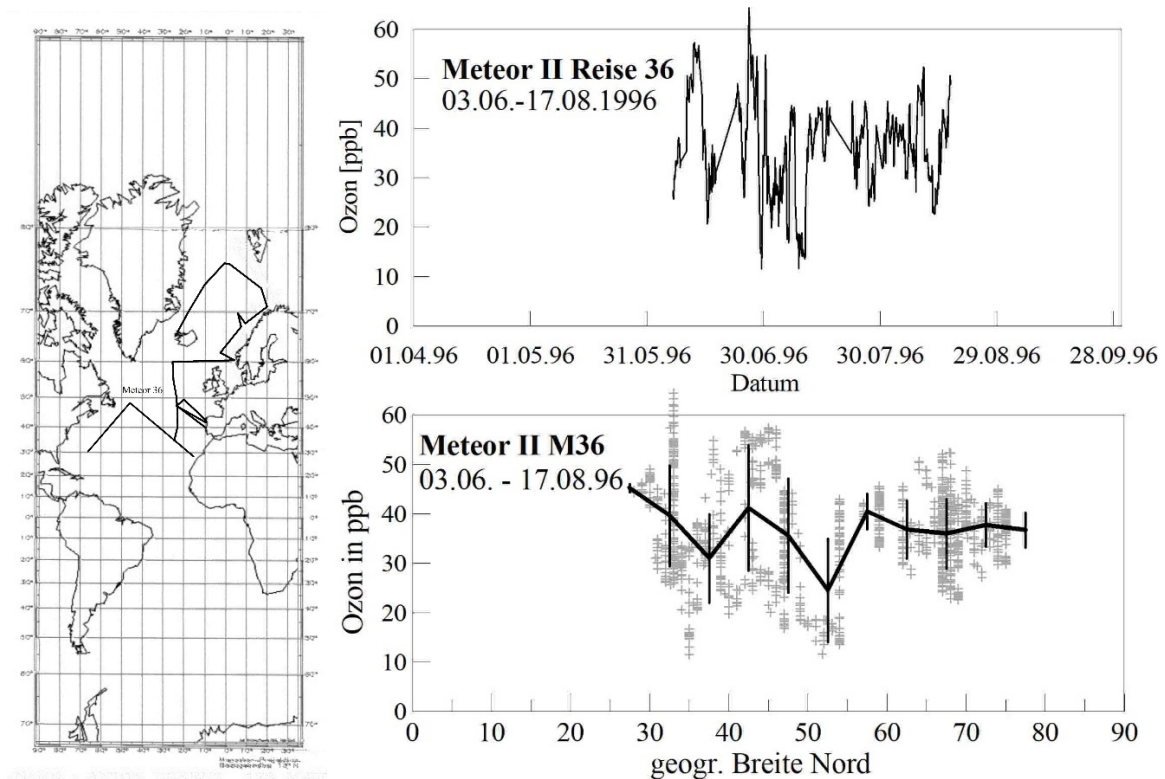


Abb. 12.35: Links: Fahrtverlauf der 36. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zeitweise zeigte das Ozon eine hohe Variabilität und vor allem im südlichen Bereich der Fahrtroute hohe Mischungsverhältnisse. Hier kann im südlichen Teil der Reise über dem amerikanischen Kontinent photochemisch erzeugtes Ozon herantransportiert und dem natürlichen Pegel überlagert gewesen sein. Allerdings ist dem Bordwetterbericht zu entnehmen, dass zeitweise stürmisches Wetter im Bereich von Tiefdruckgebieten herrschte und Ozon aus stratosphärischen Intrusionen zur Variabilität ebenfalls beigetragen haben kann (Mienert et al. 1998, S. 234-238).

12.36 Polarbjörn 1. Reise

Hamburg, Rio, Atka-Bucht, Kapstadt, Hamburg

21. Dezember 1982 – 12. März 1983

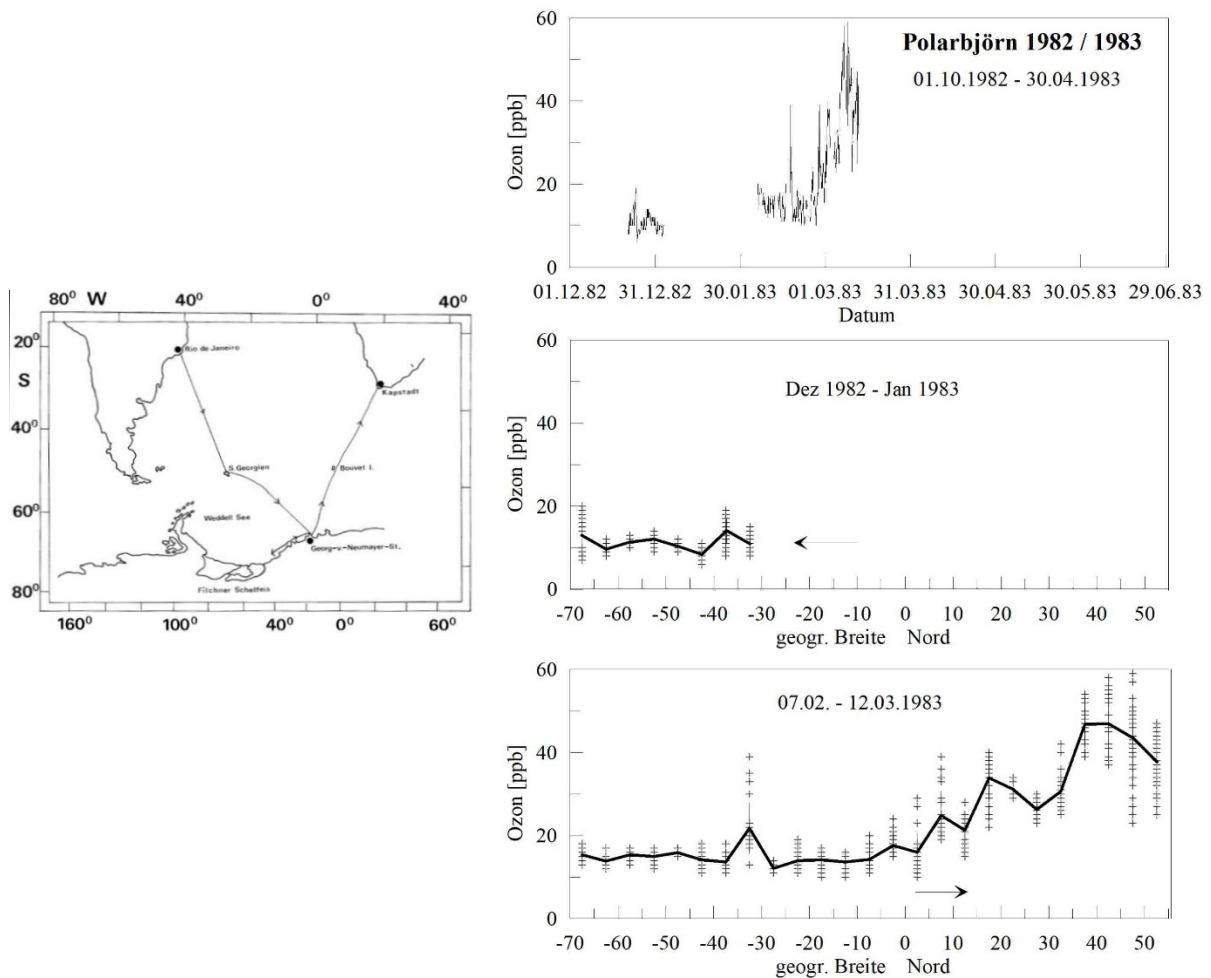


Abb. 12.36: Links: Fahrtverlauf des Versorgers Polarbjörn im Südatlantik. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auf der Hinreise wurden erst südlich von Rio de Janeiro Daten gewonnen, nachdem die Überwinterer den Schreiber eingeschaltet hatten. Auf der Rückreise verlief ungestört.

Der Breitenschnitt auf der Rückreise gehört zum Typ mit niedrigen Ozonmischungsverhältnissen in der Südhemisphäre und Übergang an der ITCZ zu hohen Mischungsverhältnissen in der Nordhemisphäre. In der Südhemisphäre wurde zwischen 30 und 40°S ein Sekundärmaximum festgestellt, das auf einer stratosphärischen Intrusion beruhen dürfte, da Biomassenverbrennung als mögliche Ozonquelle ausscheidet. Beim Passieren der ITCZ trat ein typischer Ozonanstieg beim Wechsel von der Süd- in die Nordhemisphäre auf. In Verbindung mit einem Trog über dem Westatlantik stellte diese Lage eine klassische Situation für eine Tropopausenfaltung mit stratosphärischer Intrusion dar. Zum Zweck der Reise s. (Kohnen 1983).

12.37 Polar Queen

Bremerhaven – Rio Grande – Georgien – Atka-Bucht

26. November 1981 – 21. Januar 1982

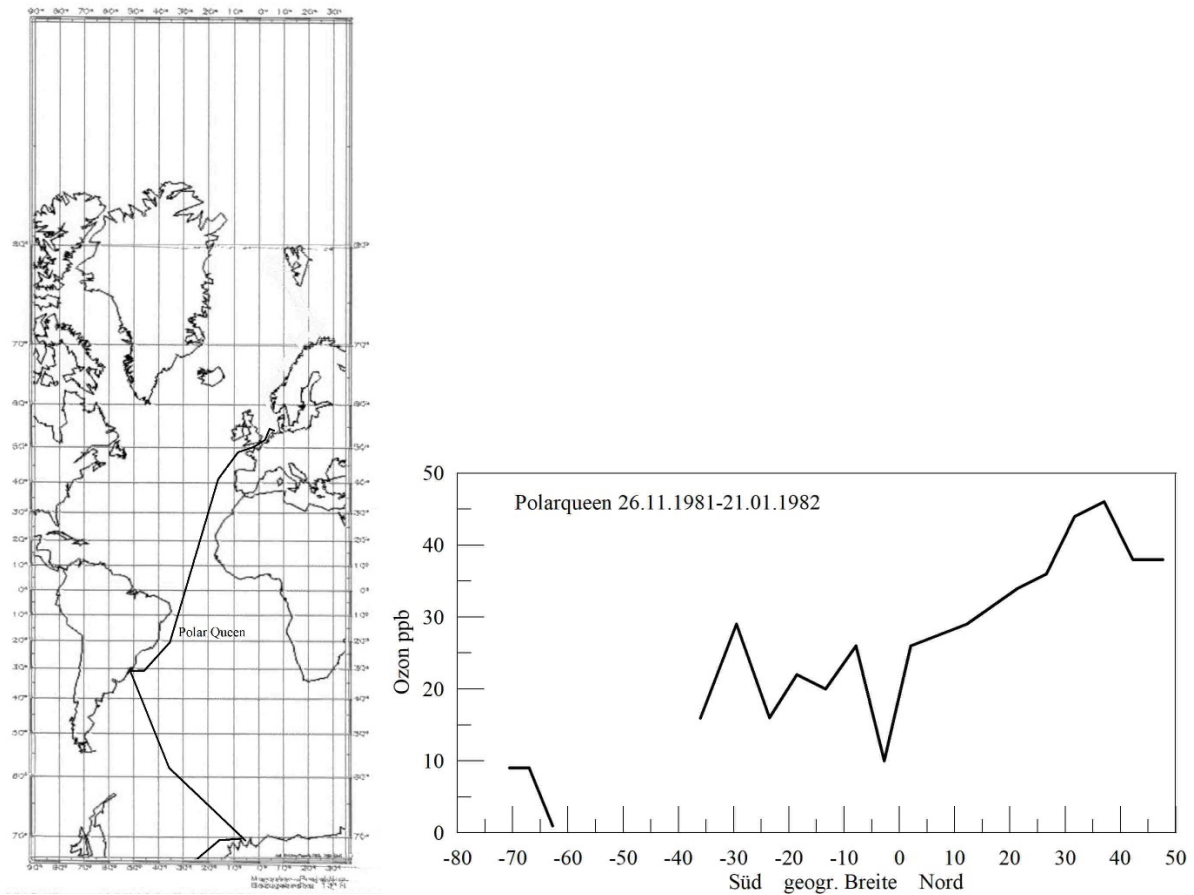


Abb. 12.37: Links: Fahrtverlauf der Polar Queen. Rechts: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Während der Reise wurde Krypton-85 gemessen (s. Abb. 8.2) (Weiss et al. 1982). Da Kr-85 rein anthropogenen Ursprungs ist, lässt sich das Ozonmaximum zwischen 30 und 40°N zum Teil einem Ferntransport von photochemisch gebildetem Ozon aus Industriegebieten zuschreiben.

12.38 Polarstern Reise ANT-I

Bremerhaven – Recife – Atka-Bucht – Kapstadt

28. Dezember 1982 – 22. April 1983

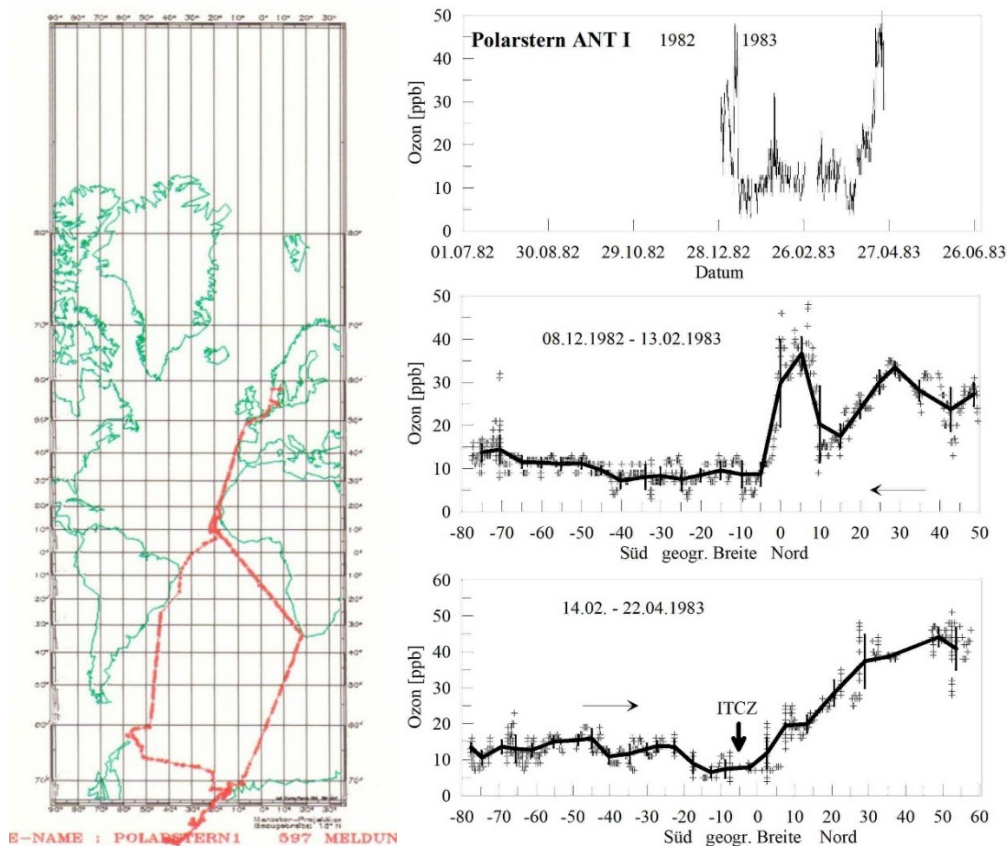


Abb. 12.38: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ANT-I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auf der Hinreise beeinflussten europäische Luftmassen das Ozon möglicherweise durch photochemische Bildung. Wie gleichzeitig gemessene Konzentrationen von Krypton-85, das ausschließlich anthropogene Quellen besitzt, zeigen, sind die hohen Ozonmischungsverhältnisse bei 0-5°N nicht durch photochemische Bildung erklärbar, sondern müssen natürlichen Ursprungs sein (vgl. Abb. 8.3).

Auf der Rückreise lag die ITCZ bei 6°S und war schwach ausgeprägt. Das erklärt die sehr niedrigen Ozonwerte von zeitweise nur 4 ppb, die durch Photolyse von Ozon verursacht worden sind.

Das Ozongerät war im Krähenest untergebracht, doch zeigte sich kein besonderer Anhaltspunkt, der auf geringere schiffsbedingte Störungen an dieser Messstelle schließen ließe. Die Luftpumpe wurde während der Reise vorsorglich neunmal gewechselt. Am Ende des letzten Abschnitts war die Pumpe etwas ausgeschlagen, wodurch ein Förderverlust von fünf Prozent eingetreten war, der korrigiert werden konnte.

Auf dieser Reise wurden auch Kohlenwasserstoffe gemessen, (Tille and Bächmann 1987).

12.39 Polarstern ARK-I

Bremerhaven – Spitzbergen – Grönlandsee

27. Juni – 19. Juli 1983

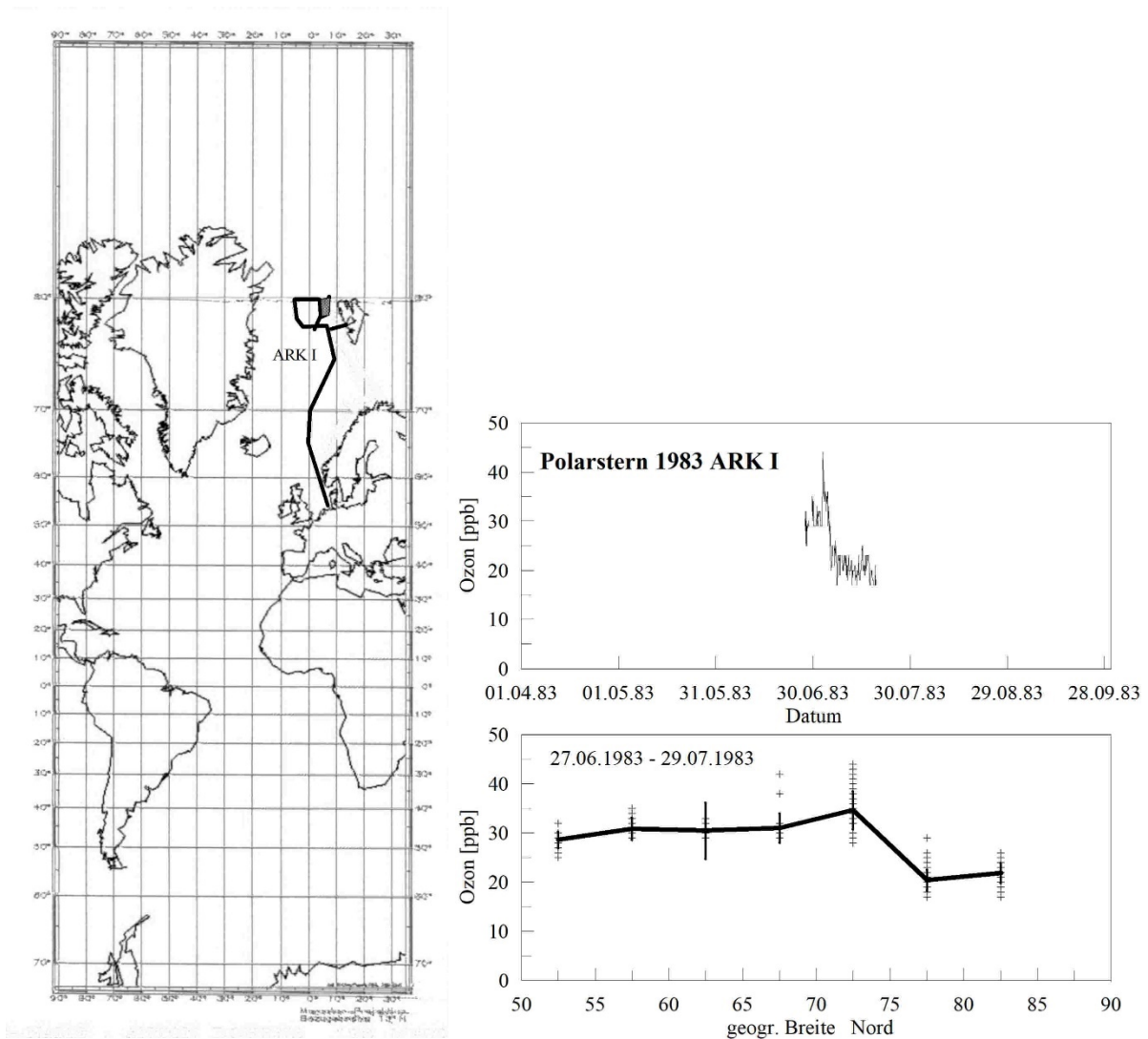


Abb. 12.39: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ARK-I. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Ozon wurde nur auf dem 1. Fahrtabschnitt gemessen. Wie auch bei anderen Reisen in hohen geographischen Breiten oft festzustellen, sank das Ozonmischungsverhältnis nach Norden hin ab.

12.40 Polarstern Reise ANT-II

Bremerhaven– Punta Arenas – Atka-Bucht – Kapstadt – Bremerhaven

28. September 1983 – 04. April 1984

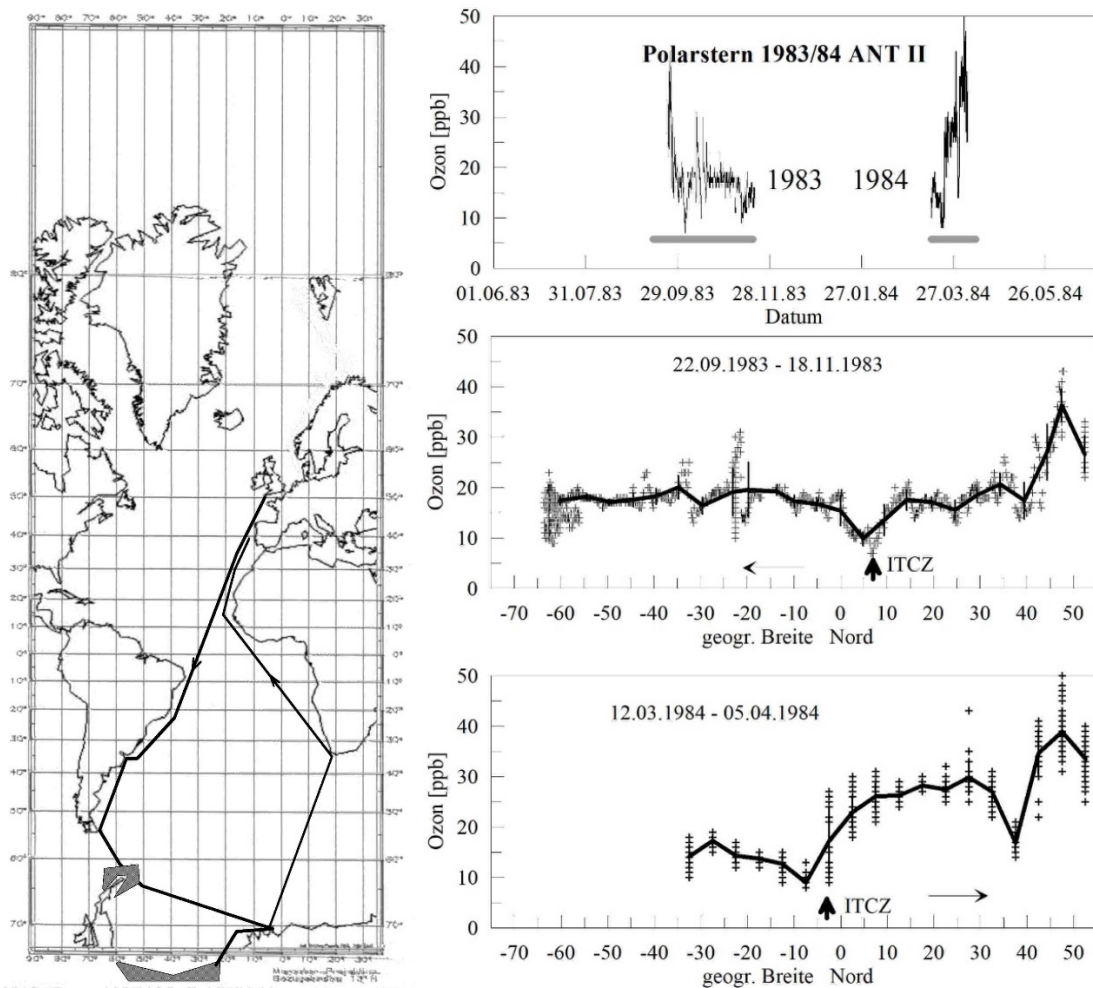


Abb. 12.40: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ANT-II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zu den Fahrtzielen s. (Fütterer 1984).

Das Ozongerät wurde im Krähennest betrieben, um von Schiffsstörungen frei zu sein. Diese Vorsichtsmaßnahme erwies sich als unnötig, wie Parallelmessungen mit einem optischen Ozongerät ergaben. Es hatte sogar Nachteile wegen der umständlichen Bedienbarkeit und wurde auf späteren Reisen nicht mehr praktiziert. Der Sprudler wurde während der Reise einmal komplett ausgetauscht. Die Luftpumpe am Ozongerät wurde vorsorglich fünfmal gewechselt. Die Betreuung hatte Dr. Helas vom MPI Mainz übernommen.

Auf der Hinreise war im Bereich der ITCZ (7°N) ein Ozonminimum festzustellen, wie es für Bedingungen mit hoher Sonneneinstrahlung und geringer Vertikaldurchmischung typisch ist. Auf dieser Reise wurden weitere Spurenstoffe (NO_x ; HNO_3 ; Krypton-85, Aerosol) gemessen (Fütterer 1984).

12.41 Polarstern ARK-II

Bremerhaven, Nordsee, Seegebiet westl. Spitzbergen

10. Mai – 19. September 1984

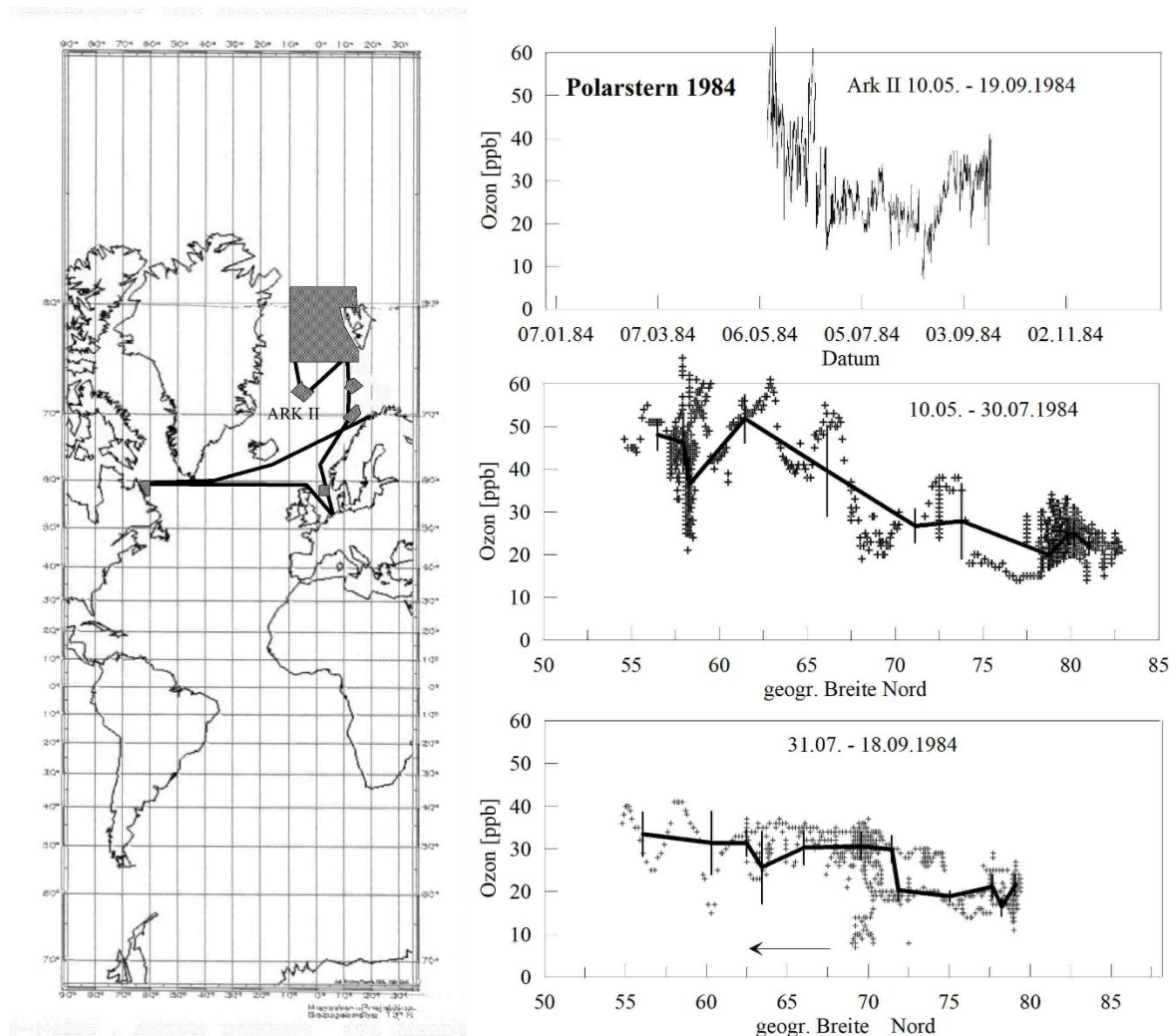


Abb. 12.41: Links: Fahrtverlauf und Operationsgebiet der Polarsternreise ARK-II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf der Ozonmischungsverhältnis; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Der 1. Fahrtabschnitt diente schiffstechnischen Untersuchungen vor Labrador bei 57,5°N (10.5.-10.6.); Zwischenaufenthalt in Tromsø (10.-12.6.); der 2. Fahrtabschnitt lag in der Framstraße.

Die teils sehr hohen Ozonmischungsverhältnisse im 1. Teil der Reise sind auf stratosphärische Intrusionen zurückzuführen, da laut Bericht der Bordwetterwarte vor Neufundland ein relativ ortsfester Tiefkomplex lag. Hier können Tropausenfaltungen entstehen. Während des 2. Fahrtabschnitts wurden bei 70°N zeitweise sehr niedrige Ozonmischungsverhältnisse gemessen, die wahrscheinlich auf Ozonabbau durch Brom bei sonnigem Wetter zurückgingen.

12.42 Polarstern Reise ANT-III

Bremerhaven – Rio de Janeiro – Ushuaia

20. Oktober 1984 – 03. März 1985

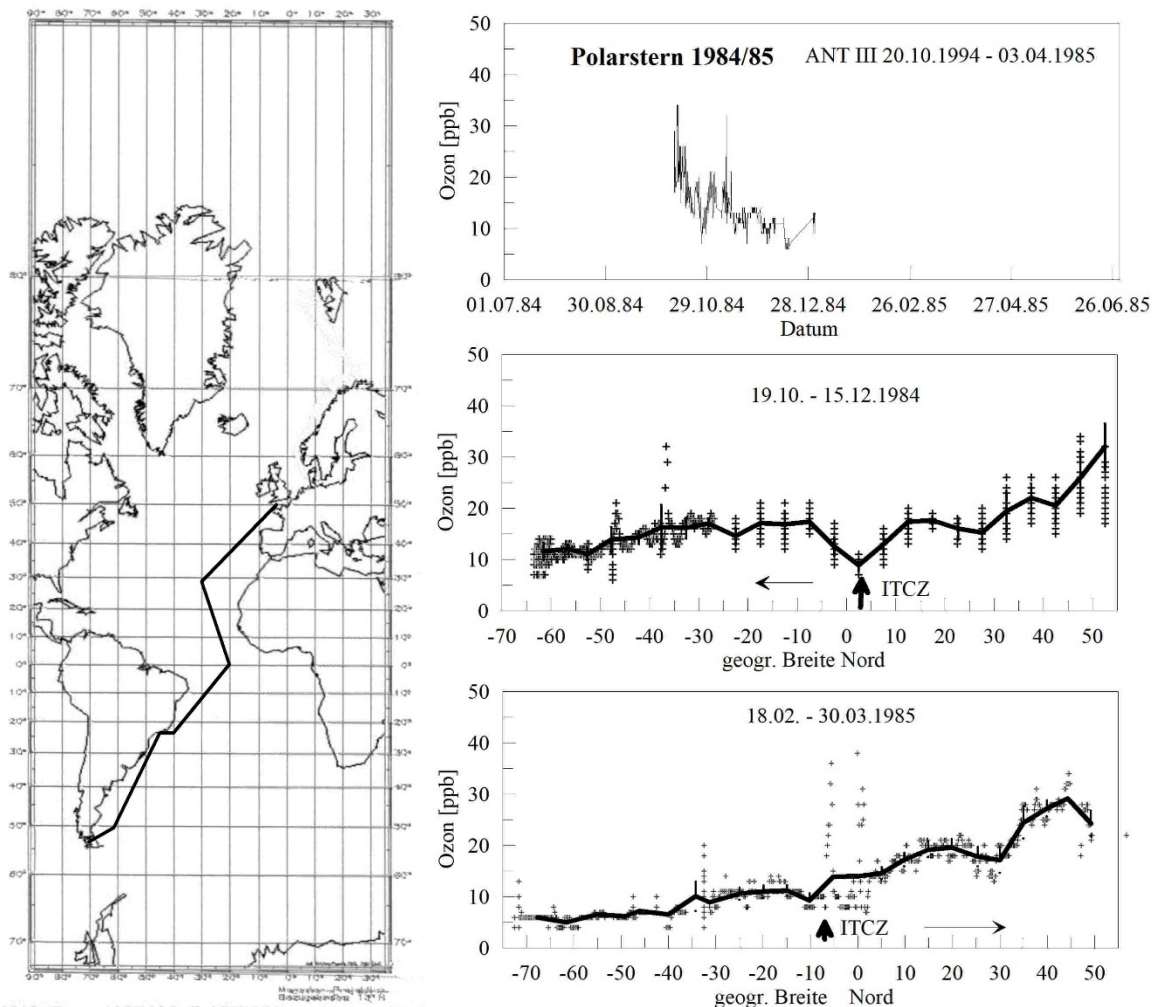


Abb. 12.42: Links: Fahrtverlauf. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf der Ozonmischungsverhältnis; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zu den Fahrtzielen insgesamt s. (Hempel 1989).

Auf der Hinreise wurde an der ITCZ ein Ozonminimum angetroffen, wie es typisch für hohe Sonneneinstrahlung und geringen Vertikalaustausch ist. Unter solchen Bedingungen kann durch Photolyse Ozon abgebaut, aber infolge von schwachem Vertikalaustausch nicht ersetzt werden. Auf der Rückreise traten an und nördlich der ITCZ zwei Ozonspitzen auf. Nach Class and Ballschmiter (1986), die einige organische Spurengase gemessen haben, bestand die ITCZ aus zwei Ästen, die bei 2°S und 2°N festgestellt wurde. Die auffallenden Ozonspitzen können durch starken Vertikalaustausch entstanden sein, wobei Ozon aus der oberen Troposphäre nach unten gemischt wurde. Zum Teil waren während der Fahrt deutliche Tagesgänge zu verzeichnen.

12.43 Polarstern Reise ARK-III

Bremerhaven – Spitzbergen – Kiel

04. Mai – 30. Mai 1985

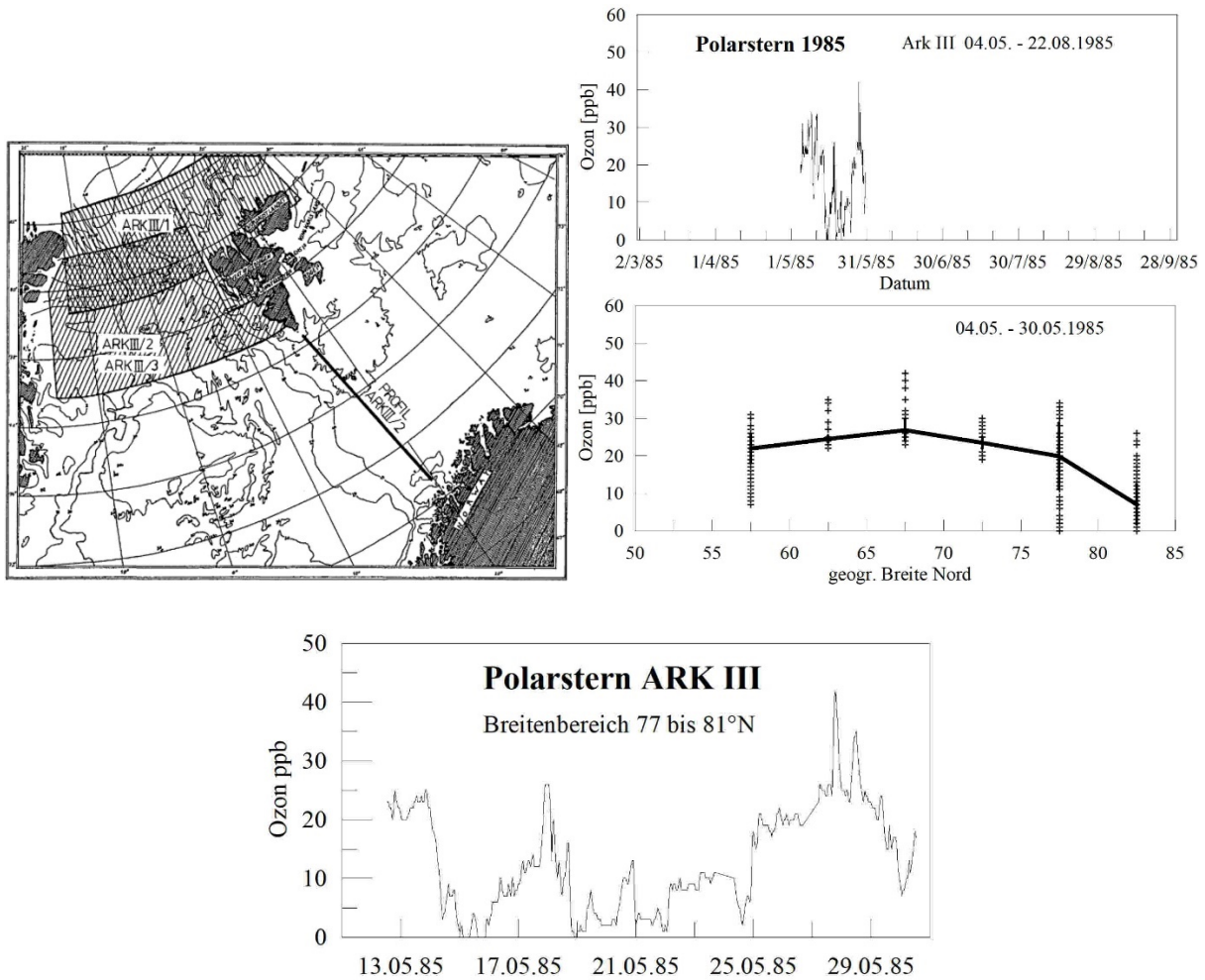


Abb. 12.43: Links: Fahrtverlauf und Operationsgebiete der Polarsternreise ARK-III. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; Mitte: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade; unten: Fahrtabschnitt im Mai mit zeitweise totalem Ozonabbau.

Anmerkungen

Eine allgemeine Abnahme des Ozons zum Pol hin ist festzustellen, wie es für hohe geographische Breiten typisch zu sein scheint. Im Zeitraum vom 15. bis 26. Mai trat zeitweise ein totaler Ozonabbau durch Reaktion von Ozon mit Brom ein, der bei strahlungsreichem Wetter möglich ist.

Das Gerät arbeitete zuverlässig.

Zu den Fahrtzielen s. Augstein et al. 1984; Gersonde (1986).

12.44 Polarstern Reise ANT-IV und ANT-V

Bremerhaven – Antarktis

05. September 1985 – 12. März 1986

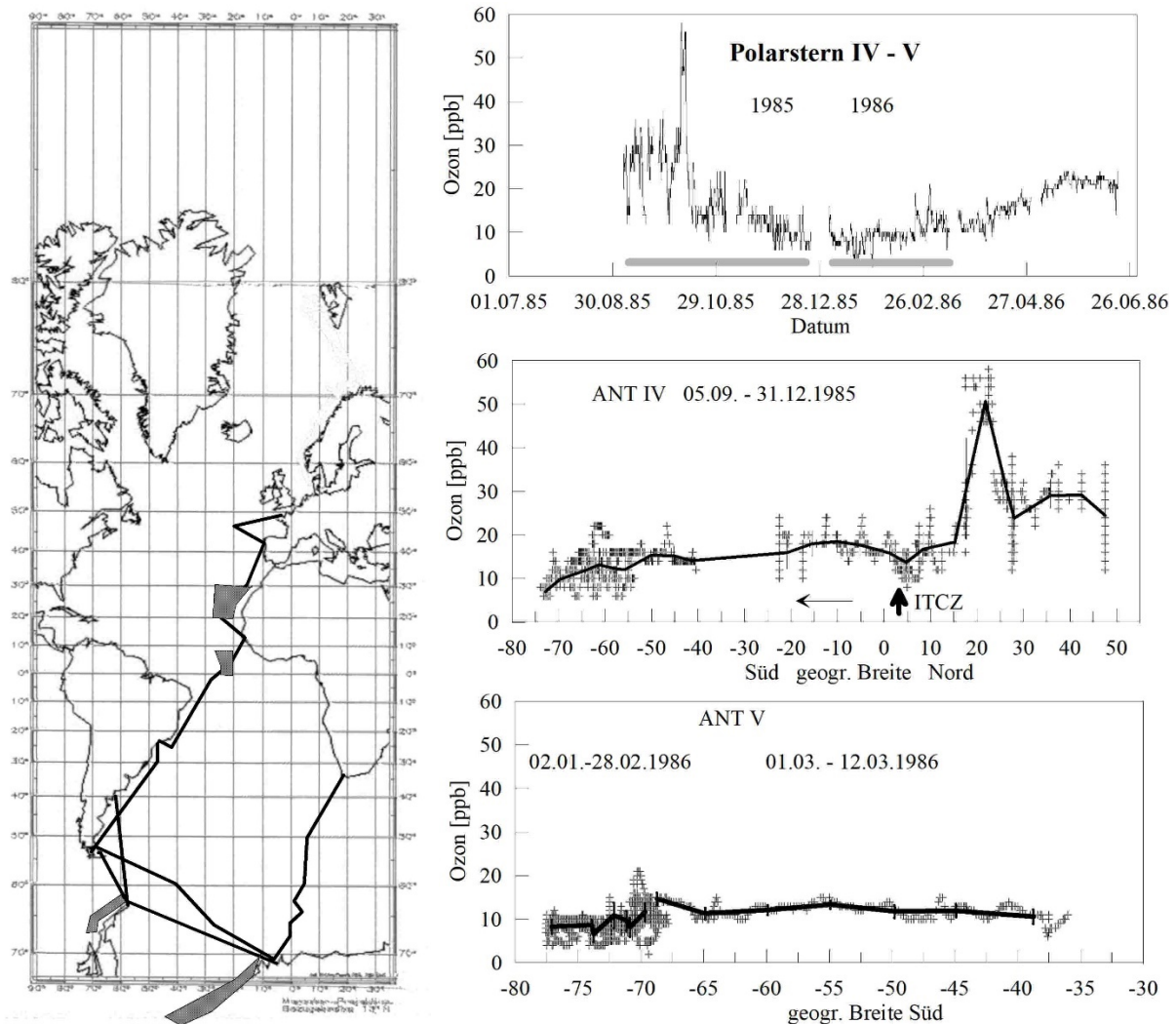


Abb. 12.44: Links: Fahrtverlauf. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Reiseziele sind in Fütterer (1986) beschrieben.

Die hohe Ozonspitze bei 20°N könnte durch eine Intrusion stratosphärischen Ozons am subtropischen Tropopausenbruch entstanden sein. Die ITCZ auf der Hinreise bei 3°N wurde am Windsprung lokalisiert.

Die untere Grafik gehört zu ANT-V, s. auch folgende Abb. 12.45.

12.45 Polarstern ANT-V

Antarktis, Weddellmeer – Kapstadt – Bremerhaven

06. Mai 1986 – 07. April 1987

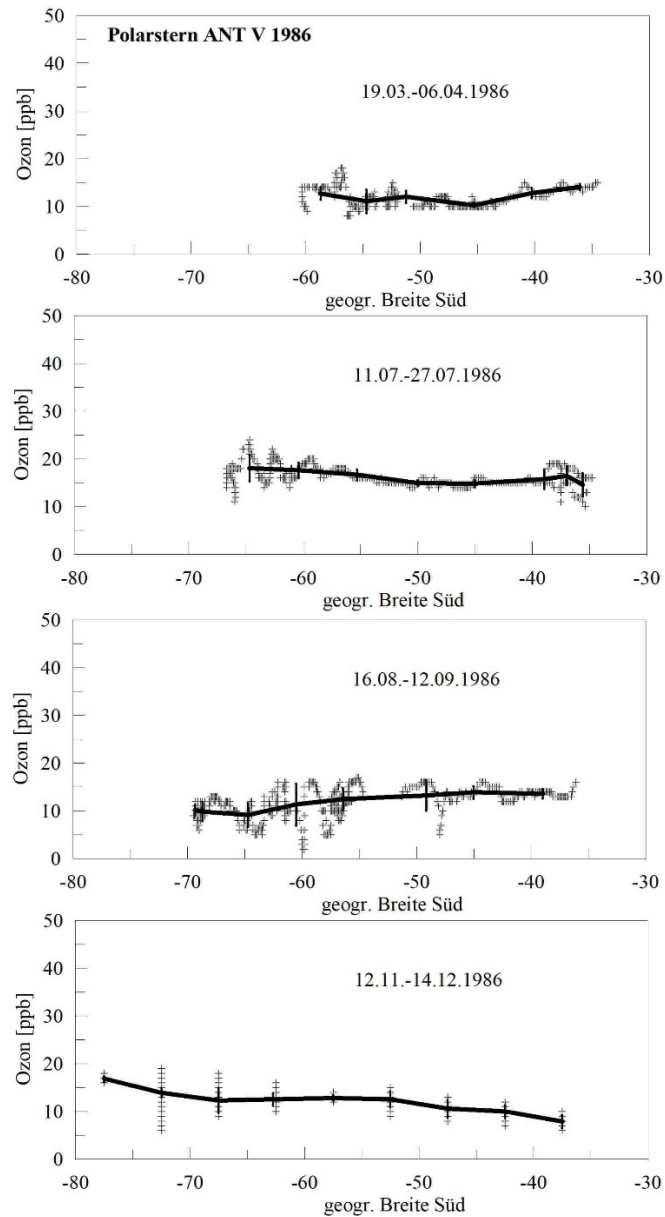


Abb. 12.45: Vier Nord-Süd-Profile im Südatlantik mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade. Zum Fahrtverlauf s. Abb. 12.44,

Anmerkungen

Polarstern blieb 1986 ganzjährig in der Südhemisphäre und nahm mehrere Schnitte von der Antarktis bis Rio oder Kapstadt vor. Längere Zeit verbrachte sie im Weddellmeer. Auf dem letzten Abschnitt Kapstadt bis Bremerhaven wurde kein Ozon gemessen. Mehrere Profile im Südatlantik zeigten nur schwache Nord-Süd-Gradienten der Ozonverteilung. Fahrtroute nach König-Langlo et al. (2006).

12.46 Polarstern Reise ARK-IV

Arktis Nordmeer – Spitzbergen

14. Mai – 02. September 1987

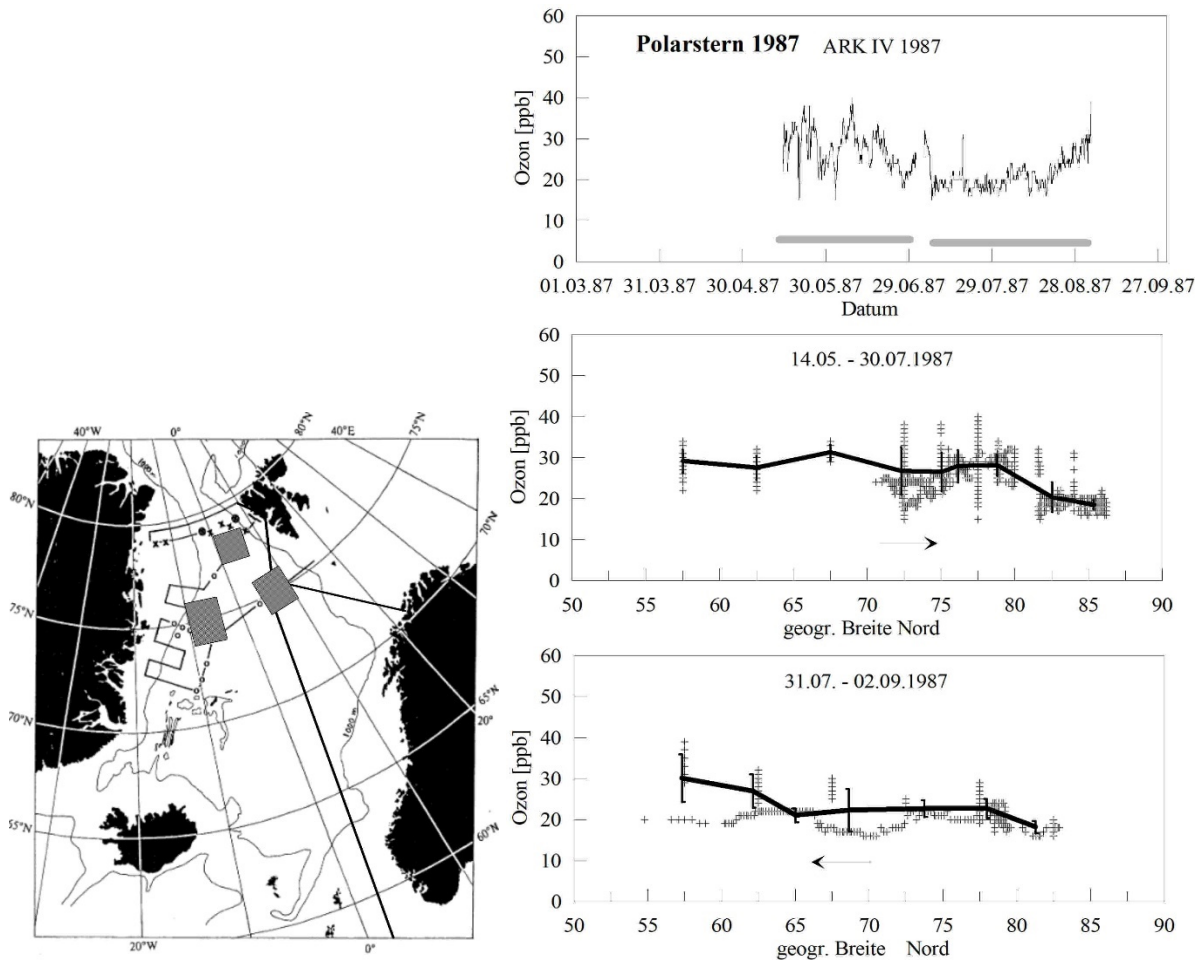


Abb. 12.46: Links: Fahrtverlauf und Operationsgebiete der Polarsternreise ARK-IV. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die mittlere Breitenverteilung des Ozonmischungsverhältnisses verläuft nur scheinbar nicht durch die Linie der Kreuze, da in das Schiff sich an mehreren Stationen jeweils längere Zeit aufhielt und dort häufig deutlich höhere Ozonmischungsverhältnisse angetroffen wurden. Während der Reise wurden ozeanographische, meeresbiologische und geowissenschaftliche Fragen untersucht (Augstein 1987).

12.47 Polarstern Reise ANT-VI

Bremerhaven – Rio Grande – Weddellmeer – Kapstadt

21. Oktober 1987 – 09. April 1988

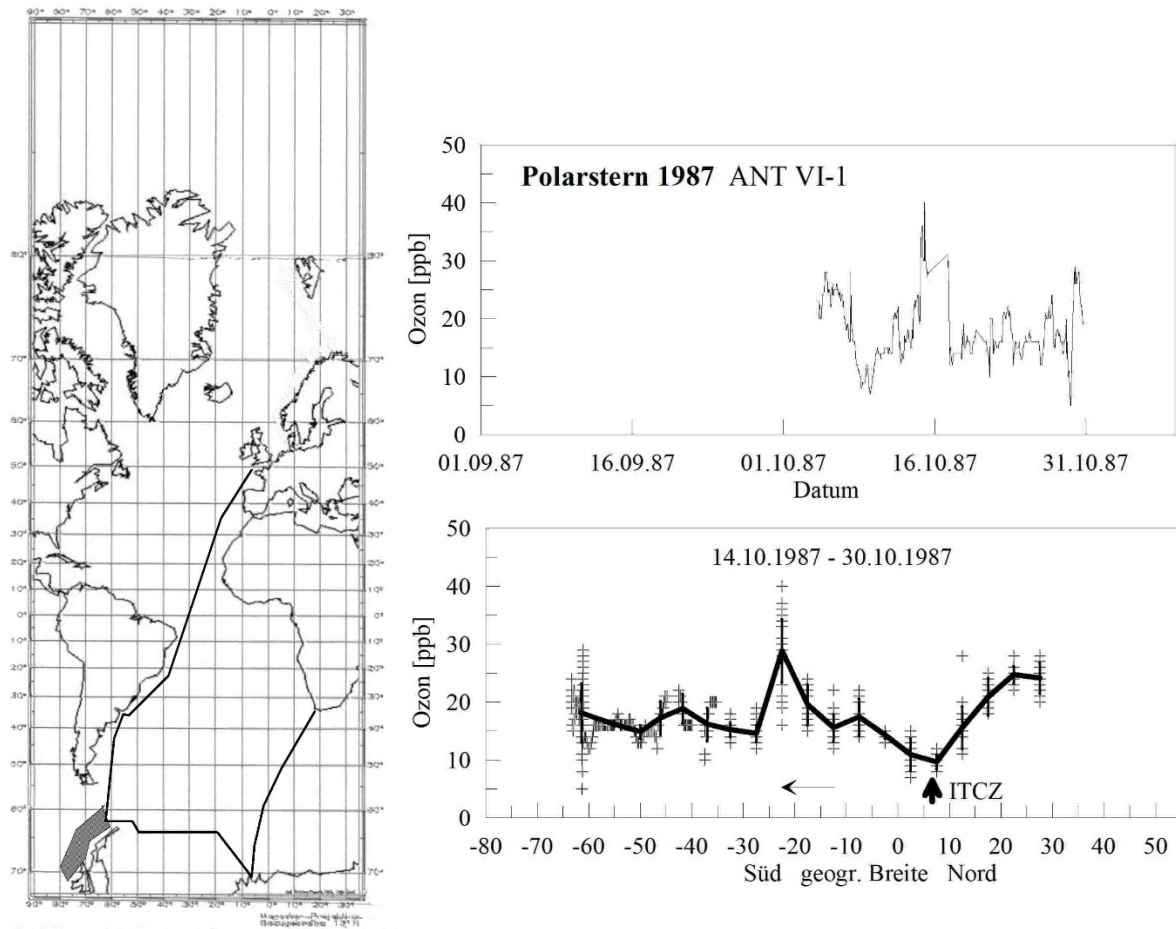


Abb. 12.47: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ANT-VI. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Es ist möglich, dass die hohe Ozon-Spitze bei 22,5°S sowohl von einer stratosphärischen Intrusion als auch auf Ferntransport aus Gebieten mit Biomassenverbrennung verursacht sein kann. Das Maximum der Biomassenverbrennung liegt im September bis November (Fütterer 1988; Krishnamurti et al. 1993). Zur Klärung der Beiträge aus beiden Quellen ist eine aufwändigere Analyse erforderlich.

12.48 Polarstern Reise ARK-VII

Bremerhaven – Ostgrönland

08. Juni – 03. Oktober 1990

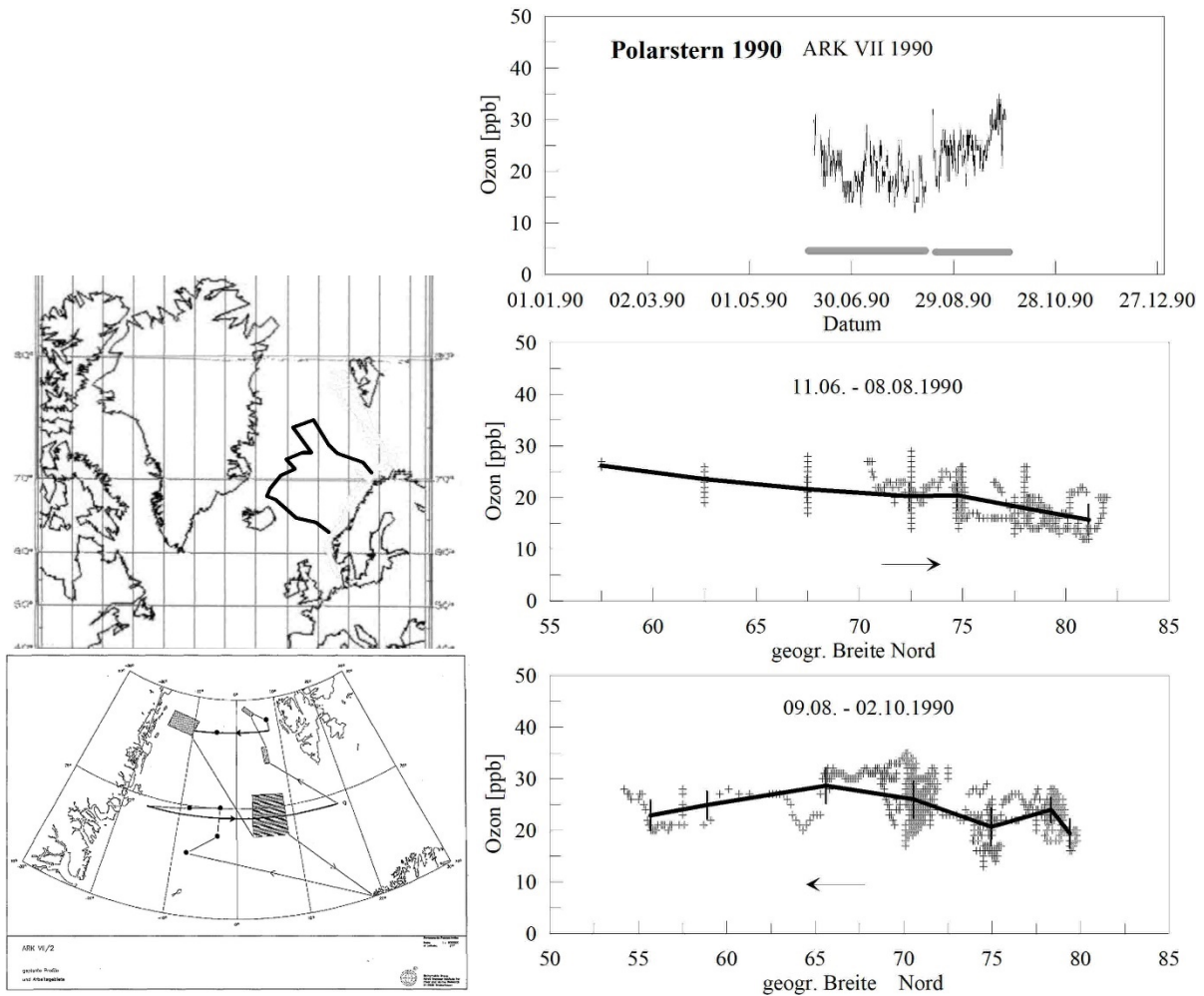


Abb. 12.48: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ARK-VII. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zu den Fahrtzielen s. Krause et al. (1991). Die Nord-Süd-Profile zeigen die auch bei anderen Reisen gefundene Abnahme der Ozonmischungsverhältnisse nach Norden in hohen geographischen Breiten hin.

12.49 Polarstern Reise ANT-IX

Bremerhaven – Punta Arenas – Antarktis – Kapstadt – Bhv

20. Oktober 1990 – 13. Mai 1991

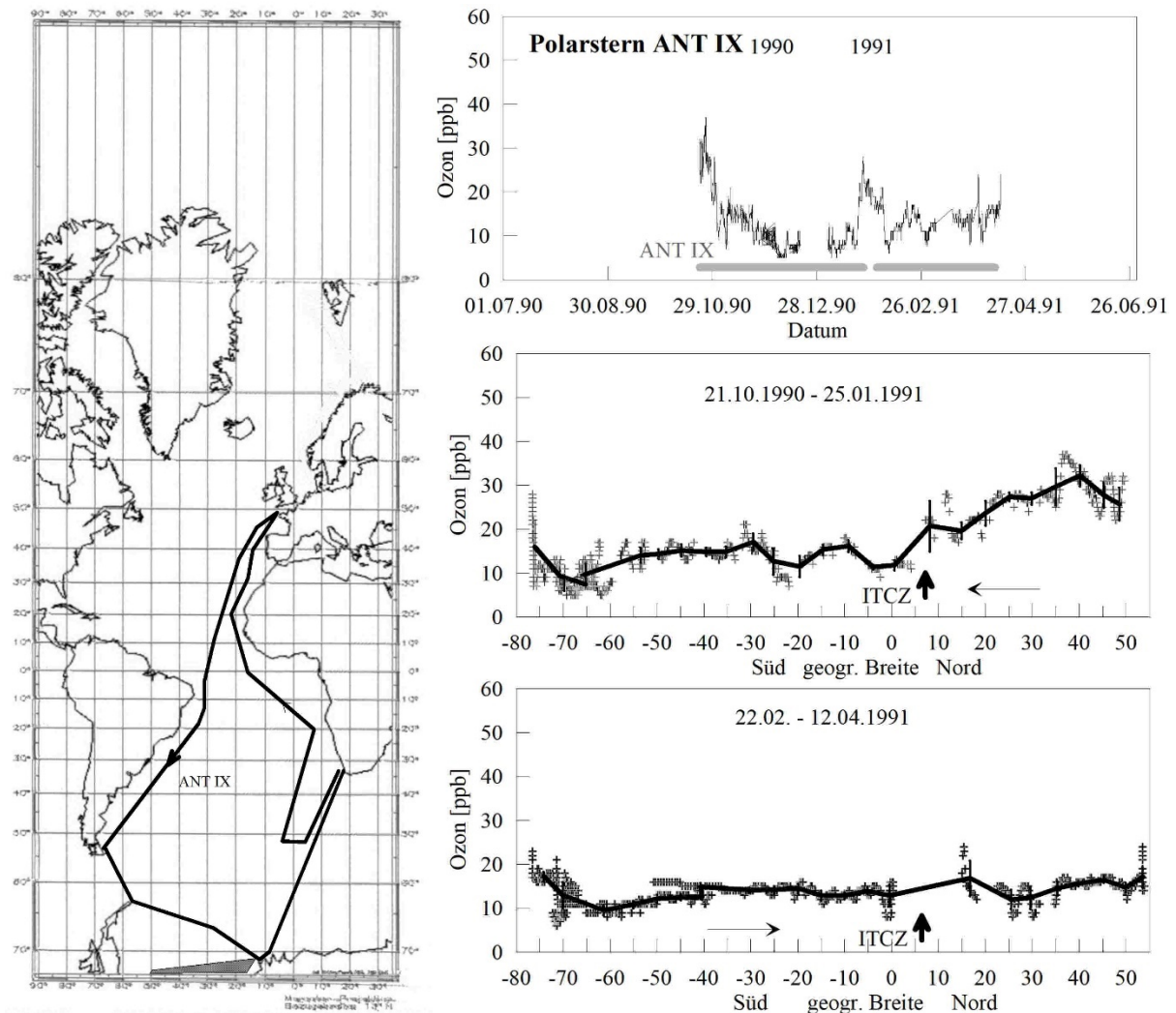


Abb. 12.49: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ANT-IX. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auf dem 1. Fahrtabschnitt zeigte die Nordhemisphäre höhere Ozonmischungsverhältnisse als die Südhemisphäre. An der ITCZ wurde etwas erhöhte Ozonmischungsverhältnisse gemessen, südlich davon wurde ein Ozonminimum beobachtet. Letzteres kann durch photochemischen Ozonabbau bei intensiver Einstrahlung und geringer Vertikaldurchmischung entstehen. Auf der Rückreise war das Ozonmischungsverhältnis in allen Breiten gering und es zeigten sich keine Unterschiede zwischen Nord- und Südhemisphäre. Auf der Rückreise waren die Ozonmessungen in der ITCZ durch Schiffsabgase unbrauchbar. Die Lage der ITCZ wurde angegeben in: Bathmann et al. (1992). Während der Hinreise wurden vom Fraunhofer Institut in Garmisch-Partenkirchen H_2O_2 und Hydroperoxid gemessen (Slemr and Tremmel 1994).

12.50 Polarstern Reise ARK-VIII

Bremerhaven – Spitzbergen – Barentssee – Tromsø – Franz-Josef-Land

01. Juni – 08. Oktober 1991

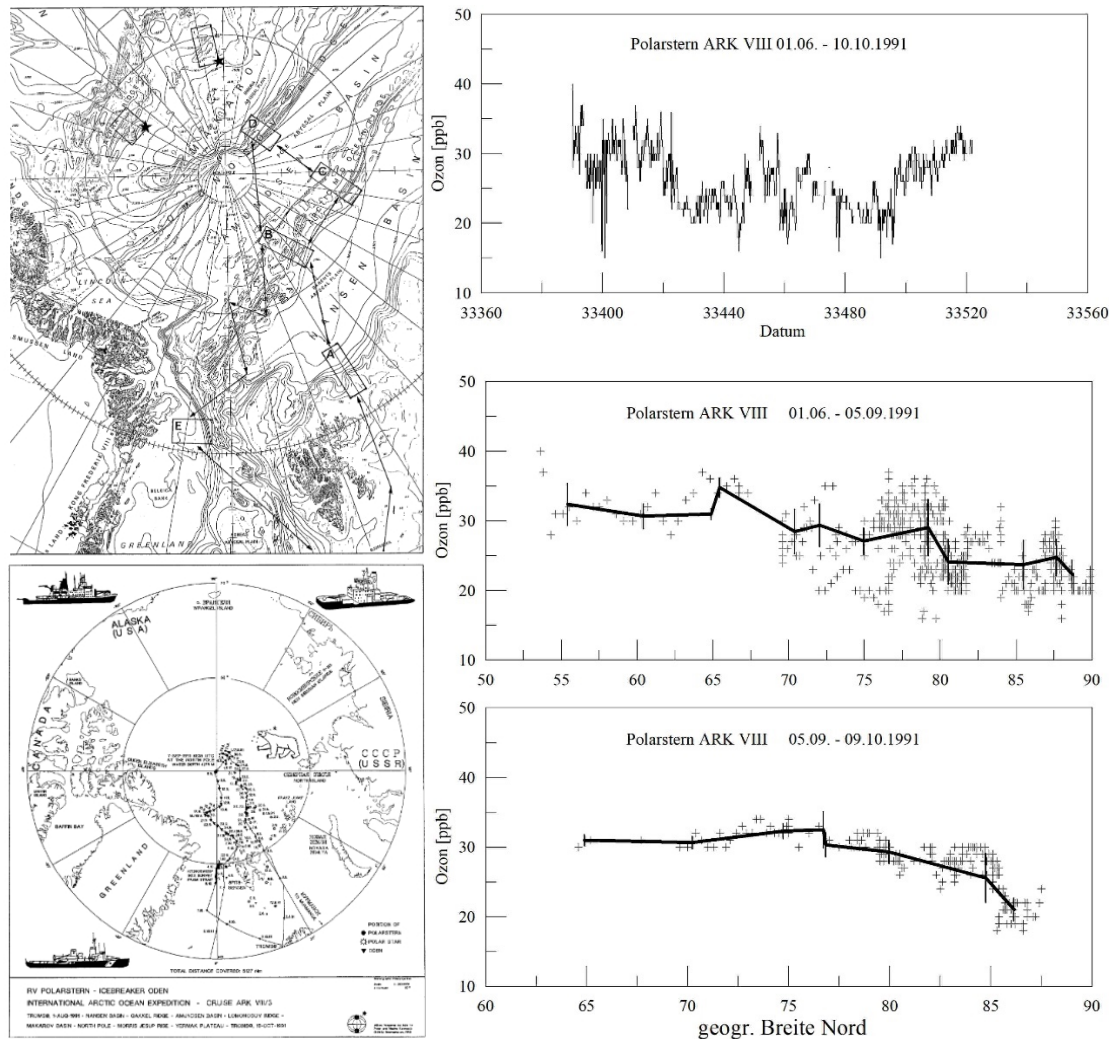


Abb. 12.50: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ARK-VIII. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auf dieser Fahrt wurde der Nordpol angefahren.

Abschnitt 1: Bremerhaven – Tromsø – Grönlandsee 1.-19.6.1991;

Abschnitt 2: Tromsø rund um Spitzbergen 20.6.-30.7.1991;

Abschnitt 3: Franz Josefs Land – Barentssee – Lomonossow-Rücken 2.8.-1.10.1991; Bremerhaven 8.10.1991.

Zwischen 75 und 80°N wurde zeitweise Luft vermessen, in der ein merklicher Ozonabbau durch Reaktion mit Brom stattgefunden hat.

12.51 Polarstern Reise ANT-X

Bremerhaven – Punta Arenas – Antarktis – Weddellmeer - Kapstadt

14. November 1991 – 08. Dezember 1991 (Anreise) – 21. Februar 1993

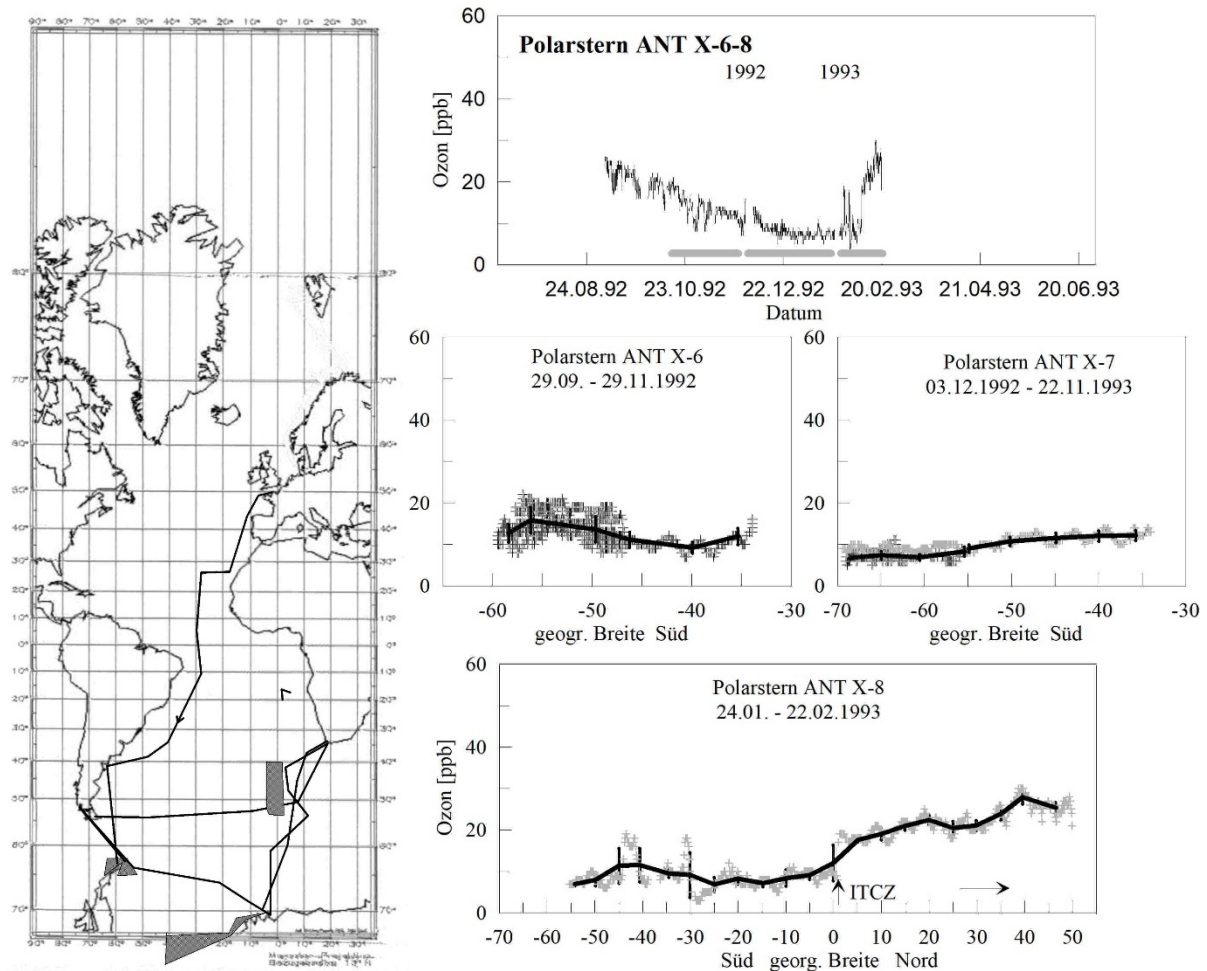


Abb. 1: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ANT-X. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; Mitte: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade im Südatlantik; unten: Rückreise Ushuaia - Bremerhaven.

Anmerkungen

Auf den Fahrabschnitten 6 und 7 wurden für den Südfrühling und Südsommer typische geringe Ozonmischungsverhältnisse beobachtet, bei insgesamt wenig ausgeprägten Nord-Süd-Gradienten. Im Südatlantik traten bei der Rückreise zwei markante Ozonspitzen auf bei 32°S und 40-45°S, die auf stratosphärische Intrusionen bei Tropopausenfaltungen zurückzuführen sein dürften. Photochemische Ozonproduktion aus Biomassenverbrennung scheidet zu dieser Jahreszeit aus. An der ITCZ zeigte sich ein plötzlicher Ozonanstieg um etwa 12 ppb bei 1°N. Die Bordwetterwarte registrierte einen markanten Windsprung und ein starkes Gewitter mit hoher Niederschlagsintensität (Bathmann et al. 1994, S. 201). Auf dieser Reise nahm das AWI regelmäßige Ozonsondierungen vor (Weller et al. 1996).

12.52 Polarstern Reise ARK-IX

Bremerhaven – Spitzbergen – Jan Mayen – Framstraße – Laptewsee – Tromsø

23. Juni – 05. Oktober 1993

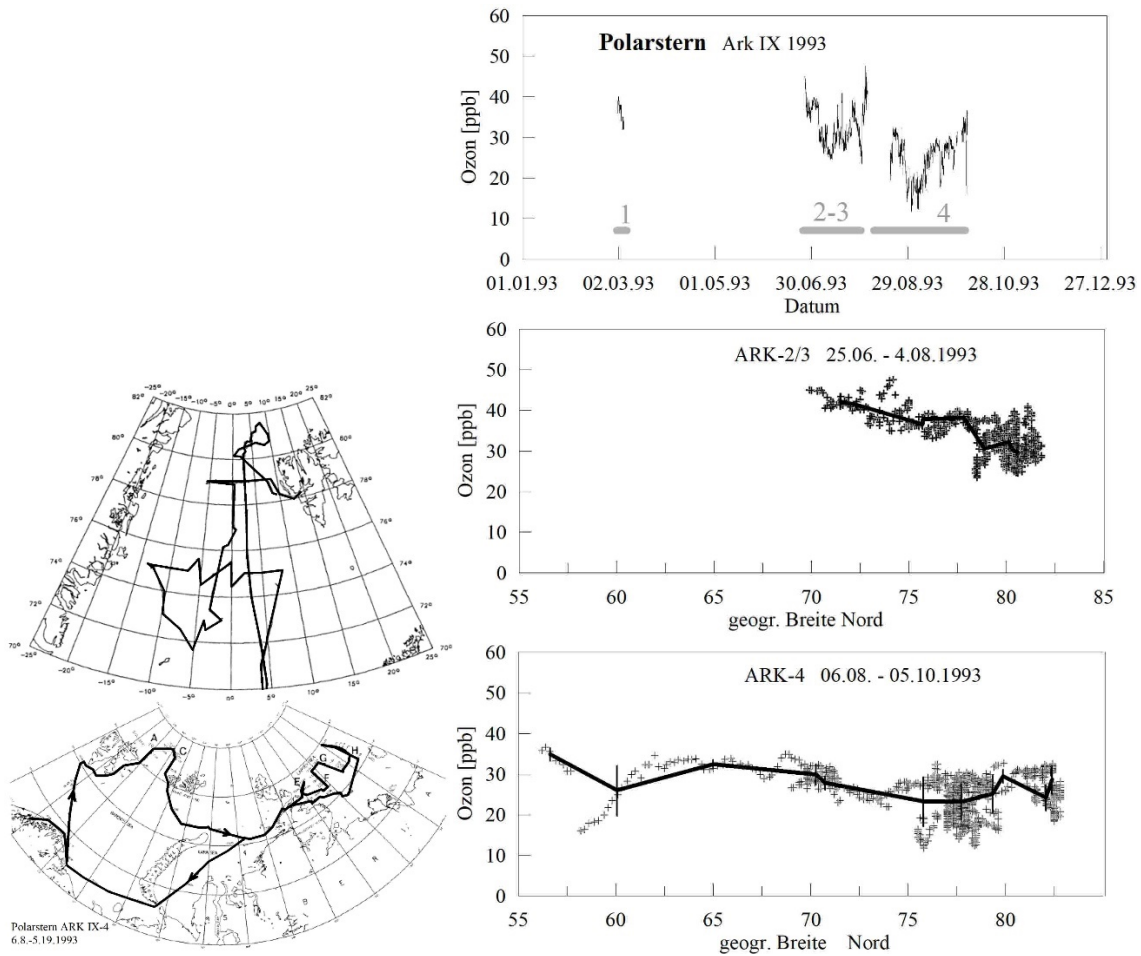


Abb. 12.52: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ARK-IX. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Karte nach (Fütterer 1994).

Vom ersten Fahrtabschnitt liegen nur 2 Tage mit brauchbaren Messungen vor.

Auf dem 2. und 3. Fahrtabschnitt nahm das Ozonmischungsverhältnis nach Norden hin ab, wie es auch auf anderen Reisen festzustellen war.

Der 4. Fahrtabschnitt verlief im Seegebiet östlich von Spitzbergen in der Laptewsee. Hier traten Ende August und Anfang September relativ niedrige Ozonmischungsverhältnisse auf (76-80°N). Während dieser Zeit herrschte sonniges Wetter (Fütterer 1994, S. 14 f.), in dieser Woche gab es also günstige Bedingungen für einen Ozonabbau durch Brom. Sonst herrschte nach dem Bericht der Bordwetterwarte überwiegend trübes Wetter. Auf der Rückreise kam es in der Nordsee zu einem starken Rückgang des Ozonmischungsverhältnisses mit anschließendem sprunghaftem Anstieg nach einem Kaltfrontdurchgang (s. Abb. ARK-IX-4 bei 56°N).

12.53 Polarstern Reise ANT-XI

Bremerhaven – Kapstadt – Punta Arenas – Antarktis – Kapstadt – Bremerhaven

18. Oktober 1993 – 17. Juni 1994

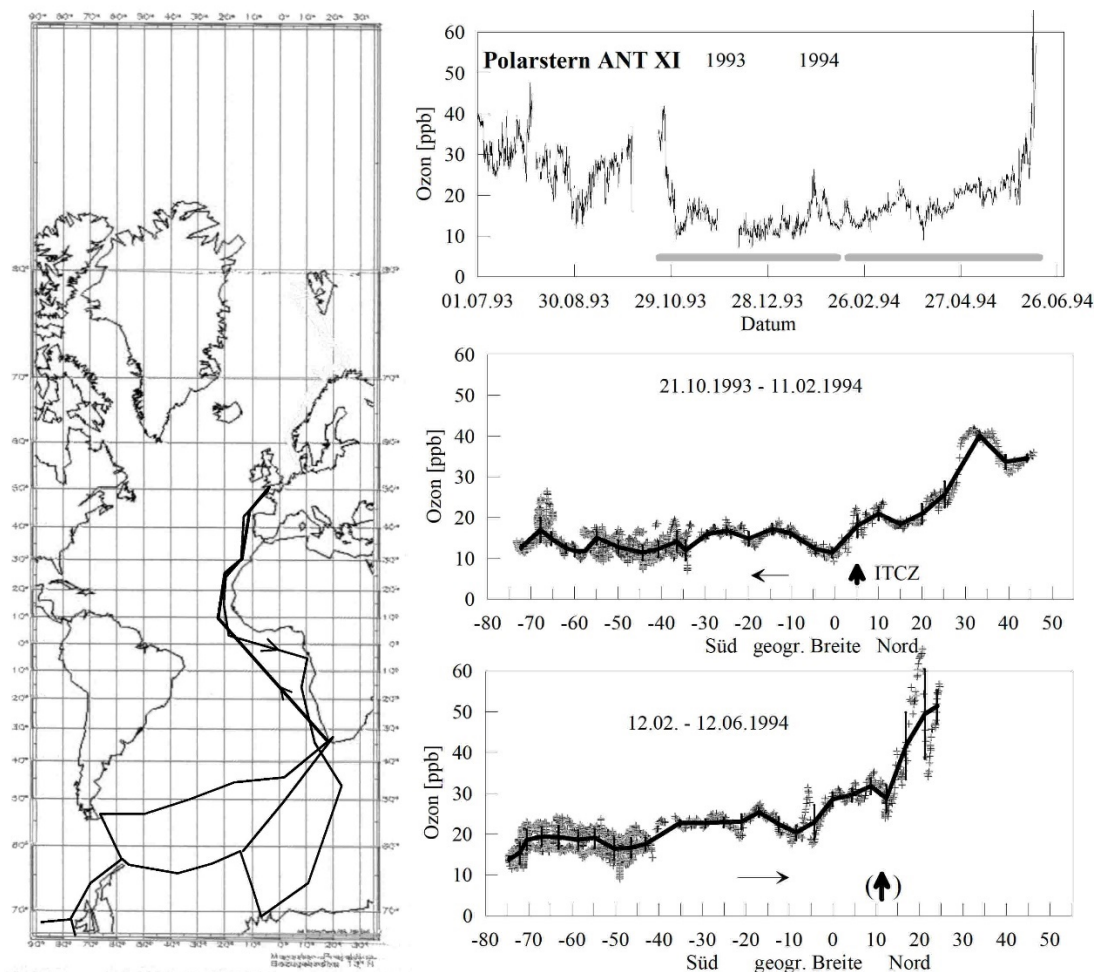


Abb. 12.53: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ANT-XI. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

In der Nordhemisphäre traten deutlich höhere Ozonmischungsverhältnisse auf als in der Südhemisphäre. Auffallend ist eine Ozonspitze bei 20°N auf der Rückreise, die wahrscheinlich natürlichen Ursprungs ist, weil photochemische Ozonbildung aus Biomassenverbrennung in Afrika zu dieser Jahreszeit entfällt.

An der ITCZ bei 6°N (Hinreise) trat eine kleine Ozonspitze auf, die wahrscheinlich durch starken Vertikalaustausch verursacht wurde. Dabei wird ozonreiche Luft aus der oberen Troposphäre rasch zur Grenzschicht transportiert. Die Lage der ITCZ konnte für die Rückreise nicht ermittelt werden, sie liegt zu dieser Jahreszeit typischerweise bei 10 oder 12°N. Nördlich davon stieg das Ozonmischungsverhältnis deutlich an. Ozonsondierungen und eine parallele Messung des oberflächennahen Ozons wurden vom AWI ausgeführt (Weller et al. 1996). Hier wurde die Lage der ITCZ für Mai-Juni 1994 bei 7°N angegeben.

12.54 Polarstern Reise ARK-X

Bremerhaven – Ostgrönland – Framstraße – Tromsø

06. Juli – 06. Oktober 1994

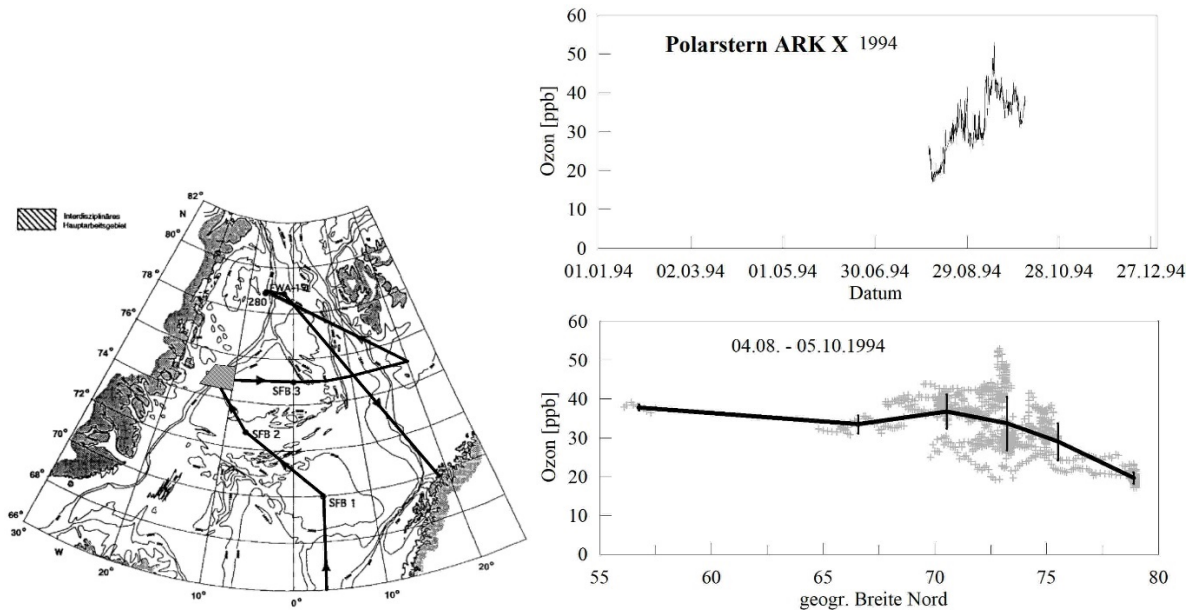


Abb. 12.54: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ARK-X. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Karte mit der Fahrtroute nach Hubberten (1994).

Nach Norden nahm das Ozonmischungsverhältnis im Mittel ab, was als typisch für hohe geographische Breiten gelten kann. Die hohe Variabilität bei 73°N ist meteorologisch bedingt und auf stratosphärische Intrusionen zurückzuführen.

12.55 Polarstern Reise ANT-XII

Bremerhaven – Punta Delgada – Antarktische Halbinsel – Punta Arenas – Halley – Kapstadt – Recife

18. Oktober 1994 – 11. Juni 1995

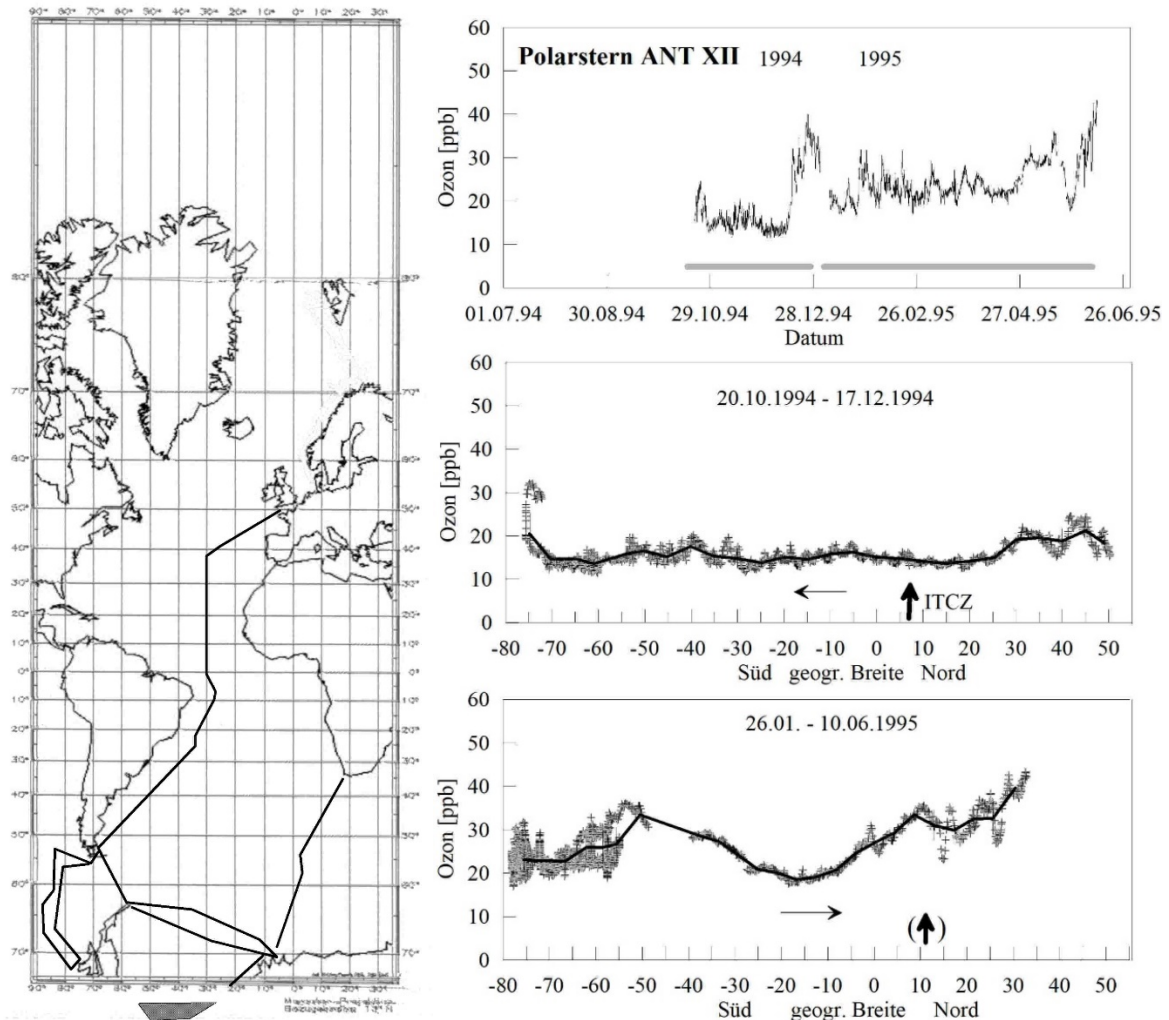


Abb. 12.55: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ANT-XII. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Während der Hinreise zeigte das Ozonmischungsverhältnis ein ähnliches Niveau in beiden Hemisphären; über einen weiten Fahrabschnitt waren deutliche Tagesgänge festzustellen.

An der ITCZ bei 6,5°N auf dem 1. Fahrabschnitt zeigte sich keine Auffälligkeit im Ozon, denn sie war nur schwach ausgeprägt (Kattner and Fütterer 1995, S. 5). In der Südhemisphäre wurden deutlich erhöhte Rußkonzentrationen gemessen, die der Biomassenverbrennung in Südafrika zugeschrieben wurden. In einer Regenprobe bei 27°S wurde ein pH-Wert von 4,2 gemessen, wie er sonst typisch für Industriegebiete ist. Auch hier zeigte sich das Ozon nicht erhöht, so dass auf keine merkliche photochemische Ozonbildung geschlossen werden kann.

12.56 Polarstern Reise ARK-XI

Bremerhaven – Murmansk – Laptewsee – Tromsø – Framstraße – Bremerhaven

07. Juli – 29. Oktober 1995

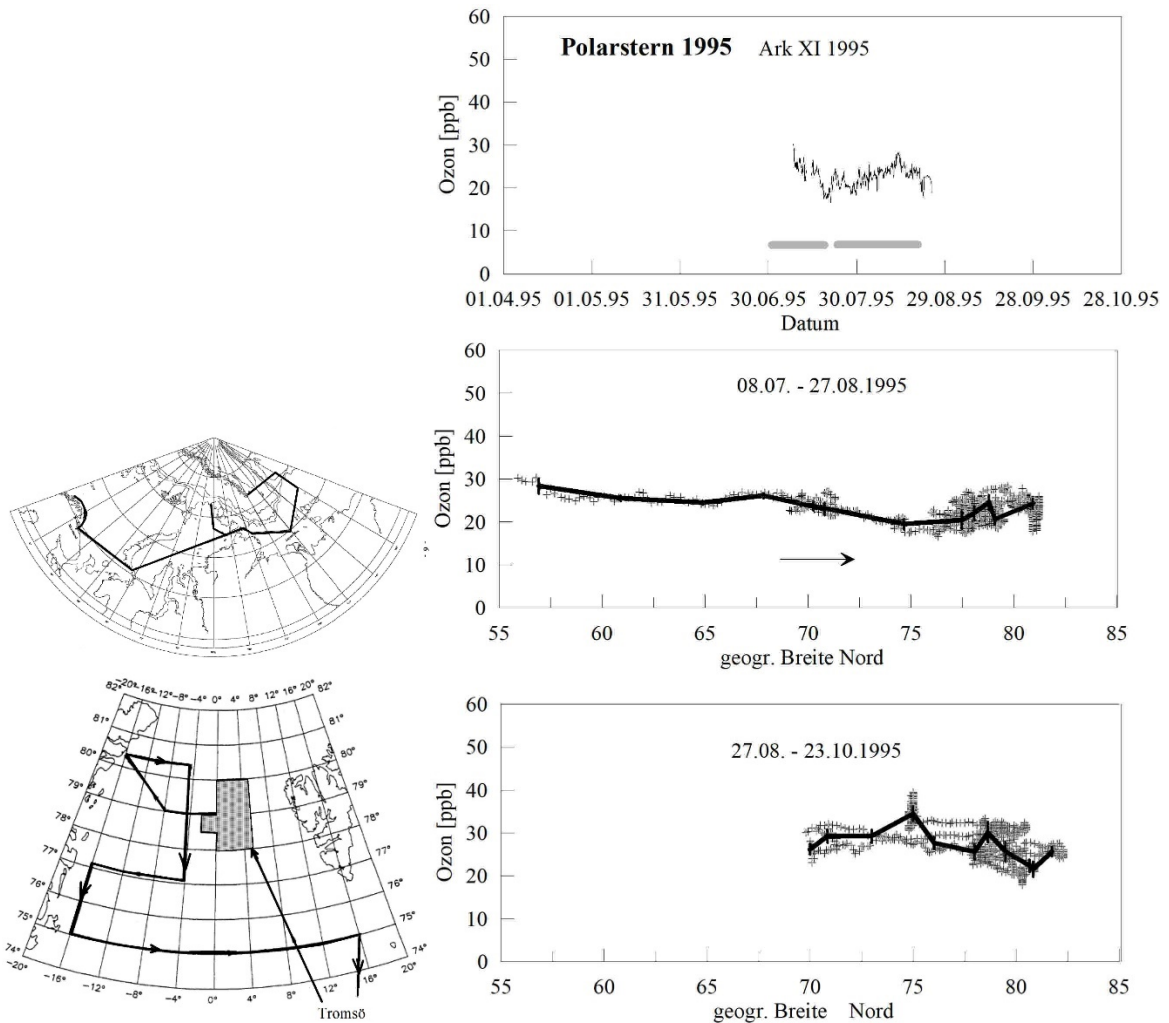


Abb. 12.56: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ARK-XI. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis zeigte keine großen Variationen.

12.57 Polarstern Reise ANT-XIII

Bremerhaven – Kapstadt – Atka-Bucht – Punta Arenas – Bremerhaven

29. Oktober 1995 – 21. Juni 1996

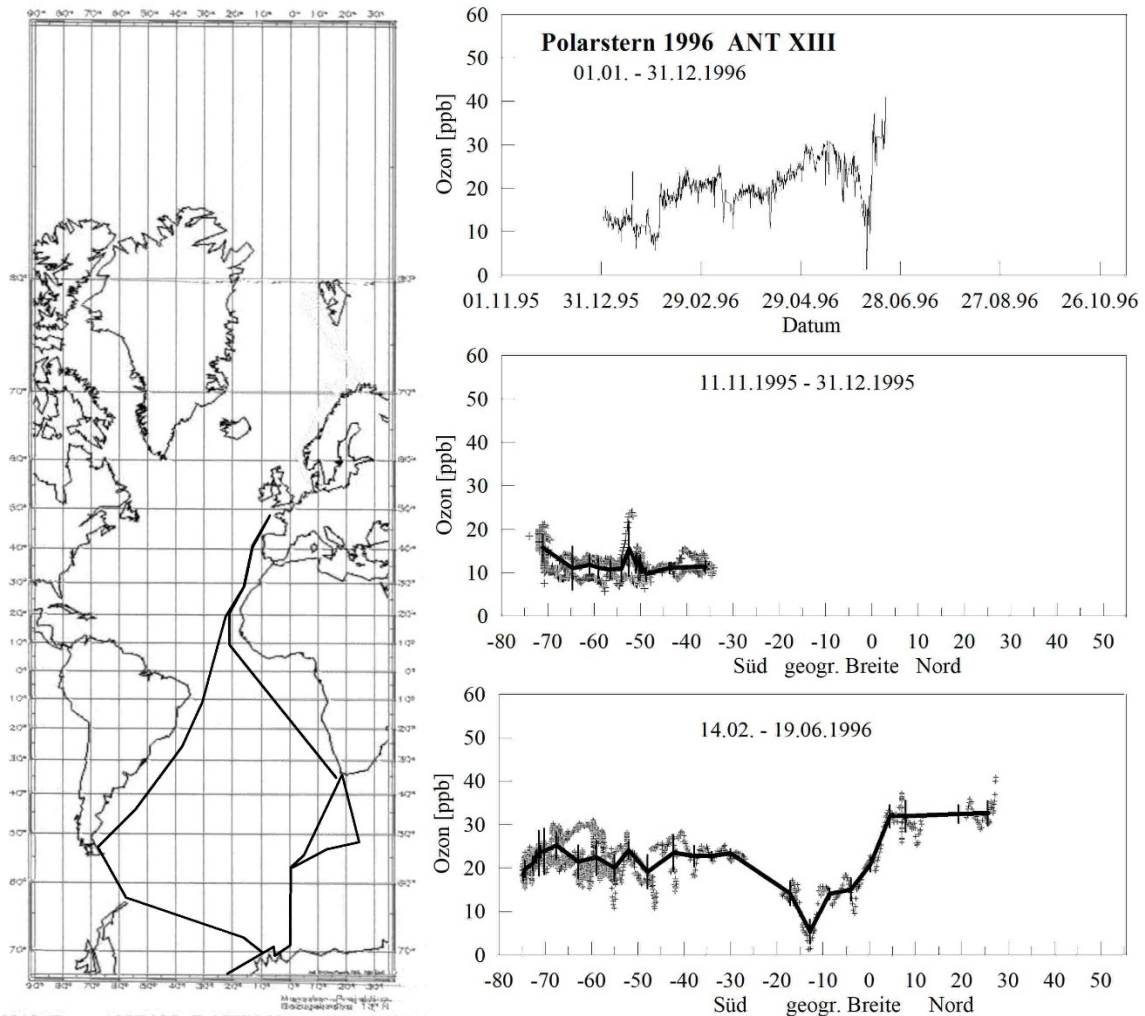


Abb. 12.57: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ANT-XIII. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Bei 13°S sank das Ozonmischungsverhältnis auf fast 0 ppb ab. Solche Situationen können auftreten, wenn bei hoher Sonneneinstrahlung und geringer Vertikaldurchmischung Ozon nahe der Oberfläche photochemisch abgebaut wird. Die ITCZ ist bei etwa 6°N zu vermuten, exakte Angaben wurden nicht gefunden.

12.58 Polarstern Reise ARK XII

Bremerhaven – Murmansk – Lomonossow-Rücken – Murmansk – Bremerhaven

12. Juli – 23. September 1996

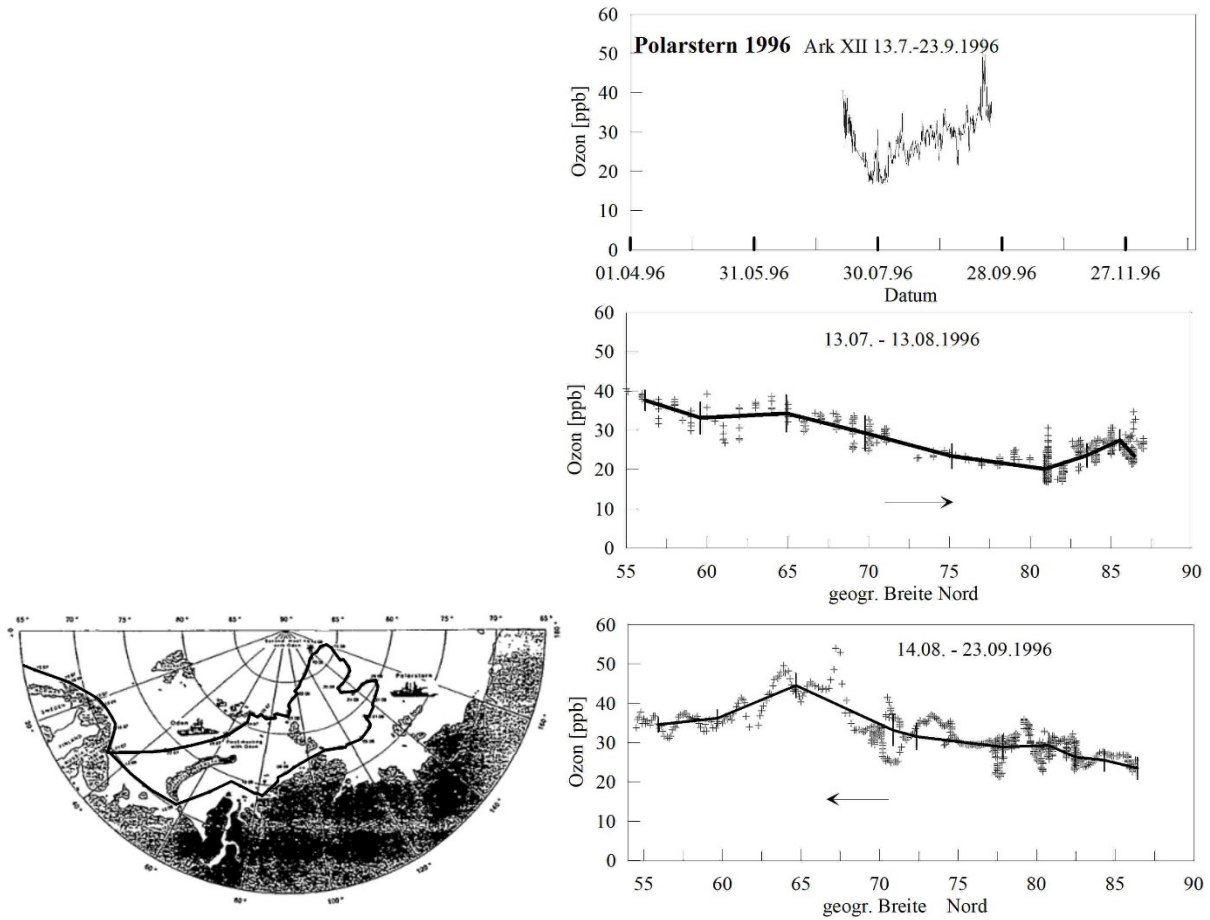


Abb. 12.58: Links: Fahrtverlauf der Polarsternreise ARK-XII. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die im Nordpolarmeer nördlich von Russland verlaufende Fahrtroute, auf der zahlreiche, größtenteils im Polareis liegende Stationen angefahren wurden, erreichte mit 86,4°N ihren nördlichsten Punkt (Augstein 1997). Das Ozonmischungsverhältnis verringerte sich im Mittel mit wachsender geographischer Breite. Das Ozonmischungsverhältnis zeigte insgesamt keine große Unruhe.

12.59 Walther Herwig Reise Nr. 30A B

Bremerhaven – Buenos Aires – Antarktische Halbinsel

08. Oktober 1977 – 27. Oktober 1977; 08. Januar – 07. Februar 1978

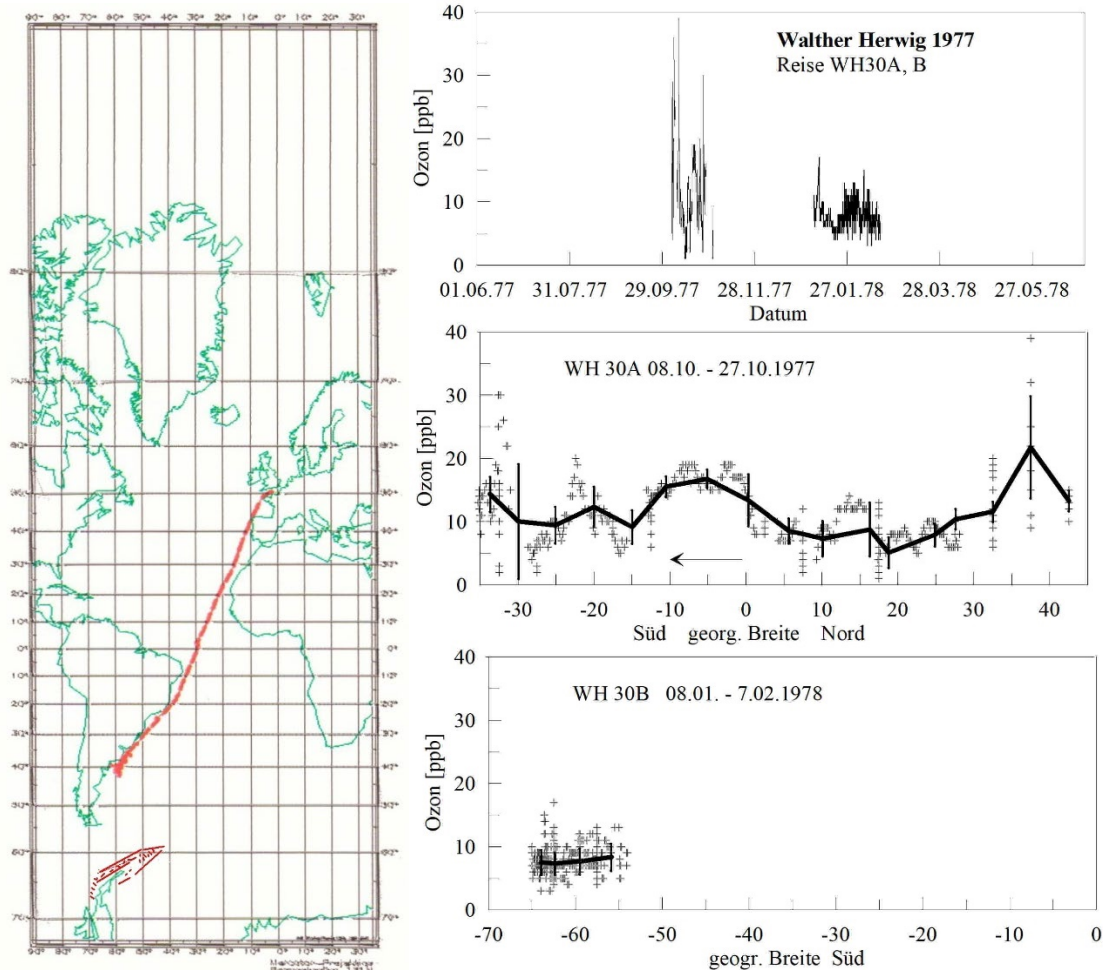


Abb. 12.59: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 30 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Reise führte von Buenos Aires aus weiter zur Antarktischen Halbinsel, um Krill-Vorkommen zu erforschen. Auffallend an der Hinreise sind die geringen Ozonmischungsverhältnisse in der Nord- im Vergleich zur Südhemisphäre. Das Ozon sank bei 18° und 8°N fast auf Null ab, wahrscheinlich bedingt durch photochemischen Ozonabbau bei hoher Einstrahlung und geringer Vertikaldurchmischung.

Auf dieser Reise wurde gasförmiges Quecksilber gemessen (Temme et al. 2003).

12.60 Walther Herwig Reise WH 31

Rio de Janeiro – Bremerhaven

26. November – 05. Dezember 1978

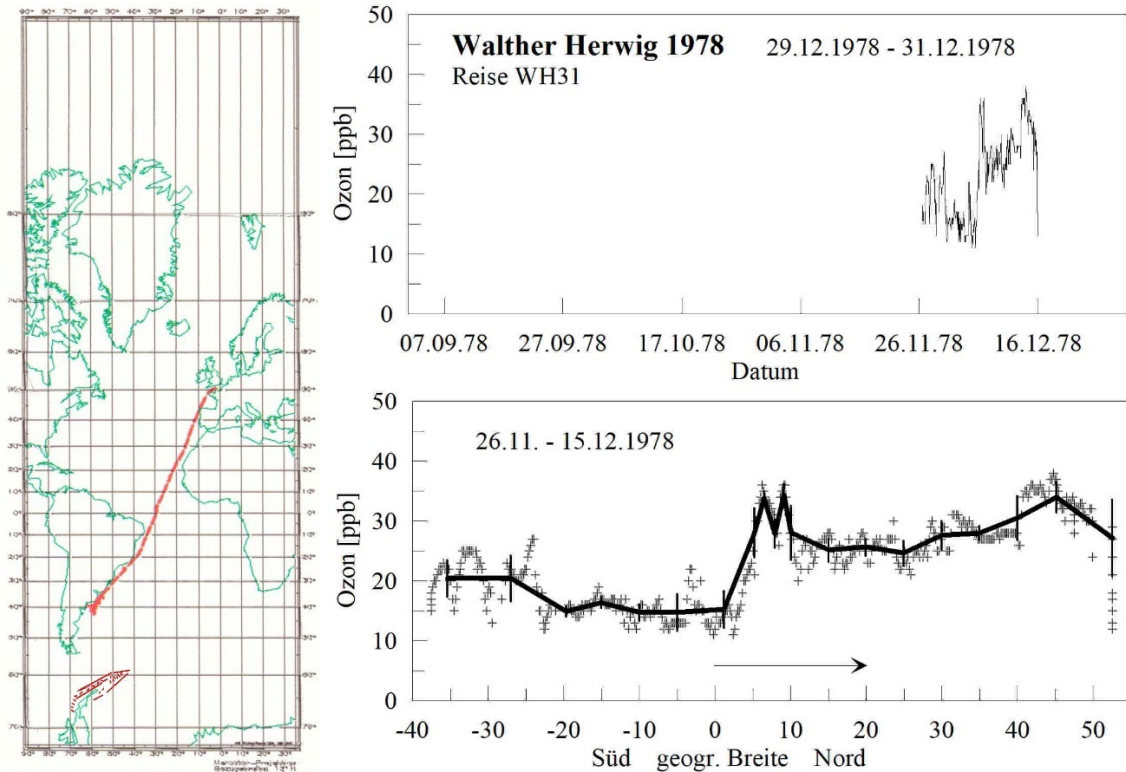


Abb. 12.60: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 31 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Nordhemisphäre wies deutlich höhere Ozonmischungsverhältnisse auf als die Südhemisphäre. Zur Lage der ITCZ fanden sich keine Angaben, der Jahreszeit entsprechend kann sie bei 5°N gelegen haben.

Vom MPI für Chemie in Mainz wurde gasförmiges Quecksilber gemessen (Temme et al. 2003).

12.61 Walther Herwig 44. Reise

Bremerhaven – Rio de Janeiro – Antarktische Halbinsel

28. Dezember 1980 – 13. April 1981

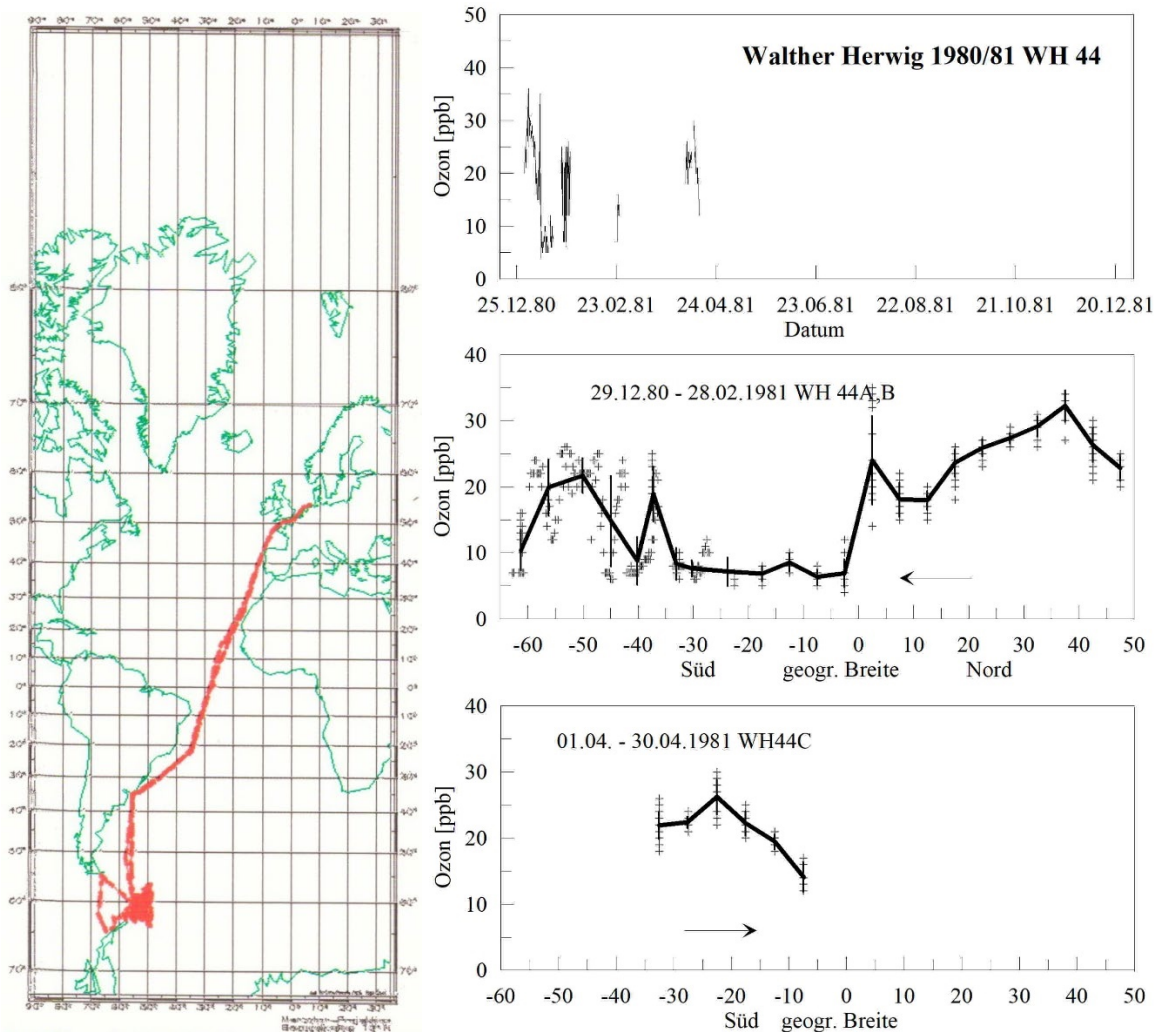


Abb. 12.61: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 44 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Untersuchung von Zooplankton um die Antarktische Halbinsel (Piatkowski and Klages 1983). Zu Lage der ITCZ fehlen genaue Angaben, aus klimatologischer Sicht ist sie bei 2-3°N zu erwarten. Südlich davon war ein starker Rückgang des Ozonmischungsverhältnisses zu verzeichnen.

Auf der Rückreise war das Ozongerät nur bis 5°S betriebsklar.

12.62 Walther Herwig Reise Nr. 67

West-Grönland – Neufundland – Ost-Grönland – Island

09. Oktober – 24. November 1984

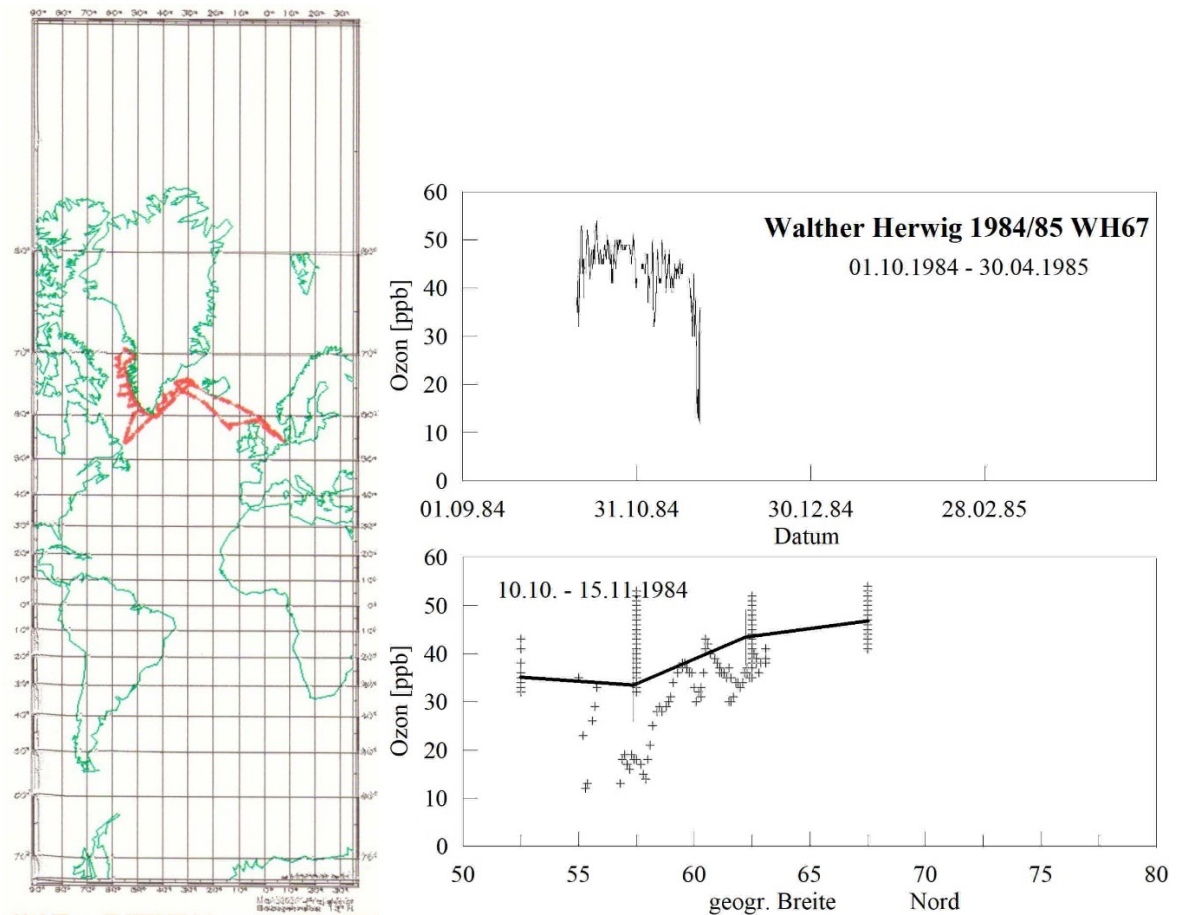


Abb. 12.62: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 67 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die zum Teil hohe Variabilität des Ozons zwischen 57 und 63°N war durch stratosphärische Intrusionen bedingt.

12.63 Walther Herwig Reise Nr. 68

Antarktis

29. November 1984 – 10. Mai 1985

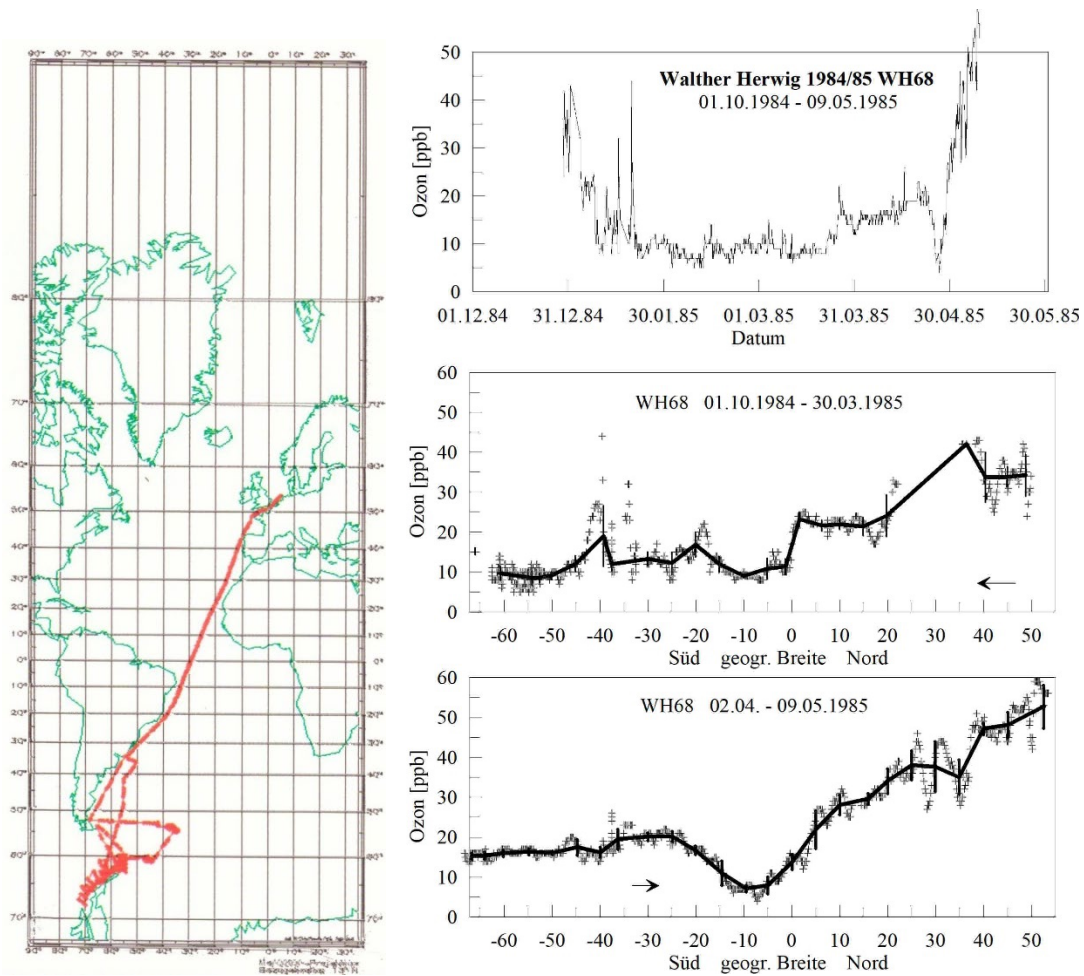


Abb. 12.63: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 68 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zur Lage der ITCZ liegen keine Angaben vor. Auffallend ist das Ozonminimum bei 8°S auf der Rückreise. Hier kann bei Bedingungen mit geringem Vertikalaustausch und hohen Sonneneinstrahlung Ozon durch Photolyse abgebaut worden sein.

12.64 Walther Herwig Reise Nr. 82

Nord-östl. Zentralatlantik

09. April – 19. Mai 1987

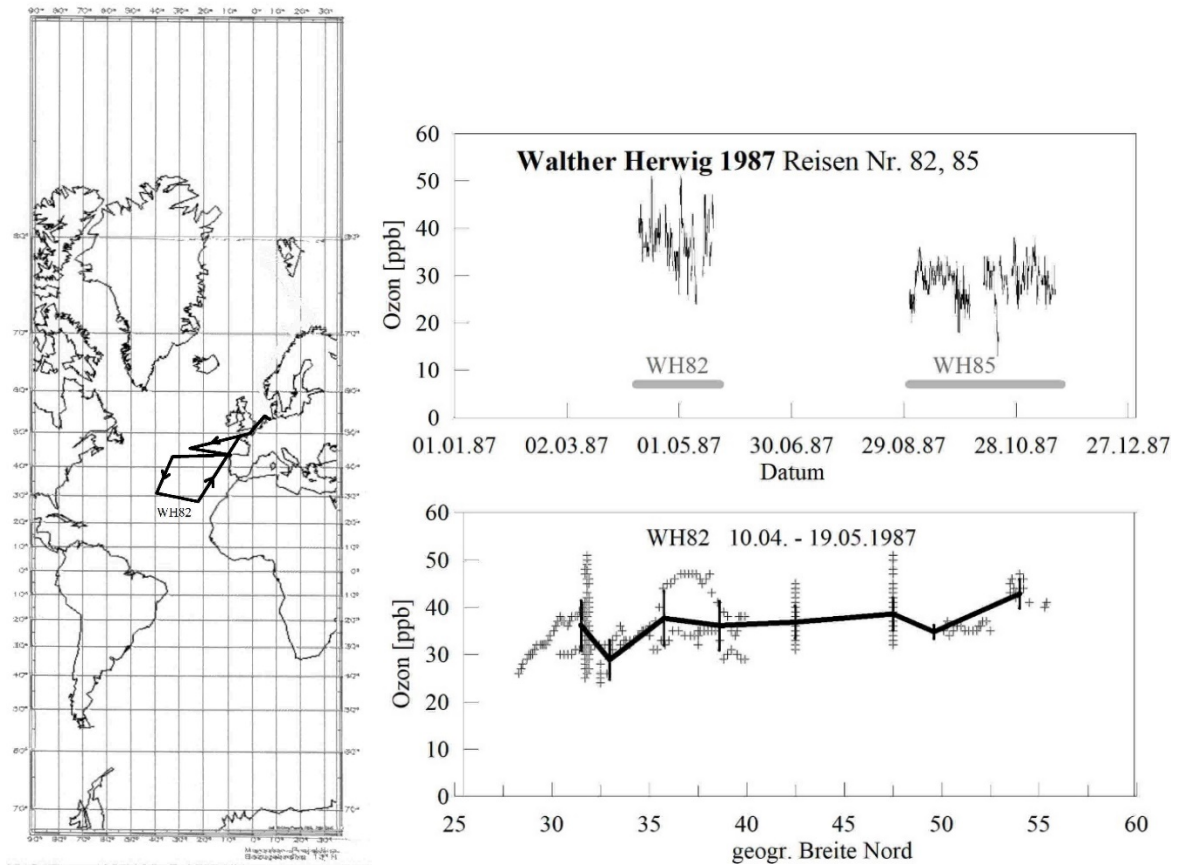


Abb. 12.64: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 82 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis zeigte deutliche Variationen, die meteorologisch bedingt und auf stratosphärische Intrusionen zurückzuführen waren.

12.65 Walther Herwig Reise Nr. 85

West-Grönland – Island

01. September – 19. November 1987

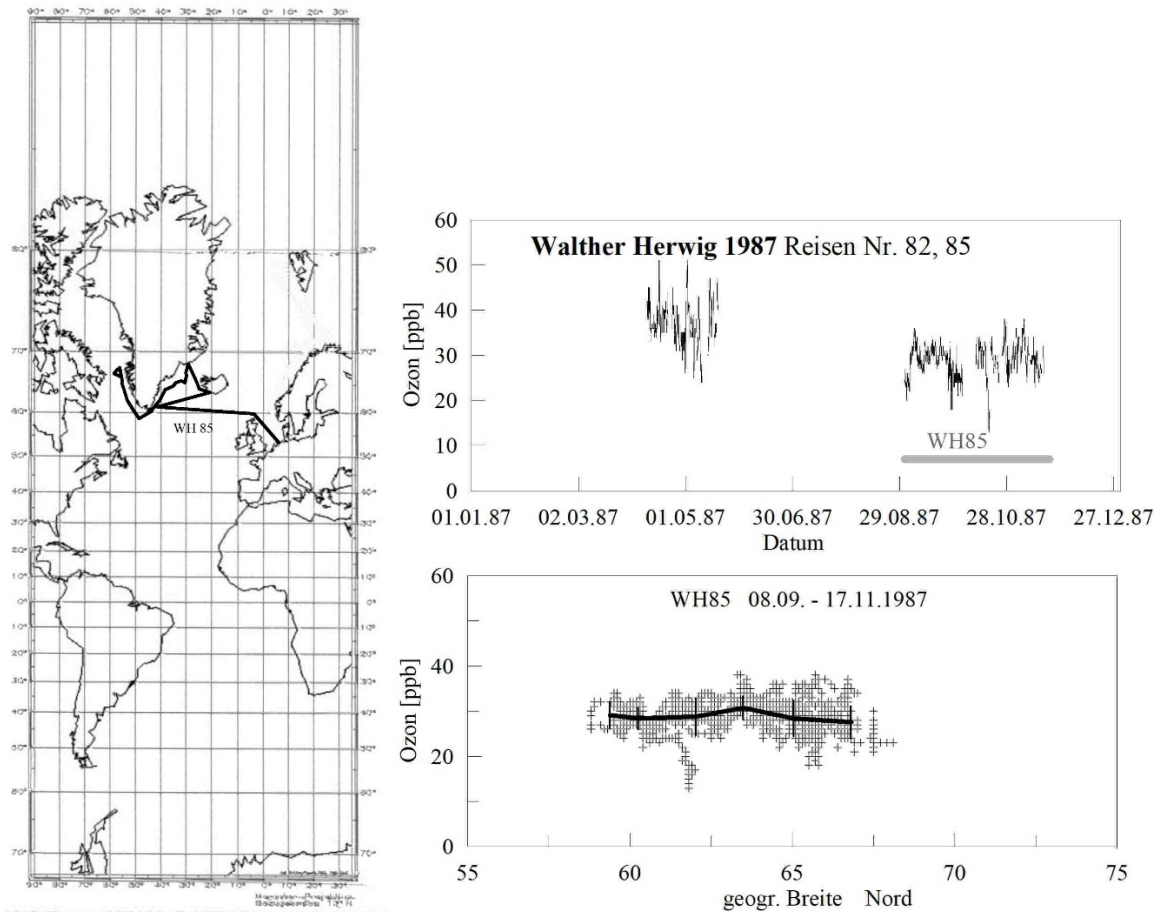


Abb. 12.65: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 85 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Das Ozonmischungsverhältnis zeigte im Nordatlantik vergleichsweise geringen Variationen.

12.66 Walther Herwig Reise Nr. 89

Azoren – Schottland

18. März – 17. Mai 1988

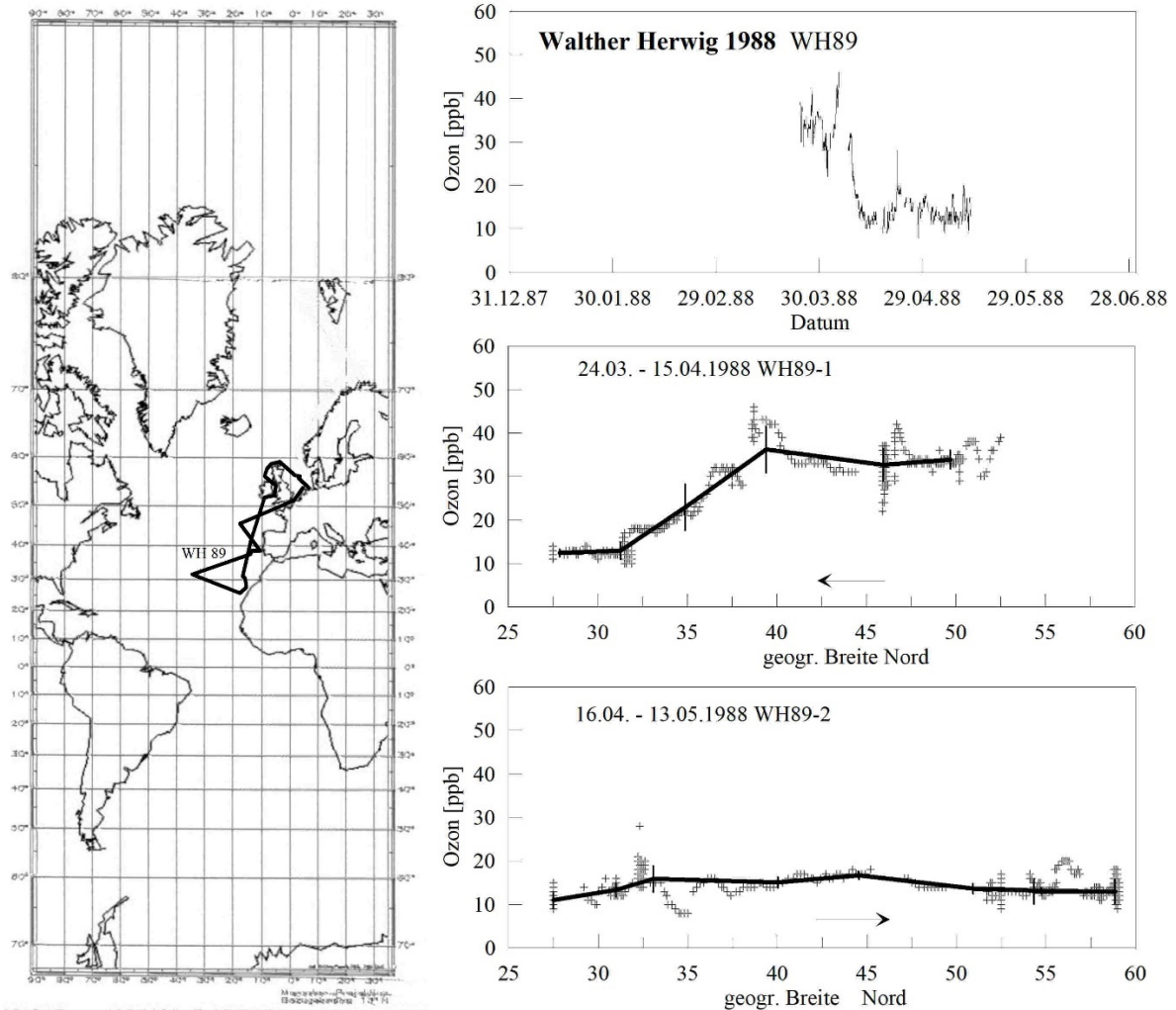


Abb. 12.66: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 89 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Auf der Hinreise wurden nördlich von 32°N hohe Ozonwerte vorgefunden, die auf Rückreise nicht mehr vorhanden waren. Auf diesem Abschnitt blieb das Ozonmischungsverhältnis nahezu konstant.

12.67 Walther Herwig Reise Nr. 92

West-, Ost-Grönland

26. August – 22. November 1988

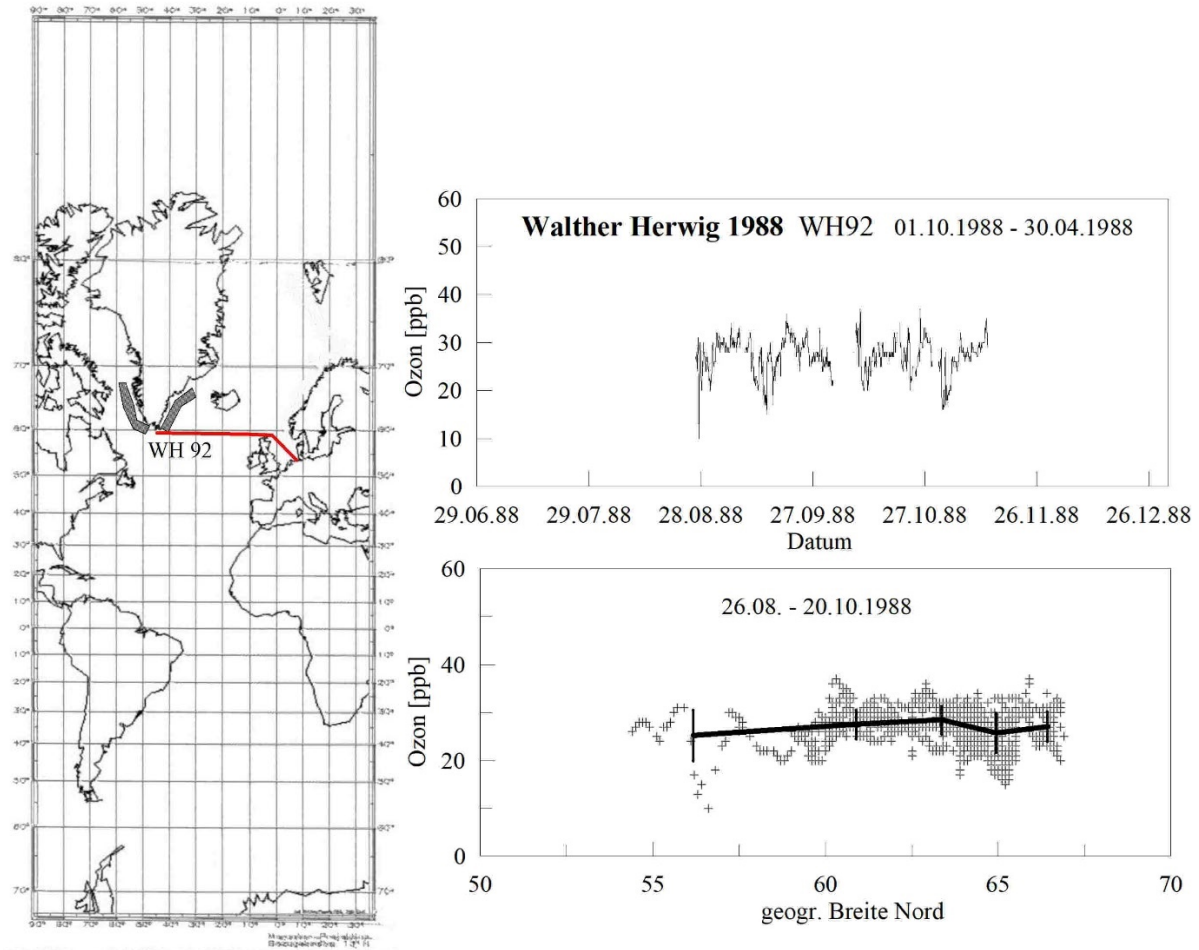


Abb. 12.67: Links: Fahrtverlauf der Reise Nr. 92 und Operationsgebiete von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Während der weitgehend in ost-westlich verlaufenden Fahrtroute zeigte das Ozon relativ einheitliche Werte.

12.68 Walther Herwig Reise Nr. 96 und Nr. 97

WH96: Westhebridische Gewässer

28. Februar – 21. März 1989

WH97: Biskaya, westirischer Atlantik

30. April – 09. Mai 1989

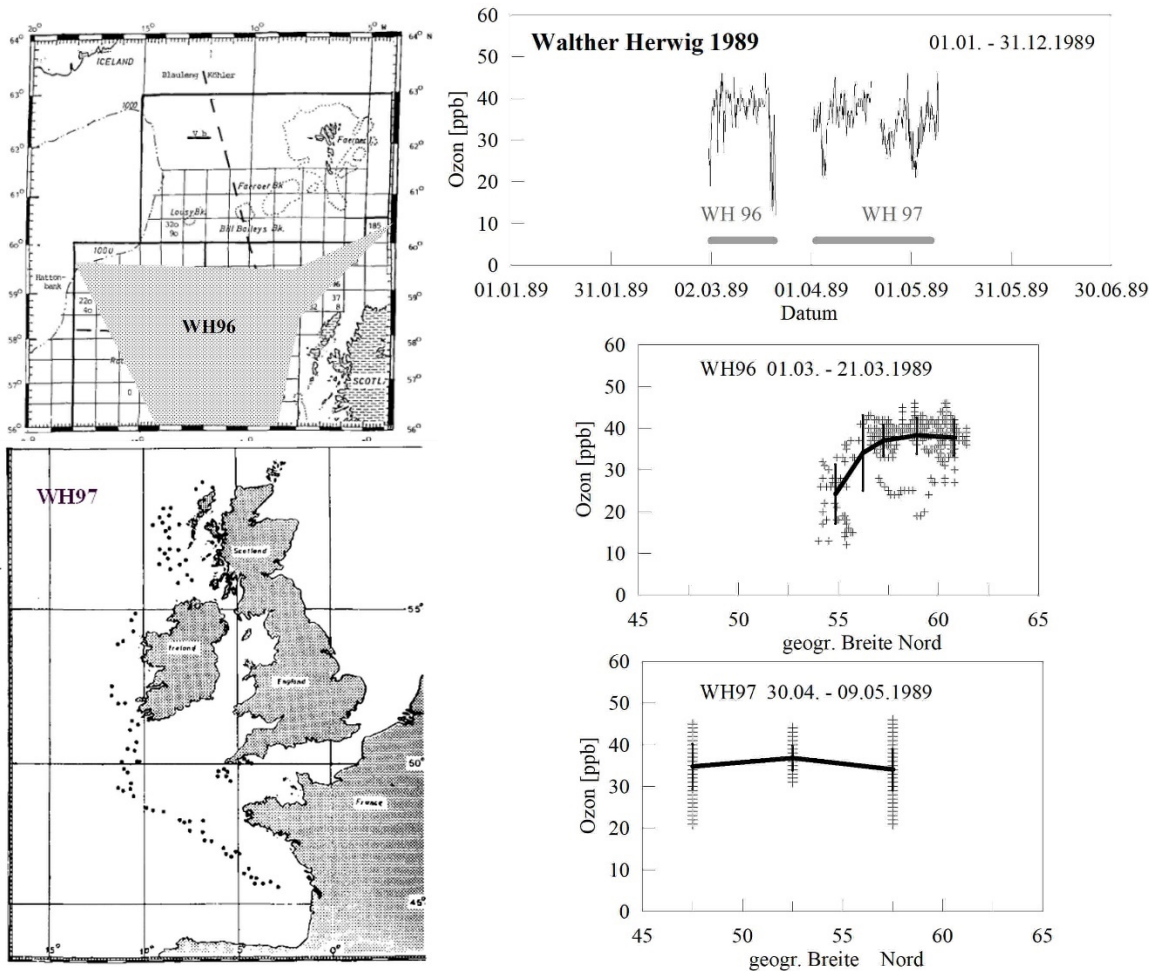


Abb. 12.68: Links: Fahrtverlauf der Reisen Nr. 96 und 97 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Die Karte WH96 entstammt (Reinsch 1989); die Karte WH97 aus (Dornheim and Wagner 1989).

Auf der Reise WH96 traten in der südlichen Nordsee geringe Ozonmischungsverhältnisse auf, wie es auch bei anderen Reisen in diesem Gebiet festgestellt wurde. Wahrscheinlich ist dies auf Ozonzerstörung durch Industrieabgase von England zurückzuführen, deren Abluffahnen weit in die Nordsee hinaus reichten.

12.69 Walther Herwig Reise Nr. 100 und 101

Atlantik – Westafrika – westl. Schottland

21. Juli – 25. August 1989

Labradorsee – Westgrönland

05. September – 02. Dezember 1989

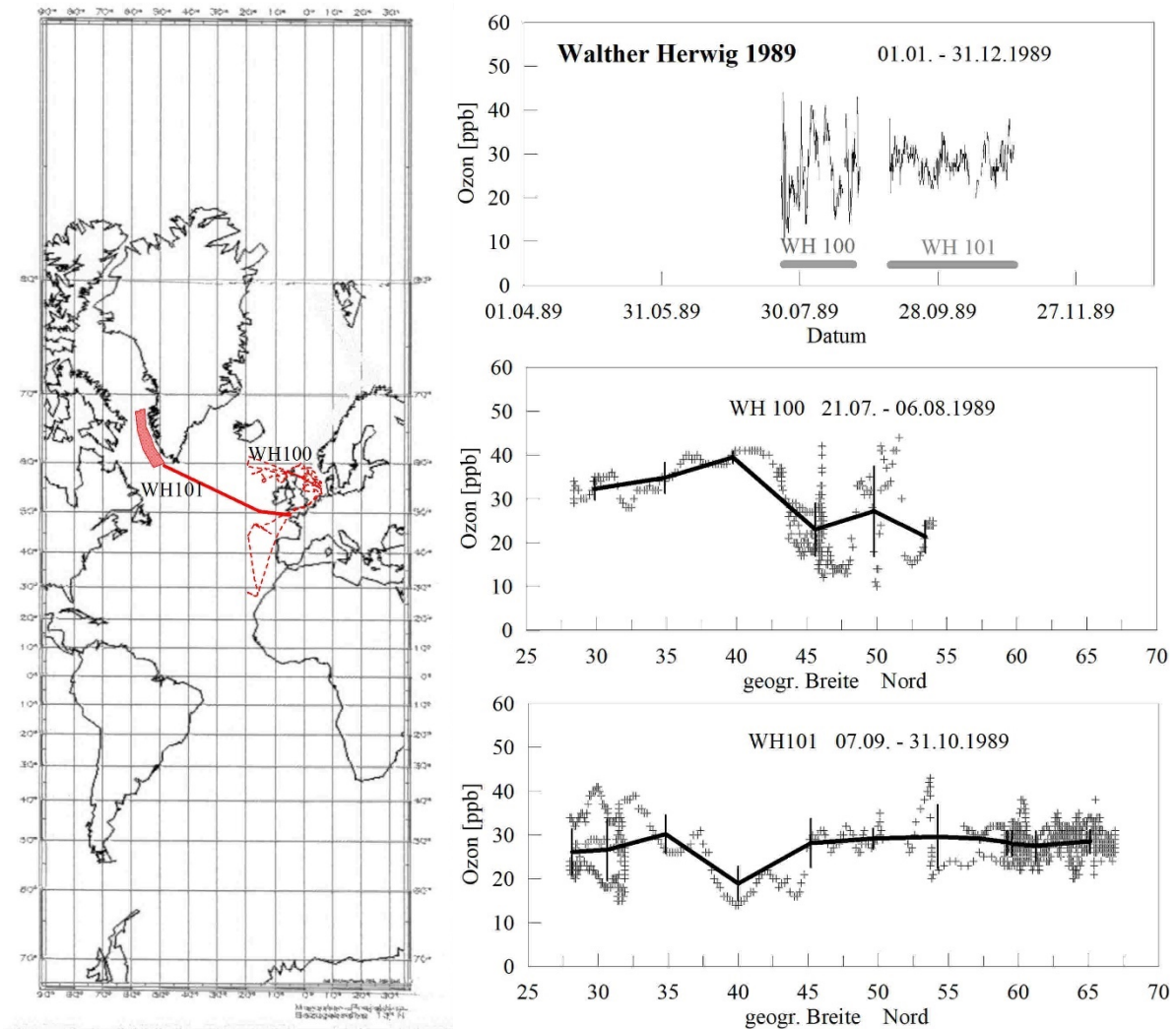


Abb. 12.69: Links: Fahrtverlauf der Reisen Nr. 100 und 101 von Walther Herwig. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Während der etwa vierwöchigen Reise Nr. 100 traten beträchtliche Variationen des Ozonmischungsverhältnisses auf, die wahrscheinlich durch stratosphärische Intrusionen bedingt waren.

12.70 Eisbrecher Ymer Reise 1980

Stockholm – Spitzbergen – Ostgrönland – Franz-Josephs-Land – Tromsø – Stockholm

25. Juni – 03. Oktober 1980

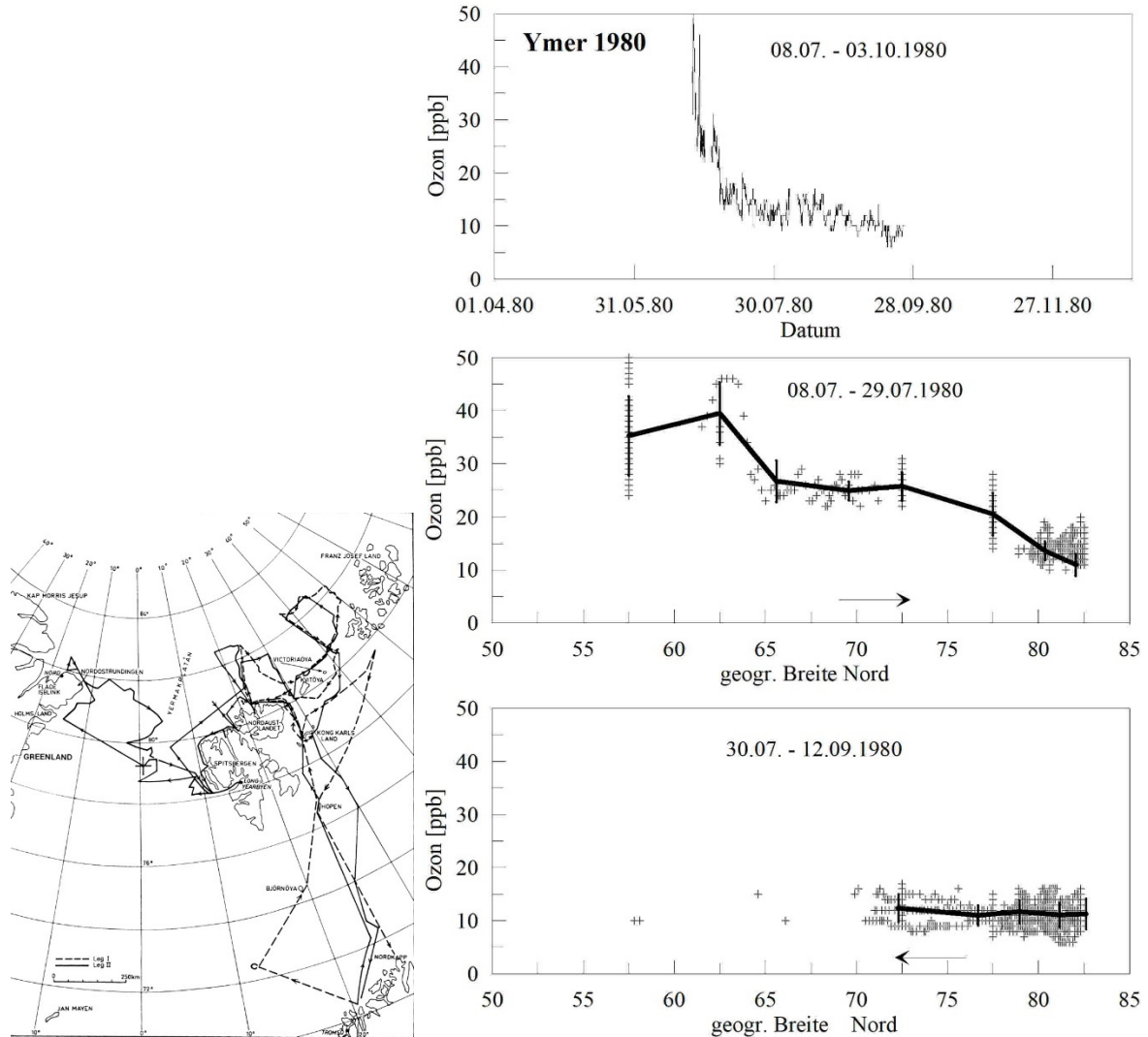


Abb. 12.70: Links: Fahrtverlauf von Ymer-80. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profile mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Diese Reise war als Gedächtnisreise zum 100-jährigen Jubiläum der Polarreise Nordenskjölds im Jahr 1880 ausgelegt (Schytt 1983). Der Eisbrecher *Ymer* operiert normalerweise in der Ostsee. Um ein Forschungsprogramm vornehmen zu können, waren für die luftchemischen Arbeiten auf dem Vordeck eine Reihe von Containern aufgebaut worden. Die Fahrt verlief meistens im Packeisgürtel und die Besatzung hatte Anweisung, das Schiff, wann immer möglich, mit dem Bug im Wind zu halten, damit luftchemische Messungen mit langen Probennahmezeiten ungestört blieben. Das Gerät lief stabil.

Auf der Rückreise nach Stockholm war der Wind meist ungünstig, so dass südlich von 70°N kaum brauchbare Daten gewonnen werden konnten.

12.71 Meteor II Reise Nr. 31

Die 31. – 33. Reise von Meteor führte durch das Mittelmeer und Rote Meer in die Arabische See. Die Ergebnisse sind der Vollständigkeit aufgeführt, wurden aber für die Ergebnisse zum Atlantik nicht verwendet.

Hamburg – östliches Mittelmeer – Rotes Meer

30. Dezember 1994 – 22. März 1995

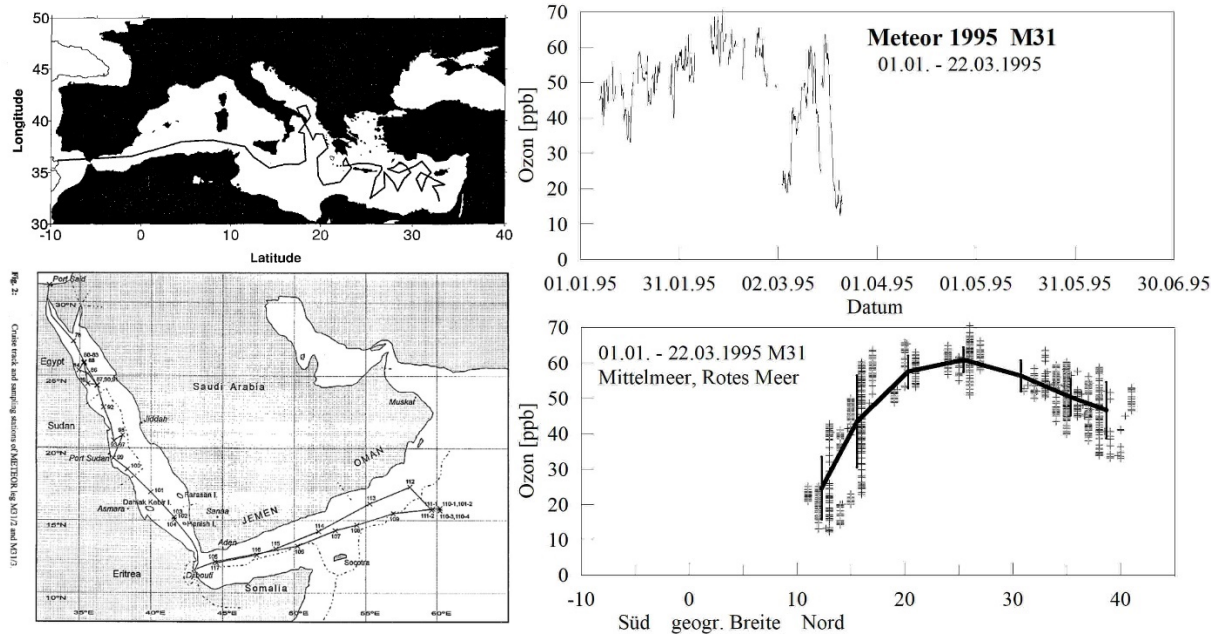


Abb. 12.71: Links: Fahrtverlauf der 31. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Zu den Forschungszielen s. (Hemleben et al. 1996; Pollehne et al. 1996).

Im Mittelmeer traten insgesamt sehr hohe Ozonmischungsverhältnisse auf. Im östlichen Mittelmeer befindet sich eine Zone mit erhöhtem Stratosphären-Troposphären Austausch (Hemleben et al. 1996). Aber auch der rege Schiffsverkehr und die NO_x-Emissionen der Anrainerstaaten dürften zu einer photochemischen Ozonbildung beitragen, so dass sich hohe natürliche Ozonmischungsverhältnisse zu anthropogen erzeugtem Ozon addieren.

Nach siebenjährigen Dauerbeobachtungen auf Kreta ist die lokale photochemische Ozonproduktion gering (<4%) (Gerasopoulos 2005; Gerasopoulos et al. 2006), das deutlich höhere Mischungsverhältnis im Vergleich zum Atlantik wird hauptsächlich durch Advektion von verschmutzten Luftmassen vom umliegenden Kontinent geprägt (Lelieveld et al. 2002).

12.72 Meteor II Reise Nr. 32

Golf von Aden – Oman – West-Ind. Ozean – Muscat

23. März – 19. September 1995

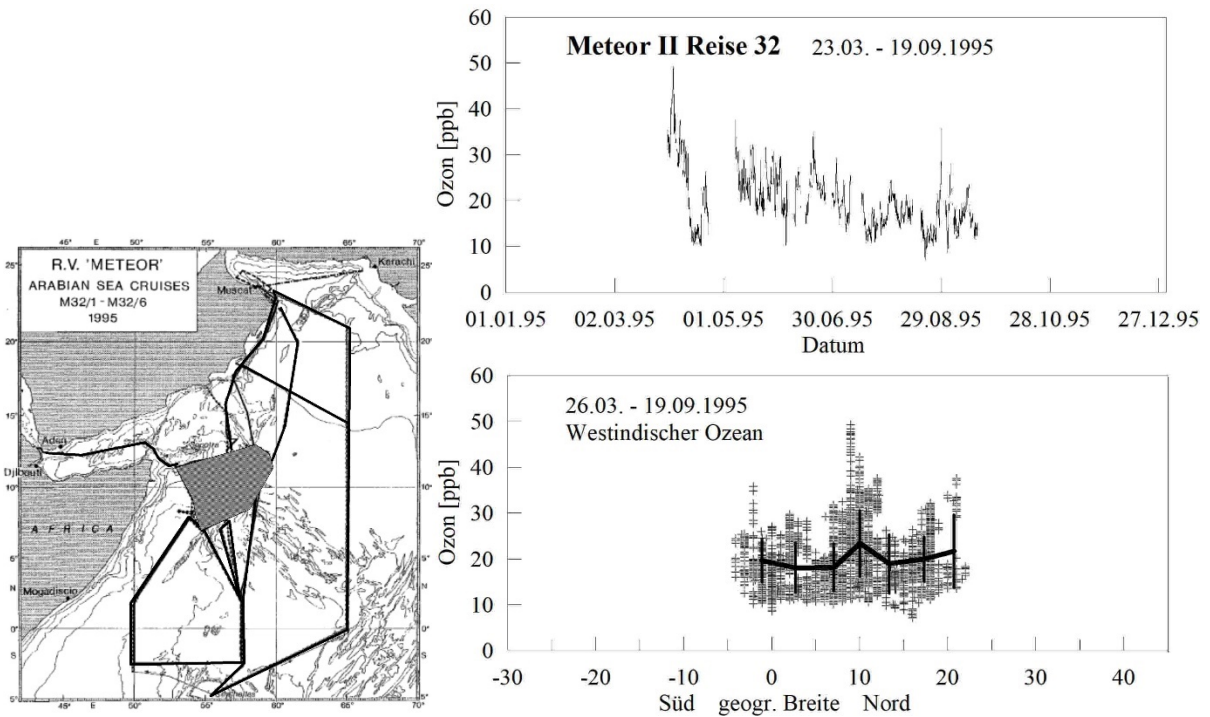


Abb. 12.72: Links: Fahrtverlauf der 32. Reise von Meteor II. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Routenkarte nach (Schott et al. 1996). Die Breitenverteilung des Ozons ist im westindischen Ozean nicht grundsätzlich anders, als über dem Atlantik, doch weicht die Lage der ITCZ deutlich von der im Atlantik ab. Die ITCZ lag bei etwa 5°S.

12.73 Meteor II Reise Nr. 33

Muscat – Port Louis – Durban – Kapstadt

Arabische See

22. September – 29. Dezember 1995

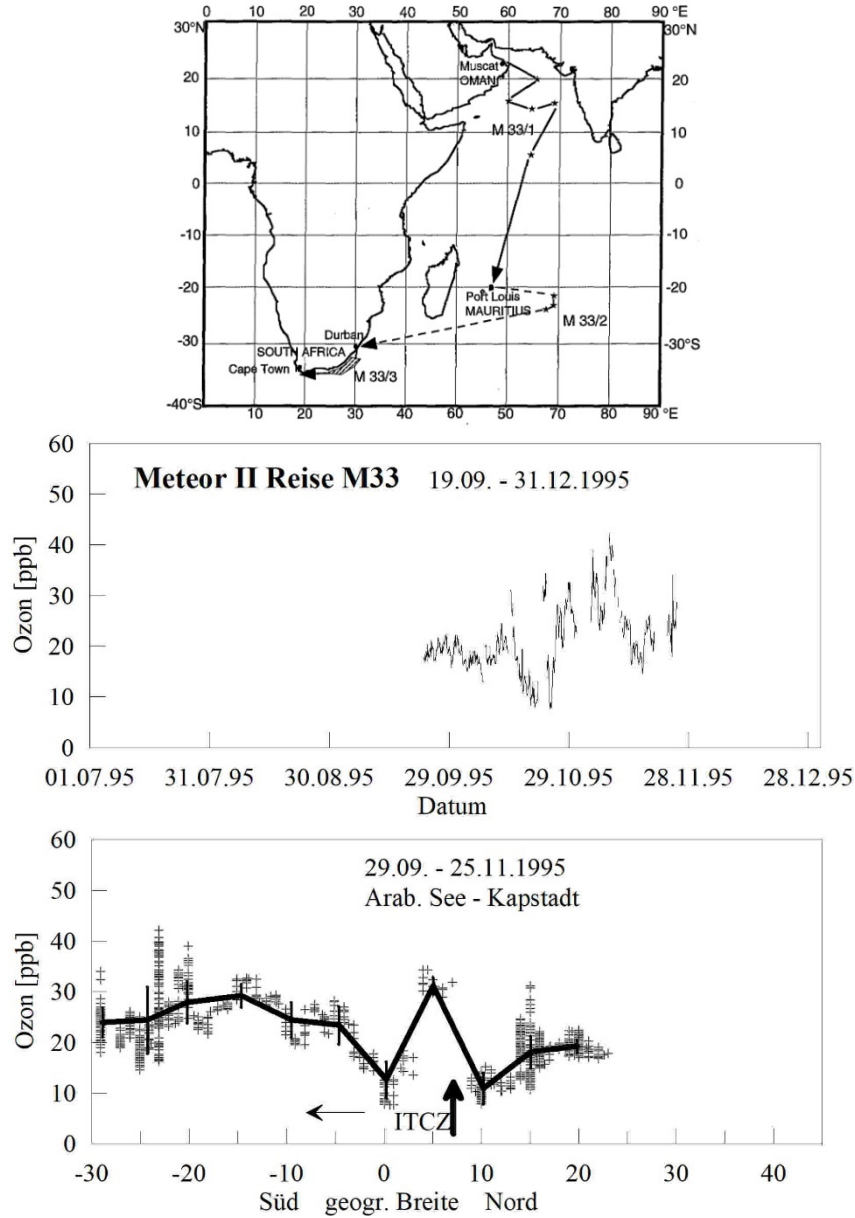


Abb. 12.73: Oben: Fahrtverlauf der 33. Reise von Meteor II. Unten: oben: Zeitlicher Verlauf des Ozonmischungsverhältnisses; unten: Nord-Süd-Profil mit Mittelwerten über jeweils 5 Breitengrade.

Anmerkungen

Der nördliche Ast der ITCZ wurde anhand des Windsprungs bei 7°N lokalisiert, Schauer oder Gewitter wurden in dem Bereich nicht beobachtet. Südlich der ITCZ wurden erhöhte Ozonmischungsverhältnisse festgestellt, die für den Atlantik eher untypisch sind

13. LITERATURVERZEICHNIS

- Ancellet G, Beekmann M, Papayannis A (1994) Impact of a cutoff low development on downward transport of ozone in the troposphere. *J. Geophys. Res.* 99:3451–3468
- Andreae MO, Anderson BE, Bradshaw JD, Collins JE, Gregory GL, Sachse GW, Shipham CM (1994) Influence of plumes from biomass burning on atmospheric chemistry over the equatorial and tropical South Atlantic during CITE-3. *J. Geophys. Res.* 99:12793–12808
- Anonymus (1972) Unser neues Fischereiforschungsschiff Walther Herwig in Dienst gestellt. Informationen für die Fischwirtschaft 19:199–202
- Appenzeller C, Holton JR, Rosenlof KH (1996) Seasonal variation of mass transport across the tropopause. *J. Geophys. Res.* 101:15071–15078
- Attmannspacher W (1971) Ein einfaches nasschemisches Gerät mit geringer Trägheit zur Messung des bodennahen Ozons in der Atmosphäre. *Meteorologische Rundschau* 24:183–188
- Augstein E (1987) Expeditionsprogramm Nr. 10, FS Polarstern, ARK-IV/1, ARK-IV/2, and ARK-IV/3. FS Polarstern Expeditionsprogramm 10
- Augstein E (1997) Die Expedition Arctic '96 des FS Polarstern ARK XII mit der Arctic climate systems study (ACSYS). *Berichte zur Polarforschung* 234
- Augstein E, Riehl H, Ostapoff F, Wagner V (1973) Mass and Energy Transports in an Undisturbed Atlantic Trade-Wind Flow. *Mon. Wea. Rev.* 101:101–111
- Augstein E, Hempel G, Tiede J (1984) Fahrtbericht der "Polarstern" Reise ARKTIS I, 1983. *Berichte zur Polarforschung* 17
- Augstein E, Bagriantsev N.V, Schenke, H. W. (1991) The Expedition ANTARKTIS VIII / 1 - 2 , 1989 with the Winter Weddell Gyre Study of the Research Vessels "Polarstern" and "Akademik Fedorov". *Berichte zur Polarforschung* 84
- Ayers GP, Penkett SA, Gillett RW, Bandy B, Galbally IE, Meyer CP, Elsworth CM, Bentley ST, Forgan BW (1992) Evidence for photochemical control of ozone concentration in unpolluted marine air. *Nature* 360:446–448
- Baray J-L, Daniel V, Ancellet G, Legras B (2000) Planetary-scale tropopause folds in the southern subtropics. *Geophys. Res. Lett.* 27:353–356
- Barrie LA, Bottenheim JW, Schell RC, Crutzen PJ (1988) Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic atmosphere. *Nature* 334:138–141
- Bates KH, Jacob DJ (2020) An Expanded Definition of the Odd Oxygen Family for Tropospheric Ozone Budgets: Implications for Ozone Lifetime and Stratospheric Influence. *Geophysical Research Letters* 47:e2019GL084486
- Bathmann U, Schulz-Baldes M, Hubberten H-W, Smetacek V, Fahrbach E (1992) Die Expeditionen ANTARKTIS IX/1-4 des Forschungsschiffes POLARSTERN 1990/1991 (The Expeditions ANTARKTIS IX/1-4 of the Research Vessel POLARSTERN in 1990/91). *Berichte zur Polarforschung*

- Bathmann U, Smetacek V, Baar HJW de, Fahrbach E, Krause G (1994) Die Expeditionen ANTARKTIS X/6-8 des Forschungsschiffes Polarstern 1992/93 (The Expeditions ANTARKTIS-X/6-8 of the Research Vessel POLARSTERN in 1992/93). *Berichte zur Polarforschung* 152:1–235
- Bauernfeind E, Boje R, Fahrbach E, Lenz J (1983) Biological and chemical oceanographic profiles from the equatorial Atlantic. supplement to: Bauerfeind, Eduard; Boje, Rolf; Fahrbach, Eberhard; Lenz, Jürgen (1983): Planktological and chemical data from the equatorial Atlantic at 22°W obtained in February to June 1979 ("FGGE-Equator '79"). *Ber. Institut f. Meereskunde Kiel* 110:157 pp
- Bazhanov VM, Petrov VN (1986) Ozone content in the surface atmosphere of the North Atlantic. *Meteorologiya y Gidrologiya* 6:60–67
- Beekmann M, Ancellet G, Blonsky S, De Muer D., Ebel A, Elbern H, Hendricks J, Kowol J, Mancier C, Sladkovic R, Smit HGJ, Speth P, Trickl T, van Haver P (1997) Regional and global tropopause fold occurrence and related ozone flux across the tropopause. *J. Atmos. Chem.* 28:29–44
- Boje R, Assow P, Zeitzschel B, Stuhr A, Thiel H (1990) Expedition Plankton '89 - Benthos '89, Reise Nr. 10, 19. März - 31. August 1989. *Meteor-Berichte* 90-1
- Boylan P, Helmig D, Oltmans SJ (2015) Ozone in the Atlantic Ocean marine boundary layer. *Elementa: Science of the Anthropocene* 3:1–13
- Brönnimann S (2007) Impact of El Niño-Southern Oscillation on European climate. *Rev. Geophys.* 45:RG3003
- Brunke E-G, Scheel HE (1998) Surface ozone measurements at Cape Point (34°S, 18°E). *Proc. Quadr. Ozone Sympos. L'Aquila, Italy, 1996*:331–334
- Burkert J, Andrés-Hernández M-D, Stöbener D, Burrows JP, Weissenmayer M, Kraus A (2001) Peroxy radical and related trace gas measurements in the boundary layer above the Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res. - D* 106:5457–5477
- Byrne MP, Pendergrass AG, Rapp AD, Wodzicki KR (2018) Response of the Intertropical Convergence Zone to Climate Change: Location, Width, and Strength. *Curr Clim Change Rep* 4:355–370
- Cau P, Methven J., Hoskins B (2007) Origins of Dry Air in the Tropics and Subtropics. *J. of Clim.* 20:2745–2759
- Chiang JCH, Kushnir Y, Giannini A (2002) Deconstructing Atlantic Intertropical Convergence Zone variability: Influence of the local cross-equatorial sea surface temperature gradient and remote forcing from the eastern equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.* 107:doi.org/10.1029/2000JD000307
- Christiansen B, Jepsen N, Kivi R, Hansen G, Larsen N, Korsholm US (2017) Trends and annual cycles in soundings of Arctic tropospheric ozone. *Atmos. Chem. Phys.* 17:9347–9364
- Class T, Ballschmiter K (1986) Chemistry of organic traces in air VI: Distribution of chlorinated C1 – C4 hydrocarbons in air over the northern and southern Atlantic Ocean. *Chemosphere* 15:413–427
- Claude H, Köhler U, Steinbrecht W (2004) Tropopause und Ozonopause. *Ozonbulletin des DWD Nr. 97*

- Conley SA, Faloon IC, Lenschow DH, Campos T, Heizer C, Weinheimer A, Cantrell CA, Mauldin III RL, Hornbrook RS, Pollak I, Bandy A (2011) A complete dynamical ozone budget measured in the tropical marine boundary layer during PASE. *J. Atmos. Chem.* 68:55–70
- Cooper OR, Parrish DD, Ziemke JR, Balashov NV, Cupeiro M, Galbally IE, Gilge S, Horowitz L, Jensen NR, Lamarque J-F, Naik V, Oltmans SJ, Schwab J, Shindell DT, Thompson AM, Thouret V, Wang Y, Zbinden RM (2014) Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review. *Elementa: Science of the Anthropocene* 2:1–28
- Crawford, J. H. Davis, D. D., Chen G, Buhr M, Oltmans SJ, Weller R, Mauldin L, Eisele F, Shetter R, Lefer B, Arimoto R, Hofmann DJ (2001) Evidence for photochemical production of ozone at the South Pole surface. *Geophys. Res. Lett.* 28:3641–3644
- Cros B, Delmas R, Ngama D, Clairac B (1988) Seasonal trends of ozone in equatorial Africa: Experimental evidence of photochemical formation. *J. Geophys. Res.* 93:8355–8366
- Crutzen PJ, Andreae MO (1990) Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science* 250:1669–1678
- Crutzen PJ, Lelieveld J, Brühl C (1994) Oxidation processes in the atmosphere and the role of human activities: observations and model results. In: Nriagu JO, Simmons MS (eds) *Environmental oxidants*. Wiley, New York u.a, pp 63–93
- Crutzen PJ, Lawrence MG, Pöschl U (1999) On the background photochemistry of tropospheric ozone. *Tellus B* 51:123–146
- Danielsen EF, Hipskind RS (1980) Stratospheric-tropospheric exchange at polar latitudes in summer. *J. Geophys. Res.* 85:393–400
- Danielsen EF, Mohnen VA (1977) Project duststorm report: Ozone transport, in-situ measurements, and meteorological analysis of tropopause folding. *J. Geophys. Res.* 82:5867–5877
- Danielsen EF, Hipskind RS, Gaines SE, Sachse GW, Gregory GL, Hill GF (1987) Three-dimensional analysis of potential vorticity associated with tropopause folds and observed variations of ozone and carbon monoxide. *J. Geophys. Res.* 92:1986–1994
- Davidson KL, Schütz L (1983) Observational Results On The Influence Of Surface Layer Stability And Inversion Entrainment On Surface Layer Marine Aerosol Number Density (1 Micrometer). *OE* 22:220145
- Davies TD, Schuepbach E (1994) Episodes of high ozone concentrations at the earth's surface resulting from transport down from the upper troposphere/lower stratosphere: a review and case studies. *Atmospheric Environment* 28:53–68
- Derwent RG, Simmonds PG, Manning AJ, Spain TG (2007) Trends over a 20-year period from 1987 to 2007 in surface ozone at the atmospheric research station, Mace Head, Ireland. *Atmospheric Environment* 41:9091–9098
- DHI (1985) *Forschungsschiff METEOR 1964-1985*. DHI, Hamburg
- Dornheim H, Wagner G (1989) Auch 1997 ergiebige Holzmakrelenfänge in der Biskaya und um Irland (97. Reise von Walther Herwig, Teil 1, 30.3.-20.4.1989. *Informationen für die Fischwirtschaft* 36:104–111
- Edwards DP (2003) Tropospheric ozone over the tropical Atlantic: A satellite perspective. *J. Geophys. Res.* 108

- Elbern H, Hendricks J, Ebel A (1998) A Climatology of Tropopause Folds by Global Analyses. *Theor Appl Climatol* 59:181–200
- Elsässer C, Wagenbach D, Weller R, Auer M, Wallner A, Christl M (2011) Continuous 25-yr aerosol records at coastal Antarctica. *Tellus B* 63:920–934
- Fahrbach E, Bauernfeind E (1982) The variability of equatorial thermocline spreading as an indication of equatorial upwelling in the Atlantic Ocean. *Océanographie tropicale* 17:121–132
- Flatøy F, Hov Ø, Gerbig C, Oltmans SJ (1996) Model studies of the meteorology and chemical composition of the troposphere over the North Atlantic during August 18-30, 1993. *J. Geophys. Res. - D* 101:29317–29334
- Freitas SR, Longo KM, Silva Dias MAF, Silva Dias PL, Chatfield R, Prins E, Artaxo P, Grell GA, Recuero FS (2005) Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environ. Fluid Mech.* 5:135–167
- Frey W, Schofield R, Hoor P, Kunkel D, Ravegnani F, Ulanovsky A, Viciani S, D'Amato F, Lane TP (2015) The impact of overshooting deep convection on local transport and mixing in the tropical upper troposphere/lower stratosphere (UTLS). *Atmos. Chem. Phys.* 15:6467–6486
- Fueglistaler S, Dessler AE, Dunkerton TJ, Folkins I, Fu Q, Mote PW (2009) Tropical tropopause layer. *Rev. Geophys.* 47:RG1004
- Fütterer D (1984) Die Expedition Antarktis II mit FS Polarstern 1983/1984. *Berichte zur Polarforschung* 18
- Fütterer D (1986) Die Expedition Antarktis IV mit FS Polarstern 1985/1986. *Berichte zur Polarforschung* 32
- Fütterer D (1988) Arctic 91 - Die Expedition Arktis VI mit FS Polarstern 1987/1988. *Berichte zur Polarforschung* 58
- Fütterer D (1994) Die Expedition Arctic '91 -Fahrtabschnitt ARK IX-4 mit FS Polarstern 1993. *Berichte zur Polarforschung* 149
- Galanter M, Levy H, Carmichael GR (2000) Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NO_x, and O₃. *J. Geophys. Res.* 105:6633–6653
- Gerasopoulos E (2005) Ozone variability in the marine boundary layer of the eastern Mediterranean based on 7-year observations. *J. Geophys. Res. - D* 110
- Gerasopoulos E, Kouvarakis G, Vrekoussis M, Donoussis C, Mihalopoulos N, Kanakidou M (2006) Photochemical ozone production in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment* 40:3057–3069
- Gerlach SA, Graf G (1990) Europäisches Nordmeer, Reise Nr. 13, 6. Juli - 24. August 1990. *Meteor-Berichte* 91-2
- Gersonde R (1986) Die Expedition Arktis III mit FS Polarstern. *Berichte zur Polarforschung* 28
- Gonzalez-Alonso L, Val Martin M, Kahn RA (2019) Biomass-burning smoke heights over the Amazon observed from space. *Atmos. Chem. Phys.* 19:1685–1702
- Gros V, Martin D, Poisson N, Kanakidou M, Le Guern F, Demont E (1998) Ozone and C₂—C₅ hydrocarbon observations in the marine boundary layer between 45°S and 77°S. *Tellus B* 50:430–448

- Gruzdev AN, Elovkov AS, Makarov OV, Mokhov II (1993) Some recent results of Russian measurements of surface ozone in Antarctica. A meteorological interpretation. *Tellus B* 45:99–105
- Haaf W, Jaenicke R (1980) Results of improved size distribution measurements in the aitken range of atmospheric aerosols. *Journal of Aerosol Science* 11:321–330
- Helmig D, Ganzeveld L, Butler T, Oltmans SJ (2006) The role of ozone atmosphere-snow gas exchange on polar, boundary-layer tropospheric ozone – a review and sensitivity analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7
- Hemleben C, Roether W, Stoffers P (1996) Östliches Mittelmeer, Rotes Meer, Arabisches Meer, Cruise No. 31, 30. December 1994 - 22. March 1995. *Meteor-Berichte* 96-4
- Hempel G (1983a) Das Polarforschungs- und Versorgungsschiff "Polarstern". *Geowissenschaften in unserer Zeit* 5:160–163
- Hempel G (1983b) Die erste Antarktisexpedition von FS Polarstern. *Berichte zur Polarforschung Sonderheft* 2
- Hempel I (1989) The Expedition Antarktis VII 1/2 of FS "Polastern 1988/89. *Berichte zur Polarforschung* 62
- Höflich O (1972) The meteorological effects of cold upwelling water areas. *Geoforum* 3:35–46
- Holanda BA, Pöhlker ML, Walter D, Saturno J, Sörgel M, Ditas J, Ditas F, Schulz C, Franco MA, Wang Q, Donth T, Artaxo P, Barbosa HMJ, Borrmann S, Braga R, Brito J, Cheng Y, Dollner M, Kaiser JW, Klimach T, Knote C, Krüger OO, Fütterer D, Lavrič JV, Ma N, Machado LAT, Ming J, Morais FG, Paulsen H, Sauer D, Schlager H, Schneider J, Su H, Weinzierl B, Walser A, Wendisch M, Ziereis H, Zöger M, Pöschl U, Andreae MO, Pöhlker C (2020) Influx of African biomass burning aerosol during the Amazonian dry season through layered transatlantic transport of black carbon-rich smoke. *Atmos. Chem. Phys.* 20:4757–4785
- Hu X-M, Sigler JM, Fuentes JD (2010) Variability of ozone in the marine boundary layer of the equatorial Pacific Ocean. *J Atmos Chem* 66:117–136
- Hubberten H-W (1994) Expeditionsprogramm 34: ARKTIS X FS Polarstern 1994. *FS Polarstern Expeditionsprogramm*
- Huntrieser H, Schlager H, Lichtenstern M, Stock P, Hamburger T, Höller H, Schmidt K, Betz H-D, Ulanovsky A, Ravegnani F (2011) Mesoscale convective systems observed during AMMA and their impact on the NO_x and O₃ budget over West Africa. *Atmos. Chem. Phys.* 11:2503–2536
- Hupe P, Ceranna L, Pilger C, Le Pichon A, Blanc E, Rapp M (2019) Mountain-Associated Waves and their relation to Orographic Gravity Waves. *Meteorologische Zeitschrift* 28:1–19
- Hurrell JW, Deser C (2010) North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Marine Systems* 79:231–244
- Jacobi N, Neuhoff H von, Springer BM (2011) 25 Jahre FS METEOR: Ein Forschungsschiff und seine Geschichte(n). *Hauschild, Bremen*

- Jing P, Cunnold DM, Wang HJ, Yang E-S (2004) Isentropic Cross-Tropopause Ozone Transport in the Northern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences* 61:1068–1078
- Jonquière I, Marenco A, Maalej A (1998) Study of ozone formation and transatlantic transport from biomass burning emissions over West Africa during the airborne Tropospheric Ozone Campaigns TROPOZ I and TROPOZ II. *J. Geophys. Res.* 100:19059–19073
- Kalnajs LE, Avallone LM (2006) Frost flower influence on springtime boundary-layer ozone depletion events and atmospheric bromine levels. *Geophys. Res. Lett.* 33:L10810
- Kasibhatla P, Levy H, Klonecki A, Chameides WL (1996) Three-dimensional view of the large-scale tropospheric ozone distribution over the North Atlantic Ocean during summer. *J. Geophys. Res.* - D 101:29305–29316
- Kattner G, Fütterer DK (1995) Die Expedition ANTARKTIS-XII mit FS Polarstern 1994/95 Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-XII/1 und 2 (The Expedition ANTARKTIS XII of RV Polarstern in 1994/95 Reports of Legs ANT XII/1 and 2). *Berichte zur Polarforschung* 168:1–100
- Kentarchos AS, Roelofs G-J, Lelieveld J, Cuevas E (2000) On the origin of elevated surface ozone concentrations at Izana Observatory, Tenerife during late March 1996. *Geophys. Res. Lett.* 27:3699–3702
- Kirchhoff VWJH, Browell EV, Gregory GL (1988) Ozone measurements in the troposphere of an Amazonian rain forest environment. *J. Geophys. Res.* - D 93:15850
- Kohlberg E, Janneck J (2006) Georg von Neumayer Station (GvN) and Neumayer Station II (NM-II) German Research Stations on Ekström Ice Shelf, Antarctica. *Polarforschung* 76:47–57
- Kohnen H (1983) Die Antarktis-Expedition von MS "Polarbjörn" 1982/83. *Berichte zur Polarforschung* 13
- Komhyr WD, Oltmans SJ, Grass RD (1988) Atmospheric ozone at South Pole, Antarctica, in 1986. *J. Geophys. Res.* 93:5167
- König-Langlo G, Loose B, Bräuer B (2006) 25 Years of Polarstern Meteorology (1982-2006). *WDC Mare Reports* 4:1–137
- Kraus EB (1959) The Evaporation-Precipitation Cycle of the Trades. *Tellus* 11:147–158
- Krause G, Meincke J, Schwarz HJ (1991) Scientific cruise reports of Arctic expeditions ARK VI 1-4 of RV "Polarstern" in 1989. *Berichte zur Polarforschung* 87
- Krishnamurti TN, Fuelberg HE, Sinha MC, Oosterhof D, Bensman EL, Kumar VB (1993) The meteorological environment of the tropospheric ozone maximum over the tropical South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* 98:10621–10641
- Laat ATJ de, Lelieveld J (2000) Diurnal ozone cycle in the tropical and subtropical marine boundary layer. *J. Geophys. Res.* 105:11547–11559
- Lamarque J-F, Langford AO, Proffitt MH (1996) Cross-tropopause mixing of ozone through gravity wave breaking: Observation and modeling. *J. Geophys. Res.* 101:22969–22976

- Lannefors H, Heintzenberg J, Hansson H-C (1983) A comprehensive study of physical and chemical parameters of the Arctic summer aerosol; results from the Swedish expedition Ymer-80. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 35:40–54
- Legrand M, Preunkert S, Jourdain B (2009) Year-round record of surface ozone at coastal (Dumont d'Urville) and inland (Concordia) sites in East Antarctica: Year-round record of surface ozone at coastal (Dumont d'Urville) and inland (Concordia) sites in East Antarctica. *Journal of Geophysical Research* 114:doi:10.1029/2008JD011667
- Lelieveld J, Dentener FJ (2000) What controls tropospheric ozone? *J. Geophys. Res.* 105:3531–3551
- Lelieveld J, Berresheim H, Borrmann S, Crutzen PJ, Dentener FJ, Fischer H, Feichter J, Flatau PJ, Heland J, Holzinger R, Korrmann R, Lawrence MG, Levin Z, Markowicz KM, Mihalo-poulos N, Minikin A, Ramanathan V, Reus M de, Roelofs GJ, Scheeren HA, Sciare J, Schlager H, Schultz M, Siegmund P, Steil B, Stephanou EG, Stier P, Traub M, Warneke C, Williams J, Ziereis H (2002) Global air pollution crossroads over the Mediterranean. *Science* (New York, N.Y.) 298:794–799
- Lelieveld J, van Aardenne J, Fischer H, Reus M de, Williams J, Winkler P (2004) Increasing ozone over the Atlantic Ocean. *Science* (New York, N.Y.) 304:1483–1487
- Levin I, Hesshaimer V (1996) Refining of atmospheric transport model entries by the globally observed passive tracer distributions of 85 krypton and sulfur hexafluoride (SF₆). *J. Geophys. Res. - D* 101:16745–16755
- Liu SC, Trainer M, Fehsenfeld FC, Parrish DD, Williams EJ, Fahey DW, Hübler G, Murphy PC (1987) Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions. *J. Geophys. Res. - D* 92:4191
- Marshall J, Kushnir Y, Battisti D, Chang P, Czaja A, Dickson R, Hurrell JW, McCartney M, Saravanan R, Visbeck M (2001) North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms. *Int. J. Climatol.* 21:1863–1898
- Marufu L, Dentener FJ, Lelieveld J, Andreae MO, Helas G (2000) Photochemistry of the African troposphere: Influence of biomass-burning emissions. *J. Geophys. Res. - D* 105:14513–14530
- Meincke J (1993) WOCE-Nord 1991, Cruise No. 18 / Reise Nr. 18, 2 September - 26 September 1991. *Meteor-Berichte* 93-1:1–122
- Mienert J, Schulz-Bull D, Hemleben C, Kremling K, Graf G, Pfannkuche O (1998) Nordatlantik 1996, Cruise No. 36, 6 June 1996 - 4 November 1996. *Meteor-Berichte* 98-2:1–320
- Molinari RL, Katz E, Fahrbach E, Lass AU, Voituriez B (1983) Near surface temperature observations in the equatorial Atlantic Ocean during FGGE. In: Nihoul JC (ed) *Hydrodynamics of The Equatorial Ocean*. Elsevier, Dordrecht, pp 65–82
- Monks PS (2000) A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmospheric Environment* 34:3545–3561
- Müller TJ, Siedler G, Zenk W (1988) Forschungsschiff Meteor Reise Nr. 6. *Ber. Institut f. Meereskunde Kiel* 184
- Nadzir MSM, Ashfold MJ, Khan MF, Robinson AD, Bolas C, Latif MT, Wallis BM, Mead MI, Hamid HHA, Harris NRP, Ramly ZTA, Lai GT, Liew JN, Ahamad F, Uning R, Samah AA,

- Maulud KN, Suparta W, Zainudin SK, Wahab MIA, Sahani M, Müller M, Yeok FS, Rahman NA, Mujahid A, Morris KI, Sasso ND (2018) Spatial-temporal variations in surface ozone over Ushuaia and the Antarctic region: observations from in situ measurements, satellite data, and global models. *Environmental Science and Pollution Research* 25:2194–2210
- Neu JL, Flury T, Manney GL, Santee ML, Livesey NJ, Worden J (2014) Tropospheric ozone variations governed by changes in stratospheric circulation. *Nature Geosci* 7:340–344
- Newell RE, Gould-Stewart S (1981) A stratospheric fountain? *J. Atmos. Sci.* 38:2789–2796
- Nieto R, Gimeno L, La Torre L de, Ribera P, Gallego D, García-Herrera R, García JA, Nuñez M, Redaño A, Lorente J (2005) Climatological Features of Cutoff Low Systems in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate* 18:3085–3103
- Oltmans SJ, Komhyr WD (1986) Surface ozone distributions and variations from 1973-1984. Measurements at the NOAA Geophysical Monitoring for climatic change baseline observatories. *J. Geophys. Res.* 91:5229–5236
- Oltmans SJ, Levy H (1992) Seasonal cycle of surface ozone over the western North Atlantic. *Nature* 358:392–394
- Oltmans SJ, Lefohn AS, Harris JM, Galbally I, Scheel HE, Bodeker G, Brunke E, Claude H, Tarasick D, Johnson BJ, Simmonds P, Shadwick D, Anlauf K, Hayden K, Schmidlin F, Fujimoto T, Akagi K, Meyer C, Nichol S, Davies J, Redondas A, Cuevas E (2006) Long-term changes in tropospheric ozone. *Atmospheric Environment* 40:3156–3173
- Paluch IR, Lenschow DH (1991) Stratiform Cloud Formation in the Marine Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences* 48:2141–2158
- Pan LL, Bowman KP, Atlas EA, Wofsy SC, Zhang F, Bresch JF, Cooper WA (2010) The stratosphere-troposphere analyses of regional transport 2008 experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91:327–342
- Panitz H-J, Speth P (1986) In situ wind measurements in the equatorial Atlantic during 1979. *Océanogr. Tropicale* 5:185–203
- Parish TR, Bromwich DH (1987) The surface windfield over the Antarctic ice sheets. *Nature* 327:51–54
- Piatkowski U, Klages N (1983) German Antarctic Expedition 1980/81 with FRV "WALTHER HERWIG" and RV "METEOR": First International BIOMASS Experiment (FIBEX), Data of micronekton and zooplankton hauls. *Berichte zur Polarforschung* 15
- Piotrowicz SR, Boran DA, Fischer CJ (1986) Ozone in the boundary layer of the equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res. - D* 91:13113–13119
- Pollehne F, Quadfasel D, Schott F, Wiesner M, Stramma L, Zeitzschel B (1996) Arabian Sea 1995, Cruise No. 32, 23 March - 19 September 1995. *Meteor-Berichte* 95-6
- Pound RJ, Sherwen T, Helmig D, Carpenter LJ, Evans MJ (2020) Influences of oceanic ozone deposition on tropospheric photochemistry. *Atmos. Chem. Phys.* 20:4227–4239
- Price JD, Vaughan G (1993) The potential for stratosphere-troposphere exchange in cut-off-low systems. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 119:343–365
- Racherla PN, Adams PJ (2006) Sensitivity of global tropospheric ozone and fine particulate matter concentrations to climate change. *J. Geophys. Res. - D* 111:D24103

- Radock U (1970) Wissenschaft gegen das eisige Schneefegen. *Polarforschung* 7:73–88
- Ramanathan V, Dickinson RE (1979) The Role of Stratospheric Ozone in the Zonal and Seasonal Radiative Energy Balance of the Earth-Troposphere System. *Journal of the Atmospheric Sciences* 36:1084–1104
- Randel WJ, Rivoire L, Pan LL, Honomichl SB (2016) Dry layers in the tropical troposphere observed during CONTRAST and global behavior from GFS analyses. *J. Geophys. Res. Atmos.* 121:14142–14158
- Rapp M, Kaifler B, Dörnbrack A, Gisinger S, Mixa T, Reichert R, Kaifler N, Knobloch S, Eckert R, Wildmann N, Giez A, Krasauskas L, Preusse P, Geldenhuys M, Riese M, Woiwode W, Friedl-Vallon F, Sinnhuber B-M, La Torre Ad, Alexander P, Hormaechea JL, Janches D, Garhammer M, Chau JL, Conte JF, Hoor P, Engel A (2020) SOUTHTRAC-GW: An airborne field campaign to explore gravity wave dynamics at the world's strongest hotspot. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102:1–60
- Read KA, Mahajan AS, Carpenter LJ, Evans MJ, Faria BVE, Heard DE, Hopkins JR, Lee JD, Moller SJ, Lewis AC, Mendes L, McQuaid JB, Oetjen H, Saiz-Lopez A, Pilling MJ, Plane JMC (2008) Extensive halogen-mediated ozone destruction over the tropical Atlantic Ocean. *Nature* 453:1232–1235
- Reinsch HH (1989) Untersuchungen an Köhler und Blauleng in den Fanggebieten westlich und nördlich der Britischen Inseln. *Informationen für die Fischwirtschaft* 36:100–104
- Reiter ER (1979) Trade-wind variability, southern oscillation and quasi-biennial oscillation. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A.* 28:113–126
- Reyes S, Ramirez OE (1987) Air-sea fluxes over the global oceans during the FGGE year. *Theor Appl Climatol* 38:69–78
- Rieckh T, Anthes R, Randel WJ, Ho S-P, Foelsche U (2017) Tropospheric dry layers in the tropical western Pacific: comparison of GPS radio occultation with multiple data sets. *Atmos. Meas. Tech.* 10:1093–1110
- Robinson E, Clark D, Cronn DR, Bamesberger WL, Hogan AW (1983) Stratospheric-tropospheric ozone exchange in Antarctica caused by mountain waves. *J. Geophys. Res.* 88:10708–10720
- Roelofs G-J, Lelieveld J (1997) Model study of the influence of cross-tropopause O₃ transports on tropospheric O₃ levels. *Tellus B* 49:38–55
- Rubin MJ, Weyant WS (1963) The mass and heat budget of the Antarctic atmosphere. *Monthly Weather Review* 91:487–493
- Rudolph J, Ehhalt DH (1981) Measurements of C₂–C₅ hydrocarbons over the North Atlantic. *J. Geophys. Res.* - D 86:11959
- Rummukainen M, Laurila T, Kivi R (1996) Yearly cycle of lower tropospheric ozone at the Arctic Circle. *Atmospheric Environment* 30:1875–1885
- Ryabinin AI, Eremeeva LV, Degterev AK (1992) Some regularities of the ozone distribution in the near-water atmospheric layer. *Sov. J. Phys. Oceanogr.* 3:405–407
- Sahrhage D (1986) Fischereiforschungsschiff Anton Dohrn außer Dienst. *Informationen für die Fischwirtschaft* 33:99–101

- Sanchez-Santillan N, Garduno Lopez R, Mendez Ramirez I, ESQUIVEL HERRERA A, Sanchez-Trejo R (2007) Simultaneous occurrence of the North Atlantic Seesaw and El Niño. *Atmósfera* 20:45–56
- Sauvage B, Martin RV, van Donkelaar A, Ziemke JR (2007) Quantification of the factors controlling tropical tropospheric ozone and the South Atlantic maximum. *Journal of Geophysical Research* 112:D11309
- Savoie DL, Prospero JM, Oltmans SJ, Graustein WC, Turekian KK, Merrill JT, Levy H (1992) Sources of nitrate and ozone in the marine boundary layer of the tropical north Atlantic. *J. Geophys. Res.* 97:11575–11589
- Schmauß A (1921) Vertikale Luftströmungen an der Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre* 9:26–27
- Schnell RC, Liu SC, Oltmans SJ, Stone RS, Hofmann DJ, Dutton EG, Deshler T, Sturges WT, Harder JW, Sewell SD, Trainer M, Harris JM (1991) Decrease of summer tropospheric ozone concentrations in Antarctica. *Nature* 351:726–729
- Schott F, Balzer W, Pfannkuche O (1994) Carbon cycle and transport of water masses in the North Atlantic - the winter situation, Cruise No. 27, 29 December 1993 - 26 March 1994. *Meteor-Berichte* 94-6
- Schott F, Pollehne F, Quadfasel D, Stramma L, Wiesner M, Zeitzschel B (1996) Arabian Sea. Cruise No. 32 25. March - 19. September 1995. *Meteor-Berichte* 95-6
- Schwerdtfeger W (1984) *Weather and climate of the Antarctic. Developments in atmospheric science, vol. 15.* Elsevier, Amsterdam
- Schytt V (1983) YMER-80: A Swedish Expedition to the Arctic Ocean. *The Geographical Journal* 149:22
- Shapiro MA, Hampel T, Krueger AJ (1987) The Arctic Tropopause Fold. *Mon. Wea. Rev.* 115:444–454
- Sherwood SC, Dessler AE (2001) A Model for Transport across the Tropical Tropopause. *Journal of the Atmospheric Sciences* 58:765–779
- Shibuya R, Sato K, Tomikawa Y, Tsutsumi M, Sato T (2015) A Study of Multiple Tropopause Structures Caused by Inertia–Gravity Waves in the Antarctic. *Journal of the Atmospheric Sciences* 72:2109–2130
- Simpson WR, Glasow R von, Riedel K, Anderson P, Ariya P, Bottenheim JW, Burrows J, Carpenter LJ, Frieß U, Goodsite ME, Heard DE, Hutterli M, Jacobi H-W, Kaleschke L, Neff B, Plane JMC, Platt U, Richter A, Roscoe H, Sander R, Shepson PB, Sodeau J, Steffen A, Wagner T, Wolff E (2007) Halogens and their role in polar boundary-layer ozone depletion. *Atmos. Chem. Phys.* 7:4375–4418
- Slemr F, Tremmel HG (1994) Hydroperoxides in the marine troposphere over the Atlantic Ocean. *J. Atmos. Chem. (Journal of Atmospheric Chemistry)* 19:371–404
- Slemr F, Brunke E-G, Ebinghaus R, Temme C, Munthe J, Wängberg I, Schroeder W, Steffen A, Berg T (2003) Worldwide trend of atmospheric mercury since 1977. *Geophys. Res. Lett.* 30:n/a-n/a
- Smit HGJ (2004) Tropospheric ozone as a tracer to investigate deep convection and its influence on the humidity in the marine tropics. *Diss TH Aachen, Wuppertal*

- Song Y, Lü D, Li Q, Bian J, Wu X, Li D (2016) The impact of cut-off lows on ozone in the upper troposphere and lower stratosphere over Changchun from ozonesonde observations. *Adv. Atmos. Sci.* 33:135–150
- Souza P, Cavalcanti IFA (2009) Atmospheric centres of action associated with the Atlantic ITCZ position. *International Journal of Climatology* 29:2091–2105
- Speth P, Panitz H-J (1983) The Variability of Local Winds at 22°w and their Influence on the Oceanic System at the Equator in the Atlantic During Fgge. In: Nihoul JC (ed) *Hydrodynamics of The Equatorial Ocean*, vol 36. Elsevier, Dordrecht, pp 51–64
- Stallard RF, Edmond JM, Newell RE (1975) Surface ozone in the South East Atlantic between Dakar and Walvis Bay. *Geophysical Research Letters* 2:289–292
- Suess E, Altenbach AV (1992) Europäisches Nordmeer, Reise Nr. 17, 15. Juli - 29. August 1991. *Meteor-Berichte* 92-3
- Suhre K, Cammas J-P, Nédelec P, Rosset R, Marenco A, Smit HGJ (1997) Ozone-rich transients in the upper equatorial Atlantic troposphere. *Nature* 388:661–663
- Temme C, Slemr F, Ebinghaus R, Einax JW (2003) Distribution of mercury over the Atlantic Ocean in 1996 and 1999–2001. *Atmospheric Environment* 37:1889–1897
- Thompson AM, Johnson JE, Torres AL, Bates TS, Kelly KC, Atlas E, Greenberg JP, Donahue NM, Yvon SA, Saltzman ES, Heikes BG, Mosher BW, Shashkov AA, Yegorov VI (1993) Ozone observations and a model of marine boundary layer photochemistry during SAGA 3. *J. Geophys. Res.* - D 98:16955
- Thompson AM (1994) Oxidants in the unpolluted marine Atmosphere. In: Nriagu JO, Simmons MS (eds) *Environmental oxidants*. Wiley, New York u.a, pp 31–61
- Thompson AM, Doddridge BG, Witte JC, Hudson RD, Luke WT, Johnson JE, Johnson BJ, Oltmans SJ, Weller R (2000) A tropical Atlantic Paradox: Shipboard and satellite views of a tropospheric ozone maximum and wave-one in January-February 1999. *Geophys. Res. Lett.* 27:3317–3320
- Thompson AM, Witte JC, Hudson RD (2001) Tropical tropospheric ozone and biomass burning. *Science* 291:2128–2132
- Thornhill GD, Ryder CL, Highwood EJ, Shaffrey LC, Johnson BT (2018) The effect of South American biomass burning aerosol emissions on the regional climate. *Atmos. Chem. Phys.* 18:5321–5342
- Tille KJW, Bächmann K (1987) Natural and Anthropogenic Hydrocarbons and Halocarbons Over the Atlantic Ocean: Latitudinal Distributions of Mixing Ratios and Sources. In: Angeletti G, Restelli G (eds) *Physico-Chemical Behaviour of Atmospheric Pollutants: Proceedings of the Fourth European Symposium held in Stresa, Italy, 23-25 September 1986*. Springer, Dordrecht, pp 440–450
- Tinel L, Adams TJ, Hollis LDJ, Bridger AJM, Chance RJ, Ward MW, Ball SM, Carpenter LJ (2020) Influence of the Sea Surface Microlayer on Oceanic Iodine Emissions. *Environmental Science & Technology* 54:13228–13237. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02736>
- Tkachenko EY, Kozachkov SG (2012) Possible contribution of triboelectricity to snow–air interactions. *Environ. Chem.* 9:109–115

- Tomaziello ACN, Carvalho LMV, Gandu AW (2016) Intraseasonal variability of the Atlantic Intertropical Convergence Zone during austral summer and winter. *Clim Dyn* 47:1717–1733
- Vaughan G, Tuck AF (1985) Aircraft Measurements Near Jet Streams. In: Zerefos CS, Ghazi A (eds) *Atmospheric Ozone*, pp 572–579
- Velthoven PFJ van, Kelder H (1996) Estimates of stratosphere-troposphere exchange: Sensitivity to model formulation and horizontal resolution. *J. Geophys. Res. - D* 101:1429–1434
- Ventrice MJ, Thorncroft CD, Roundy PE (2011) The Madden–Julian Oscillation’s Influence on African Easterly Waves and Downstream Tropical Cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.* 139:2704–2722
- Wagenbach D, Görlach U, Moser K, Münnich KO (1988) Coastal Antarctic aerosol: the seasonal pattern of its chemical composition and radionuclide content. *Tellus B* 40B:426–436
- Wang H, Fu R (2007) The Influence of Amazon Rainfall on the Atlantic ITCZ through Convectively Coupled Kelvin Waves. *Journal of Climate* 20:1188–1201
- Wefer G, Bleil U, Schulz H, Fischer G (1997) *Geo Bremen South Atlantic 1996. Cruise M34 January 3 - April 15, 1996. Meteor-Berichte*
- Weigel W, Wefer G, Pfannkuche O (1991) *Ostatlantik 90 - Expedition, Reise Nr. 12, 13. März - 30. Juni 1990. Meteor-Berichte* 91-1:1–173
- Weiss W, Stockburger H, Sartorius H, Münnich KO (1982) Kr85 Meridionalschnitte. *Berichte zur Polarforschung* 6:72–73
- Weiss W, Sittkus A, Stockburger H, Sartorius H, Münnich KO (1983) Large-scale atmospheric mixing derived from meridional profiles of krypton 85. *J. Geophys. Res.* 88:8574
- Weller R, Lilischkis R, Schrems O, Neuber R, Wessel S (1996) Vertical ozone distribution in the marine atmosphere over the central Atlantic Ocean (56°S - 50°N). *J. Geophys. Res. - D* 101:1387–1399
- Weller R, Neuber R, Schrems O (1998) Vertical ozone distribution over the central Atlantic Ocean (70 N-60 S). *Polar stratospheric ozone 1997: Proc 4th Europ Symp on Polar Stratospheric Ozone, Schliersee, 1997* (N R P Harris, I Kilbane-Dawe, Amanatidis, eds) *Air pollution research report*
- Weller R, Levin I, Wagenbach D, Minikin A (2006) The air chemistry observatory at Neumayer Stations (GvN and NM-II) Antarctica. *Polarforschung* 76:39–46
- Wessel S, Aoki S, Winkler P, Weller R, Herber A, Gernandt H, Schrems O (1998) Tropospheric ozone depletion in polar regions A comparison of observations in the Arctic and Antarctic. *Tellus B* 50:34–50
- Winger K, Feichter J, Kalinowski MB, Sartorius H, Schlosser C (2005) A new compilation of the atmospheric 85krypton inventories from 1945 to 2000 and its evaluation in a global transport model. *Journal of Environmental Radioactivity* 80:183–215
- Winkler P (1988) Surface ozone over the Atlantic ocean. *J. Atmos. Chem.* 7:73–91. <https://doi.org/10.1007/bf00048255>
- Winkler P, Brylka S (1992) Regular fluctuations of surface ozone at Georg-von-Neumayer station, Antarctica. *Tellus B* 44:33–40

Zeitzschel B, Zenk W (1981) Beobachtungen und erste Ergebnisse der Meteor-Reise Nr. 56. Ber. Institut f. Meereskunde Kiel 80

Zenk W, Müller TJ, Wefer G (1989) Barlavento - Expedition, Reise Nr. 9, 29. Dezember 1988 - 17. März 1989. Meteor-Berichte 89-2. https://doi.org/10.2312/CR_M9

Zhang C (2001) Double ITCZs. J. Geophys. Res.-D (Journal of Geophysical Research) 106:11785–11792. <https://doi.org/10.1029/2001JD900046>

14. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|-------|--|
| AO | Arktische Oszillation |
| AWI | Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven |
| BfS | Bundesamt für Strahlenschutz |
| BHV | Bremerhaven |
| DWD | Deutscher Wetterdienst, Offenbach |
| ENSO | El Nino-Southern Oscillation |
| ECMWF | European Center for Medium Range Weather Forecast |
| FS | Forschungsschiff |
| FFS | Fischereiforschungsschiff |
| GvN | Georg von Neumayer |
| HH | Hansestadt Hamburg |
| ITCZ | Innertropische Konvergenzzone |
| KFA | Kernforschungsanlage |
| LDF | Leitstelle Deutsche Forschungsschiffe |
| NAO | Nord Atlantik Oszillation |
| QBO | Quasi-biennial Oscillation |
| WOZ | wahre Ortszeit |

Danksagung

Allen Betreuern der Ozonmessungen gebührt an dieser Stelle mein besonderer Dank. Sie haben geholfen, ohne großen Kostenaufwand zur Datengewinnung beizutragen, die auf andere Weise und ohne ihren Einsatz nicht möglich gewesen wäre. Folgende Personen haben die Gerätebetreuung übernommen, wegen der großen Zahl wird hier nur die Institutionszugehörigkeit genannt. Insgesamt wurde die Betreuung von etwa 35 Personen vorgenommen, denen für ihre Bereitschaft meine besondere Anerkennung und Dankbarkeit gilt:

Dem Personal des DWD in den Bordwetterwarten auf den verschiedenen Forschungsschiffen. Wissenschaftlern der Universitäten Mainz und Frankfurt, des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz und des Alfred-Wegener-Instituts für Polarforschung in Bremerhaven.

Bordpersonal von ausländischen Forschungsschiffen und Versorgern.

Überwinterern der *Georg-von-Neumayer-Station* in der Antarktis.

Herrn Dr. W. Weiß (BfS) danke ich für die Mitteilung seiner Messergebnisse zu Krypton-85.

Herrn Manfred Theel (DWD) danke ich für die umfangreiche Datenaufbereitung.

Herrn Dr. R. Weller (AWI) danke ich für die Durchsicht des Manuskripts und wertvolle Kommentare.

Bildrechte

- Titel links: Joachim Kettler (DHI); rechts: Gert König-Langlo (AWI)
- Abb. 2.1-2.3: Peter Winkler (DWD)
- Abb. 3.1: Peter Winkler (DWD)
- Abb. 3.2: Universität Hamburg /LDF/ V. Domas.
- Abb. 3.3: Manfred Stein (persönliche Mitteilung), Fotograf unbekannt
- Abb. 3.4 Manfred Stein (persönliche Mitteilung), Fotografin R. Schumacher (vermutet)
- Abb. 3.5: Hannes Grobe (AWI)
- Abb. 3.6: Gert König-Langlo (AWI)
- Abb. 3.7: Archiv AWI, Fotograf Joachim Plötz (AWI)
- Abb. 3.8: Archiv AWI, Fotograf unbekannt
- Abb. 3.9: *Agulhas* ([commons.wikimedia.org/wiki/File: SAAgulhas_on_the_Thames_\(3\)_236462320.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SAAgulhas_on_the_Thames_(3)_236462320.jpg)) (Abruf 10.05.2021)
- Abb. 3.10-8.4: Peter Winkler (DWD)
- Abb. 9.1: Eumetsat (©EUMETSAT 2015; Abruf 10.05.2021)
- Abb. 9.2-10.1: Peter Winkler (DWD)
- Abb. 10.2: Gert König-Langlo (AWI)
- Abb. 10.3-12.73: Peter Winkler (DWD)

Die **Berichte zur Polar- und Meeresforschung** (ISSN 1866-3192) werden beginnend mit dem Band 569 (2008) als Open-Access-Publikation herausgegeben. Ein Verzeichnis aller Bände einschließlich der Druckausgaben (ISSN 1618-3193, Band 377-568, von 2000 bis 2008) sowie der früheren **Berichte zur Polarforschung** (ISSN 0176-5027, Band 1-376, von 1981 bis 2000) befindet sich im electronic Publication Information Center (**ePIC**) des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI); see <https://epic.awi.de>. Durch Auswahl "Reports on Polar- and Marine Research" (via "browse"/"type") wird eine Liste der Publikationen, sortiert nach Bandnummer, innerhalb der absteigenden chronologischen Reihenfolge der Jahrgänge mit Verweis auf das jeweilige pdf-Symbol zum Herunterladen angezeigt.

The **Reports on Polar and Marine Research** (ISSN 1866-3192) are available as open access publications since 2008. A table of all volumes including the printed issues (ISSN 1618-3193, Vol. 377-568, from 2000 until 2008), as well as the earlier **Reports on Polar Research** (ISSN 0176-5027, Vol. 1-376, from 1981 until 2000) is provided by the electronic Publication Information Center (**ePIC**) of the Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (AWI); see URL <https://epic.awi.de>. To generate a list of all Reports, use the URL <http://epic.awi.de> and select "browse"/ "type" to browse "Reports on Polar and Marine Research". A chronological list in declining order will be presented, and pdf-icons displayed for downloading.

Zuletzt erschienene Ausgaben:

760 (2022) Messungen des oberflächennahen Ozons an Bord von Forschungsschiffen im Atlantik und an der GEORG-VON-NEUMAYER-STATION in der Antarktis von 1977 bis 1996, by Peter Winkler

759 (2022) The Expedition AMD2104 of the Research Vessel CCGS AMUNDSEN to the Arctic Ocean in 2021, edited by Lisa Bröder, Matt O'Regan, Michael Fritz, Bennet Juhls, Taylor Priest, Julie Lattaud, Dustin Whalen, Atsushi Matsuoka, André Pellerin, Thomas Bossé-Demers, Daniel Rudbäck, Antje Eulenburg, Thomas Carson, Maria-Emilia Rodriguez-Cuicas, Paul Overduin, and Jorien Vonk

758 (2021) Expeditions to Antarctica: ANT-Land 2020/21 NEUMAYER STATION III, Kohnen Station, Flight Operations and Field Campaigns, edited by Tanja Fromm, Constance Oberdieck, Tim Heitland and Christine Wesche with contributions of the participants

757 (2021) The Expedition PS126 of the Research Vessel POLARSTERN to the Fram Strait in 2021, edited by Thomas Soltwedel with contributions of the participants

756 (2021) Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2020, edited by Boris K. Biskaborn, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Mikhail N. Grigoriev, Anne Morgenstern, Luidmila A. Pestryakova, Leonid V. Tsibizov, and Antonia Dill

755 (2021) The Expedition PS124 of the Research Vessel POLARSTERN to the southern Weddell Sea in 2021, edited by Hartmut H. Hellmer and Moritz Holtappels with contributions of the participants

754 (2021) MOSAiC Expedition: Airborne Surveys with Research Aircraft POLAR 5 and POLAR 6 in 2020, edited by Andreas Herber, Sebastian Becker, Hans Jakob Belter, Jörg Brauchle, André Ehrlich, Marcus Klingebiel, Thomas Krumpfen, Christof Lüpkes, Mario Mech, Manuel Moser, and Manfred Wendisch

753 (2021) The Expedition PS123 of the Research Vessel POLARSTERN to NEUMAYER STATION III in 2020/2021, edited by Tim Heitland with contributions of the participants

752 (2021) Expeditions to Fennoscandia in 2020, edited by Matthias Fuchs, Lona van Delden, Nele Lehmann, and Torben Windirsch

Recently published issues:



ALFRED-WEGENER-INSTITUT
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-
UND MEERESFORSCHUNG

BREMERHAVEN

Am Handelshafen 12
27570 Bremerhaven
Telefon 0471 4831-0
Telefax 0471 4831-1149
www.awi.de

HELMHOLTZ