

**Saisonalität und kurzperiodische Variabilität
des Seesalz-Aerosols und des bodennahen
Ozons in der Antarktis (Neumayer-Station)
unter Berücksichtigung der Meereisbedeckung**

**Seasonal and short-periodic variability of
seasalt aerosol and near-surface ozone in
Antarctica (Neumayer-Station) in consideration
of sea-ice coverage**

Jörg Hofmann

**Ber. Polarforsch. 376 (2000)
ISSN 0176 - 5027**

Jörg Hofmann

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Am Handelshafen 12
D-27568 Bremerhaven

Die vorliegende Arbeit wurde im April 1998 dem Fachbereich 2 (Biologie/Chemie)
der Universität Bremen als Dissertation vorgelegt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Summary	4
1. Einführung	7
1.1 Atmosphärische Spurenstoffe in der Antarktis	7
1.2 Zielstellung und weitere Vorgehensweise	10
2. Grundlagen und Datenbasis	12
2.1 Luftmassentransporte zur Neumayer-Station	12
2.1.1 Luftmassen und Zyklonen	12
2.1.2 Meteorologische und klimatologische Situation an der Neumayer-Station	16
2.1.3 Analyse des Luftmassentransports	21
2.1.4 Ableitung der Haupteinzugsgebiete	27
2.2 Spurenstoffmessungen an der Neumayer-Station	29
2.2.1 Das Luftchemische Observatorium	29
2.2.2 Seesalz-Aerosol	32
2.2.3 Bodennahe Ozon	38
2.3 Datenbasis und Datenverarbeitung	46
2.3.1 Datenbasis	46
2.3.2 Datenbearbeitung	47

3. Luftmassenbezogene Untersuchungen der Meereisbedeckung	48
3.1 Bestimmung der Meereisbedeckung aus Fernerkundungsdaten	48
3.2 Bestimmung der gebietsbezogenen Eisbedeckungen	52
3.2.1 Methode	52
3.2.2 Allgemeine Charakteristik	53
3.2.3 Vergleich zwischen Ost- und West-Einzugsgebiet	55
3.3 Trajektorienbezogene Eisbedeckungen	58
3.3.1 Methode	58
3.3.2 Allgemeine Charakteristik	59
3.3.3 Vergleich zwischen Ost- und West-Transporten	60
3.4 Zusammenfassung und Diskussion	66
3.5 Schlußfolgerungen	69
4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozone-Konzentration	70
4.1 Beschreibung des verwendeten Korrelationsalgorithmus	70
4.1.1 Beschreibung der Bestandteile des Korrelators	71
4.1.2 Testkorrelationen	74
4.2 Seesalz-Aerosol	84
4.2.1 Erwartete Ergebnisse	84
4.2.2 Aufbereitung der Zeitreihe	85
4.2.3 Übersicht über die Ergebnisse	86
4.2.4 Zusammenfassung und Diskussion	92
4.2.5 Schlußfolgerungen	94
4.3 Bodennahe Ozon	95
4.3.1 Erwartete Ergebnisse	95
4.3.2 Aufbereitung der Zeitreihe	95
4.3.3 Ergebnisse der Korrelation	96
4.3.4 Zusammenfassung und Diskussion	96
4.3.5 Schlußfolgerungen	98
5. Schlußbemerkungen & Ausblick	99

6. Literaturverzeichnis	101
Anhang	107
A. Ergebnisse der Meereisuntersuchung	107
A.1 Relative Meereisbedeckungen im östlichen Untersuchungsgebiet	107
A.2 Relative Meereisbedeckungen im westlichen Untersuchungsgebiet	113
A.3 Trajektorienbezogene, relative Eisbedeckung des Gesamtseegebietes	119
A.4 Trajektorienbezogenes, absolutes Meereisgebiet	125
A.5 Trajektorienbezogenes, absolutes Seegebiet	131
B. Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalysen	137
B.1 Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse für Seesalz-Aerosol	137
B.1.1 Kreuzkorrelation von Seesalz-Aerosol mit Meereisbedeckungen des östlichen Einzugsgebietes	137
B.1.2 Kreuzkorrelation von Seesalz-Aerosol mit Meereisbedeckungen des westlichen Einzugsgebietes	158
B.1.3 Kreuzkorrelation von Seesalz-Aerosol mit dem trajektorienbezo- genen, absoluten Seegebiet	179
B.2 Kreuzkorrelation von Bodenzon mit der trajektorienbezogenen, abso- luten Meereisbedeckung	185
C. Sonstiges	191
Danksagung	193

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Saisonalität und der kurzperiodischen Variabilität atmosphärischer Spurenstoffe in der Antarktis unter Berücksichtigung der Meereisbedeckung. Als Meßort wurde die deutsche Forschungsstation NEUMAYER ($8^{\circ} 15' W$ und $70^{\circ} 39' S$) gewählt, an der sich sowohl ein Meteorologisches als auch ein Luftchemisches Observatorium befindet.

Ziel war die Untersuchung des saisonalen Verhaltens der Meereisbedeckung für die Umgebung der Neumayer-Station unter besonderer Berücksichtigung der Variabilität des Luftmassen-Transports. Darauf aufbauend sollte der Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen, zeitlichen Variabilität der Meereisbedeckung und der kurzperiodischen, zeitlichen Veränderung der Konzentration des Seesalz-Aerosols und des bodennahen Ozons im Bereich der Neumayer-Station untersucht werden. Es sollte festgestellt werden, ob und wie Meereis eine Luftmasse auf ihrem Weg zu NEUMAYER luftchemisch beeinflusst.

Ausgangspunkt der Untersuchungen war eine umfassende Analyse der Meereissituation für die Umgebung dieser Station anhand von Eisbedeckungsdaten des National Snow and Ice Data Center (NSIDC), Boulder. Mit der Bestimmung gebietsbezogener und trajektorienbezogener Eisbedeckungen wurden zwei Methoden entwickelt, die einer auf den Luftmassen-Transport bezogenen Betrachtung der Meereisbedeckung prinzipiell gerecht werden. Gebietsbezogene Eisbedeckung bezeichnet dabei die Eisbedeckung innerhalb fester geographischer Gebiete, welche von den meteorologischen Haupttransportlagen abgeleitet wurden und Gebiete darstellen, über die ein Großteil des Luftmassen-Transports zur Neumayer-Station hinwegführt (Haupteinzugsgebiete der Luftmassen). Trajektorienbezogene Eisbedeckung bezeichnet die Eisbedeckung innerhalb einer Fläche, die berechneten Rückwärts-Trajektorien mittels eines speziellen Verfahrens zugeordnet wurde. Gebietsbezogene Eisbedeckungen sind aufgrund der größeren Grundgesamtheit (tägl., rel. Eisbedeckungen ab 1979) vor allem für statistische Untersuchungen der "reinen" Eisbedeckung geeignet und methodisch bedingt, repräsentativ für Ferntransporte. Trajektorienbezogene Eisbedeckungen berücksichtigen die saisonale Variabilität der Eisbedeckung und die tägliche Variation der Bedingungen für den Luftmassen-Transport. Aufgrund der begrenzten Länge der Trajektorien repräsentieren sie vor allem die Eisbedeckung im Nahbereich.

Bestandteil der Untersuchungen zur Meereisbedeckung war eine Analyse des Luftmassen-Transports zur Neumayer-Station. Anhand saisonaler Herkunftshäufigkeitsverteilungen und mittlerer Trajektorien wurden drei Haupttransportklassen unterschieden und entsprechende Haupteinzugsgebiete abgeleitet. Der Untersuchung lagen vom Deutschen Wetterdienst (DWD) für 1993 bis 1996 für die geographische Position der Neumayer-Station berechnete, tägliche Rückwärts-Trajektorien zugrunde. Den Hauptanteil von ca. 70 % aller Luftmassentransporte machen Ost-Transporte aus. Der Startpunkt der zugeordneten Trajektorien befindet sich dabei in einem Sektor zwischen 0° und 135° von NEUMAYER aus gesehen (Azimutwinkel). Als Haupteinzugsgebiet für Ost-Transporte wurde ein Gebiet nördlich von 60°S und 45°W bestimmt. Von diesem Haupteinzugsgebiet bis nach NEUMAYER bewegen sich Ost-Transporten zuzurechnende Luftmassen über das antarktische Inlandeis. West-Transporte sind mit ca. 25 % am zweithäufigsten, wobei der Startpunkt der zugeordneten Trajektorien zwischen 225° und 360° liegt. Ihr Haupteinzugsgebiet ist die Weddellsee. West-Transporten zuzurechnende Luftmassen bewegen sich im Mittel von Westen kommend über See im küstennahen Bereich zur Neumayer-Station. Eine geringe Rolle spielen Süd-Transporte aus einem Sektor zwischen 135° und 225° . Ihr Herkunftsgebiet liegt auf dem Inlandeis südlich von NEUMAYER. Damit sind Süd-Transporte für Untersuchungen der Meereisbedeckung nicht relevant.

Basierend auf der Festlegung der Haupteinzugsgebiete wurden für den Zeitraum von 1979 bis 1996 tägliche, gebietsbezogene Eisbedeckungen für das östliche und das westliche Einzugsgebiet bestimmt. Ausgehend von den verfügbaren Rückwärts-Trajektorien wurden tägliche, trajektorienbezogene Eisbedeckungen für den Zeitraum von 1993 bis 1996 berechnet. Es zeigte sich, daß es wesentliche, vor allem transportbedingte Unterschiede in der Eisbedeckung gibt, die eine Luftmasse auf ihrem Weg zur Neumayer-Station beeinflussen können. Ost-Transporte sind dabei deutlich weniger (im Jahresgang ca. 3 Monate später und über einen kürzeren Zeitraum) dem Meereiseinfluß ausgesetzt als West-Transporte. Weiterhin wurde festgestellt, daß West-Transporte ganzjährig im Nahbereich (1 bis 3 Tage vor Erreichen von NEUMAYER) häufiger über Meereis- bzw. Seegebiet, dagegen Ost-Transporte im Nahbereich vor allem im Winter häufiger über Schelf- oder Inlandeis führen. Dies läßt bezogen auf die untersuchten atmosphärischen Spurenstoffe folgende Schlußfolgerungen zu: Wenn das nach NEUMAYER transportierte Seesalz-Aerosol aus Polynien stammt, dann müßte es bevorzugt mit West-Transporten zur Station gelangen, da diese im küstennahen Bereich Gebiete überqueren in denen bevorzugt Polynien auftreten. Sollte es jedoch aus eisfreien Seegebieten kommen, also über Ferntransporte nach NEUMAYER gelangen, dann müßte es auch bei Ost-Transporten auftreten. Der bodennahe Antransport ozonarmer Luftmassen müßte, da die Ozonzerstörung nach Wessel [1997] an das Vorhandensein von Meereis gebunden ist, vorzugsweise mit West-Transporten in Zusammenhang stehen. Auch hier könnten Polynien eine besondere Rolle spielen, da in deren Randbereich durch Deposition von Seesalz-Aerosol und Überspülen mit Seewasser Seesalz und so-

mit Bromverbindungen auf dem Meereis abgelagert werden. Damit wäre eine weitere Voraussetzung für den troposphärischen Ozonabbau in der Antarktis erfüllt.

Abschließend wurde der Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen Variabilität der Eisbedeckung und der kurzperiodischen Variabilität der an NEUMAYER gemessenen Konzentrationen von Seesalz-Aerosol und bodennahem Ozon untersucht. Dazu wurden Annahmen über den Transportverlauf gemacht, die mittels Kreuzkorrelationsanalyse zwischen der betreffenden Spurenstoff-Meßreihe und den verschiedenen Eisbedeckungs-Zeitreihen überprüft wurden. Es zeigte sich, daß nach der aktuellen Datenlage kein kausaler Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen Variabilität der Meereisbedeckung und der kurzperiodischen Variabilität der beiden Spurenstoffe existiert.

Ein wichtiges Ergebnis der Arbeit ist die umfassende Beschreibung der Meereisbedeckung für die Umgebung von NEUMAYER. Es wurden Methoden zur Untersuchung der Meereisbedeckung entwickelt, die analog auch für andere Meßorte angewandt werden können. Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Meereisbedeckung und Spurenstoffen zeigte vor allem, daß der Transport der untersuchten Spurenstoffen in die Antarktis Resultat komplexer atmosphärischer Prozesse ist, bei deren Auftreten und Wirken der Meereiseinfluß offenbar nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Summary

The present work deals with the seasonal variations and the short periodical variability of atmospheric trace compounds in Antarctica by taking sea ice coverage into consideration. The German Antarctic research station Neumayer ($8^{\circ} 15' W$ and $70^{\circ} 39' S$) has been selected for the measurements. Neumayer station accommodates a meteorological as well as an air chemistry observatory.

The main objective of the investigations performed was the study of the seasonal behaviour of the sea ice coverage for the surroundings of Neumayer station under special consideration of air-mass transport variability. Based on that it was intended to study the correlation between the short periodical, temporal variability of the sea ice coverage, the short periodical, temporal changes of the sea-salt aerosol concentration and the near-surface ozone in the vicinity of Neumayer station. It was the aim to determine whether and how sea ice can influence an air mass on its way to Neumayer station.

The originator of the investigations was an extensive analysis of the sea ice situation for the surroundings of the station on the basis of ice coverage data from the National Snow and Ice Data Center (NSIDC), Boulder. Two methods have been developed with the determination of area-related and trajectory-related ice coverages, which meet the requirements of an air mass transport related consideration of the sea ice coverage. Area-related ice coverage marks the ice coverage within fixed geographical regions, which have been derived from the main meteorological transport layers and represent areas over which a better part of the air mass transport towards Neumayer station takes place. Trajectory-related ice coverage designates the ice coverage within an area, which has been assigned to calculated back trajectories by means of a special method. Area-related ice coverages are above all suitable for statistical investigations of the pure ice coverage and - conditional on the method - a representative cross section for long distance transport. Trajectory-related ice coverages take into account the seasonal variability of the ice coverage and the daily variations of the air transport conditions. Due to the limited length of the trajectories they represent mainly ice coverages in the vicinity of the station.

An essential element of the sea ice coverage investigations was an analysis of the air mass

transport towards Neumayer station. On the basis of seasonal frequency distributions of the origins and averaged trajectories three main transport categories have been distinguished and the corresponding main catchment areas have been derived. These investigations were based on daily back trajectories which were made available by the Deutsche Wetterdienst (DWD) for the geographical area of Neumayer station and the years 1993-1996. About 70 % of all air mass transports are east transports. The starting point of the assigned trajectories is within the sector between 0° and 135° as seen from the station (azimuth angle). As main catchment area for east transports a region north of 60°S and 45°W has been determined. From this main catchment area air masses which can be attributed to east transports stream over the antarctic inland ice. West transports have a share of 25 % and the starting point of the assigned trajectories is between 225° and 360° . Their main catchment area is the Weddell Sea. Air masses which can be attributed to west transports move over sea in near-coast areas towards Neumayer station. South transports from a sector between 135° and 225° play only a secondary role. Their origin is located on the inland ice south of Neumayer station. Consequently, south transports are not relevant for investigations of the sea ice coverage.

Based on the predetermination of the main catchment areas area-related ice coverages for the easterly and westerly catchment areas have been determined for the period from 1979 to 1996. Starting from the available back trajectories, daily trajectory-related ice coverages for the period from 1993 till 1996 have been calculated. It could be shown, that there are substantial, primarily transport related differences in the ice coverage, which can influence an air mass on its way to Neumayer station. East transports are noticeable less exposed (about three months later in the annual cycle and over a shorter period) to the influence of the sea ice than west transports. Furthermore, it has been realised that west transports in the vicinity (1 to 3 days before reaching the station) move more frequently all-year-round over sea ice or sea areas whereas east transports in the vicinity move primarily during winter over shelf- or sea ice areas. From these observations the following conclusions can be drawn for the investigated atmospheric trace compounds: If the sea-salt aerosol which is transported to Neumayer station originates from polynias, then it should preferably reach the station via west transports since these traverse regions in near coastal areas where polynias frequently appear. Should the aerosol originate from ice-free sea areas, that means it would reach Neumayer station by long distance transport, then it should show up also with east transports. The near-surface transport of low-ozone air masses should preferentially be connected with west transports since - according to a hypothesis - ozone depletion should be connected to the existence of sea ice. In such a case polynias could play a crucial role, since at their rims sea-salt aerosol can be deposited and, by flooding with sea water, seasalt and thus bromine-containing species can be enriched. Therewith a further condition for the tropospheric ozone depletion in Antarctica would be fulfilled.

Furthermore, the connection between the short periodical variability of the ice coverage and the short periodical variability of concentrations of sea-salt aerosol and near-surface ozone have been investigated. For that purpose assumptions about the transport processes have been made, which have been checked by means of a cross-correlation analysis between the corresponding measurements and the various time series for ice coverage. It could be shown that the existing data do not show a causality between the short periodical variability of the sea ice coverage and the short periodical variability of the sea salt aerosol and near-surface ozone

An important result of this work is the extensive description of the sea ice coverage for the vicinity of Neumayer station. Methods for the investigation of the sea ice coverage have been developed, which analogously can also be applied for other measuring sites. The investigation of the correlation between sea ice coverage and atmospheric trace compounds primarily shows that the transport of trace compounds in Antarctica is the result of complex atmospheric processes, on which their occurrence and impact the sea ice coverage obviously plays only a secondary role.

1. Einführung

1.1 Atmosphärische Spurenstoffe in der Antarktis

Die Antarktis, der Kontinent, der den Südpol unserer Erde umgibt, ist fast vollständig von Eis bedeckt. Sie ist rundum von Ozeanen umgeben und aufgrund ihres Klimas nicht von Menschen besiedelt. Infolgedessen gilt der Kontinent als weitgehend frei von Quellen für natürliche und anthropogene atmosphärische Spurenstoffe¹. Die Quellen natürlicher biogener Spurenstoffe (Stickstoff- und Schwefelverbindungen) befinden sich hauptsächlich im umgebenden Ozean und im teilweise von Tieren und Pflanzen besiedelten Küstengebiet. Wegen der relativ geringen Populationen und der geringen Luft- und Wassertemperaturen sind die Quellstärken im küstennahen Bereich jedoch nicht mit denen "normal" besiedelter Gebiete vergleichbar. Die wenigen eisfreien Flächen, vor allem im Bereich der antarktischen Halbinsel sind Quellen natürlicher nichtbiogener Spurenstoffe. Insbesondere werden hier Mineralstäube emittiert. Forschungsstationen und Schiffe stellen Quellen anthropogener Spurenstoffe dar.

Wie Messungen in der Atmosphäre und an Eisbohrkernen zeigen, gelangen auch Spurenstoffe nichtantarktischer Herkunft zum antarktischen Kontinent [Wagenbach u.a., 1988, Wagenbach u.a., 1997, Minikin, 1994]. Sie werden mit der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation herantransportiert. Nach ihrer Herkunft unterscheidet man einerseits Spurenstoffe kontinentalen und marinen Ursprungs, andererseits nach ihrer Entstehung, natürliche und anthropogene Spurenstoffe. Die in die Antarktis transportierten Spurenstoffe werden dort auf der Schneeoberfläche deponiert (trockene Deposition) oder vom Niederschlag aus der Atmosphäre ausgewaschen und mit dem Niederschlag auf der Eisoberfläche abgelagert (feuchte Deposition). Durch die schichtweise Akkumulation des Niederschlags hat sich in den letzten hunderttausend Jahren der Eisschild der Antarktis, das kontinentale Inlandeis aufgebaut. Mit ihm ist in Form der eingelagerten atmosphärischen Spurenstoffe ein umfassendes Klimaarchiv entstanden, das Auskunft über die Zusammensetzung der Atmosphäre und eventuelle Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation in den vergangenen Jahrtausenden gibt. Diese Information wird jedoch nur zugänglich, wenn man als Referenzinformation

¹Wenn nachfolgend von Spurenstoffen die Rede ist, sind immer atmosphärische Spurenstoffe gemeint.

1. Einführung

die Zusammensetzung der heutigen Atmosphäre kennt und der Transport der Spurenstoffe in die Antarktis ausreichend verstanden ist.

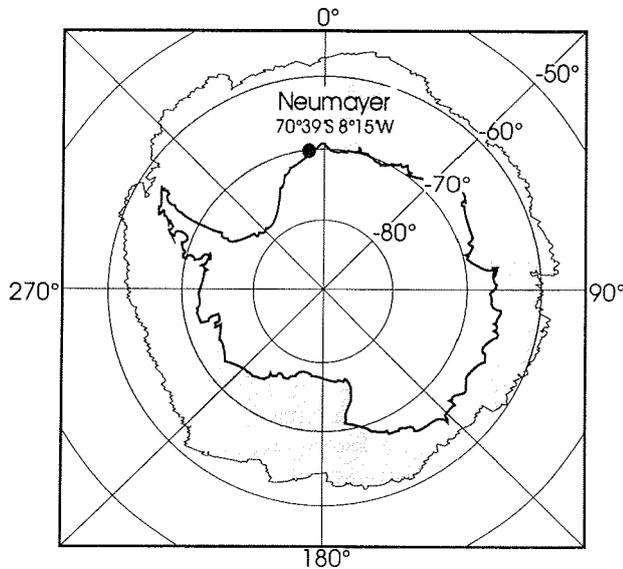


Abbildung 1.1 Antarktis mit Meereisgrenze am 2.10.1986.

Auf ihrem Weg zum antarktischen Kontinent müssen die Luftmassen den die Antarktis umgebenden, Südlichen Ozean überqueren. Der Südliche Ozean ist saisonal wechselnd mit Eis bedeckt. Ozean und Meereis können selbst Quellen und Senken für Spurenstoffe sein. Die Eisbedeckung erstreckt sich im Süd-Winter² ausgehend vom antarktischen Kontinent einige hundert bis mehrere tausend Kilometer nach Norden und verschwindet im Sommer fast vollständig. Dies hat zwei Konsequenzen für den Spurenstoff-Transport:

1. Für einen Beobachter auf dem antarktischen Kontinent verändert sich die Entfernung zur Spurenstoffquelle Südlicher Ozean im Jahresgang um einige hundert bis mehrere tausend Kilometer.
2. In den Transportweg schiebt sich im Jahresgang eine weitere mögliche Quelle oder Senke von Spurenstoffen.

²Da sich die gesamte Arbeit auf die Südhemisphäre bezieht, wird im weiteren auf den Zusatz "Süd-" für die Jahreszeiten verzichtet.

Eine Einflußnahme der Meereisbedeckung auf den Transport von Spurenstoffen ist also nicht ausgeschlossen und wurde bereits in den Arbeiten von Wagenbach u.a. [1988, 1997], Welch u.a. [1988], Pfaff [1993], Wyputta [1994] und Wessel [1997,1998], die sich mit der Problematik des Spurenstofftransportes in die Antarktis beschäftigten, diskutiert.

Offene Fragen

Nach Wagenbach u.a. [1988] besteht kein direkter Zusammenhang zwischen der an der Neumayer-Station gemessenen Seesalz-Aerosol-Konzentration und dem saisonalen Verlauf der Meereisbedeckung. Gleichzeitig wurde aber festgestellt, daß es für im Frühjahr auftretende Maxima der Seesalz-Aerosol-Konzentration keine Erklärung gibt, außer man bringt sie mit Langstrecken-Transporten oder der Ausbildung von Polynien³ in Zusammenhang. Auch Wyputta [1994] versucht nach ausführlicher Diskussion des Luftmassentransports die frühjährlichen Maxima des Seesalz-Aerosols auf Polynien zurückzuführen. Wagenbach u.a. [1997] präzisieren die Vorstellungen über die Herkunft der Seesalz-Aerosol-Maxima im Frühjahr. Nach Abschätzung von Produktions- und Depositionsraten kommen sie zu dem Ergebnis, daß weder Polynien noch Langstrecken-Transporte diese Maxima schlüssig erklären können.

Wessel [1997,1998] untersuchte das Auftreten von troposphärischen Ozonminima in den Polarregionen. Während für die Arktis recht konkrete Vorstellungen über die Entstehung dieser Minima existieren [Barrie u.a., 1988, Platt, 1997], ist die Arbeit von Wessel, die erste, welche dieses Phänomen umfassend für die Antarktis beschreibt. Letztlich führt sie, analog zur Situation in der Arktis, die Entstehung troposphärischer Ozonminima auf den Herantransport ozonarmer Luftmassen zurück. Die Entstehung dieser ozonarmen Luftmassen wird damit erklärt, daß Ozon durch chemische Reaktionen mit Bromverbindungen zerstört wird. Die Freisetzung dieser reaktiven Bromverbindungen erfolgt wahrscheinlich aus auf dem Meereis deponiertem Seesalz über noch nicht vollständig geklärte (heterogene) Reaktionsmechanismen.

Pfaff [1993] untersucht erstmalig das saisonale Verhalten der Meereisbedeckung in der Umgebung der Neumayer-Station. Durch die Bestimmung der meridionalen Entfernung des nördlichen Meereisrandes von der Station erhält er eine regional bezogene Meereisbedeckungszeitreihe. Welch u.a. [1988] versuchen die mittlere, jährliche Eisbedeckung ausgewählter Regionen (Ross-Meer und gesamte Eisbedeckung des Südlichen Ozeans) mit der aus Schneeproben des Newall-Gletschers gewonnenen, mittleren jährlichen Methansulfonsäure-Konzentration zu korrelieren. Er kommt zu dem Ergebnis, daß vor allem zur Gesamteisbedeckung des südlichen Ozeans eine gute Korrelation existiert.

³Polynien sind Gebiete freien Wassers innerhalb der geschlossenen Meereisbedeckung [Gordon und Comiso, 1988].

1. Einführung

Diese Zusammenstellung zeigt einerseits, daß verschiedene Zusammenhänge zwischen der Meereisbedeckung und der Variation von Spurenstoff-Konzentrationen vermutet werden. Eine systematische Analyse des saisonalen Verlaufs der Meereisbedeckung und der möglichen Konsequenzen für den Luftmassentransport steht aber noch aus.

Andererseits sind es vor allem kurzfristige Phänomene (Maxima der Seesalz-Aerosol-Konzentration, Minima des Bodenozone), die mit der Meereisbedeckung in Verbindung gebracht werden. Eine nähere Betrachtung zeigt, daß letztlich alle Spurenstoffmeßreihen durch eine kurzperiodische Variabilität im Zeitraum von mehreren Tagen gekennzeichnet sind. Diese kurzperiodische, zeitliche Variabilität der Spurenstoffkonzentrationen wird in der Literatur zumeist auf die kurzperiodische Variabilität der Transportprozesse zurückgeführt oder bleibt gänzlich unbeachtet. Wie Markus [1995] zeigt, handelt es sich bei Polynien, um sehr dynamische Gebilde, die sich innerhalb von Tagen öffnen, schließen oder verändern und demonstriert damit die kurzfristige Variabilität der Meereisbedeckung. Insofern stellt sich die Frage ob es einen Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen Variabilität der Meereisbedeckung und der kurzperiodischen Änderung von Spurenstoffkonzentrationen gibt.

1.2 Zielstellung und weitere Vorgehensweise

Aus den im vorherigen Abschnitt dargestellten offenen Fragen ergibt sich die Zielstellung dieser Arbeit wie folgt:

1. Untersuchung des saisonalen Verhaltens der Meereisbedeckung für die Umgebung der Neumayer-Station, vor allem unter Berücksichtigung der Variabilität des Luftmassentransports.
2. Untersuchung des Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen, zeitlichen Variabilität der Meereisbedeckung und der kurzperiodischen, zeitlichen Veränderung der Konzentration ausgewählter Spurenstoffe im Bereich der Neumayer-Station.

Wie in dieser Zielstellung formuliert, soll zuerst das saisonale Verhalten der Meereisbedeckung untersucht werden. Um die Variabilität des Luftmassentransports berücksichtigen zu können, muß zunächst der Luftmassentransport zur Neumayer-Station grundlegend analysiert werden (siehe Abschnitt 2.1). Aus dieser Analyse werden in Kapitel 3 Methoden zur luftmassenbezogenen Beschreibung der Meereisbedeckung abgeleitet, entsprechende Eisbedeckungszeitreihen berechnet und ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung werden in Abschnitt 3.4 zusammengefaßt und diskutiert.

Aufbauend auf den erhaltenen Eisbedeckungszeitreihen soll danach der Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen, zeitlichen Variabilität von Meereisbedeckung und

1.2 Zielstellung und weitere Vorgehensweise

Spurenstoffen untersucht werden. Da nach Literaturangaben [Wagenbach u.a., 1988] [Wagenbach u.a., 1997, Wessel, 1997, Wessel u.a., 1998] möglicherweise eine Verbindung zwischen Seesalz-Aerosol- und Bodenozon-Konzentrationen und der Meereisbedeckung besteht, konzentrieren sich die Untersuchungen dieser Arbeit auf diese beiden Spurenstoffe. Eine allgemeine Einführung zur Seesalz-Aerosol- und Bodenozon-Problematik wird in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 gegeben. In Kapitel 4 wird zunächst der gewählte Vergleichsalgorithmus beschrieben und danach die beim Vergleich erhaltenen Ergebnisse vorgestellt. Eine Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse erfolgt in den Abschnitten 4.2.4 und 4.3.4.

2. Grundlagen und Datenbasis

2.1 Luftmassentransporte zur Neumayer-Station

2.1.1 Luftmassen und Zyklonen

Luftmassen

Die Hauptenergiequelle des Systems Erde-Atmosphäre ist die Sonnenstrahlung. Aufgrund der Kugelform der Erde ist der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung im Äquatorbereich fast senkrecht und flacht zu den Polen hin ab (Kosinusetz). Infolge dieser Verhältnisse "müßte sich das System Erde-Atmosphäre in der Zone zwischen 40°N und 40°S laufend beträchtlich erwärmen, während sich die Polarkappen laufend abkühlen würden" [Fortak, 1982]. Zum Ausgleich dieses gegebenen Energiegradienten strömt Luft vom Äquator zu den Polen und umgekehrt. Zur besseren Charakterisierung dieser Strömungen wurde der Begriff *Luftmasse* geprägt. "Als Luftmasse wird die Luftmenge eines großen Gebietes bezeichnet, welche die gleichen Eigenschaften aufweist, d.h. gleiche Temperatur, Feuchte, Lufttrübung und vor allem den gleichen vertikalen Aufbau." [Berth u.a., 1965]

Damit eine derartige Luftmasse entstehen kann, muß sie über einen längeren Zeitraum den unter einer bestimmten geographischen Breite vorherrschenden Strahlungsbedingungen ausgesetzt sein. Derartige Bedingungen findet man fast ausschließlich in stationären Hochdruckgebieten, also im subtropischen Hochdruckgürtel oder aber im polaren Hoch vor. Entsprechend können grundsätzlich zwei Luftmassen unterschieden werden - tropische Warmluft und Polarluft. Entsprechend ihrem Entstehungsort, über Ozean oder Kontinent, kann man sie noch in maritim oder kontinental geprägte Tropik- bzw. Polarluft unterteilen [Liljequist und Čehak, 1984].

Auf ihrem Weg vom Ursprungsort verändern sich die Eigenschaften der Luftmasse in Abhängigkeit vom Untergrund den sie passiert. Sie verändert ihre Eigenschaften solange, bis sie wieder in den Einflußbereich eines der großen stabilen Hochdruckgebiete gelangen, wo die Luftmasse gänzlich in eine neue transformiert wird. Man nennt diesen Prozess auch *Luftmassen-Transformation*. Für Europa existiert nach Scherhag [1948]

ein allgemeingültiger Index, der die großen Luftmassen nach ihrer Herkunft und ihrem Weg klassifiziert. Für die Umgebung der Neumayer-Station findet man ähnliche Klassifizierungsansätze bei Pfaff [1993] und Wyputta [1994].

Analog dazu, wird eine Luftmasse in Abhängigkeit von ihrem Herkunftsort und ihrem Weg auch chemisch geprägt, indem sie je nach Quellenlage Spurengase und Aerosole aufnimmt. Eine Analogie zur Luftmassen-Transformation gibt es jedoch nur entfernt. Entsprechend ihrer *Verweildauer* oder *Halbwertszeit* verbleiben Spurenstoffe Tage oder Jahre in einer Luftmasse. Durch Mischung mit anderen Luftmassen oder durch chemische Reaktionen (hier findet dann auch eine Transformation statt) kann der Spurenstoffgehalt verändert werden.

Zyklonen und Zyklogenese in der Südhemisphäre

Auf ihrem Weg zum Äquator bzw. zu den Polen treffen polare und tropische Luftmassen im Bereich des 40. und 60. Breitengrades aufeinander. Infolge der verschiedenen Dichte der kalten und warmen Luft, welche eine direkte Mischung verhindert, bildet sich eine Luftmassen-Grenze heraus. Sie verläuft zirkumpolar und wird *Polarfront* genannt (siehe Abb. 2.1).

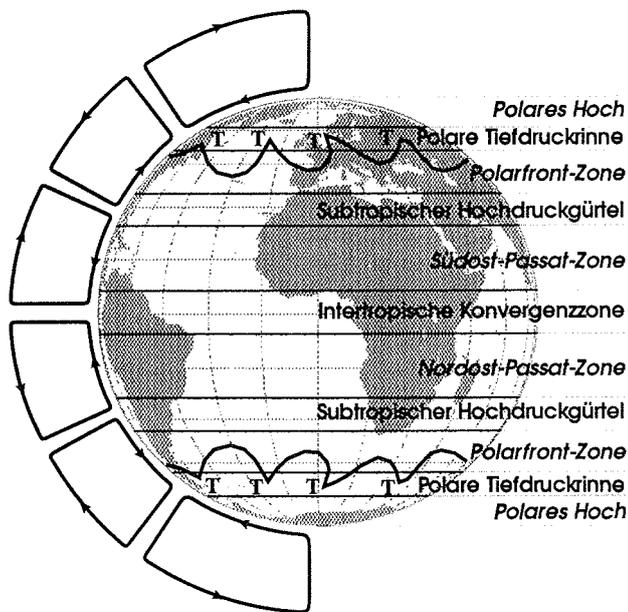


Abbildung 2.1 Schematische Darstellung der allgemeinen Zirkulation.

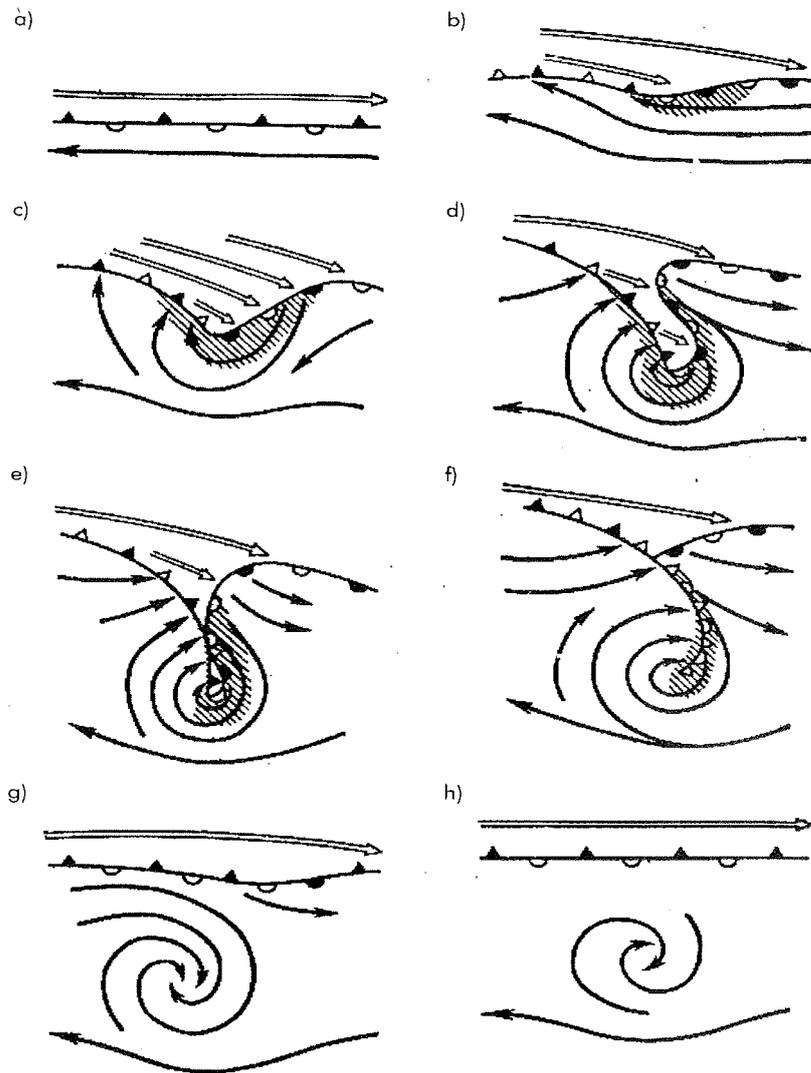


Abbildung 2.2 Entwicklung einer südhemisphärischen Zyklone (nach Bjerknes), a) Ausgangsstadium, b) Verwellung der Polarfront, durch Kalt- bzw. Warmluftvorstoß, c) Ausbildung der Warm- und Kaltfront, d) Voll ausgebildete Zyklone, e) Beginnende Okklusion durch Ablösung der Warmluft vom Boden f) Alte Zyklone mit voll ausgebildeter Okklusion g) und h) Auflösung der Zyklone [Berth u.a., 1965]

2.1 Luftmassentransporte zur Neumayer-Station

Auf Grund von Erwärmung und Ausdehnung einer Luftmasse, durch orographische Effekte, etc. und die Wirkung der Coriolisbeschleunigung kommt es zu sogenannten Kalt- oder Warmluftvorstößen gegen die Polarfront (Abb. 2.2 a,b). Dies hat eine sogenannte Wellenstörung in der Polarfront zur Folge und ist Ausgangspunkt einer Zyklonogenese, der Bildung eines neuen Tiefdruckgebietes, einer Zyklone. Im weiteren Verlauf bilden sich getrieben durch die polare Kaltluft die sogenannte Kaltfront bzw. getrieben durch die Warmluft die Warmfront heraus. Diese werden in der Südhemisphäre gegeneinander mit dem Uhrzeigersinn verwirbelt (Abb. 2.2 d,e). In Folge verschiedener dynamischer Effekte und das, ein Abbremsen der Warmfront bewirkende, Aufgleiten dieser weniger dichten Luftmasse auf die Kaltluft, bewegt sich die Kaltfront schneller als die Warmfront. Dies bewirkt eine Ablösung der Warmluft vom Boden ausgehend vom Kern der Zyklone. Es bildet sich eine Okklusion. Sie ist dadurch charakterisiert, daß sich am Boden Warm- und Kaltfront vereinigt haben, während sich in der Höhe noch Warmluft des ehemaligen Warmsektors befindet (Abb. 2.2 f,g). Je nach dem ob die vorauseilende Kaltluft wärmer oder kälter als die nacheilende ist, spricht man von einer Kalt- oder Warmfrontokklusion [Berth u.a., 1965].

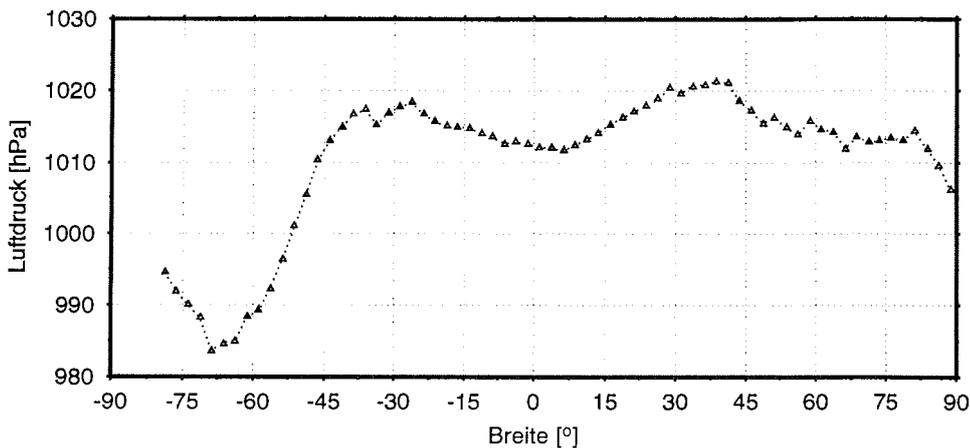


Abbildung 2.3 Breitenbezogenes Mittel des Bodenluftdrucks aus 3-stündigen Observa-
tionen des FS POLARSTERN von 1982-1996, Klassenbreite: 2.5 ° Breite.

Im Bodendruckfeld stellt sich die Zyklone durch einen gegenüber ihrer Umgebung vertieften Luftdruck dar. Das Zentrum der Zyklone befindet sich immer auf der kalten Seite der Polarfront, auf der Südhalbkugel also im Süden. Zyklone sind dynamische Gebilde. Ihre Lebensdauer beträgt mehrere Tage. Währenddessen verlagern sich die Zyklonen längs der Polarfront nach Osten. Da gleichzeitig immer mehrere Zyklonen existieren,

bilden sie südlich der Polarfront ein Band von Zonen tieferen Bodenluftdrucks. Dieses Band wird die *Polare Tiefdruckrinne* genannt (siehe 2.1). Ausgehend vom polaren Hoch nimmt der Luftdruck zunächst ab und danach zum subtropischen Hochdruckgürtel hin wieder zu. Abbildung 2.3 zeigt dies eindrucksvoll. Die Druckverteilung ist abhängig von der Jahreszeit. Im Winter erhöht sich der Bodendruck am nördlichen Rand der Front, während er sich im Bereich der Rinne vertieft. In Folge dessen kommt es zu einer Vergrößerung des Druckgradienten. Dies äußert sich in einer Intensivierung und einer Vergrößerung der Zuggeschwindigkeit der sich in der Tiefdruckrinne bewegendenden Zyklonen [Jones und Simmonds, 1993].

Luftmassen und Zyklonen sind Teile eines komplizierten Getriebes. Dabei stellen die Zyklonen, bildhaft gesprochen, Schaufelräder dar, welche die Luftmassen von Nord nach Süd und umgekehrt befördern. Natürlich ist der reale, atmosphärische Prozess wesentlich komplizierter und vielfältiger. Eine detailliertere Darstellung kann man in Lehrbüchern der Meteorologie, z.B. bei Fortak [1982] oder Liljequist und Čehak [1984] finden.

2.1.2 Meteorologische und klimatologische Situation an der Neumayer-Station

Die Neumayer-Station (NEUMAYER) wurde 1992, wie ihre 1982 eröffnete Vorgängerin, bei $70^{\circ}38'S$ und $8^{\circ}15'W$ auf dem Ekström-Schelfeis im atlantischen Sektor der Antarktis gebaut. Sie liegt an der Küste, östlich der Weddellsee und nördlich von Königin-Maud-Land in unmittelbarer Nähe der Atka-Bucht, einer natürlichen Einbuchtung im Schelfeis (siehe Abb. 2.4). NEUMAYER befindet sich permanent südlich der Polarfront im Einflußbereich der in der polaren Tiefdruckrinne ziehenden Zyklonen. Auf Grund der relativ großen Entfernung von der Grounding-Line, dem Übergang vom Schelf zum Inlandeis, wird NEUMAYER nur mittelbar von *katabatischen Winden*, der kalten, bodennah abfließenden Luft aus dem Kontinentinneren beeinflusst. Weitere Details sind in der Reihe "The meteorological data of the Georg-von-Neumayer-Station" beschrieben [Gube-Lenhardt und Obleitner, 1986, Gube-Lenhardt, 1987, Helmes, 1989] [König-Langlo, 1992, König-Langlo und Herber, 1996, König-Langlo u.a., 1997].

Orographie

Die Neumayer-Station liegt an der Nordspitze des Ekström-Schelfeises (siehe Abb. 2.4) in ca. 40 m Höhe. In diesem Bereich hat das Schelfeis seine größte meridionale Ausdehnung. Zwischen dem Søråsen im Westen und dem Halvfar-Ryggen im Osten verengt es sich nach Süden bis es ca. 100 km südlich der Station die Grounding-Line erreicht. Søråsen und Halvfar-Ryggen sind kontinentale, mit Inlandeis bedeckte Landzungen die im Mittel eine Höhe von 300 m erreichen. Im Süden steigt das Inlandeis bis in

2.1 Luftmassentransporte zur Neumayer-Station

Höhen von über 1000 m auf. Der südliche Bereich des Ekströmschelfeises ist in Folge dessen deutlich katabatisch beeinflusst. Zwischen den im Osten und Westen aufsteigenden Hügelketten wird die kalte Luftmasse am Boden bis in den nördlichen Bereich des Schelfeises geleitet (Kanaleffekt).

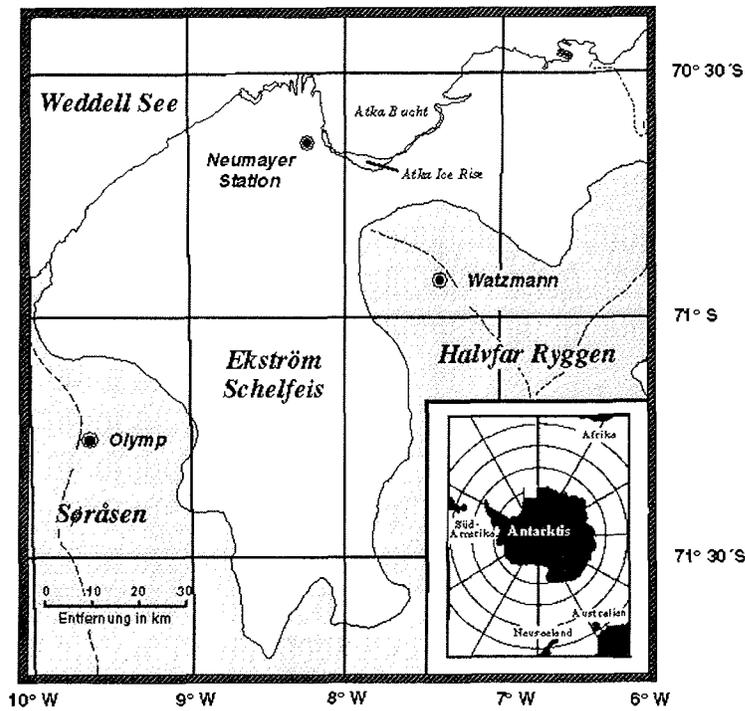


Abbildung 2.4 Geographische Lage der Neumayer-Station.

Meteorologische Parameter

Nachfolgend soll die meteorologische Situation an NEUMAYER anhand der Relationen zwischen Wind, Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck dargestellt werden. Den Daten liegen die 3-stündigen, meteorologischen Observationen an der Neumayer-Station zugrunde [König-Langlo und Marx, 1997]. Mittelwerte beziehen sich auf den Zeitraum von 1981 bis 1996. Mittelwerte der Windrichtung sind vektorielle Mittel.

2. Grundlagen und Datenbasis

Wind ` Abbildung 2.5 zeigt den Zusammenhang zwischen Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Die Hauptwindrichtung ist 'Ost'. Bei Ostwind werden auch die höchsten Windgeschwindigkeiten gemessen. Offenbar gilt, daß mit zunehmender Windgeschwindigkeit die Wahrscheinlichkeit wächst, daß der Wind aus östlicher Richtung weht. Neben dem Ostwind-Maximum existieren noch zwei weitere Maxima, bei 180° und zwischen 225° und 270°.

Die drei Windmaxima repräsentieren bestimmte Wetterlagen, so sind das Ostmaximum auf nördlich der Station vorbeiziehende großskalige Tiefs und das Westmaximum auf südlich von NEUMAYER ziehende kleinskalige Tiefs zurückführbar. Eine Besonderheit, die auf der speziellen Orographie des Ekströmschelfeises beruht, ist das Südmaximum. Hierin drückt sich der vorstehend beschriebene Kanaleffekt aus.

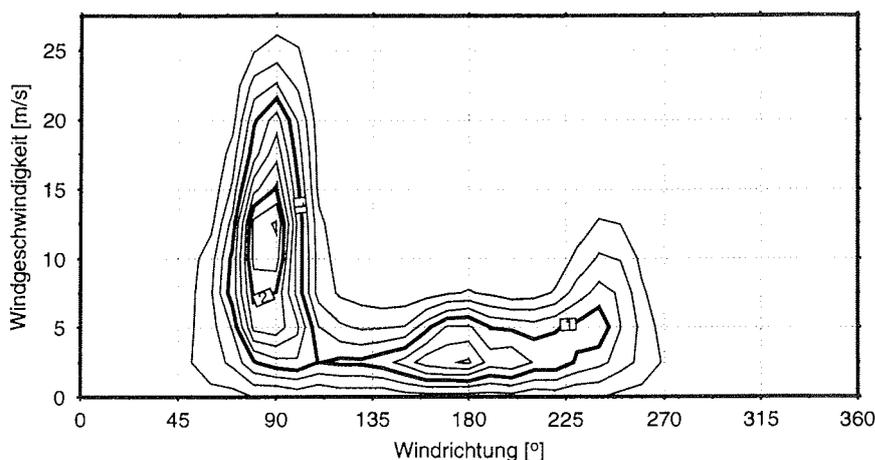


Abbildung 2.5 Relative Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und Windgeschwindigkeit für NEUMAYER von 1981-1996, Klassenbreite: 10°, 2,5 m/s.

Lufttemperatur und relative Luftfeuchte Temperatur und Feuchte sind Charakteristika einer Luftmasse (siehe Abschnitt 2.1.1). Im Jahresgang haben beide während des Winters ihr Minimum. Ihre Relation zur Windrichtung zeigt ein Minimum bei Südwinden (siehe Abb. 2.6 und 2.7). Vor allem die Minima in den Relationen Lufttemperatur/Windrichtung und rel. Luftfeuchte/Windrichtung zeigen den unterschiedlichen Einfluß verschiedener Luftmassen. Bezugnehmend auf den Zusammenhang Windrichtung/Windgeschwindigkeit kann festgestellt werden, daß schwache Winde (< 5 m/s) bei niedrigen Temperaturen (< 15°C) auf Luftmassen innerantarktischen Ursprungs (katabatische Winde) hindeuten.

2.1 Luftmassentransporte zur Neumayer-Station

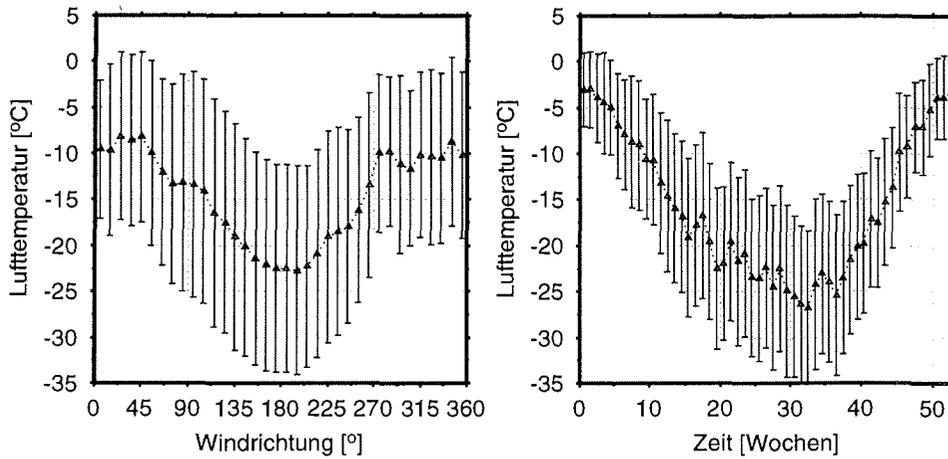


Abbildung 2.6 Mittlere Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Windrichtung Klassenbreite: 10° (links), Jahresgang der Lufttemperatur aus Wochenmitteln (rechts).

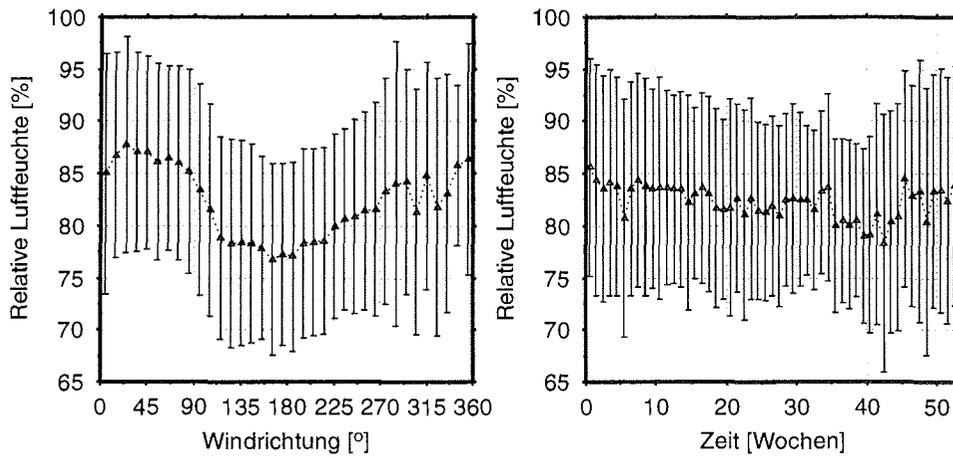


Abbildung 2.7 Mittlere rel. Luftfeuchte in Abhängigkeit von der Windrichtung, Klassenbreite: 10° (links), Jahresgang der rel. Luftfeuchte aus Wochenmitteln (rechts).

2. Grundlagen und Datenbasis

Luftdruck Der mittlere Luftdruck an NEUMAYER beträgt 986 hPa (Mittelwert des Luftdruckes aus 3-stündlichen Observationen von 1981-1996). Im Jahresgang der Wochenmittelwerte (Abb. 2.8) ist eine leichte Doppelwelle zu sehen. Während der Sommer- und Wintermonate ist der Luftdruck eher höher als der langjährige Mittelwert, während er im Herbst und Frühling eher darunter liegt. Im Gegensatz zur Windgeschwindigkeit, wo sich die auch im Winter erhöhte, zyklonale Aktivität in höheren Windgeschwindigkeiten widerspiegelt, steigt der Luftdruck im Winter wieder an. Darin drückt sich der während des Winters erhöhte Luftdruck im Polaren Hochdruckgebiet aus, der eine Folge der großflächigen Abkühlung der bodennahen Luftmasse über dem antarktischen Kontinent während der Polarnacht ist.

Der Luftdruck zeigt eine gewisse Abhängigkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (Abb. 2.9). Das Minimum und das lokale Maximum bei 90° können mit dem Durchzug von Fronten der Nord-Zyklonen in Verbindung gebracht werden. Das Druckmaximum bei 180° zeigt den Hochdruckeinfluß während der bereits erwähnten gradientenschwachen Lagen. Bezüglich des Zusammenhangs Luftdruck und Windgeschwindigkeit gilt: Je geringer der Luftdruck, desto höher die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hoher Windgeschwindigkeiten (Abb. 2.9).

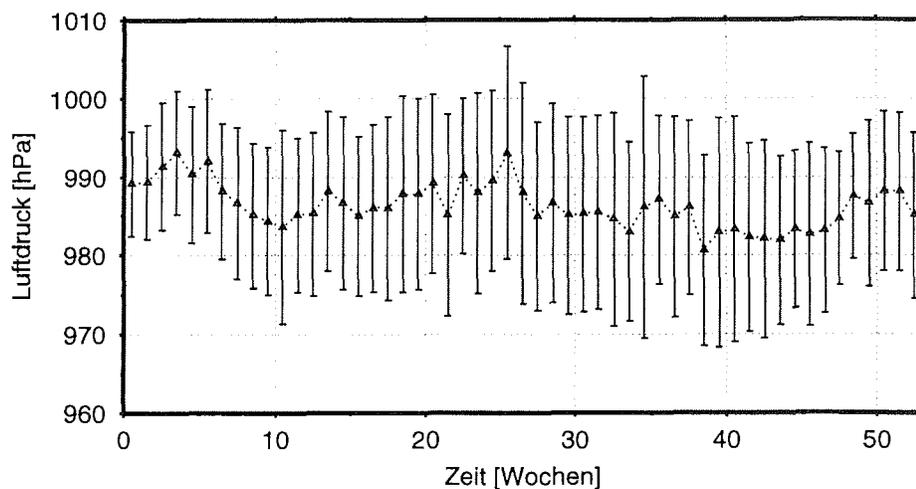


Abbildung 2.8 Jahresgang des Luftdrucks aus Wochenmitteln.

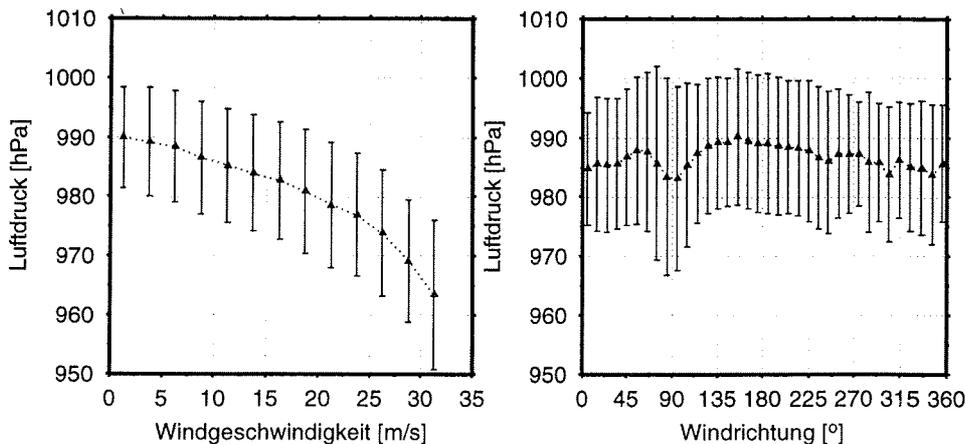


Abbildung 2.9 Mittlerer Luftdruck in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, Klassenbreite: 2.5 m/s (links), Mittlerer Luftdruck in Abhängigkeit von der Windrichtung, Klassenbreite: 10°. (rechts).

2.1.3 Analyse des Luftmassentransports

Das nahezu einzige, für diese Region verfügbare, numerische Hilfsmittel zur Beschreibung des Luftmassen-Transports sind vom Deutschen Wetterdienst auf Basis seines Globalen Modells (GM) berechnete Rückwärtstrajektorien. Die Berechnung wird von Pflüger u. a. [1990] detailliert beschrieben. Neben einer ausführlichen Statistik zum Luftmassentransport zur Neumayer-Station finden sich bei Kottmeier [1997] weiterführende Betrachtungen zur Verwendung und Qualität der Rückwärts-Trajektorien, insbesondere für den Bereich von NEUMAYER. Die Trajektorien fanden als Mittel zur Untersuchung der Herkunft von Luftmassen auch Eingang in die Arbeiten von Pfaff [1993], Wyputta [1994] und Wessel [1997], die sich ebenfalls mit Luftmassentransporten zur Neumayer-Station befaßten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Rückwärts-Trajektorien zunächst zur Festlegung von Hauptherkunftsgebieten benutzt, die im weiteren Grundlage für die Analyse der Meereisbedeckung sein werden. Basierend auf den für NEUMAYER von 1993 bis 1996 berechneten 5-Tage-Trajektorien wurden zunächst relative Herkunftshäufigkeitsverteilung und die mittleren Trajektorien im Boden-Niveau für den Gesamtzeitraum und alle Jahreszeiten berechnet.

Herkunftshäufigkeitsverteilung Zur Beschreibung der Herkunft der Rückwärts-Trajektorien verwendet Kottmeier [1997] Kovarianzellipsen und beschreibt damit letzt-

2. Grundlagen und Datenbasis

lich die Streuung der geographischen Herkunft um einen Herkunftsmittelwert. Wie allgemein bekannt ist, sind aber Mittelwert einer Verteilung und Schwerpunkt einer Punktwolke nicht zwangsläufig identisch. Außerdem erhält man so keine Aussage über die Form der Verteilung. Da in dieser Arbeit vor allem die Schwerpunkte der Herkunfts-orte von Interesse sind, wurde für ein geographisches Gitter von $10 \times 10^\circ$ Länge/Breite die Häufigkeit bestimmt, mit der eine 5-Tage-Trajektorie in einem dieser Gitterpunkte startet.

In Abbildung 2.10 sind die Ergebnisse in Form von Linien gleicher relativer Häufigkeit dargestellt. Wie die Abbildung 2.10 a zeigt, kommen im Mittel über den betrachteten Zeitraum die meisten Trajektorien aus einem Gebiet südöstlich von NEUMAYER. Dies ändert sich auch im Jahresverlauf wenig. Anhand der jahreszeitlichen, relativen Herkunftsverteilungen (Abb. 2.10 b-e) kann man jedoch gewisse Verschiebungen der Herkunftsschwerpunkte im jahreszeitlichen Verlauf erkennen.

Anhand der Herkunftsschwerpunkte der 5-Tage-Trajektorien und in Anlehnung an die meteorologischen Hauptwetterlagen werden die folgenden Transportklassen definiert.

Ost-Transporte: Herkunftsort der Trajektorie ist der östliche Sektor zwischen 0° (Nord) und 135° (Süd-Ost) von NEUMAYER aus gesehen. Die zugehörigen Schwerpunkte in den jahreszeitlichen Häufigkeitsverteilungen befindet sich Sommers wie Winters im Südosten von NEUMAYER. Im Herbst und im Frühjahr ist eine Nordverlagerung an den Kontinentalrand zu beobachten. Ost-Transporte stehen mit den nördlich von NEUMAYER, in der Polaren Tiefdruckrinne ziehenden Zyklonen (Nord-Zyklonen) in Verbindung.

Süd-Transporte: Der Herkunftsort befindet sich im Sektor zwischen ca. 135° (Süd-Ost) und 225° (Süd-West). Diese Transporte werden in allen Jahreszeiten durch einen Schwerpunkt annähernd gleich repräsentiert. Dieser Schwerpunkt macht im Jahresgang eine leichte Wanderung von Süd-Süd-Ost im Sommer nach Süd-Süd-West im Frühjahr durch und verstärkt sich im Frühjahr. Die Süd-Transporte treten bei sogenannten gradientschwachen Wetterlagen auf. Das Gebiet um NEUMAYER befindet sich dann im Einflußbereich eines Hochdruckgebietes. In diesem Fall tritt der katabatische Abfluß der Kaltluft vom Inland-Eis zutage, wobei der in Abschnitt 2.1.2 kurz beschriebene Kanaleffekt offenbar eine Rolle spielt.

West-Transporte: Herkunftsorte der 5-Tage-Trajektorie befinden sich in einem Sektor zwischen ca. 225° (Süd-West) und 360° (Nord). Die West-Transporte sind durch einen Schwerpunkt in den jahreszeitlich bezogenen Häufigkeitsverteilungen im Sommer bis Winter (Abb. 2.10 b-d) gekennzeichnet. West-Transporte haben im Sommer ihre größte Häufigkeit. Zum Winter nimmt diese ab und der Herkunftsort verlagert sich nach Norden ins Zentrum der Weddell-See.

2.1 Luftmassentransporte zur Neumayer-Station

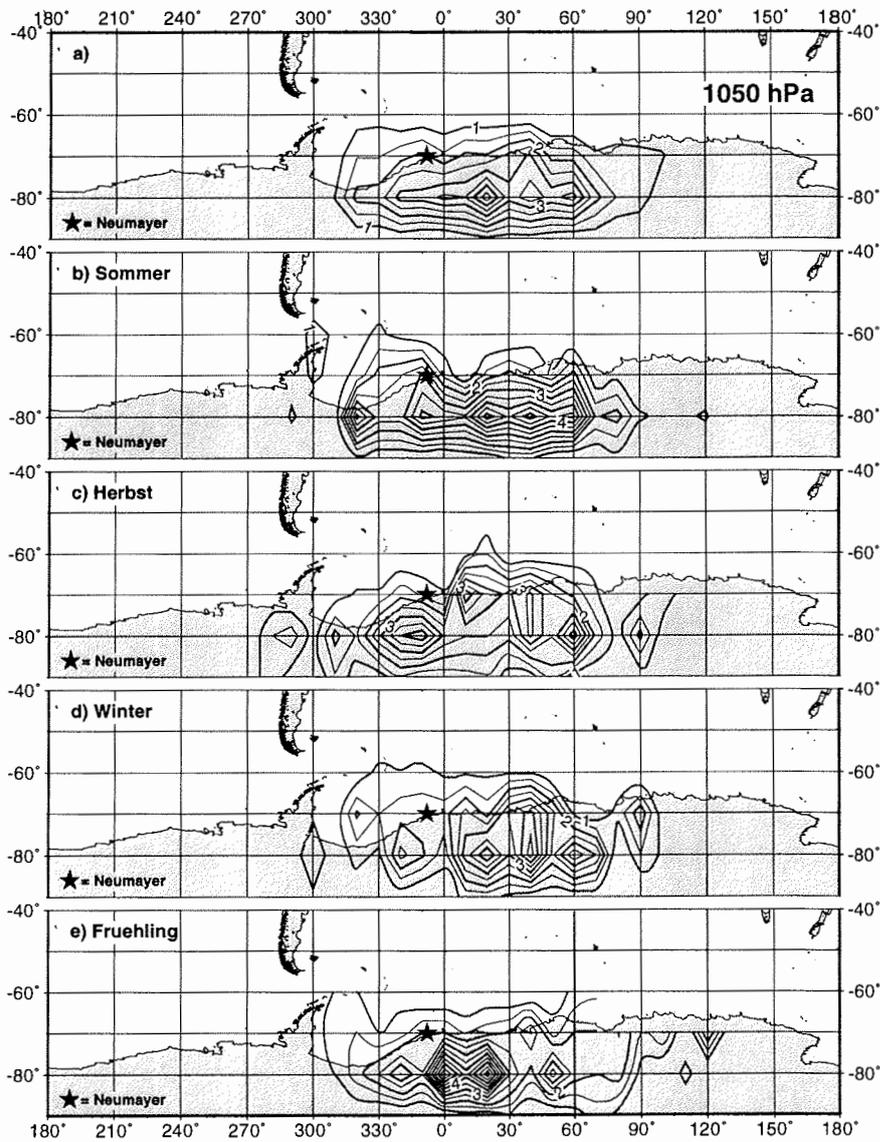


Abbildung 2.10 Relative Herkunftshäufigkeitsverteilung der 5-Tage-Boden-Trajektorie, Klassenbreite: 10° Breite und Länge, Linien gleicher relativer Häufigkeit: Abstand 0.5 %, a) Gesamtzeitraum Juli 1992 bis Dezember 1996, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter, e) Fruehling.

2. Grundlagen und Datenbasis

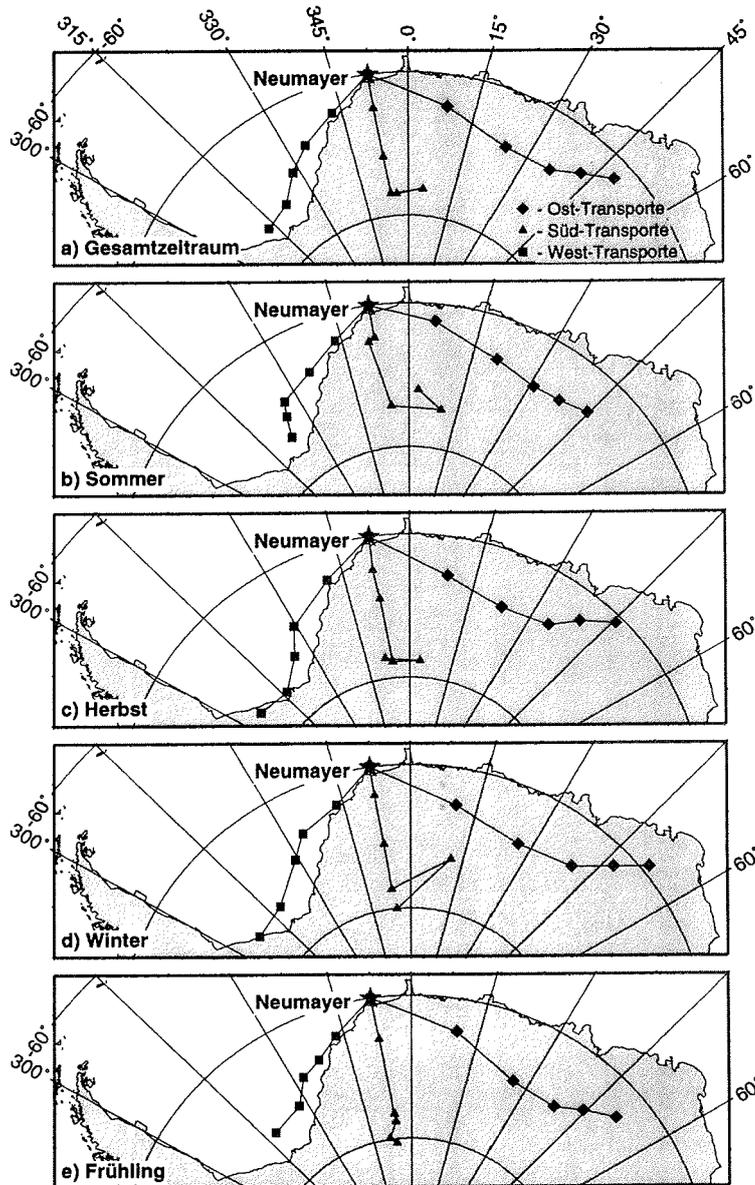


Abbildung 2.11 Mittlere Boden-Trajektorien, a) Gesamtzeitraum Juli 1992 bis Dezember 1996, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter, e) Frühling.

Im Frühjahr scheint dieser Schwerpunkt "in die Breite zu fließen" und verschwindet. Diese Luftmassentransporte sind mit kleinräumigen, südlich an NEUMAYER vorbeiziehenden Zyklonen (Süd-Zyklonen) in Verbindung zu bringen.

Mittlere Trajektorien Zu Veranschaulichung der Transportwege wurden mittlere Trajektorien berechnet (Abb. 2.11). Dazu wurden für den jeweiligen Sektor der Transportklasse die Mittelwerte der Tagespunkte aller Trajektorien gebildet. Es zeigt sich, daß die mittleren Trajektorien im Jahresgang nur wenig variieren. Anhand dieser Trajektorien wurden Haupttransportwege für Luftmassentransporte zur Neumayer-Station bestimmt:

Ost-Transporte: Startpunkt der Trajektorie ist der kontinentale Sektor der Antarktis zwischen 30° und 60° östlicher Länge. Der Transport führt über das Inlandeis längs der antarktischen Küste zur Neumayer-Station.

Süd-Transporte: Die Luftmassen stammen aus dem Königin-Maud-Land und werden über das Inlandeis nach NEUMAYER geführt.

West-Transporte: Die Trajektorie startet im nördlichen Filchner-Ronne-Schelfeis bzw. in der südlichen Weddell-See. Der Transport erfolgt über See im küstennahen Bereich zur Neumayer-Station.

Relative Häufigkeit der Transportklassen

Zur Ergänzung der Beschreibung der Transportklassen soll nun noch die Häufigkeit deren Auftretens im Jahresgang und in Abhängigkeit von der an NEUMAYER herrschenden Windrichtung betrachtet werden.

Die häufigsten Luftmassentransporte (ca. 70%) sind Ost-Transporte. Sie überwiegen vor allem in Herbst und Frühjahr. West-Transporte sind mit ca. 25% repräsentiert. Sie treten am häufigsten im Sommer und Winter auf. Süd-Transporte sind selten (ca. 5% rel. Häufigkeit). Ihre Häufigkeitsverteilung zeigt Maxima im Früh- und Spätsommer (siehe Abb. 2.12).

Auch bezüglich der Windrichtung dominieren die Ost-Transporte die Häufigkeitsverteilung. Sie sind bei süd-östlicher Windrichtung jedoch am häufigsten. Im Gegensatz dazu treten bei Nord-West-Winden häufiger West-Transporte auf. Süd-Transporte haben ihre größte Häufigkeit bei Südwinden (siehe Abb. 2.13).

2. Grundlagen und Datenbasis

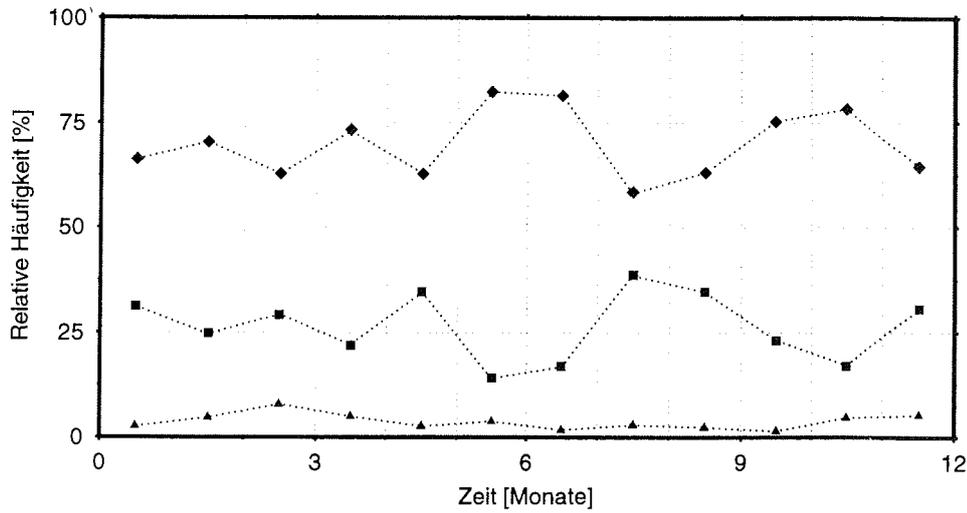


Abbildung 2.12 Relative monatliche Häufigkeit des Auftretens der Transportklassen, \diamond = Ost-Transporte, \square = West-Transporte, \triangle = Süd-Transporte.

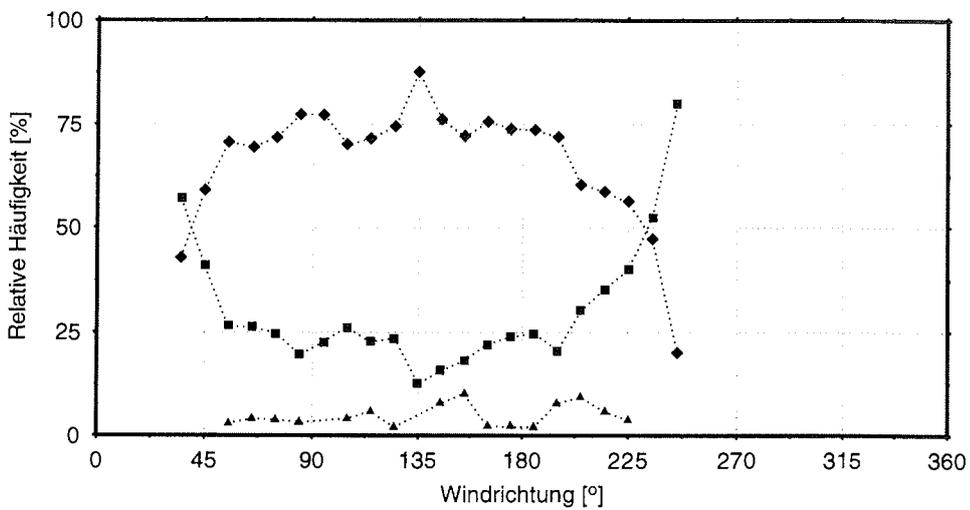


Abbildung 2.13 Relative Häufigkeit des Auftretens der Transportklasse in Abhängigkeit von der Windrichtung, Klassenbreite: 10° , \diamond = Ost-Transporte, \square = West-Transporte, \triangle = Süd-Transporte.

2.1.4 Ableitung der Haupteinzugsgebiete

Wie die Darstellung der mittleren Trajektorien zeigt (Abbildung 2.11) reichen die berechneten Rückwärts-Trajektorien der Ost-Transporte nicht über den antarktischen Kontinent hinaus. Wie die Spurenstoff-Analysen für NEUMAYER beweisen, gelangen jedoch auch Spurenstoffe nichtantarktischer Herkunft zur Station. Um eine Aussage über die möglichen Haupteinzugsgebiete zu erhalten, wurden deshalb die Trajektorien, nach Maßgabe möglicher, meteorologischer Situationen verlängert.

Basis ist dabei die Annahme, daß die Ost-Transporte mit einem großräumigen, nördlich an NEUMAYER vorbeiziehenden Tiefdruckgebiet in Verbindung stehen. Dies ist nach der Erfahrung des Autors¹ die Standardwetterlage, was auch von Pfaff [1993] und Wyputta [1994] bestätigt wird. Dabei wird Luft aus dem östlichen Bereich vor dem Tiefdruckgebiet, südlich um das Tief herum nach Westen transportiert. Eine schematische Darstellung dieser und der Wetterlage bei West-Transporten zeigt Abbildung 2.14.

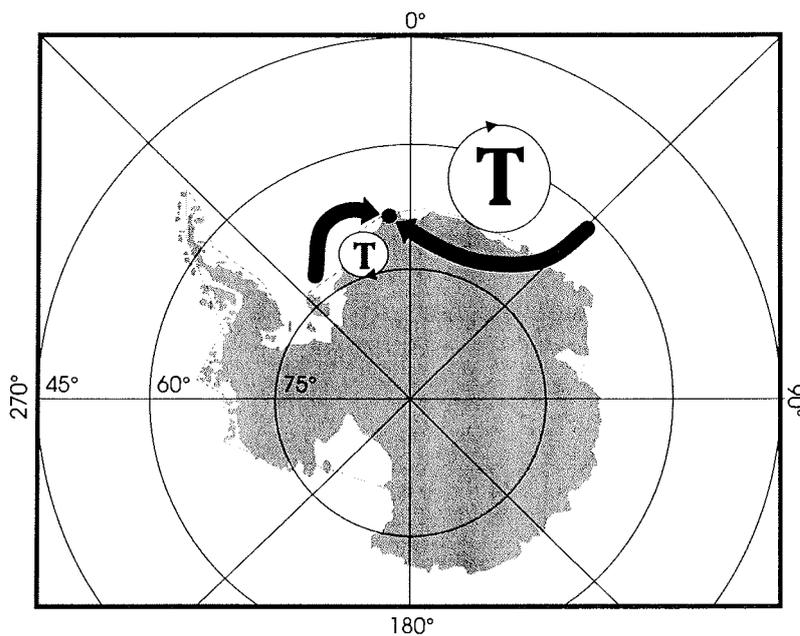


Abbildung 2.14 Schematische Darstellung der Ost- und West-Transporte.

¹während der Überwinterung 1993

2. Grundlagen und Datenbasis

Daraus werden folgende Haupteinzugsgebiete abgeleitet:

Östliches Einzugsgebiet: Bei Ost-Transporten stammen die Luftmassen aus einem Gebiet nördlich von 60°S und 45°W. Im Südwesten eines großen, nordöstlich von NEUMAYER befindlichen Tiefdruckgebietes wird die Luftmasse zunächst nach Süden und danach längs der mittleren Trajektorie für Ost-Transporte zur Neumayer-Station transportiert.

Westliches Einzugsgebiet: Der Luftmassentransport wird von einem kleinräumigen, südlich von NEUMAYER ziehenden Tief bestimmt. Der Transport erfolgt längs der für West-Transporte bestimmten, mittleren Trajektorie aus dem Gebiet nördlich des Ronne-Filchner-Schelfeises.

2.2 Spurenstoffmessungen an der Neumayer-Station

2.2.1 Das Luftchemische Observatorium

Schon seit Beginn der wissenschaftlichen Überwinterungen² 1982 wird auf NEUMAYER ein luftchemisches Observatorium betrieben. Das erste, eher provisorische Observatorium wurde schon 1983 durch ein Speziallabor ersetzt, welches vom INSTITUT FÜR UMWELTPHYSIK DER UNIVERSITÄT HEIDELBERG (IUP) konzipiert und gebaut worden war.

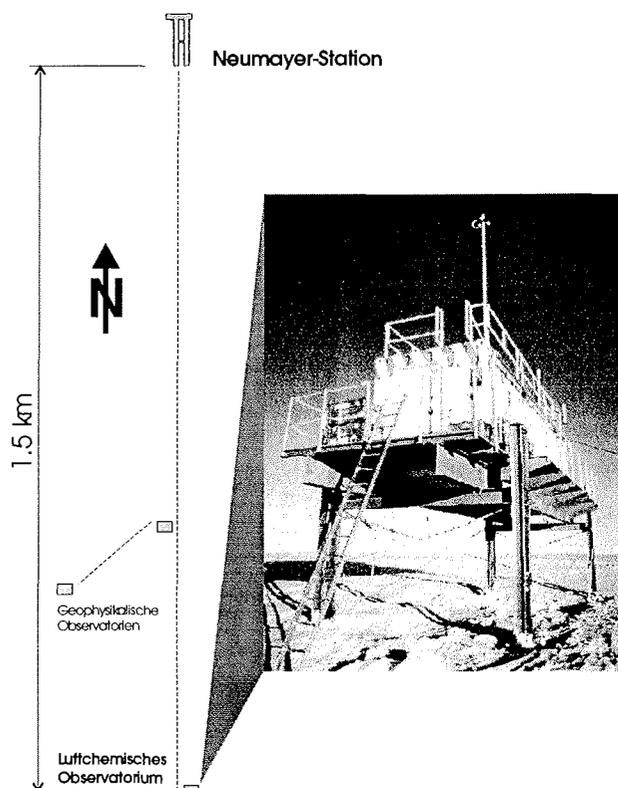


Abbildung 2.15 Lage des Luftchemischen Observatoriums.

²Die 1. Überwinterung in der neubauten Georg-von-Neumayer-Station fand 1981 statt. Hauptaufgabe dieser Überwinterung war jedoch die technische Erprobung des Neubaus, so daß nur ein minimales, meteorologisches Observationsprogramm von F. Obleitner durchgeführt wurde.

2. Grundlagen und Datenbasis

Mit dem Stationsneubau 1992 wurden auch alle Observatorien neu konzipiert. Das neue luftchemische Observatorium konnte im Sommer 1994/95 installiert werden. Es befindet sich ca. 1.5 km südlich der Hauptstation. Im Gegensatz zu seinem Vorgänger (einem umgebauten, auf Schlitten montierten Biwakcontainer³) besteht es nun aus zwei Laborcontainern, die auf einer ortsfesten, einige Meter über der Schneeoberfläche befindlichen, einfach erhöhbaren Stahlplattform montiert sind (siehe Abb. 2.15). Hier, wie auch im Vorgängerobservatorium führen AWI Bremerhaven und kooperierende Institutionen, wie das IUP Heidelberg Spurenstoffmessungen durch. Im Rahmen des Observatoriumsprogramms werden die Konzentrationen von Tracern und Treibhausgasen, biogenen Spurengasen und von Aerosolen gemessen bzw. Probensammlungen durchgeführt sowie eine Vielzahl experimentbezogener Meßgrößen erfaßt. Eine grobe Übersicht des Meßprogramms zeigt Abbildung 2.16. In den Tabellen C.1 und C.2 ist es detailliert aufgelistet [Minikin, 1996].

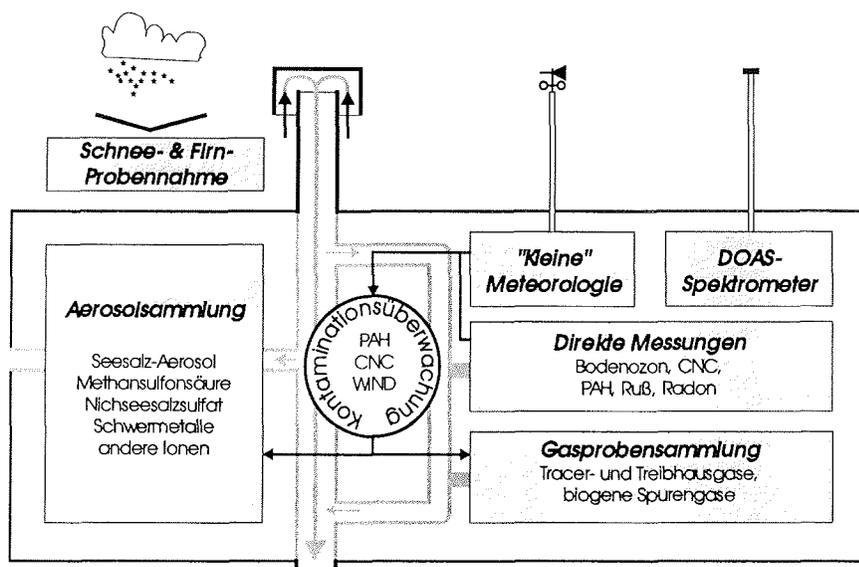


Abbildung 2.16 Schematische Darstellung der Messungen und Probenahmen am luftchemischen Observatorium (PAH = Polyzyklische Aromate, CNC = Kondensationskerne).

³Biwakcontainer (Biwakschachteln) werden normalerweise als Unterkunft auf Landexpeditionen genutzt.

2.2 Spurenstoffmessungen an der Neumayer-Station

Eine Besonderheit des luftchemischen Observatoriums stellt die automatische Kontaminationsüberwachung dar. Obwohl das Observatorium im Süden der Hauptstation gelegen ist, besteht immer noch die Möglichkeit, daß es z.B. bei Nordwinden in den Einflußbereich der Stationsabgase oder aber der Abgasfahnen von in Stationsnähe befindlichen Fahrzeugen oder Schiffen gerät. Um dies zu verhindern, werden kontinuierlich die Konzentrationen von polyzyklischen Aromaten und Kondensationskernen (Aitken-Kernen) sowie meteorologische Parameter überwacht. Beim Überschreiten festgelegter Schwellen werden Aerosol- und Gasprobensammlung unterbrochen.

Aus dem Betrieb des Observatoriums resultieren mehrere, langjährige Meßreihen, welche die Ausgangsbasis für die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen darstellen. Es stehen derzeit folgende Zeitreihen zur Verfügung:

- Seesalz-Aerosol-Konzentrationen als 10-tägige Mittelwerte von 1983 bis 1995,
- Methansulfonsäure-Konzentrationen (MSA) als 10-tägige Mittelwerte von 1983 bis 1995,
- Sulfat-Konzentrationen, die nicht dem Seesalz-Aerosol entstammen⁴ als 10-tägige Mittelwerte von 1983 bis 1995,
- Bodenozone-Konzentrationen als Tagesmittelwerte von 1995 bis 1996.

Da in dieser Arbeit die Seesalz-Aerosol- und die Bodenozone-Zeitreihe verwendet werden, sollen nachfolgend Quellen, Senken und Transport dieser Spurenstoffe sowie deren Messung und die daraus resultierenden Zeitreihen ausführlicher diskutiert werden.

⁴Im weiteren Nichtseesalzsulfat genannt.

2.2.2 Seesalz-Aerosol

Quellenbeschreibung

Entstehung Die Quelle des Seesalz-Aerosols ist der Ozean. Man muß zwei Entstehungsmechanismen unterscheiden. Zum Einen wird Seesalz-Aerosol bei der Ablösung sogenannter Filmtropfen von den Schaumkronen sich überschlagender Wellen gebildet. Hierbei entstehen "Riesen-Aerosole" mit Durchmessern bis $100 \mu\text{m}$. Zum Zweiten entsteht es aus in der aufgewühlten See aufsteigenden Bläschen (Jettropfen), die an der Oberfläche zerplatzen und dabei Aerosol einer charakteristischen Größe von $1\text{-}10 \mu\text{m}$ bilden [Blanchard und Woodcock, 1957]. Über dem Ozean findet man das Seesalz-Aerosol bis in einer Höhe von ca. 1000 m vor. Seine Konzentration nimmt mit der Höhe ab. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit wird mehr Seesalz-Aerosol produziert (siehe Abb. 2.17, [Blanchard und Woodcock, 1957] und [Monhan u.a., 1986]).

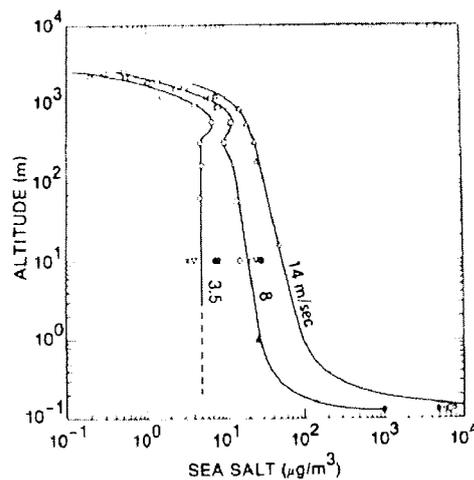


Abbildung 2.17 Vertikale Verteilung des Seesalz-Aerosols in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (nach [Blanchard und Woodcock, 1957] aus [Hidy, 1984]).

Das Seesalz-Aerosol ist ein Gemisch bestehend aus mehreren Substanzen. Entsprechend der Zusammensetzung des Seesalzes sind seine Hauptbestandteile Chlorid (Cl^- , 55 Gew.-%), Natrium (Na^+ , 30 Gew.-%) und Sulfat (SO_4^{2-} , 8 Gew.-%). In der marinen Atmosphäre können sich diese Anteile jedoch wesentlich verschieben. Durch Oxidation von Schwefeldioxid (SO_2) am bzw. im Aerosol ist der Sulfat-Anteil im marinen Aerosol wesentlich höher als im Seesalz des Ozeans bzw. im isolierten Seesalz-Aerosol.

Da jedoch der Natrium- und Chlor-Anteil nahezu unverändert bleibt, können diese Bestandteile zur Bestimmung des aus dem Seesalz stammenden Sulfat-Anteils im marinen Aerosol herangezogen werden [Hidy, 1984].

Quelldynamik Einen entscheidenden Einfluß auf die Seesalz-Aerosol-Produktion hat, entsprechend dem Entstehungsmechanismus, die Windgeschwindigkeit im Quellgebiet. Die höchsten Windgeschwindigkeiten werden für die Region der Neumayer-Station nach Pfaff [1993], Jones und Simmonds [1993] und Wyputta [1994] während der Übergangsjahreszeiten und im Winter erreicht (siehe auch Abschnitt 2.1.2). Entsprechend sollten die Maxima der Seesalz-Aerosol-Konzentration im Frühjahr bzw. im Herbst zu finden sein.

Eine Besonderheit des südlichen Ozeans ist, daß sich infolge der Eisbedeckung die effektive Fläche der Quelle saisonal verändert. Die Ausbildung der maximalen Eisbedeckung im Winter ist gleichbedeutend mit einer Entfernung der Quelle um mehrere 100 km von der Neumayer-Station (siehe Kapitel 3). Weitgehend ungeklärt ist die Bedeutung von *Polynien*, eisfreien Gebieten innerhalb des Meereisgebietes, als Quellgebiete für Seesalz-Aerosol. Man unterscheidet zwischen Küsten- und Hochseepolynien. Küstenpolynien bilden sich bei ablandigem Wind, der das Meereis bis zu 100 km weit von der Küste fortreibt [Gordon und Comiso, 1988]. Küstenpolynien werden auch regelmäßig in unmittelbarer Nähe von NEUMAYER und entlang der Küste bis zum Ronne-Filchner-Schelfeis beobachtet [Markus, 1995]. Von Wagenbach u.a. [1988,1997] und Wyputta [1994] werden Polynien für die unregelmäßig im Jahresgang auftretenden Maxima des Seesalz-Aerosols, sogenannten "Salzstürmen" verantwortlich gemacht.

Transport Bedingt durch die Rauigkeit der Erdoberfläche ist die bodennahe Luftströmung eine turbulente Strömung. Erst ab einer bestimmten Höhe strömt die Luft nahezu laminar. Der Bereich turbulenter Strömung wird *Planetarische Grenzschicht (PGS)* genannt, der Bereich laminarer Strömung *Freie Atmosphäre*. Die vertikale Ausdehnung der PGS hängt vom Untergrund und den aktuellen, meteorologischen Bedingungen ab. Starke Konvektion erweitert die PGS, die auch die Bewölkung mit einschließt. Als Richtwert für die Höhe der PGS findet man in der Literatur oft 1000 m. Über dem ruhigen Ozean und über Eis ist sie auf Grund deren niedriger Oberflächen-Rauigkeit und der stabilisierenden Wirkung des Untergrundes (Wasser oder Eis) eher geringer [Stull, 1988].

Während des Aufenthalts des Aerosols in der planetarischen Grenzschicht besteht fortlaufend die Möglichkeit, daß es innerhalb der turbulenten Strömung wieder in Bodennähe gelangt und dort abgelagert wird (trockene Deposition) oder in Wolken eingemischt wird und mit dem Niederschlag zum Boden zurückgeführt wird (feuchte Deposition). Deshalb ist es eine wichtige Voraussetzung für den Transport von Seesalz-Aerosol

über mittlere und lange Strecken, daß es die freie Atmosphäre erreicht und somit kurzfristig nicht mehr deponiert werden kann.

Seesalz-Aerosol wird bis in eine Höhe von ca. 1000 m transportiert (siehe 2.17). Die Möglichkeit, daß es die freie Atmosphäre über dem Ozean erreicht ist also vorhanden. Daß Seesalz-Aerosol die Freie Atmosphäre erreicht und über lange Strecken transportiert wird, zeigen vor allem Messungen an antarktischen Eisbohrkernen [Minikin, 1994]. Es muß angemerkt werden, daß der Transport des Seesalz-Aerosols sicher auch von der Partikelgröße abhängt. So ist zu vermuten, daß vor allem die großen Aerosole (Riesen-Aerosole) die PGS nicht verlassen und im direkten Umfeld der Quelle deponiert werden. Für die Aerosole, die in die laminare Strömung der freien Atmosphäre gelangen, gilt nach dem Stoke'schen Gesetz, daß kleinere Aerosole bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit weiter transportiert werden als große Aerosole.

Deposition Durch Veränderungen in der Strömungsgeschwindigkeit der freien Atmosphäre und damit verbundenem Absinken des Aerosols oder Ausdehnung der PGS (z.B. an orographischen Hindernissen oder durch Konvektion) gelangt das Seesalz-Aerosol zurück in die Planetarische Grenzschicht. Von dort aus kann es dann trocken oder feucht deponiert werden. Möglicherweise werden Langstrecken-Transporte von Seesalz-Aerosol eben durch die geringe Höhe der PGS über Eis begünstigt.

Beschreibung von Meßanordnung und Zeitreihe

Die Messung des Seesalz-Aerosols ist Bestandteil der Aerosolprobennahme-Programms an NEUMAYER. Dabei werden fortlaufend für eine Dauer von 7 bis 14 Tagen (in Ausnahmefällen auch länger) Zellulosefilter (\emptyset 24 cm) mit Luft aus der Umgebung des luftchemischen Observatoriums besaugt. Da vom Überwinterungspersonal normalerweise keine ionenchromatographischen Untersuchungen vorgenommen werden können, müssen die Filter bis zur nächsten Transportmöglichkeit nach Deutschland staub- und luftdicht verpackt, gelagert werden (siehe Abb. 2.18). Die erforderlichen Analysen werden dann am Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven oder am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg durchgeführt. Erst hier kann die Bestimmung der Seesalz-Aerosol-Konzentration erfolgen. Aus der Konzentration des Natriums (Na^+) oder alternativ des Chlorids (Cl^-) bestimmt sich die Seesalz-Aerosol-Konzentration wie folgt:

$$[Seesalz] = [Na^+]/k_{Na} = [Cl^-]/k_{Cl} \quad (2.1)$$

wobei nach Hidy [1984] $k_{Na} = 0.3$ bzw. $k_{Cl} = 0.55$ angenommen wird. Weitere Einzelheiten sind bei Wagenbach [1988,1997] und Minikin [1996] beschrieben. Eine detaillierte

Beschreibung des ionenchromatographischen Meßverfahrens für antarktische Seesalz-Aerosole findet sich bei Ebbeler [1997]. Während der Besaugung unterliegen die Filter der Kontaminationsüberwachung des luftchemischen Observatoriums.

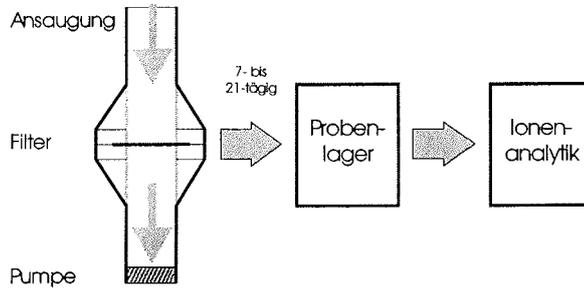


Abbildung 2.18 Schematischer Ablauf der Aerosolprobensammlung.

Die Seesalz-Zeitreihe ist durch ganzjährig verteilte Maxima gekennzeichnet (Abb. 2.19). Eine Periodizität oder Saisonalität ist auch im normierten Leistungsdichtespektrum⁵ nicht zu erkennen (Abb. 2.20).

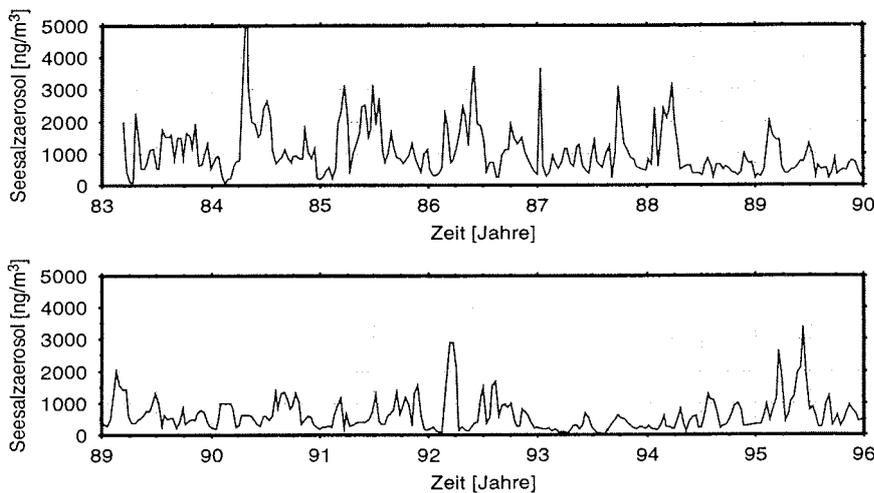


Abbildung 2.19 Seesalz-Aerosol-Konzentrationen an NEUMAYER, 1983-1995.

⁵Im weiteren nur noch Leistungsdichtespektrum genannt. In Analogie zur Leistung eines elektrischen Signals zeigt es den je Spektralanteil anfallenden Anteil an der Gesamtsignalleistung. Da sie normiert und damit dimensionslos ist, wird die Signalleistung hier nicht näher bezeichnet.

2. Grundlagen und Datenbasis

Abbildung 2.21 zeigt den mittleren Jahresgang der Seesalz-Aerosol-Konzentration, der aus Wochenmittelwerten gebildet wurde. Er zeigt das Hauptmaximum der Konzentration im Spätsommer/Herbst sowie ein weiteres Maximum im Frühjahr an.

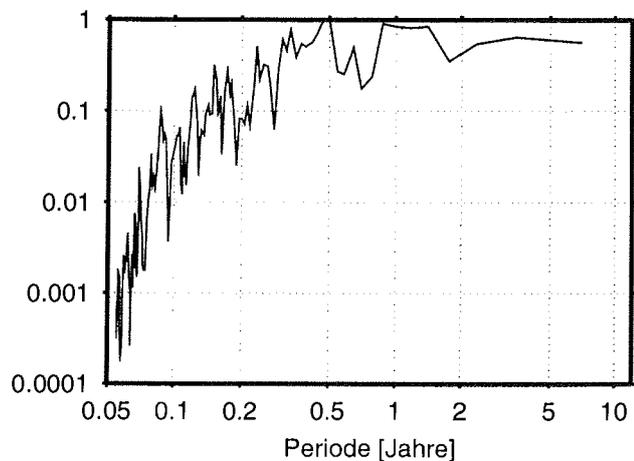


Abbildung 2.20 Normiertes Leistungsdichtespektrum der Seesalz-Aerosol-Zeitreihe.

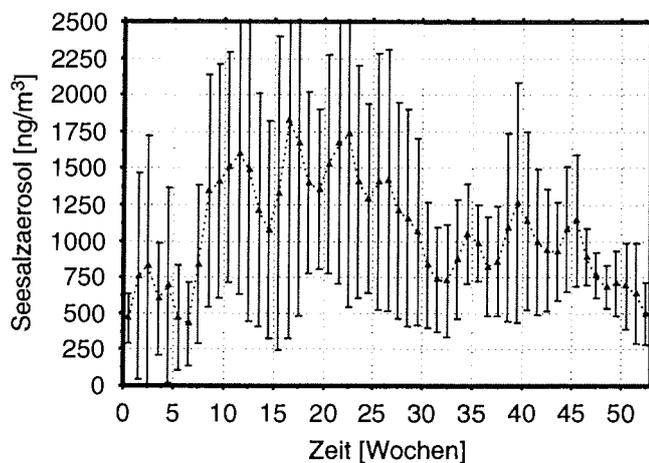


Abbildung 2.21 Wochenmittel der Seesalz-Aerosol-Konzentration für 1983-1995.

2.2 Spurenstoffmessungen an der Neumayer-Station

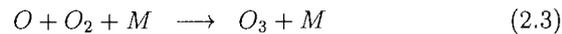
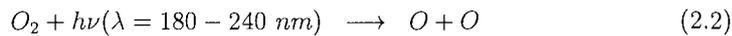
Besonders auffällig sind die gerade in diesem Zeitraum auftretenden Maxima (siehe auch Abschnitt 2.2.2). Ein weiteres Phänomen stellen die im Vergleich zu den restlichen Jahren vergleichsweise niedrigeren Maxima im Zeitraum von 1989 bis 1994 dar. Eine genaue Erklärung hierzu steht jedoch noch aus.

Die ursprüngliche Meßreihe besteht aus den anhand der Ionenanalytik je Filter ermittelten Seesalz-Aerosol-Konzentrationen. Diese repräsentieren eine mittlere Konzentration für den jeweiligen Besaugungszeitraum. Für diese Arbeit lagen die Seesalz-Aerosol-Konzentrationen als extrapolierte 10-Tages-Mittelwerte vor.

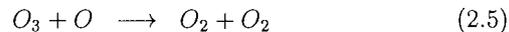
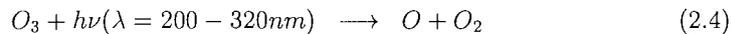
2.2.3 Bodennahes Ozon

Quellenbeschreibung

Chemie der Ozonbildung und des Ozonabbaus Unter stratosphärischen Strahlungs-, Druck- und Temperaturbedingungen entsteht Ozon bei der Photolyse von Sauerstoffmolekülen zu Sauerstoffatomen (2.2) und deren anschließender Rekombination mit einem Sauerstoffmolekül zu Ozon (2.3). Dabei wird das Vorhandensein eines Stoßpartners (M) vorausgesetzt. Molekularer Sauerstoff (O_2) und Stickstoff (N_2) sind dafür gleichermaßen geeignet [Warneck, 1988].



Die "Standardreaktion" zum stratosphärischen Ozonabbau ist die Photolyse des Ozons. Dabei werden je ein Sauerstoffmolekül und ein Sauerstoffatom freigesetzt (2.4). Das Sauerstoffatom reagiert mit einem Ozonmolekül sofort weiter zu zwei Sauerstoffmolekülen (2.5) [Warneck, 1988].



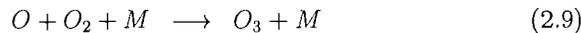
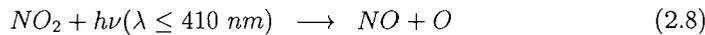
Neben dieser photolytischen Reaktion sind mehrere katalytische Ozonabbaureaktionen bekannt, die nach folgendem, vielfach in der Literatur beschriebenen Schema ablaufen (siehe z.B. Thrush [1988]):



Dabei kann X Stickstoffmonoxid (NO), Wasserstoff (H), ein OH-Radikal, Chlor (Cl) oder atomares Brom (Br) sein. Welche Reaktion letztlich zum Tragen kommt hängt wiederum von den komplexen, atmosphärischen Bedingungen ab. Beispielsweise spielt unter den Bedingungen der unteren und mittleren Stratosphäre in hohen Breiten (Polargebiete) Chlor (Cl) als Katalysator die Hauptrolle. Da eine detaillierte Erörterung dieser Prozesse nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, sei an dieser Stelle auf entsprechende Literatur, z.B. Warneck [1988] oder Thrush [1988] verwiesen.

Unter troposphärischen Bedingungen findet eine Ozonbildung unter Beteiligung von Stickstoffdioxid (NO_2) statt. NO_2 wird dabei aus Stickstoffmonoxid (NO) gebildet,

welches bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht. Die Oxidation des NO zu NO₂ erfolgt dabei nach Liu u.a. [1985] in einer Reaktionskette an der z.B. auch Kohlenmonoxid (CO) oder Methan (CH₄) beteiligt sind. Das Stickstoffdioxid (NO₂) wird wiederum zu Stickstoffmonoxid und atomarem Sauerstoff photolysiert (2.8). Dieser bildet unter Beteiligung eines Stoßpartners (M) mit molekularem Sauerstoff Ozon (2.9). Stoßpartner können wiederum molekularer Sauerstoff (O₂) und Stickstoff (N₂) sein.



Die troposphärische Ozonabbaureaktion funktioniert nach dem gleichen Schema wie der katalytische Ozonabbau in der Stratosphäre (Gleichungen 2.6 und 2.7). Katalysator ist hier vor allem das OH-Radikal. Unter den Bedingungen der polaren Troposphäre kommen auch Chlor (Cl) und Brom (Br) als Katalysatoren in Frage [Platt, 1997].

Die eigentliche Ozonproduktion unterliegt einem zyklischen Prozess bei dem Ozonbildung (Stratosphäre: Gleichungen 2.2 und 2.3, Troposphäre: Gleichungen 2.8 und 2.9) und Ozonabbau (Gleichungen 2.4 bis 2.7) gleichzeitig ablaufen. Beide Reaktionszweige stehen dabei im quasistationären Gleichgewicht. Je nach dem, welcher der beiden Reaktionszweige überwiegt, ist die lokale Ozonkonzentration höher oder niedriger. Die Dynamik einer Ozonquelle wird also vom Verhältnis dieser beiden Reaktionszweige geprägt. Beeinflussende Faktoren sind wie bereits erwähnt die Strahlungsbedingungen, die entscheidend von der geographischen Lage bestimmt werden, das Vorhandensein entsprechender Katalysatoren und meteorologische Parameter, wie Druck, Temperatur und Luftfeuchte. Ändert sich einer dieser Parameter, z.B. im Tagesgang, wird sich die Ozonkonzentration entsprechend verändern.

Entstehung des antarktischen, troposphärischen Ozons Allgemein muß man zwischen den stratosphärischen und troposphärischen Ozonquellen unterscheiden. Vor allem im Bereich des Äquators wird in der Stratosphäre infolge der dort maximalen Sonneneinstrahlung Ozon produziert. Dies wird mit der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation Richtung Süd und Nord verteilt und bildet in ca. 20 km Höhe die Ozonschicht. Insofern kann man von einer global wirkenden Quelle sprechen. Im Gegensatz dazu sind die troposphärischen Ozonquellen lokal wirkende Quellen, die sich unter bestimmten Bedingungen, vor allem bei entsprechend hoher Einstrahlung und genügend hoher Konzentrationen an Stickstoffdioxid, zeitlich und räumlich begrenzt ausbilden.

Im Gebiet der Antarktis ist keine dieser Quellen wirksam. Trotzdem ist in der antarktischen Troposphäre Ozon vorhanden. Dabei weisen alle Messungen (siehe Zusammenstellung bei Wyputta [1994]) einen Jahresgang mit einem Maximum im Winter auf. In

2. Grundlagen und Datenbasis

der neueren Literatur scheint sich die Ansicht durchzusetzen, daß die hohen Winterozonwerte eher auf eine Einmischung stratosphärischen Ozons zurückzuführen sind, als auf bodennahe oder mitteltroposphärische Transporte aus mittleren Breiten.

So fanden Murayama u.a. [1992] bei Flugzeugmessungen im Winter über der japanischen Station SYOWA (69°S, 39°O) eine Übereinstimmung der Ozonvariabilität in der unter Troposphäre mit der Variabilität in der unteren Stratosphäre. Der Vergleich der Radon-, Bodenozon- und Temperaturzeitreihe an NEUMAYER zeigt eine Korrelation zwischen diesen Zeitreihen [Winkler u.a., 1992]. Einerseits sind hohe Konzentrationen von Radon, welches terrigenen Ursprungs ist, gut mit hohen Temperaturen, andererseits hohe Ozonwerte gut mit niedrigen Temperaturen korreliert. Die Fluktuation aller Werte weist wiederum die Periodizität großräumiger Transportprozesse auf. Hiervon leiten Winkler u.a. [1992] eine Verbindung des Ozontransportes mit großräumigen Zykklonen ab. Dabei soll Radon bodennah über die warme Seite der Zyklone in die Antarktis transportiert werden. Andererseits wird auf der kalten Seite der stratosphärisch-troposphärische Austausch angeregt, so daß stratosphärisches Ozon in den Kaltsektor der Zyklone absinken kann. Shaw [1988] nimmt an, daß stratosphärisches Ozon durch Absinken im polaren Hoch in die Troposphäre eingetragen wird, wobei dieser Prozess durch Schwerewellen angeregt wird. Nachfolgend wird Ozon mit den katabatischen Winden zur Küste transportiert.

Andererseits wird der Antransport ozonarmer Luftmassen aus mittleren Breiten von Murayama u.a. [1992] für das Sommerminimum verantwortlich gemacht. Dies wird zum einen damit begründet, daß die zyklonale Aktivität innerhalb der Polarfront im Sommer geringer ist und somit der meridionale Austausch begünstigt wird, und zum Zweiten dadurch, daß sich die Tropopause erst im Sommer wieder als Trennschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre etabliert und somit Vertikaltransporte verhindert (siehe dazu auch nächsten Abschnitt).

Prinzipiell liegt die Vermutung nahe, daß der Ozontransport über die mittlere Troposphäre für ein gewisses Basisniveau der Ozonkonzentration sorgt, welches im Bereich des Sommerminimums liegt. Dagegen führt der vertikale Eintrag stratosphärischen Ozons zur Anreicherung während des Winterhalbjahres und letztlich zum spätwinterlichen Ozonmaximum.

Jahresgang der Tropopausenhöhe Wie im vorherigen Abschnitt festgestellt scheint der Eintrag stratosphärischen Ozons ursächlich mit dem Wintermaximum des antarktischen, troposphärischen Ozons zusammenzuhängen. Diese Aussage ist jedoch an die potentielle Möglichkeit von Vertikaltransporten gebunden. Ein Kriterium dafür ist die Höhe der Tropopause. Andere Parameter, wie Angabe der potentiellen Vortizität sind dafür sicher besser geeignet, tragen jedoch auf Grund der geringen Datendichte im

2.2 Spurenstoffmessungen an der Neumayer-Station

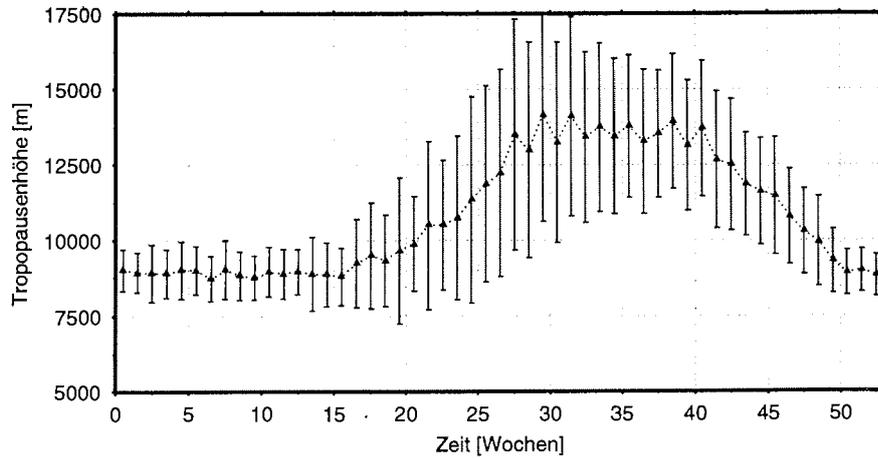


Abbildung 2.22 Wochenmittel der Tropopausehöhe über NEUMAYER, 1981-1996.

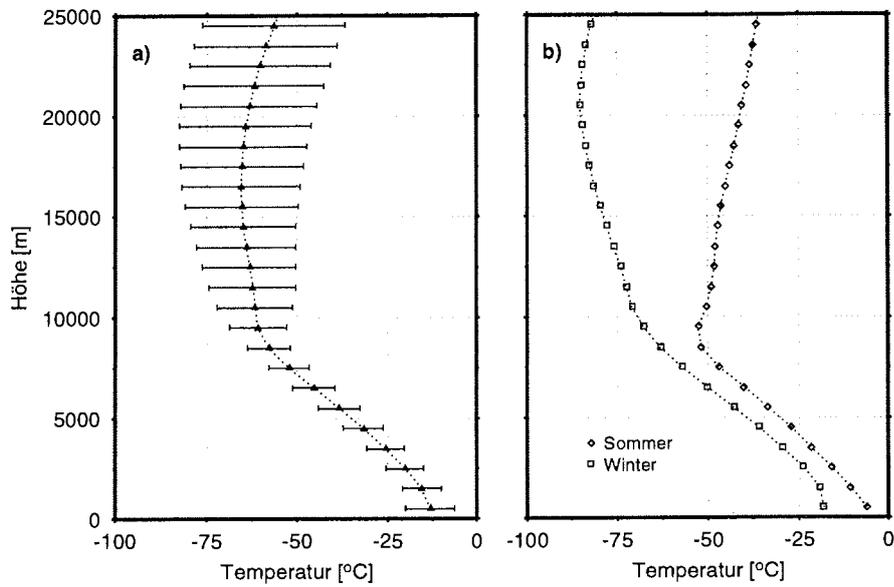


Abbildung 2.23 Vertikale Struktur des Temperaturfeldes über NEUMAYER, Mittlere Temperatur in Abhängigkeit von der Höhe von 1981-1996, Klassenbreite: 1000 m.

2. Grundlagen und Datenbasis

Bereich der Antarktis eher hypothetischen Charakter, wogegen die Tropopausenhöhe direkt aus lokalen Meßwerten abgeleitet werden kann.

Als Tropopause bezeichnet man die Obergrenze der Troposphäre. Sie fungiert als Trennschicht und Übergang zur Stratosphäre. Als *Tropopausenhöhe* ist die Untergrenze des Bereiches definiert, ab dem die Temperaturabnahme mit der Höhe weniger als 0.2°C pro 100 m beträgt. Diese Bedingung muß über eine Schichtdicke von 2000 m erfüllt sein [König-Langlo und Herber, 1996].

Über NEUMAYER vergrößert sich die Tropopausenhöhe von ca. 9000 m im Sommer um ca. 3500 m im Winter auf ca. 12500 m (Abb. 2.22). Das troposphärisch-stratosphärische Temperaturminimum liegt während des Winters oft mehrere tausend Meter über der definierten Tropopausenhöhe. D.h., eine klare Abgrenzung zwischen Troposphäre und Stratosphäre kann nicht mehr gefunden werden (Abb. 2.23).

Die Minima des Bodenozone Ein besonderes Phänomen stellen die troposphärischen Ozonminima in den Polargebieten dar. Für die Arktis wurde dies erstmals 1988 von Barrie u.a. [1988] beschrieben. Die erste, umfassende Beschreibung von Ozonminima in der Antarktis, hier speziell für die Stationen NEUMAYER und SYOWA, wird von Wessel [1997] gegeben. Hier wird von einem Transport ozonarmer Luftmassen aus meeresbedeckten Regionen ausgegangen. Der Ozonabbau vollzieht sich dabei möglicherweise nach dem gleichen Mechanismus, den z.B. Barrie u.a. [1988] und Platt [1997] als Ursache für die arktischen Ozonminima sehen. Danach findet der Ozonabbau durch katalytische Reaktion mit atomarem Brom (Br) statt (siehe Gleichung 2.6 und 2.7). Es wird angenommen, daß das Brom entweder biogenen Ursprungs [Barrie u.a., 1988] ist oder unter gewissen Bedingungen aus der Eisoberfläche freigesetzt wird [McConnell u.a., 1992], wohin es durch Deposition von Seesalz-Aerosol oder Überspülen mit Seewasser gelangt.

Beschreibung von Meßanordnung und Zeitreihe

Der seit 1995 eingesetzte Ozonanalysator O₃41M der Firma Ansyco arbeitet nach dem Prinzip der UV-Absorption. Dabei wird der Effekt ausgenutzt, daß Ozon UV-Licht der Wellenlänge 254 nm absorbiert.

Die in eine Meßkammer (Abb. 2.24) eingeleitete Probenluft, wird mit UV-Licht durchstrahlt. Als UV-Lichtquelle kommt eine Quecksilberlampe zum Einsatz, deren stärkste Linie bei 254 nm liegt. Das in die Meßkammer eingestrahlte Licht, wird am Ende des Strahlengangs von einer Photodiode empfangen und ein elektrisches Meßsignal erzeugt. Im direkten Vergleich zu einem Referenzdetektor kann die Transmission der Luftprobe bestimmt werden. Diese Messung wird abwechselnd mit Probenluft und ozonfreier Luft durchgeführt. Aus dem Verhältnis beider Proben wird die Ozonkonzentration nach

2.2 Spurenstoffmessungen an der Neumayer-Station

dem Lambert-Beer'schen Gesetz bestimmt. Druck- und Temperatursensoren ermöglichen die Korrektur der Werte auf Normalbedingungen [Ansyco, 1994]. Die Nachweisgrenze des Gerätes liegt bei 1 ppb. Im konkreten Fall liefert es 5min-Mittelwerte der Ozonkonzentration.

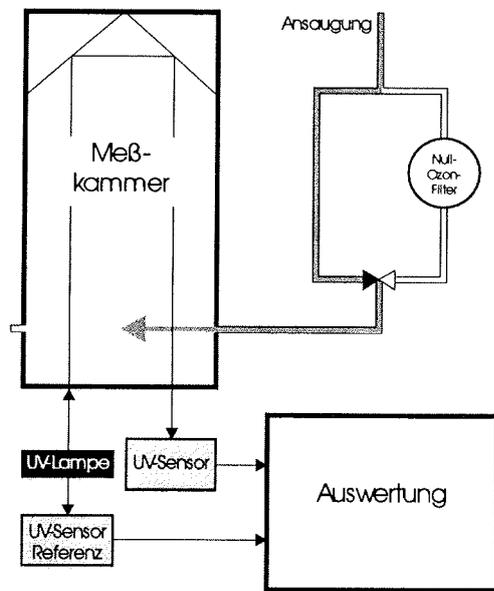


Abbildung 2.24 Schematische Darstellung des Ozonanalysators.

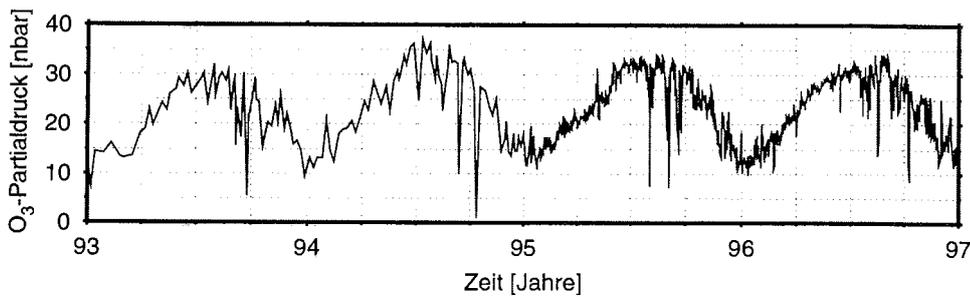


Abbildung 2.25 Konzentration des Bodenzons an der Neumayer-Station, 1992-1996.

2. Grundlagen und Datenbasis

Abbildung 2.25 zeigt die so gewonnene Zeitreihe. Zur besseren Darstellung der jahreszeitlichen Variation des Ozons wurden von 1993 bis 1994 Ozonsondendaten in die Zeitreihe einbezogen. Erst ab 1995 sind zeitlich, hochaufgelöste Daten des UV-Analysators verfügbar, die hier auch zur weiteren Datenverarbeitung verwendet wurden.

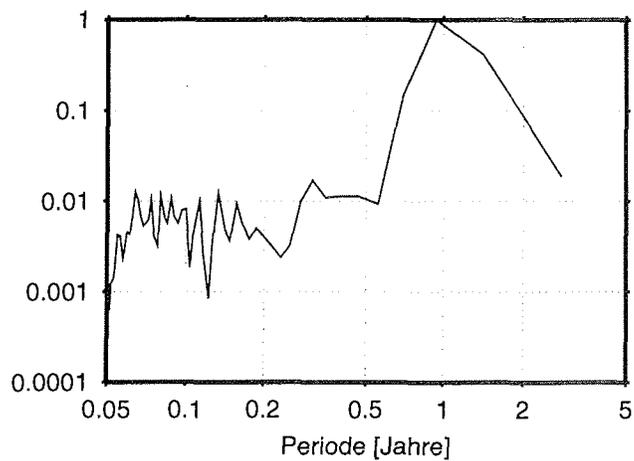


Abbildung 2.26 Normiertes Leistungsdichtespektrum der Bodenozone-Zeitreihe.

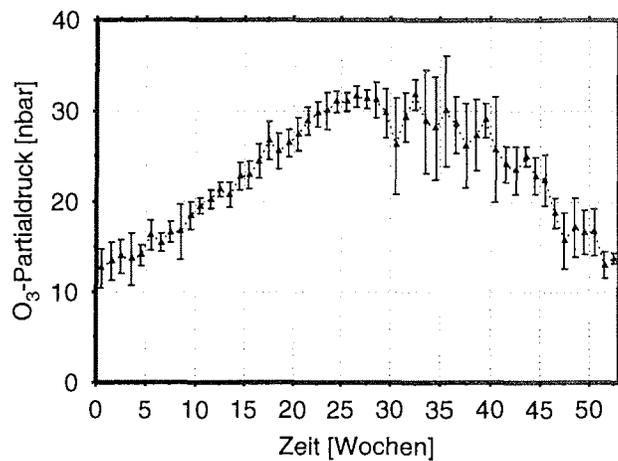


Abbildung 2.27 Jahresgang aus Wochenmitteln der Bodenozone-Konzentration für 1992-1996.

2.2 Spurenstoffmessungen an der Neumayer-Station

Die Bodenozon-Zeitreihe weist einen ausgeprägten Jahresgang auf, der auch das Leistungsdichtespektrum der Zeitreihe dominiert (siehe Abb. 2.26). Das Maximum von über 30 nbar wird im Spätwinter erreicht, das Minimum stellt sich um die Jahreswende ein. Am mittleren Jahresgang (siehe Abb. 2.27) fallen die im allgemeinen geringen Schwankungsbreiten auf, die sich jedoch ab der 30-igsten bis zur 45-igsten Woche des Jahres schlagartig vergrößern. Hierin drücken sich unregelmäßig im Spätsommer und Frühjahr auftretende Minima aus. In der übrigen Zeit zeichnet sich die Zeitreihe durch eine geringe, kurzfristige Variabilität aus.

2.3 Datenbasis und Datenverarbeitung

2.3.1 Datenbasis

Im Rahmen dieser Arbeit wurden meteorologische, luftchemische und Fernerkundungsdaten ausgewertet. Für Meteorologie und Fernerkundung konnte auf vorhandene Datenarchive zurückgegriffen werden. Die verfügbaren luftchemischen Daten der Neumayer-Station wurden in einer Datenbank zusammengefaßt. Es wurden folgende Datensätze verwendet:

Luftchemische Daten:

Seesalz-Aerosol-Daten lagen als prozessierte 10-Tage Mittelwerte von 1983–1995 vor.

Bodenozondaten wurden aus der Bodenozon-Meßreihe des luftchemischen Observatoriums und aus Radiosonden-Daten [König-Langlo und Marx, 1997] zusammengestellt. Radiosonden-Daten liegen von 1992 bis 1994 als ca. 10-tägige Einzelmittelwerte der unteren 1000 m des Aufstieges vor. Die Meßreihe des luftchemischen Observatoriums ist für den Zeitraum von 1995 bis 1996 als 5-Minuten-Mittelwerte verfügbar.

Trajektorien:

Es wurden der tägliche Rückwärts-Trajektorien-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Neumayer-Station für den Zeitraum von 1993 bis 1996 verwendet [DWD, 1993-1996].

Meereisdaten:

Als Basis standen die täglichen Daten der passiven Mikrowellensensoren der Satelliten des DMSP-(Defense Meteorological Satellite Program)-Programms für die Südpolarregion im Zeitraum von 1978–1996 zur Verfügung. Daraus wurden mit Hilfe von Standard-Algorithmen tägliche Eisbedeckungen berechnet [NSIDC, 1978-1996].

Meteorologische Daten:

Als *meteorologische Basisdaten* wurden die 3-stündigen Observationen der Neumayer-Station für den Zeitraum von 1982–1996 verwendet [König-Langlo und Marx, 1997].

Vertikalprofile beziehen sich auf die täglichen Radiosondenaufstiege an der Neumayer-Station von 1982–1996 [König-Langlo und Marx, 1997].

2.3.2 Datenbearbeitung

Zentraler Teil der Datenbearbeitung war eine relationale Datenbank unter dem Datenbank-Betriebssystem SYBASETM. Relationen und Zugang wurden vom Autor selbst in SQL (Structured Query Language) oder C programmiert. Vor allem für die grafischen Darstellungen, aber auch für einige Berechnungen wurde das Programmsystem GMT (General Mapping Tools) verwendet [Wessel und Smith, 1995].

3. Luftmassenbezogene Untersuchungen der Meereisbedeckung

3.1 Bestimmung der Meereisbedeckung aus Fernerkundungsdaten

Meereisbedeckungen sind in folgender Form verfügbar:

1. als Beobachtungsdaten von Schiffen und Landstationen,
2. in Form von Satellitenbildern und
3. als fertige Meereisbedeckungsanalysen, in deren Auswertung Beobachtungsdaten und Satellitenbilder eingeflossen sind.

Für die vorgesehene Untersuchung war es vor allem wichtig, daß die Daten in *rechnerverwertbarer Form* (Bilddateien mit entsprechender geographischer Beschreibung oder als numerischer Datensatz mit entsprechender Beschreibung) und möglichst *konsistent* über den Zeitraum verfügbar waren, für den auch Spurenstoffdaten vorlagen. Der einzige Datensatz der diese Bedingungen erfüllt, sind die "DMSP¹-SSM/I²-Helligkeitstemperaturen für die Polarregionen". Sie werden vom NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER (NSIDC), Boulder kontinuierlich auf CD-ROM veröffentlicht [NSIDC, 1978-1996].

Zur Bestimmung der Meereisbedeckung standen die Daten der passiven Mikrowellensensoren zur Verfügung, die sich an Bord der Satelliten NIMBUS-7 und des DMSP-Programms (F-8, F-11, F-13) befanden bzw. noch befinden. Diese Daten wurden nach einem Standardalgorithmus [NSIDC, 1992] in Meereisbedeckungen umgerechnet.

¹DMSP - Defense Meteorological Satellite Program

²SSM/I - Special Sensor Microwave Imager

3.1 Bestimmung der Meereisbedeckung aus Fernerkundungsdaten

Nach diesem Bearbeitungsschritt liegen die Daten als Eiskonzentrationen in einem Gitter von 332 x 316 Bildpunkten (Beispiele siehe Abb. 3.1) vor, wobei jeder Bildpunkt eine Fläche von ca. 500 km² repräsentiert. Eiskonzentration bezeichnet den prozentualen Anteil der Eisbedeckung an dieser Fläche, also die auf den Bildpunkt bezogene relative Eisbedeckung. Dabei spielt die Form der Eisbedeckung keine Rolle, d.h. ein großes Eisfloß erzeugt das gleiche Signal wie viele kleine Eisschollen der gleichen Gesamtfläche.

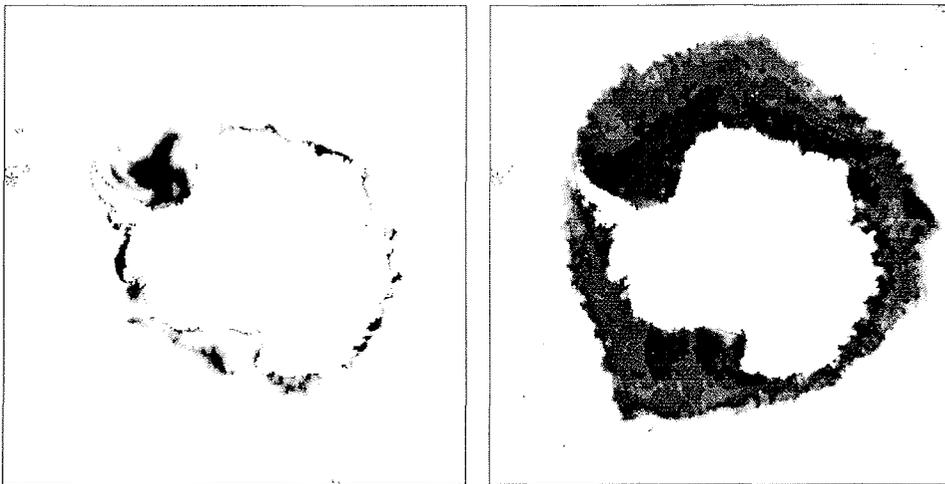


Abbildung 3.1 Meereisbedeckung am 1. März 1993 (links) und am 1. September 1993 (rechts) aus Daten des [NSIDC, 1978-1996], dunkle Grauwerte stehen für eine hohe Eiskonzentration.

Wie man sieht, handelt es sich dabei um zweidimensionale, flächenhafte Daten. Damit zeigt sich jedoch das Hauptproblem der weiteren Datenverarbeitung: Um die Meereisbedeckungsdaten mit den eindimensionalen Spurenstoffzeitreihen vergleichen zu können, müssen die Meereisdaten in eindimensionale Daten umgewandelt werden. In der Literatur findet man dazu zwei grundsätzliche Ansätze. Pfaff [1993] verwendet meridionale Meereisausdehnungen zur Beschreibung der Meereisbedeckung, dazu wird ausgehend von der Küste (Schelfeiskante) entlang des zugeordneten Meridians die Entfernung zur nördlichen Meereiskante bestimmt. Bei dieser Methode werden innerhalb dieser Strecke auftretenden eisfreien Gebiete nicht berücksichtigt. Anders das von Welch u.a. [1993] angewandte Verfahren. Hier wird die Eisbedeckung für die Flächen festgelegter Gebiete bestimmt. Im konkreten Beispiel sind das der südliche Ozean und die Ross-See. Die Festlegung dieser Untersuchungsgebiete erfolgte jedoch eher intuitiv.

3. Luftmassenbezogene Untersuchungen der Meereisbedeckung

Betrachtet man Abbildung 3.1 stellt man fest, daß die Meereisbedeckung um die Antarktis keineswegs ein homogenes Gebildes ist, dessen Saisonalität einzig dadurch bestimmt ist, daß es sich im Winter nach Norden ausdehnt. Vielmehr beeinflussen die lokale Geographie und Klimatologie, Meeresströmungen und die aktuelle, lokale meteorologische Situation den saisonalen Verlauf der Meereisbedeckung mit. Ausgehend von der Annahme, daß Meereis die in einer Luftmasse befindlichen Spurenstoffe beeinflusst und der Tatsache, daß sich diese Luftmasse je nach Herkunft und Jahreszeit über eine mehr oder weniger eisbedeckte Wasseroberfläche bewegt, erscheint es sinnvoll die Festlegung des für die Meereisbedeckung relevanten Untersuchungsgebietes an der lokalen Luftmassentransportsituation zu orientieren. Deshalb wurden zwei Konzepte für die Umwandlung der flächenhaften Meereisbedeckungsdaten in eindimensionale Meereisbedeckungs-Zeitreihen entwickelt.

Gebietsbezogene Meereisbedeckungen Es werden die täglichen, mittleren Meereisbedeckungen für feste Regionen berechnet, wobei die Regionen anhand der meteorologischen Haupteinzugsgebiete (siehe Abschnitt 2.1.4) festgelegt wurden. Die mittleren, täglichen Meereisbedeckungen einer Region bilden dann eine Zeitreihe.

Trajektorienbezogene Meereisbedeckungen Zu vorhandenen Rückwärts-Trajektorien (siehe Abschnitt 2.1.3) wird eine bestimmte Fläche unter der Trajektorie als deren Einzugsgebiet definiert. Für dieses Einzugsgebiet berechnet man die mittlere Meereisbedeckung. Die mittleren Meereisbedeckungen der Einzugsgebiete aller Trajektorien des gleichen Typs³ bilden wiederum eine Zeitreihe.

Nachfolgend werden beide Konzepte erklärt, die resultierenden Zeitreihen beispielhaft dargestellt und die spezifischen Eigenschaften der Zeitreihen abgeleitet. Zunächst seien jedoch einige Begriffe definiert und erklärt.

Erklärung von Begriffen und Symbolen

Untersuchungsgebiet, U : Bezugsgebiet für welches die Daten erhoben wurden.

Festgebiet, U_{Fest} : Der Teil des Untersuchungsgebietes der von Festland, kontinentalem Eis oder Schelfeis eingenommen wird.

Meereisgebiet, U_{Eis} : Der Teil des Untersuchungsgebietes der mit Meereis bedeckt ist.

Seegebiet, U_{See} : Der Teil des Untersuchungsgebietes der von freier See (nicht von Meereis bedeckter See) eingenommen wird.

³1-,2- bis 5-Tage-Rückwärtstrajektorien

3.1 Bestimmung der Meereisbedeckung aus Fernerkundungsdaten

Flächeneinheit, FE : Maßeinheit, welche die absolute Fläche der Gebiete U , U_{Fest} , U_{Eis} und U_{See} beschreibt. 1 FE entspricht ca. 10000 km².

Relativer Festanteil, RF : Prozentualer Anteil des Festgebietes am Untersuchungsgebiet.

$$RF = 100 \frac{U_{Fest}}{U}$$

Relative Eisbedeckung, RE : Prozentualer Anteil des Meereisgebietes am Untersuchungsgebiet.

$$RE = 100 \frac{U_{Eis}}{U}$$

Relativer Seeanteil, RS : Prozentualer Anteil des Seegebietes am Untersuchungsgebiet.

$$RS = 100 \frac{U_{See}}{U}$$

Wenn nachfolgend von Eisbedeckung gesprochen wird, ist immer Meereisbedeckung gemeint.

3.2 Bestimmung der gebietsbezogenen Eisbedeckungen

3.2.1 Methode

Gebietsbezogene Eisbedeckung bezeichnet das zeitliche Verhalten der Meereisbedeckung in einem festgelegten Gebiet, wobei sich die Lage des Gebietes an den meteorologischen Haupteinzugsgebieten für den Luftmassen-Transport zur Neumayer-Station orientiert. Innerhalb jedes Einzugsgebietes wurden mehrere verschiedene große Untersuchungsgebiete⁴ festgelegt. Das Größte umfaßt ein Gebiet, welches sich als rechteckiges Segment, ausgehend von einer Ursprungsordinate 1600 km nach Norden und je 1600 km nach Ost und West erstreckt. Bei den kleineren Untersuchungsgebieten wurde die nördliche, östliche und westliche Erstreckung jeweils halbiert. Dabei bleibt die Ursprungsordinate erhalten, so daß besonders die zeitliche Veränderung der Eisbedeckung in der Umgebung der Ursprungsordinate, i.A. damit im küstennahen Bereich berücksichtigt wurde (siehe Abbildung 3.2).

In Kapitel 2.1 wurden den Transportklassen Haupteinzugsgebiete zugeordnet (siehe Abschnitt 2.1.4). Das östliche Einzugsgebiet wurde aus der Lage der mittleren Trajektorie für Ost-Transporte und einer Annahme über die Wetterlage bei der diese Transporte zustande kommen, als das Gebiet nördlich von 60°S und 45°W bestimmt. Um auch küstennahe Effekte, wie Küstenpolynien zu berücksichtigen, wurde die Ursprungsordinate dieses Einzugsgebietes in den küstennahen Bereich bei 70°S und 45°W verschoben. Die Festlegung der Ursprungsordinate für das westliche Einzugsgebiet erfolgte anhand der mittleren Trajektorie für die West-Transporte, wobei das größte Untersuchungsgebiet (1600-km-Segment) den Gesamtbereich der Weddell überdecken sollte.

Als nächster Schritt wurde die mittlere, tägliche, relative Eisbedeckung für jedes einzelne Segment bestimmt. Diese berechnet sich für alle Bildpunkte P_{ij} des betreffenden Segments wie folgt:

$$RE_{Segment} = \frac{1}{N_{Bildpunkte}} \sum^{ij} RE_{ij} \quad (3.1)$$

Die so für jedes Segment erhaltenen täglichen, relativen Eisbedeckungen bilden je Segment eine Eisbedeckungszeitreihe. Da je Segment die Fläche des Festgebietes bekannt ist, können daraus Zeitreihen für alle anderen Größen abgeleitet werden. Die erhaltenen Zeitreihen sind im Anhang A, Abbildungen A.1 bis A.5 für das östliche Einzugsgebiet und Abbildungen A.6 bis A.10 für das westliche Einzugsgebiet dargestellt.

⁴Nachfolgend auch Segmente des Einzugsgebietes genannt.

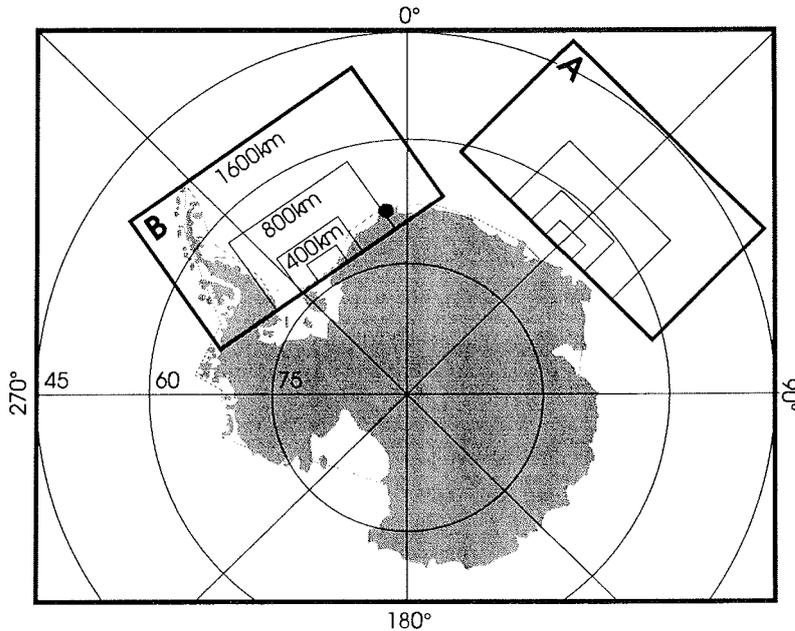


Abbildung 3.2 Darstellung der Untersuchungsgebiete für die Eisbedeckung im Einzugsgebiet der Ost-(Gebiet A)- und West-(Gebiet B)-Transporte (Darstellung und Projektion nicht maßstabsgerecht).

3.2.2 Allgemeine Charakteristik

Das typische Erscheinungsbild einer gebietsbezogenen Eisbedeckungszeitreihe zeigt Abbildung 3.3. Hier sind die tägliche relative Eisbedeckung im 1600-km-Segment des östlichen Einzugsgebietes dargestellt. Wie man auch am zugehörigen Leistungsdichtespektrum Abbildung 3.4 sehen kann, ist der Jahresgang deutlich ausgeprägt. Außerdem zeigt das Leistungsdichtespektrum einen 4-Jahres-Zyklus an. In der Zeitreihe wird dieser in Form vierjährlicher, größerer Jahresmaxima sichtbar. Diese Maxima treten in der Beispielzeitreihe 1979, 1983, 1985/86, 1990 und 1993 auf. Sie sind auch in den Zeitreihen der anderen Segmente des östlichen Einzugsgebietes zu finden. Im westlichen Einzugsgebiet kann dieser 4-Jahres-Zyklus nicht beobachtet werden. Neben diesem Zyklus kann noch ein Trend zur "schubweisen" Erhöhung der jährlichen Eisbedeckungsmaxima beobachtet werden. So lagen von 1979 bis 1988 alle Maxima im dargestellten Segment unter 30 % relative Eisbedeckung. Von 1989 bis 1995 wurde diese Marke bereits 3 Mal (1989, 1992 und 1994) überschritten.

3. Luftmassenbezogene Untersuchungen der Meereisbedeckung

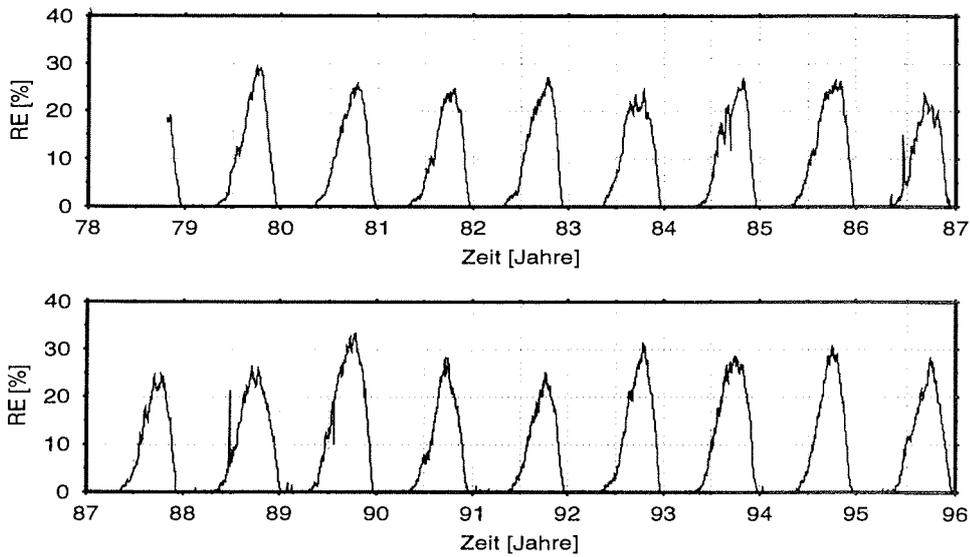


Abbildung 3.3 Tägliche relative Eisbedeckung im 1600-km-Segment des östlichen Einzugsgebietes von 1978-1995.

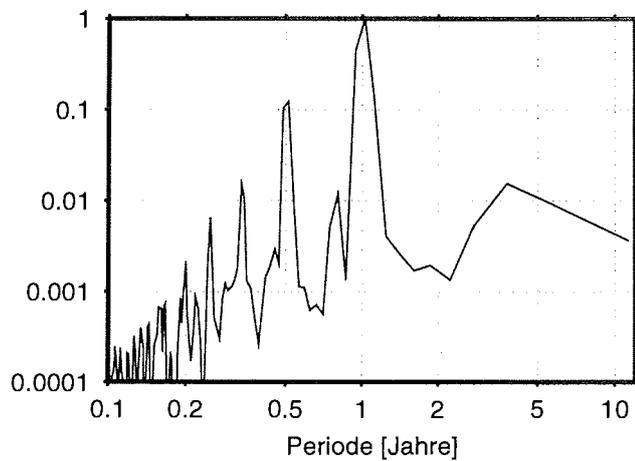


Abbildung 3.4 Normiertes Leistungsdichtespektrum der täglichen relativen Eisbedeckung im 1600-km-Segment des östlichen Einzugsgebietes von 1978-1995.

3.2 Bestimmung der gebietsbezogenen Eisbedeckungen

In Abbildung 3.5 sind die wöchentlichen, mittleren relativen Eisbedeckungen für das 100-(Abb. 3.5 a,b)-, 400-(Abb. 3.5 c,d)- und 1600-(Abb. 3.5 e,f)-Segment des östlichen (links, Abb. 3.5 a,c,e) und des westlichen (rechts, Abb. 3.5 b,d,f) Einzugsgebietes dargestellt. Neben dem ausgeprägten Jahresgang mit dem Minimum im Sommer und dem Maximum der Eisbedeckung im Spätwinter, kann festgestellt werden, daß der Aufbau der vollen Eisbedeckung offensichtlich länger dauert als deren Abbau. Außerdem nimmt die Eisbedeckung in Küstennähe zu, wie der Vergleich der 100-km-Segmente mit den 1600-km-Segmenten beider Untersuchungsgebiete zeigt.

3.2.3 Vergleich zwischen Ost- und West-Einzugsgebiet

Um die Eisbedeckungszeitreihen numerisch charakterisieren und vergleichen zu können wurden charakteristische Parameter eingeführt, die sich jeweils auf dem mittleren Jahresgang der relativen Eisbedeckung beziehen. Bei den Parametern handelt es sich um Formfaktoren, die den Verlauf des Jahresganges beschreiben. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind für alle Sektoren beider Einzugsgebiete in Tabelle 3.1 zusammengefaßt.

Tabelle 3.1 Vergleich der Eisbedeckung in den verschiedenen Segmenten der Einzugsgebiete anhand der charakteristischen Parameter, Ost: Einzugsgebiet der Ost-Transporte, West: Einzugsgebiet der West-Transporte, Parameter: \overline{RE}_{max} - Maximum der relativen Eisbedeckung, \overline{RE}_{min} - Minimum der relativen Eisbedeckung, $t(\overline{RE}_{max})$ - Zeitpunkt des Maximums der relativen Eisbedeckung, $t(\overline{RE}_{min})$ - Zeitpunkt des Minimums der relativen Eisbedeckung, $t(\overline{RE}_{>50\%})$ - Beginn der Periode mit mehr als 50 % relativer Eisbedeckung $t(\overline{RE}_{<50\%})$ - Ende der Periode mit mehr als 50 % relativer Eisbedeckung.

Segment [km]	\overline{RE}_{min} [%]		$t(\overline{RE}_{min})$ [Woche]		\overline{RE}_{max} [%]		$t(\overline{RE}_{max})$ [Woche]		$t(\overline{RE}_{>50\%})$ [Woche]		$t(\overline{RE}_{<50\%})$ [Woche]	
	Ost	West	Ost	West	Ost	West	Ost	West	Ost	West	Ost	West
1600	0	13.7	12	8	24.5	85.6	42	32	-	20	-	50
800	0	17.1	10	8	41.8	94.5	40	32	-	16	-	53
400	0	15.9	2	9	72.2	95.2	42	32	34	14	46	53
200	0	14.7	7	9	85.2	95.1	38	31	31	14	47	52
100	0	13.3	15	8	88.5	96.1	38	28	29	14	47	51

3. Luftmassenbezogene Untersuchungen der Meereisbedeckung

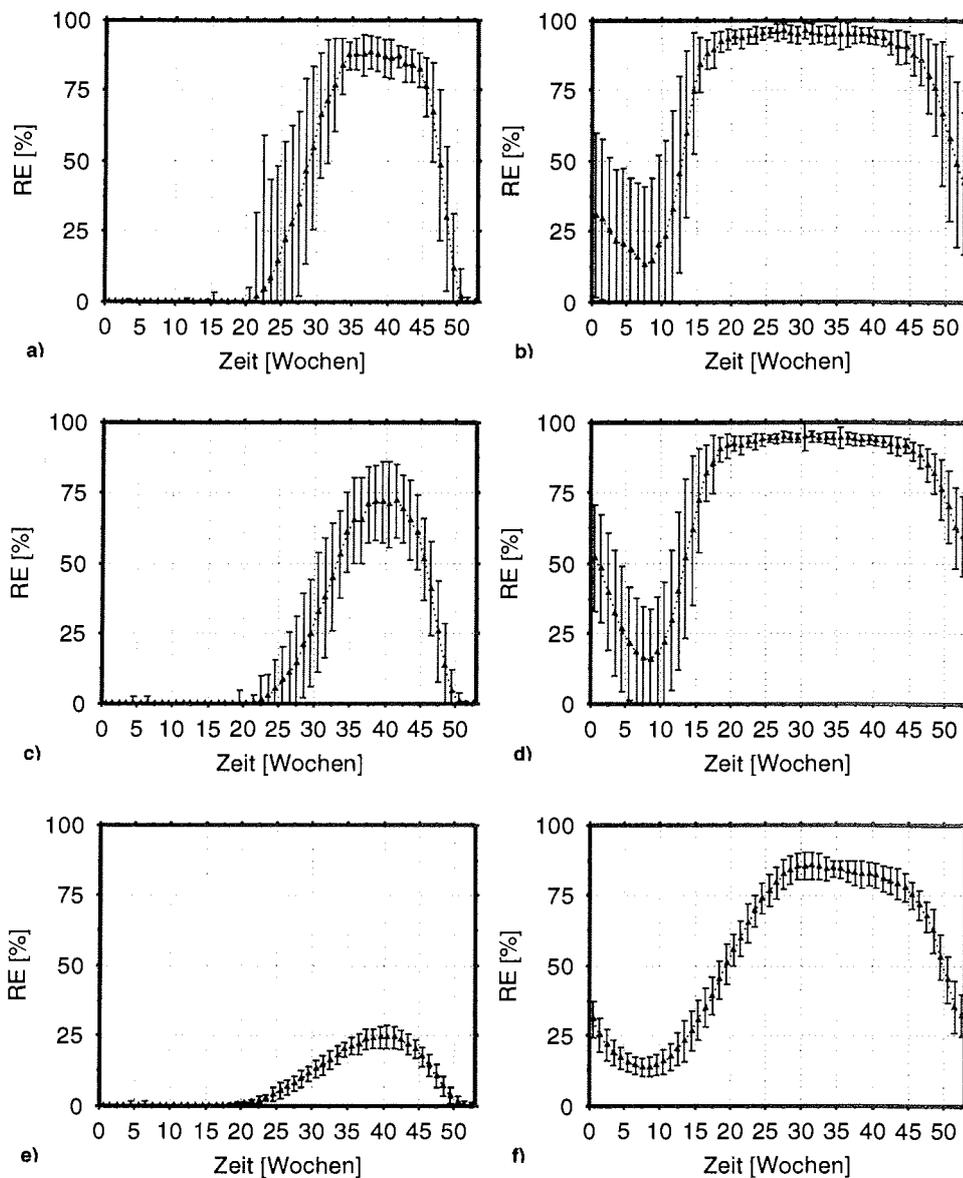


Abbildung 3.5 Wöchentliche, mittlere relative Eisbedeckung für 1978-1995, a,c,e) Östliches Einzugsgebiet, b,d,f) Westliches Einzugsgebiet a,b) 100-km-Segment, c,d) 400-km-Segment, e,f) 1600-km-Segment.

3.2 Bestimmung der gebietsbezogenen Eisbedeckungen

Anhand von Tabelle 3.1 und Abbildung 3.5 läßt sich folgendes Ergebnis formulieren:

- Das Maximum der rel. Eisbedeckung ist im Ost-Einzugsgebiet in allen Segmenten niedriger als im West-Einzugsgebiet. Es erreicht ca. 90 % im küstennahen 100-km-Segment und knapp 30 % im 1600-km-Segment. Dagegen sind die küstennahen Segmente (100- bis 400-km-Segment) des West-Einzugsgebietes fast vollständig mit Meereis bedeckt. Auch das 1600-km-Segment ist im Maximum zu ca. 90 % mit Eis bedeckt.
- Im Ost-Einzugsgebiet wird das Meereis im Sommer vollständig abgebaut, es ist während der ersten 20 Wochen des Jahres eisfrei. Das West-Einzugsgebiet bleibt in allen Segmenten zu ca. 15 % mit Eis bedeckt. Die hohe Schwankungsbreite (Streuung der Wochenmittelwerte) der relativen Eisbedeckung im küstennahen 100-km-Segment des westlichen Einzugsgebietes zeigt jedoch an, daß jährliche Schwankungen zwischen 0 und 40 % rel. Eisbedeckung möglich sind.
- Das Maximum der rel. Eisbedeckung tritt im Ost-Einzugsgebiet um die 40. Woche (ca. Ende September, Anfang Oktober) des Jahres ein, d.h. ca. 10 Wochen später als im West-Einzugsgebiet, wo das Maximum schon um die 30. Woche (Ende Juli, Anfang August) erreicht ist. Dabei ist zu berücksichtigen, daß diese Werte durch die in den küstennahen Sektoren auftretende Sättigung (100 % RE) verzerrt werden, deshalb wird das Eisbedeckungsmaximum in den küstennahen Sektoren des westlichen Einzugsgebietes auch schon um die 25. Woche, also nochmal um einen Monat früher erreicht.
- Die Festlegung eines Zeitpunktes für das Minimum im Ost-Einzugsgebiet ist nicht sinnvoll, da das Ost-Einzugsgebiet während der ersten 20 Wochen in allen Segmenten eisfrei ist. Im West-Einzugsgebiet wird das Minimum in der 8. oder 9. Woche des Jahres (Ende Februar, Anfang März) erreicht.
- Das Ost-Einzugsgebiet ist im küstennahen, 100-km-Sektor von der 29. bis zur 47. Woche des Jahres mindestens zu 50 % mit Eis bedeckt. Im 100-km-Sektor des West-Einzugsgebiet beginnt diese Periode der mittleren wöchentlichen Eisbedeckung mit über 50 % in der 14. Woche des Jahres und endet erst in der 51. Woche des Jahres, d.h. dieser Sektor des West-Einzugsgebiet ist von April bis zum Jahresende mindestens zu 50 % mit Meereis bedeckt. Für beide Einzugsgebiete gilt, daß sich diese Periode in Abhängigkeit von der Nordausdehnung des Sektors verkürzt. Dies ist im Ost-Einzugsgebiet stärker ausgeprägt als im West-Einzugsgebiet.

3.3 Trajektorienbezogene Eisbedeckungen

3.3.1 Methode

Trajektorienbezogene Eisbedeckung bezeichnet das zeitliche Verhalten der Eisbedeckung in einem Gebiet längs einer Rückwärts-Trajektorie. Die Fläche unter der Trajektorie wurde wie folgt definiert: Jedem 6-Stunden-Teilstück der Rückwärts-Trajektorie wird eine Fläche zugeordnet, deren Länge und halbe Breite der Strecke bis zum nächsten Trajektorien-Punkt entspricht. Die Summe aller dieser Sektoren ist das Einzugsgebiet der Trajektorie (siehe Abbildung 3.6).

Da alle Spurenstoffmessungen an NEUMAYER in Bodennähe durchgeführt werden, wird die Rückwärts-Trajektorie der am Boden ankommenden Luftmasse verwendet. Außerdem wird angenommen, daß die am Boden ankommende Trajektorie sich auch längs der Trajektorie immer am Boden befunden hat, d.h. Veränderungen in der Höhenlage der Trajektorie werden nicht berücksichtigt.

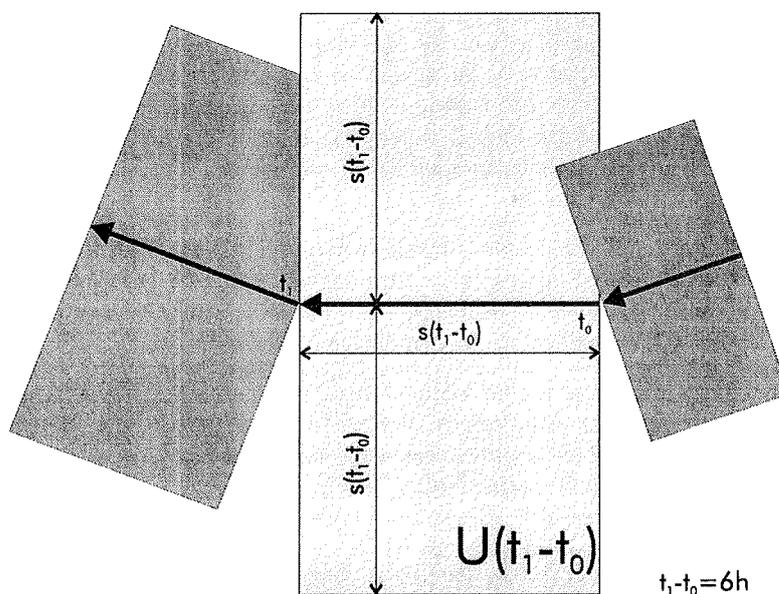


Abbildung 3.6 Bestimmung des Einzugsgebietes für eine Trajektorie.

Jeder der Rückwärts-Trajektorien wurde so ein Einzugsgebiet zugeordnet. Nach Gleichung 3.1 kann diesem eine relative Eisbedeckung zugeordnet werden, wobei P_{ij} die

Bildpunkte des Einzugsgebietes sind. Damit wurden die täglichen, relativen Eisbedeckungen für alle 1- bis 5-Tage-Rückwärts-Trajektorien bestimmt. Entsprechend erhält man Eisbedeckungszeitreihen für die 1- bis 5-Tage-Rückwärtstrajektorien. Da sich der Verlauf der Trajektorie von Tag zu Tag verändert, sind auch die täglichen Einzugsgebiete der Trajektorien⁵ verschieden. Es wurden deshalb aus der berechneten, relativen Eisbedeckung drei Größen abgeleitet. Dies sind die auf das Gesamtseegebiet (Seegebiet+Meereisgebiet) bezogene relative Eisbedeckung RE_{See} , das (absolute) Meereisgebiet U_{Eis} und das (absolute) Seegebiet U_{See} das (absolute) Meereisgebiet U_{Eis} . Die Darstellung der zugeordneten Zeitreihen befindet sich im Anhang A, Abbildungen A.11 bis A.25. Im Weiteren sollen diese Zeitreihen am Beispiel des absoluten Seegebietes allgemein charakterisiert, danach Ost- und Westtransporte verglichen und außerdem die Relation zwischen Festgebiet, Seegebiet und Meereisgebiet betrachtet werden.

3.3.2 Allgemeine Charakteristik

Abbildung 3.7 zeigt mit der täglichen, auf die 5-Tage-Trajektorie bezogenen, absoluten Meereisbedeckung den typischen Verlauf trajektorienbezogener Eisbedeckungszeitreihen. Die Zeitreihe weist einen ausgeprägten Jahresgang aus, der auch im zugeordneten Leistungsdichtespektrum (Abb. 3.8) sichtbar ist. Als besonderes Merkmal gegenüber den gebietsbezogenen Meereisbedeckungen ist sie durch eine hohe Variabilität geprägt. Darin spiegelt sich die direkte Berücksichtigung der Variabilität der Transportprozesse wieder, die durch die Einbeziehung der Rückwärtstrajektorien in die Berechnung der Meereisbedeckung erreicht wurde. Es zeigt sich damit, daß auch im Winter noch Luftmassen an NEUMAYER ankommen, die vergleichsweise viel freie See "gesehen" haben und daß im Sommer der Antransport von Luftmassen aus mit Meereis bedeckten Gebieten nicht ausgeschlossen ist.

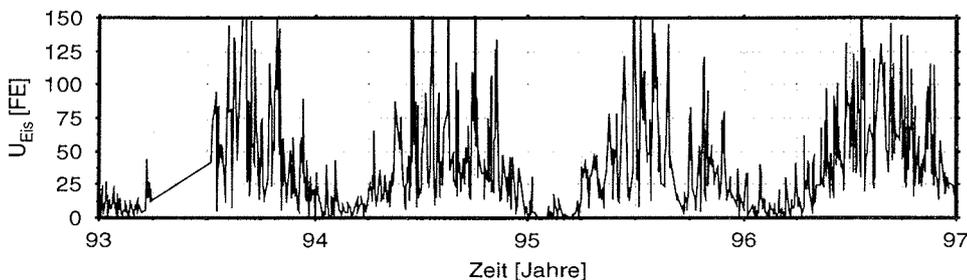


Abbildung 3.7 Tägliches, auf die 5-Tage-Trajektorie bezogenes, absolutes Meereisgebiet von 1993-1996.

⁵Im Unterschied zu den gebietsbezogenen Eisbedeckungen, die sich immer auf dasselbe Segment beziehen.

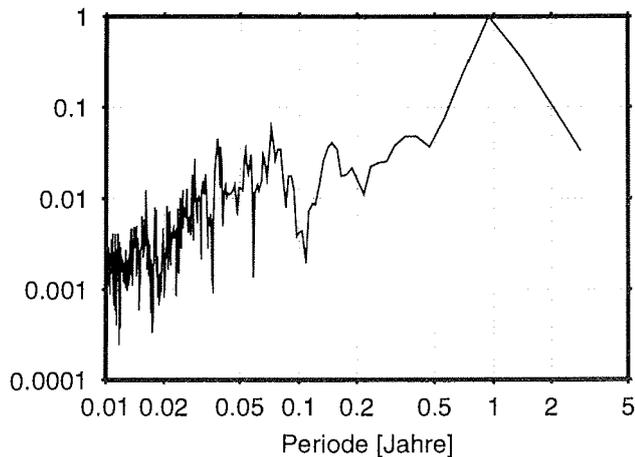


Abbildung 3.8 Normiertes Leistungsdichtespektrum des täglichen, auf die 5-Tage-Trajektorie bezogenen, absoluten Meereisgebietes von 1993-1996.

3.3.3 Vergleich zwischen Ost- und West-Transporten

Auch für die trajektorienbezogenen Eisbedeckungen ist analog zum Vergleich des Ost- mit dem West-Einzugsgebiet gebietsbezogener Eisbedeckungen ein Vergleich zwischen Ost- und West-Transporten von Interesse. Die Einteilung der trajektorienbezogenen Eisbedeckungen in Ost- und West-Transporte erfolgt nach dem auf Seite 22 dargestellten Schema. Danach werden alle Trajektorien mit Ausgangspunkt im Sektor⁶ 0° bis 135° Ost-Transporten und alle Trajektorien im Sektor 225° bis 360° West-Transporten zugerechnet. Die auf dieser Grundlage bestimmten mittleren Jahresgänge der relativen Eisbedeckung zeigt Abbildung 3.9. Die Unterschiede zwischen Ost-(Abb. 3.9 a,c,e) und West-Transporten (Abb. 3.9 b,d,f) liegen jedoch im Bereich der Streuung der verwendeten Monatsmittel. Die trajektorienbezogene, relative Eisbedeckung ist jedoch auf das jeweilige Einzugsgebiet der Trajektorie normiert und verschleiert so die wahre Eisbedeckung. Deshalb seien nachfolgend die trajektorienbezogene, absolute Eisbedeckung betrachtet.

In Analogie zum Vergleich auf Seite 57 sollen wiederum charakteristische Parameter betrachtet werden, die sich alle auf den mittleren Jahresgang der trajektorienbezogenen, absoluten Eisbedeckung beziehen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind für drei Trajektorienlängen in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

⁶azimutal von NEUMAYER aus gesehen

3.3 Trajektorienbezogene Eisbedeckungen

Tabelle 3.2 Vergleich der Eisbedeckung für verschiedene Trajektorienlängen anhand der charakteristischen Parameter, Ost: Ost-Transporte, West: West-Transporte, Parameter: $\overline{U_{Eismax}}$ Maximum der absoluten Eisbedeckung, $\overline{U_{Eismin}}$ Minimum der absoluten Eisbedeckung, $t(\overline{U_{Eismax}})$ Zeitpunkt des Maximums der absoluten Eisbedeckung, $t(\overline{U_{Eismin}})$ Zeitpunkt des Minimums der absoluten Eisbedeckung, $t(\overline{U_{Eis>50\%}})$ Beginn der Periode mit mehr als 50 % von $\overline{U_{Eismax}}$ absoluter Eisbedeckung, $t(\overline{U_{Eis<50\%}})$ Ende der Periode mit mehr als 50 % von $\overline{U_{Eismax}}$ absoluter Eisbedeckung.

Anzahl [Tage]	$\overline{U_{Eismin}}$ [FE]		$t(\overline{U_{Eismin}})$ [Monat]		$\overline{U_{Eismax}}$ [FE]		$t(\overline{U_{Eismax}})$ [Monat]		$t(\overline{U_{Eis>50\%}})$ [Monat]		$t(\overline{U_{Eis<50\%}})$ [Monat]	
	Ost	West	Ost	West	Ost	West	Ost	West	Ost	West	Ost	West
1	2.1	0.7	2	2	29.5	21.9	10	10	5	4	11	12
3	6.7	4.4	1	2	44.4	60.4	8	7	3	5	10	11
5	7.1	8.4	2	2	69.1	110.9	7	8	5	5	11	9

Der Vergleich der auf Ost- bzw. West-Trajektorien bezogenen mittleren, absoluten Eisbedeckung stellt sich nach Tabelle 3.2 und Abbildung 3.10 folgendermaßen dar:

- Das Maximum der Eisbedeckung nimmt mit der Länge der zugeordneten Trajektorie zu. Während das Maximum für die Ost-1-Tag-Trajektorien noch höher ausfällt als das für die West-Trajektorien nimmt das Maximum für die West-Trajektorien mit der Trajektorienlänge stärker zu und beträgt für die West-5-Tage-Trajektorien das Doppelte des Ost-Maximums.
- Das Minimum für beide Trajektorientypen beträgt zwischen 5 und 15 % der maximalen Eisbedeckung der zugeordneten Trajektorienlänge und nimmt mit der Länge der Trajektorie zu.
- Das Maximum der Eisbedeckung wird für beide 1-Tag-Trajektorien im Oktober erreicht. Mit zunehmender Trajektorienlänge verschiebt sich das Maximum nach vorn. Für die 5-Tage-Trajektorien befindet es sich im Juli (Ost) bzw. im August (West). Dazu muß bemerkt werden, daß sowohl Ost- als auch West-1-Tag-Trajektorien ein sekundäres Eisbedeckungsmaximum im Juli (Ost) bzw. Mai (West) aufweisen.

3. Luftmassenbezogene Untersuchungen der Meereisbedeckung

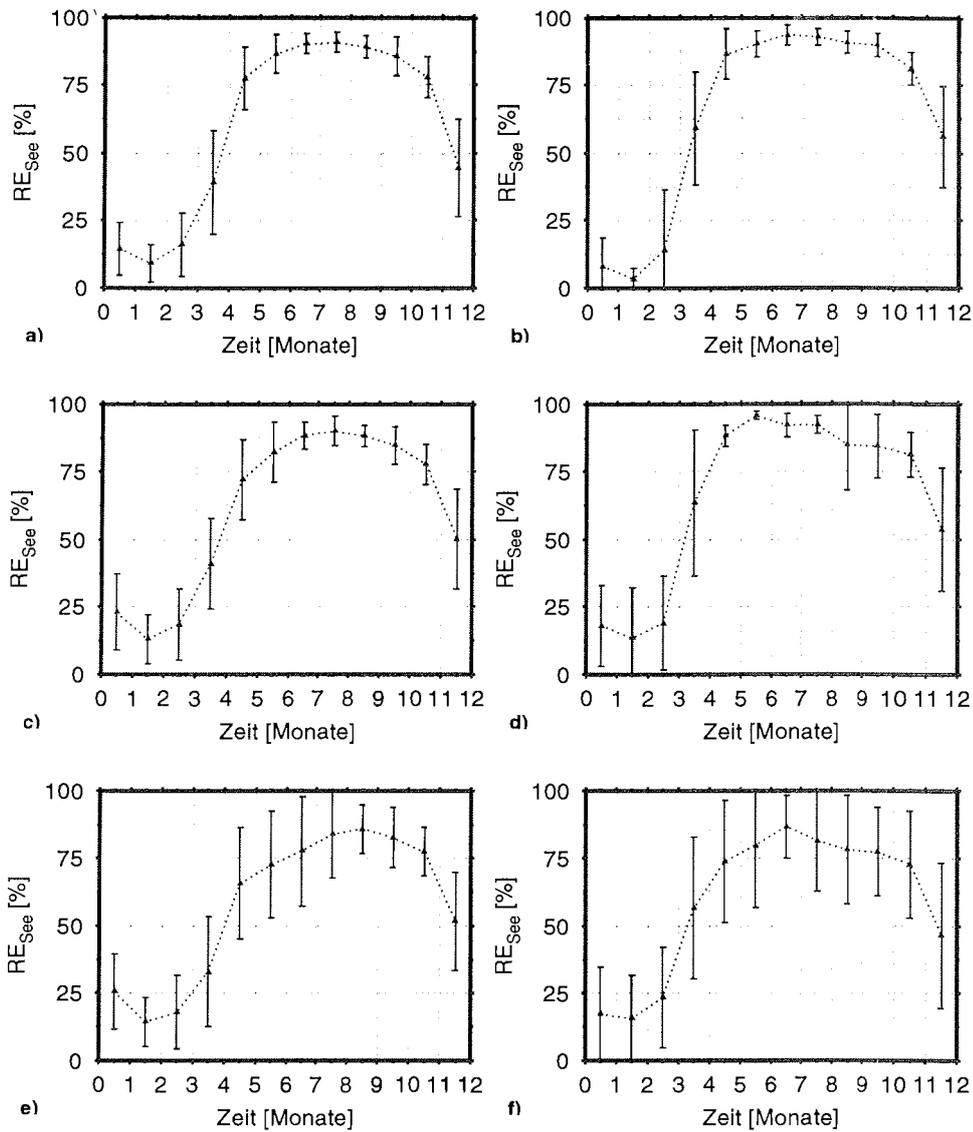


Abbildung 3.9 Monatsmittel der trajektorienbezogenen, relativen Eisbedeckung des Seegebietes für 1993-1996, a,b) 1-Tag-Trajektorien, b,c) 3-Tage-Trajektorien, d,e) 5-Tage-Trajektorien, a,c,e) Ost-Transporte, b,d,f) West-Transporte.

3.3 Trajektorienbezogene Eisbedeckungen

- Für beide Trajektorientypen befindet sich das Minimum der Eisbedeckung im Sommer, unabhängig von der Trajektorienlänge etwa im Februar.
- Der jährliche Eisbedeckungs-Zyklus läuft aus der "Sicht" der Trajektorien für den Ost- und den West-Sektor nahezu synchron ab. Eine Phasenverschiebung ist hier nicht feststellbar.

Ein Nachteil der Verwendung absoluter Eisbedeckungen ist die fehlende Information über die übrigen Bestandteile des Untersuchungsgebietes. Abbildung 3.11 stellt die relative Eisbedeckung dem relativen Festanteil gegenüber. Die Darstellung der Anteile erfolgt kumulativ, so daß die Ergänzung zu 100 % i.A. den Anteil an freier See wiedergibt. Allgemein ist folgendes festzustellen.

- Die den Ost-Trajektorien zuzuordnende Fläche beinhaltet einen deutlich größeren Festanteil als die Flächen der West-Trajektorien, d.h. die Ost-Trajektorien bewegen sich anteilig mehr über Schelf- oder Inlandeis. Für die West-1-Tage-Trajektorie liegt der Festanteil deutlich unter 10 %, d.h. diese Trajektorien führen fast ausschließlich über Meereis oder freie See.
- Der Festanteil nimmt für beide Trajektoriengruppen mit zunehmender Trajektorienlänge zu. Das bedeutet, daß sich die Luftmassen im Nahbereich (1-Tag-Trajektorie) öfter über freie See oder Meereis bewegen. Besonders deutlich tritt dies bei den West-Trajektorien in Erscheinung.
- Für Ost-Transporte weist der Festanteil der 1-Tag-Trajektorie einen leichten Jahresgang mit Maximum im Winter auf, d.h. die Ost-Trajektorien bewegen sich im Sommer in Stationsnähe anteilig mehr über freier See bzw. Meereisgebiet als im Winter.
- Das gleiche zeigt sich für die 5-Tage-Trajektorie der West-Transporte, was wiederum bedeutet, daß sich die West-Trajektorien im Sommer 3 bis 5 Tage vor Erreichen von NEUMAYER anteilig mehr über freier See bzw. Meereisgebiet bewegen.

3. Luftmassenbezogene Untersuchungen der Meereisbedeckung

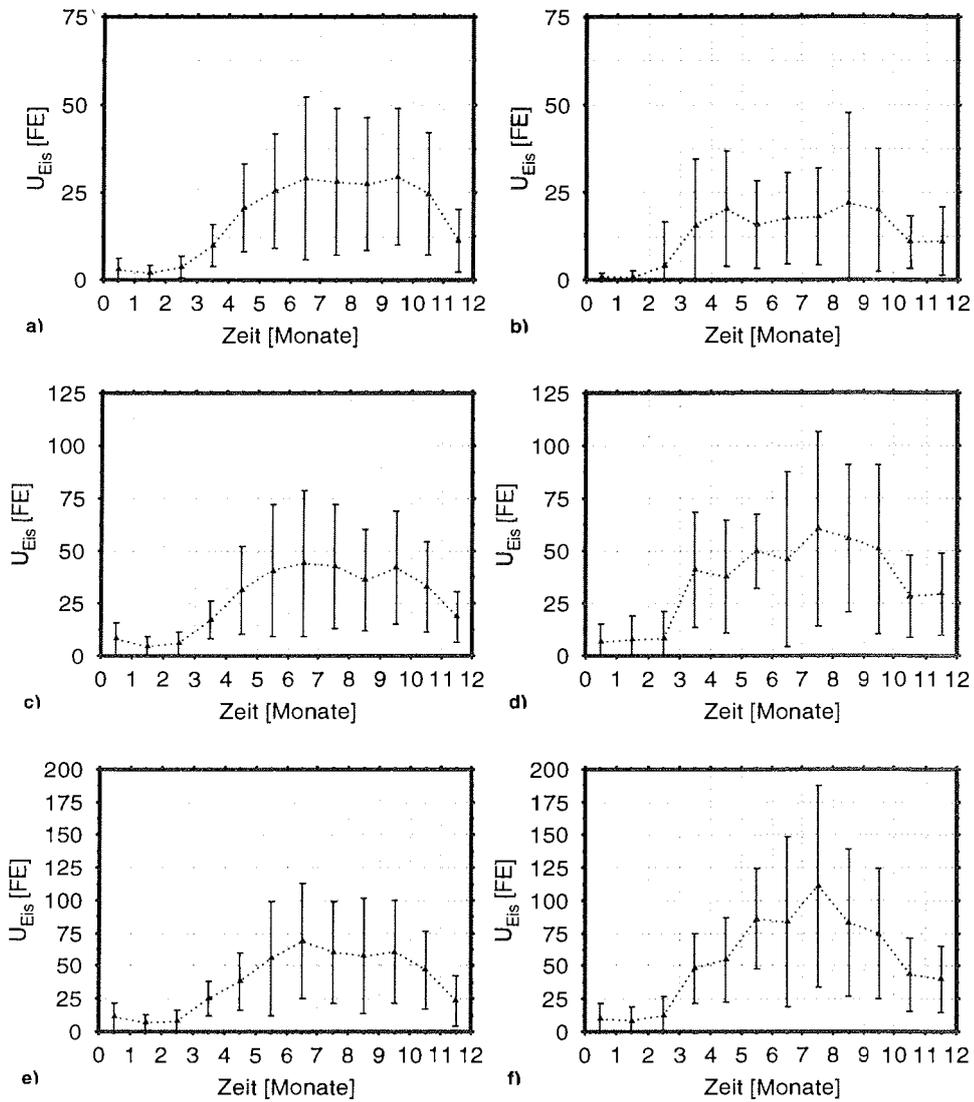


Abbildung 3.10 Mittlere trajektorienbezogene, absolute Meereisbedeckung für 1993-1996, a,b) 1-Tag-Trajektorien, b,c) 3-Tage-Trajektorien, d,e) 5-Tage-Trajektorien, a,c,e) Ost-Transporte (Monatsmittel), b,d,e) West-Transporte (Monatsmittel).

3.3 Trajektorienbezogene Eisbedeckungen

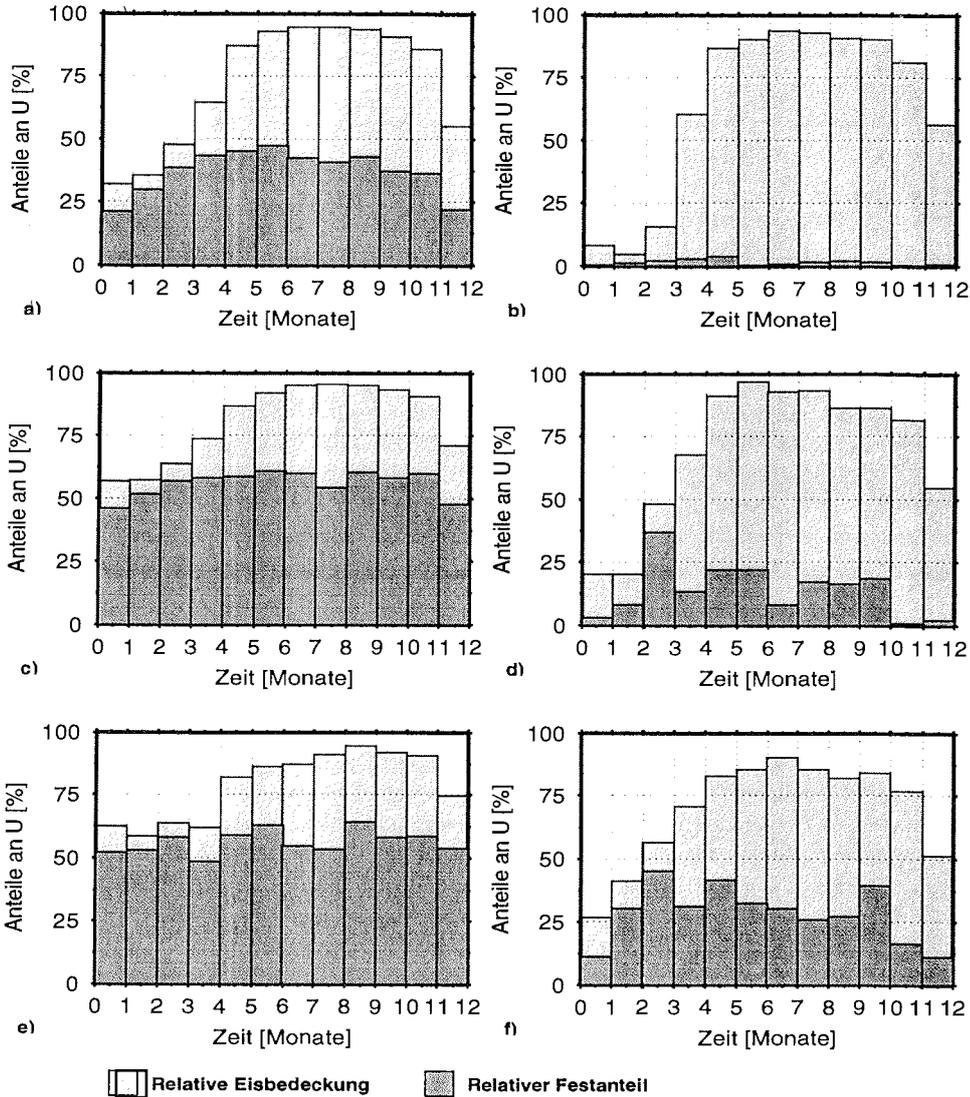


Abbildung 3.11 Mittlere trajektorienbezogene Anteile von Fest-, Meereis- und Seegebiet am Untersuchungsgebiet für 1993-1996, a,b) 1-Tag-Trajektorien, c,d) 3-Tage-Trajektorien, e,f) 5-Tage-Trajektorien, a,c,e) Ost-Transporte (Monatsmittel), b,d,f) West-Transporte (Monatsmittel).

3.4 Zusammenfassung und Diskussion

Hauptziel der Untersuchung war, die Meereisbedeckung auf den Luftmassentransport zu beziehen. Bildhaft gesprochen sollte bestimmt werden, wieviel Meereis die aktuell bei NEUMAYER ankommende Luftmasse "gesehen" hat. Dazu wurden mit den gebietsbezogenen und den trajektorienbezogenen Eisbedeckungen zwei Konzepte entwickelt, die dieser Anforderung prinzipiell gerecht werden.

Bezogen auf den saisonalen Verlauf, stimmen die Pfaff'sche Eisbedeckungszeitreihe⁷ und die hier gewonnenen Zeitreihen gut überein. Im einzelnen zeigen sich jedoch große Unterschiede, was vor allem auf die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Eisbedeckung und die verschiedenen, untersuchten Gebiete zurückzuführen ist. So liegen Pfaff's Eisbedeckungen Wochenmittel zugrunde, während hier grundsätzlich mit Tagesmitteln gearbeitet wurde, wodurch vor allem die zeitliche Variabilität der Meereisbedeckung besser erfaßt wurde. Während Pfaff pauschal die Eisbedeckung nördlich von NEUMAYER untersuchte, wurde hier eine auf dem Luftmassentransport bezogene Betrachtung der Eisbedeckung vorgenommen. Außerdem ist die räumliche Auflösung der hier verwendeten Daten wesentlich höher und die geographische Zuordnung präziser als bei Pfaff, der die meridionale Entfernung aus gezeichneten Eiskarten ablas.

Konzeptvergleich

Der wesentliche Unterschied zwischen gebiets- und trajektorienbezogenen Eisbedeckungen liegt in der Festlegung der Einzugsgebiete. Die Einzugsgebiete der gebietsbezogenen Eisbedeckungen stellen gewissermaßen die Verlängerung eines hypothetischen Einzugsgebietes der mittleren Trajektorien für Ost- bzw. West-Transporte dar. Die gebietsbezogenen Eisbedeckungen sind damit für Langstrecken-Transporte, die über das jeweilige Einzugsgebiet führen repräsentativ, berücksichtigen die Eissituation im Nahbereich der Neumayer-Station jedoch nicht. Sie haben den Vorteil, daß sie als lange Zeitreihen ab 1979 in hoher Auflösung (Tagesmittel) zur Verfügung stehen. Ein Nachteil ist die statische Zuordnung zu den Ost- bzw. West-Transporten, die zusammen ca. 90 % aller Transporte nach NEUMAYER ausmachen (siehe Seite 26) aber täglichen Veränderungen unterliegen. Um anhand der gebietsbezogenen Eisbedeckungen eine Aussage über die für NEUMAYER relevante Eisbedeckung zu erhalten, muß die tägliche Transportsituation explizit betrachtet werden.

Die trajektorienbezogenen Eisbedeckungen dagegen berücksichtigen die Transportsituation implizit, da der Bestimmung des Einzugsgebietes dynamisch je nach Verlauf der Trajektorien (also Verlauf des Luftmassentransportes) erfolgt. Die Variabilität der

⁷Pfaff [1993] hatte basierend auf der meridionalen Entfernung der nördlichen Eisgrenze von NEUMAYER den Jahresgang der Eisbedeckung bestimmt.

trajektorienbezogenen Eisbedeckung beruht demnach auf zwei Komponenten - der saisonalen Variabilität der Eisbedeckung und der transportbedingten Variabilität des Einzugsgebietes. Von Nachteil ist jedoch, daß Rückwärts-Trajektorien erst ab 1993 verfügbar sind und auch die längsten Trajektorien (5-Tage-Trajektorien) u.U. nicht den vollständigen, über Meereis führenden Transportweg überdecken und somit eher repräsentativ für die Eisbedeckung im Nahbereich von NEUMAYER sind.

Aufgrund dieser konzeptionellen Unterschiede muß nach Zielstellung und nach Datenlage entschieden werden, ob gebiets- oder trajektorienbezogene Eisbedeckungen für eine Untersuchung verwendet werden.

Neben der allgemeinen Charakterisierung des saisonalen Verlaufs und der Besonderheiten der gewonnenen Zeitreihen (siehe Seite 53 für gebietsbezogene und Seite 59 für trajektorienbezogene Eisbedeckungen) wurden vergleichende Betrachtungen zwischen den verschiedenen Einzugsgebieten der gebietsbezogenen Eisbedeckung bzw. zwischen verschiedenen Transportklassen der trajektorienbezogenen Eisbedeckung durchgeführt. Der Vergleich der gebietsbezogenen Eisbedeckung im östlichem und westlichen Einzugsgebiet (Seite 57) zeigt, daß das westliche Einzugsgebiet im Jahresgang deutlich früher und länger von Meereis bedeckt ist. Die Unterschiede im Vergleich der trajektorienbezogenen Eisbedeckung für Ost- und West-Transporte fallen dagegen (Seite 61) eher moderat aus, was ein Indiz dafür ist, daß die trajektorienbezogenen vor allem für den Nahbereich von NEUMAYER repräsentativ sind. Einzig der Vergleich der in den trajektorienbezogenen Eisbedeckungen enthaltenen Anteile von Meereis-, See- und Festgebiet offenbart größere Differenzen, die auf die Unterschiede im geographischen Verlauf der den Transportklassen zugeordneten Trajektorien zurückzuführen sind. Hier ist das wesentliche Ergebnis, daß West-Transporte ganzjährig im Nahbereich (1 bis 3 Tage vor Erreichen) der Station häufiger über Meereis- oder Seegebiet, Ost-Transporte im Nahbereich vor allem im Winter häufiger über Schelf- oder Inlandeis führen.

Dies läßt bezogen auf die zu untersuchenden atmosphärischen Spurenstoffe folgende Schlussfolgerungen zu: Wenn das nach NEUMAYER transportierte Seesalz-Aerosol aus Polynien stammt, dann müßte es bevorzugt mit West-Transporten zur Station gelangen, da diese im küstennahen Bereich Gebiete überqueren in denen nach Markus [1995] bevorzugt Polynien auftreten. Sollte es jedoch aus eisfreien Seegebieten kommen, also über Ferntransporte nach NEUMAYER gelangen, dann müßte es auch bei Ost-Transporten auftreten. Der bodennahe Antransport ozonarmer Luftmassen müßte, da die Ozonzerstörung nach Hypothese von Wessel [1997] an das Vorhandensein von Meereis gebunden ist (siehe Abschnitt 2.2.3), vorzugsweise mit West-Transporten in Zusammenhang stehen. Auch hier könnten Polynien eine besondere Rolle spielen, da in deren Randbereich durch Deposition von Seesalz-Aerosol und Überspülen mit Seewasser Seesalz und somit Bromverbindungen auf dem Meereis abgelagert werden. Damit wäre eine weitere Voraussetzung für den troposphärischen Ozonabbau in der Antarktis erfüllt. Eine Überprüfung beider Hypothesen war im Rahmen dieser Arbeit nicht

3. Luftmassenbezogene Untersuchungen der Meereisbedeckung

möglich, da die als Grundgesamtheit für entsprechende statistische Verfahren verfügbare Datenbasis derzeit noch zu gering ist.

Grundlage für die Bestimmung der trajektorienbezogenen Eisbedeckungen waren auf Basis des "Global Model" vom Deutschen Wetterdienst berechnete Rückwärts-Trajektorien. Die Qualität dieser Trajektorien hat sicher einen entscheidenden Einfluß auf die Güte der berechneten Eisbedeckungszeitreihen. Kottmeier und Fay [1997] sowie Pfaff [1993] gehen auf diese Problematik besonders ein. Probleme bestehen dabei in zweierlei Hinsicht, zum einen sind für die Gesamtregion "Antarktis" nur ein Bruchteil der Daten verfügbar, wie z.B. für "Europa". Dies wirkt sich in erster Linie auf den Fehler der Bestimmung der Trajektorienpunkte aus (in der Literatur werden hier mehrere 100 bis 1000 km Abweichung genannt). Zum zweiten erhält man mit einem anderen Trajektorien-Modell (z.B. ECMF⁸-Trajektorien) u.U. auch ganz andere Trajektorien. Hier zeigt sich ein Problem der (nordhemisphärischen?) Vorhersage-Modelle, die nach Erfahrung des Autors z.B. die katabatische Abflußströmung nur unzureichend berücksichtigen. Eher ein statistisches Problem ist, daß die verwendeten Rückwärts-Trajektorien nur für den Zeitraum ab 1993 verfügbar sind.

Ein kritischer Punkt der Berechnung ist die Bestimmung der Haupteinzugsgebiete der gebietsbezogenen bzw. der Einzugsgebiete der trajektorienbezogenen Eisbedeckungen. Als gut gesichert kann das westliche Einzugsgebiet bezeichnet werden, da es sich sowohl von den mittleren Trajektorien der West-Transporte als auch aus einer (wenn auch stark vereinfachten) Modellwetterlage ableiten läßt. Komplizierter stellt sich das beim östlichen Einzugsgebiet dar, da es nur auf der Interpretation einer Modellwetterlage beruht, die jedoch von den Trajektorien der Ost-Transporte gut unterstützt wird. Dies ist jedoch insofern unproblematisch, da das östliche Einzugsgebiet aufgrund der dort relativ ausgeglichenen Eisbedeckungsverhältnisse robust gegen Verschiebungen um $+/- 15^\circ$ östlicher bzw. westlicher Länge ist. Eine Nord-Süd-Verschiebung ist noch unkritischer, da die Luftmassen ohnehin nicht in diesem Gebiet gebildet, sondern von Nord kommend über diese Gebiet hinwegtransportiert und dabei von der Meereisformation beeinflusst werden. Um einiges kritischer ist die Festlegung des Einzugsgebietes einer Trajektorie zu sehen, welche letztlich intuitiv entschieden werden mußte. Dies war notwendig da einerseits keine vergleichbaren Betrachtungen zur Verfügung standen und andererseits die verfügbare Rechenkapazität nicht ausreichte, um die Ergebnisse mit einem anderen Ansatz für das Einzugsgebiet zu verifizieren.

Ein Antrieb zur Durchführung dieser Untersuchung war sicher die Frage des Einflusses von Polynien vor allem auf die Konzentration des Seesalz-Aerosols. Wegen der relativ hohen räumlichen Auflösung der Meereisdaten (25 km x 25 km) werden Polynien bei der Berechnung der Eiskonzentration implizit berücksichtigt. Mit der verfügbaren Datenbasis war es jedoch nicht möglich, Polynien explizit auszuweisen. Der von Markus [1995] beschriebene Algorithmus könnte hierbei zukünftig Abhilfe schaffen, greift je-

⁸European Center of Midrange Forecast

doch auf eine Datenbasis zurück die derzeit für statistische Zeiträume nicht verfügbar ist.

3.5 **Schlußfolgerungen**

Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung der Eisbedeckung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Über die Verwendung von gebiets- oder trajektorienbezogenen Eisbedeckungen muß je nach Zielstellung und Datenlage entschieden werden.
 - Gebietsbezogene Eisbedeckungen sind aufgrund der größeren Grundgesamtheit (tägl., rel. Eisbedeckungen ab 1979) vor allem für statistische Untersuchungen der "reinen" Eisbedeckung geeignet. Methodisch bedingt sind sie repräsentativ für Ferntransporte die das östliche und westliche Einzugsgebiet passieren.
 - Trajektorienbezogene Eisbedeckungen berücksichtigen die saisonale Variabilität der Eisbedeckung und die transportbedingte Variabilität des Einzugsgebietes. Aufgrund der Länge der Trajektorien sind sie vor allem für die Eisbedeckung im Nahbereich der Neumayer-Station repräsentativ.
2. Es gibt wesentliche, transportbedingte Unterschiede in der Eisbedeckung, die eine Luftmasse auf ihrem Weg zur Neumayer-Station "sieht", wobei
 - West-Transporte deutlich stärker (im Jahresgang früher und länger) dem Meereiseinfluß ausgesetzt sind, als Ost-Transporte und
 - West-Transporte ganzjährig im Nahbereich (1 bis 3 Tage vor Erreichen von NEUMAYER) häufiger über Meereis- bzw. Seegebiet führen, während Ost-Transporte im Nahbereich vor allem im Winter häufiger über Schelf- oder Inlandeis führen.
3. Die Qualität der Aussage vor allem der trajektorienbezogenen Eisbedeckungen würde sich verbessern, wenn
 - Weiterreichende, präzisere Rückwärts-Trajektorien über einen längeren Zeitraum verfügbar wären (z.B. 10-Tage-Trajektorien ab 1982) und
 - Polynien als expliziter Klassifizierungsparameter (neben See-, Meereis- und Festgebiet) in den Eisbedeckungsdaten enthalten wären.

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozone-Konzentration

Aufbauend auf die Ergebnisse der Bestimmung der Meereisbedeckung in Kapitel 3 soll nachfolgend der Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen Änderung der Meereisbedeckung und der kurzperiodischen Variabilität der Konzentration des an NEUMAYER gemessenen Seesalz-Aerosols bzw. Bodenozone untersucht werden. Dazu soll in Abschnitt 4.1 kurz in die verwendete Methode eingeführt werden. Anschließend werden die für Seesalz-Aerosol und Bodenozone erhaltenen Ergebnisse getrennt zusammengefaßt und bewertet.

4.1 Beschreibung des verwendeten Korrelationsalgorithmus

Ein grundlegende Aufgabe dieser Arbeit war die Festlegung eines Algorithmus, der den Vergleich von Spurenstoffmeßreihen und Meereisbedeckungen ermöglicht. In der Literatur [Bendat und Pierson, 1971, Fritzsche, 1977, Schönwiese, 1985, Press u.a., 1988] werden Kreuzkorrelationsalgorithmen¹ beschrieben, die einen solchen Vergleich ermöglichen. Da ein abschnittsweiser Vergleich der Zeitreihen über jeweils einen kurzfristigen, bezüglich des Spurenstofftransportes relevanten Zeitraum gefragt war, wurde entsprechender Korrelationsalgorithmus konstruiert (Abbildung 4.1). Der eigentliche Korrelator wurde den "Numerical Recipes" [Press u.a., 1988] entnommen, wobei die umgebende Struktur vom Autor in C programmiert wurde.

¹im weiteren nur noch Korrelationsalgorithmus oder Korrelator genannt.

4.1 Beschreibung des verwendeten Korrelationsalgorithmus

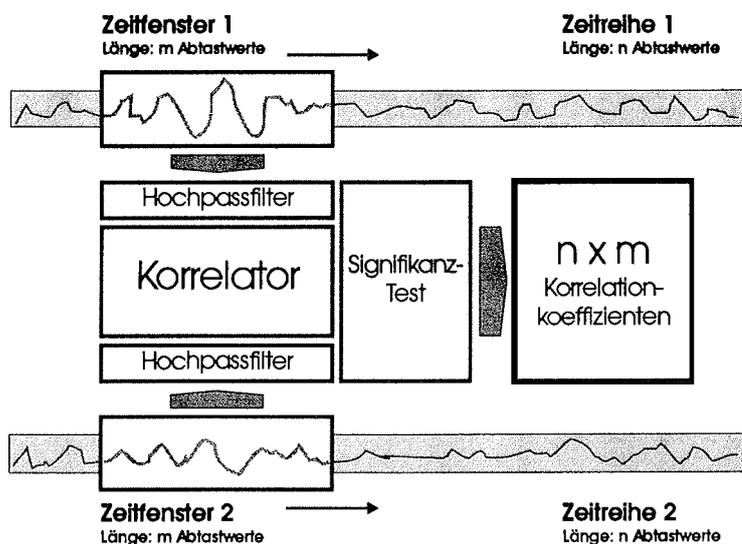


Abbildung 4.1 Grundstruktur des verwendeten Korrelationsalgorithmus.

Der Programmablauf gestaltet sich so, daß jedem Meßwert (auch Abtastwert) der Zeitreihen ein Zeitabschnitt zugeordnet wird, der aus dem Meßwert selbst und den ihn umgebenden $\pm m/2$ -Meßwerten zusammengesetzt ist, wobei m die wählbare Länge des Zeitabschnittes (Zeitfensters) darstellt. Die Zeitabschnitte beider hochpaßgefilterter Zeitreihen werden zeitsynchron kreuzkorreliert, so daß ein Feld aus n (Anzahl der Meßwerte der kürzeren Zeitreihe) mal m Kreuzkorrelationskoeffizienten entsteht. Nachfolgend werden die wesentlichen Bestandteile des Korrelators beschrieben.

4.1.1 Beschreibung der Bestandteile des Korrelators

Hochpaßfilterung

Zur Hochpaßfilterung wird auf die Methode der übergreifenden Mittel zurückgegriffen [Schönwiese, 1985]. Das Filterausgangssignal berechnet sich danach für eine aus N Abtastwerten bestehende, diskrete Zeitreihe $\{x_n\}$, $n = 1, \dots, N$, folgendermaßen:

$$x'(n\Delta t) = x(n\Delta t) - \frac{1}{2m} \sum_{i=-m}^{m-1} x((n+i)\Delta t) \quad (4.1)$$

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozone-Konzentration

$$\begin{aligned}n &= 0, 1, 2, \dots, N \\m &\leq N/2\end{aligned}$$

Die Filtercharakteristik (untere Grenzfrequenz) wird durch $2m$ festgelegt. Zur wirksamen Filterung des Jahresganges wird von Schönwiese [1985] $2m = 30$ angegeben, wobei $\Delta t = 1 \text{ Tag}$ ist.

Mathematische Beschreibung und Realisierung des Korrelators

Für zwei aus N Abtastwerten bestehende, diskrete Zeitreihen $\{x_n\}$ und $\{y_n\}$, $n = 1, \dots, N$, ist die Kreuzkorrelationsfunktion nach Bendat und Pierson [1971] wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}R_{xy}(r\Delta t) &= \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x(n\Delta t)y((n+r)\Delta t) \\r &= 0, 1, 2, \dots, m \\m &< N\end{aligned} \quad (4.2)$$

$R_{xy}(r\Delta t)$ wird der Kreuzkorrelationskoeffizient der Zeitreihen x und y für die Phasenverschiebung $r\Delta t$ genannt. Δt steht für die Zeitdifferenz zwischen zwei benachbarten Abtastwerten und ist konstant. Für beide Zeitreihen wird vorausgesetzt, daß sie mittelwertsfrei sind, d.h. $\bar{x} = \bar{y} = 0$. Nach Gleichung 4.3 erhält man die normierte Kreuzkorrelationsfunktion $\rho(r\Delta t)$.

$$\rho(r\Delta t) = \frac{R_{xy}(r\Delta t)}{\sqrt{R_x(0)}\sqrt{R_y(0)}} \quad (4.3)$$

Dabei gilt für den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) ρ , $-1 \leq \rho \leq 1$. $R_x(0)$ und $R_y(0)$ die Autokorrelationskoeffizienten der Zeitreihen x und y für $r = 0$. Die Autokorrelationskoeffizienten sind das Ergebnis der Kreuzkorrelation einer Zeitreihe mit sich selbst, d.h. nach Gleichung 4.2 ist

$$\begin{aligned}R_x(r\Delta t) = R_{xx}(r\Delta t) &= \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x(n\Delta t)x((n+r)\Delta t) \\r &= 0, 1, 2, \dots, m \\m &< N\end{aligned} \quad (4.4)$$

und somit

$$R_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-r} x^2(n\Delta t) \quad (4.5)$$

Aufgrund der guten Rechenleistung bietet sich für die Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion die Anwendung der schnellen Fouriertransformation (Fast Fourier Transform - FFT) an. Ein entsprechender Algorithmus wird von [Bendat und Pierson, 1971] ausführlich beschrieben. Der verwendete Korrelator (aus [Press u.a., 1988]) funktioniert genau nach diesem Prinzip.

Signifikanztest

Ein wichtiger Teil der Bewertung der mit dem Kreuzkorrelator erhaltenen Ergebnisse ist die Feststellung ihrer Signifikanz. Deshalb wurde das Korrelationsprogramm um einen Signifikanztest erweitert. Dazu wird die Nullhypothese $\rho = 0$ geprüft, d.h. es wird festgestellt ob der für ρ erhaltene Werte signifikant ungleich Null ist. Das Signifikanzniveau kann dabei in mehreren Stufen vorgegeben werden. Während der Arbeit mit dem Korrelator hat sich 95 % als praktikable Größe für das Signifikanzniveau herausgestellt, d.h. alle im Ergebnis erhaltenen Kreuzkorrelationskoeffizienten sind mit 95 % statistischer Wahrscheinlichkeit ungleich Null. Für eine genaue Erklärung der Vorgehensweise sei auf Bronstein und Semendjajew [1979] verwiesen.

Abgeleitete Anforderungen

Aus der Konstruktion des Korrelationsalgorithmus ergeben sich zwei Anforderungen an die zu bearbeitenden Zeitreihen:

Mittelwertfreiheit: Diese Forderung resultiert aus der Definition der Kreuzkorrelationsfunktion (Gleichung 4.2) und ist infolge der anderweitig geforderten Hochpaßfilterung der Zeitreihen erfüllt.

Synchronität der Abtastwerte: D.h. die Zeitdifferenz zwischen allen Meßwerten muß konstant sein. In der Praxis bedeutet dies, daß zumindest fehlende Meßwerte geeignet eingefügt werden müssen bzw. sogar die ganze Zeitreihe an ein neues Zeitraster angepaßt werden muß.

Aufgrund der Verwendung der FFT im Korrelator wird für die Fensterlänge m gefordert, daß $m = 2^i$ mit $i = 0, 1, \dots$ erfüllt ist.

4.1.2 Testkorrelationen

Im Folgenden soll anhand einiger Tests mit bekannten Ausgangsdaten die Funktion des Korrelators demonstriert werden. Dazu wurde aus einer Pseudozufallszahlenfolge eine Referenzzeitreihe (siehe 4.2) generiert.

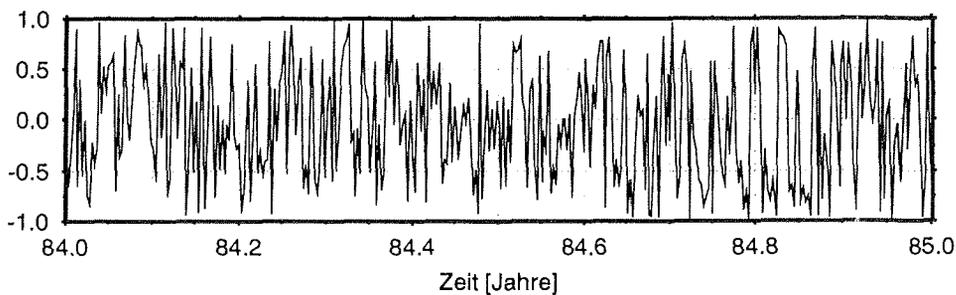


Abbildung 4.2 Referenzzeitreihe für ein Beispieljahr (1984).

Diese Referenzreihe wurde durch additives Rauschen und Phasenverschiebung verändert. Die resultierenden Testzeitreihen enthalten das Signal der Referenzzeitreihe in mehr oder weniger verfälschter Form. Zusätzlich wurde eine Testreihe generiert, deren Daten statistisch unabhängig von denen der Referenzreihe sind und somit deren Signal nicht enthalten. Es wurden die Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen der Referenzzeitreihe und den Testzeitreihen berechnet. Nachfolgend sollen die Ergebnisse dieser Testkorrelationen dargestellt und diskutiert werden. Alle Testzeitreihen wurden auf den Signalebereich $-1 \leq x(n\Delta t) \leq 1$ normiert.

Korrelation mit verrauschter Referenzzeitreihe

Die Referenzzeitreihe $\{x_n\}$ wurde zunächst mit additivem Rauschen überlagert (siehe Gleichung 4.6).

$$\begin{aligned}
 x'(n\Delta t) &= x(n\Delta t) + f_{\text{rausch}} x_{\text{max}} \frac{z(n\Delta t)}{z_{\text{max}}} & (4.6) \\
 x''(n\Delta t) &= \frac{x'(n\Delta t)}{x'_{\text{max}}} \\
 n &= 0, 1, 2, \dots, N
 \end{aligned}$$

4.1 Beschreibung des verwendeten Korrelationsalgorithmus

Das Rauschen $\{z_n\}$ wurde wiederum einer Pseudozufallszahlenfolge entnommen, wobei darauf geachtet wurde, dass es nicht derselben Grundgesamtheit entstammt, wie die Referenzzeitreihe selbst (siehe Abb. 4.3). Mittels des Rauschfaktors f_{rausch} kann das Rauschen dosiert werden. In diesem Beispiel wird ein 10-prozentiges Rauschen addiert, d.h. $f_{\text{rausch}} = 0.1$. Es soll der Einfluß des Rauschens auf das Korrelationsergebnis getestet werden.

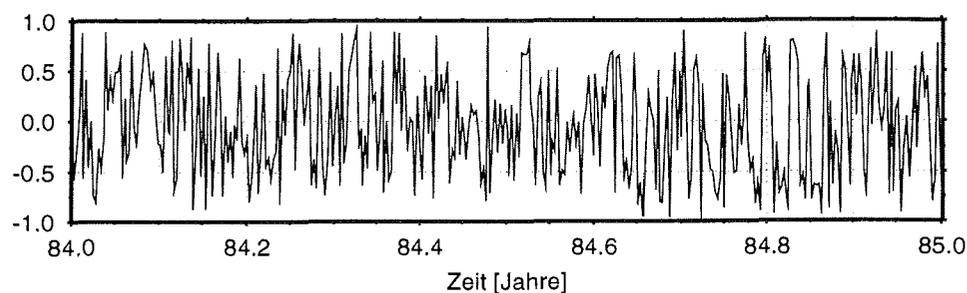


Abbildung 4.3 Mit 10 % additivem Rauschen überlagerte Referenzzeitreihe für ein Beispieljahr (1984).

Das Ergebnis (Abb. 4.4) zeigt bei einer Phasenlage von 0 Tagen im Korrelationsmaximum Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) von über 0.9. Die Rohdaten weisen sogar KKK's von über 0.99 aus.

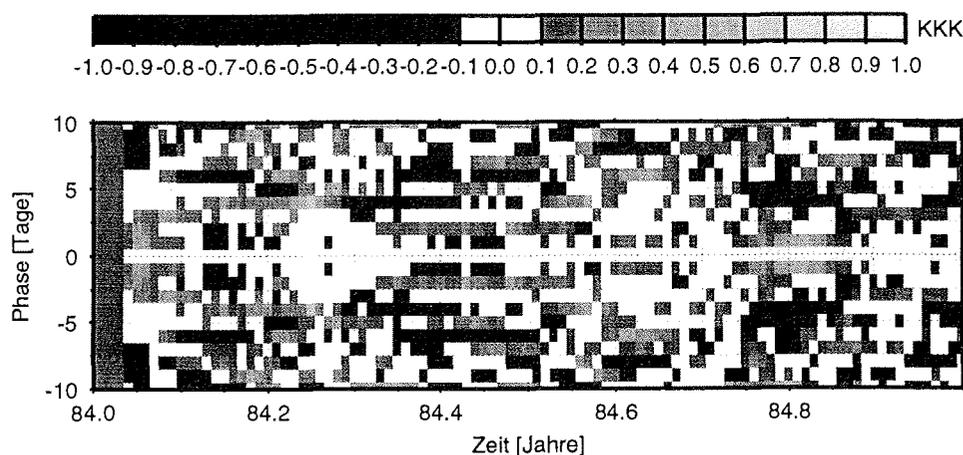


Abbildung 4.4 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Referenzzeitreihe mit 10 % verrauschter Referenzzeitreihe.

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozon-Konzentration

Eine etwas andere Darstellung der KKK's zeigt Abb. 4.5. Hier ist der mittlere Kreuzkorrelationskoeffizient je Phase, gemittelt über die gesamte Zeitreihe dargestellt. Das Korrelationsmaximum bei Phase = 0 Tage ist deutlich ausgeprägt, alle anderen Phasen schwanken mit geringer Standardabweichung um Null.

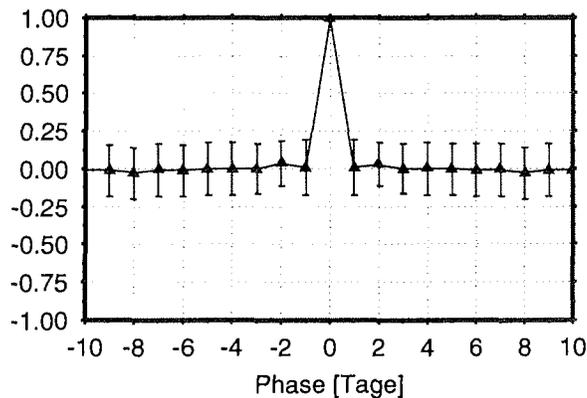


Abbildung 4.5 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Referenzzeitreihe mit 10 % verrauschter Referenzzeitreihe.

Korrelation mit phasenverschobener Referenzzeitreihe

In diesem Fall wurde die Referenzzeitreihe $\{x_n\}$ um $p = 3$ Tage verschoben (Abb. 4.6), d.h.:

$$\begin{aligned} x'(n\Delta t) &= x((n+p)\Delta t) \\ n &= 0, 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4.7)$$

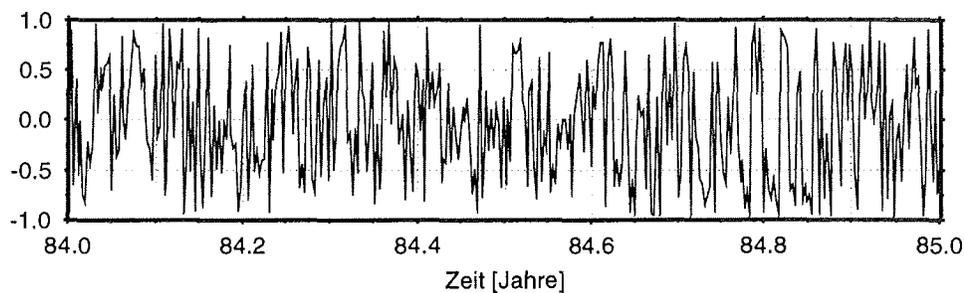


Abbildung 4.6 Um 3 Tage verschobene Referenzzeitreihe für ein Beispieljahr (1984).

4.1 Beschreibung des verwendeten Korrelationsalgorithmus

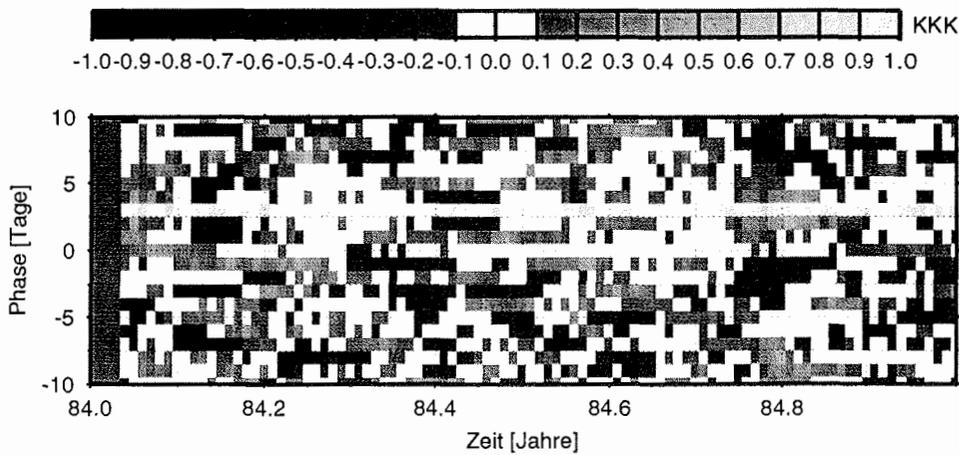


Abbildung 4.7 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Referenzzeitreihe mit 3-Tage verschobener Referenzzeitreihe.

Es soll getestet werden, wie sich diese Phasenablage auf das Korrelationsergebnis auswirkt. Die Phasenverschiebung bewirkt eine Verschiebung des Korrelationsmaximums auf eine Phase von 3 Tagen (Abb. 4.7). Die maximalen KKK's erreichen immer noch einen Wert größer als 0.99. Die Tag-zu-Tag-Schwankung der KKK's hat sich vergrößert, so daß im Korrelationsmaximum auch Werte kleiner als 0.9 auftreten.

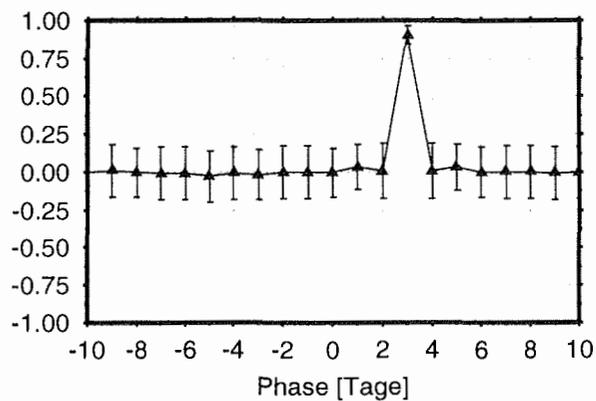


Abbildung 4.8 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Referenzzeitreihe mit 3-Tage verschobener Referenzzeitreihe.

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozon-Konzentration

Analog zum vorherigen Beispiel zeigt Abb. 4.8 wiederum die mittleren KKK's je Phase. Das Korrelationsmaximum ist auf eine Phasenlage von 3 Tagen verschoben. Im Vergleich zum vorherigen Beispiel ist der mittlere KKK bei dieser Phasenlage etwas geringer. Alle übrigen KKK's je Phase schwanken wiederum mit geringer Standardabweichung um Null.

Korrelation mit verrauschter, phasenverschobener Referenzzeitreihe

Im nächsten Test wurde die Referenzzeitreihe um 8 Tage verschoben und mit einem 25-prozentigem Rauschen überlagert (Abb. 4.9). Es soll getestet werden, wie sich beide Veränderungen der Referenzzeitreihe auf das Korrelationsergebnis auswirken.

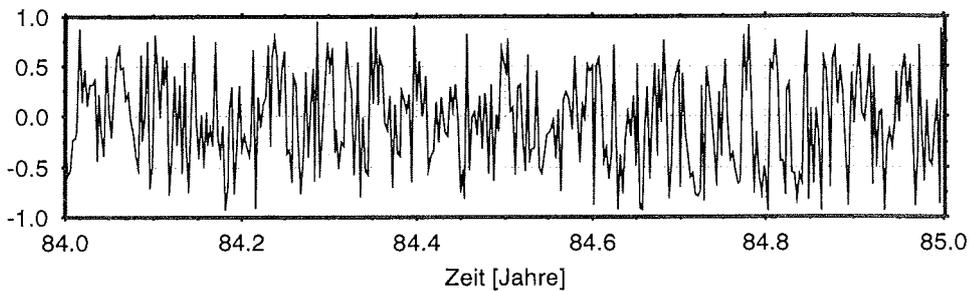


Abbildung 4.9 Mit 25 % additivem Rauschen überlagerte und um 8 Tage verschobene Referenzzeitreihe für ein Beispieljahr (1984).

Wiederum bewirkt die Phasenverschiebung eine Verschiebung des Korrelationsmaximums um 8 Tage (Abb. 4.10). Die KKK's im Bereich des Maximums erreichen mittlere Werte zwischen 0.8 und 0.9. Ein analoges Bild zeigen die mittleren KKK's in Abb. 4.11. Der mittlere KKK bei einer Phasenlage von 8 Tagen erreicht nur noch 0.75. Er läßt sich von den übrigen KKK's, die nach wie vor um Null variieren, differenzieren.

4.1 Beschreibung des verwendeten Korrelationsalgorithmus

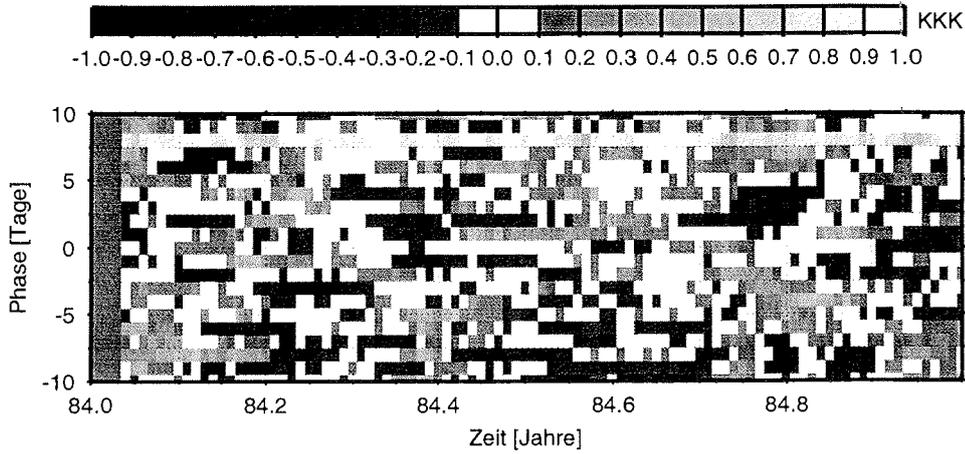


Abbildung 4.10 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Referenzzeitreihe mit 10 % verrauschter und 8-Tage verschobener Referenzzeitreihe.

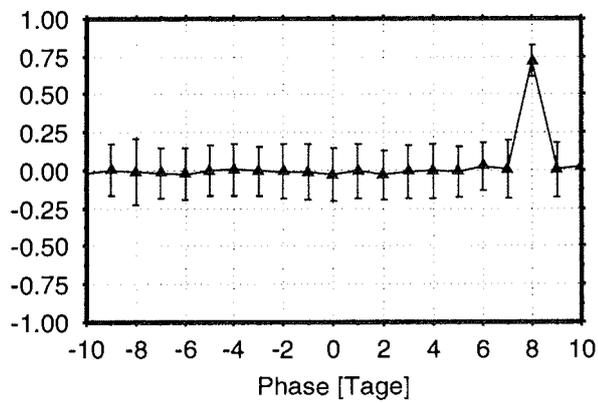


Abbildung 4.11 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Referenzzeitreihe mit 10 % verrauschter und 8-Tage verschobener Referenzzeitreihe.

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozon-Konzentration

Korrelation mit invertierter Referenzzeitreihe, Antikorrelation

Für diesen Test wurde die Referenzzeitreihe invertiert (Abb. 4.12). Es war zu zeigen, wie der Korrelator auf eine Antikorrelation reagiert.

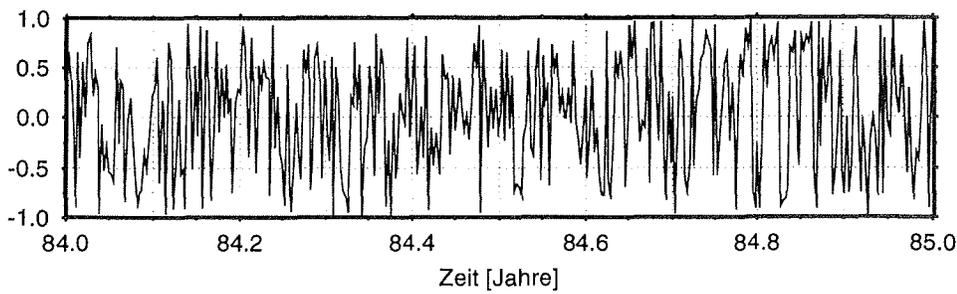


Abbildung 4.12 Invertierte Referenzzeitreihe für ein Beispieljahr (1984).

Im Ergebnis zeigen sich entsprechend negative KKK's kleiner als -0.9 (Abb. 4.13) und entsprechende, mittlere KKK's in Abb 4.14.

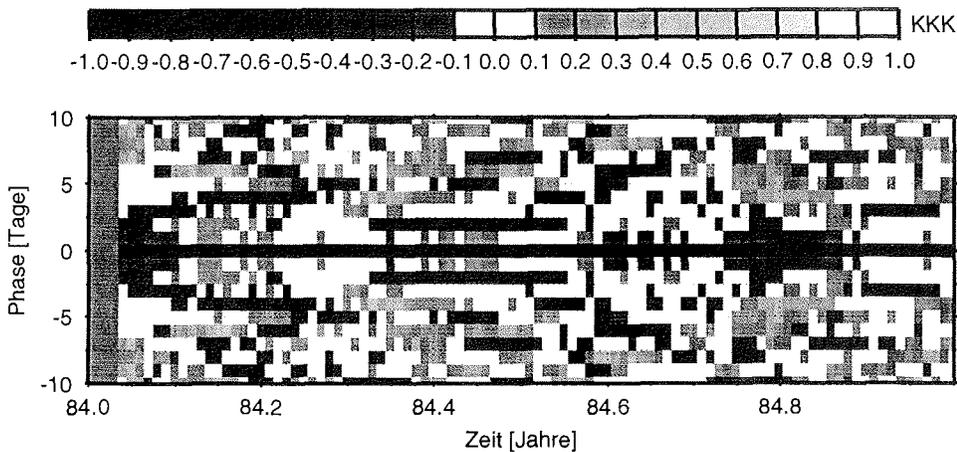


Abbildung 4.13 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Referenzzeitreihe mit invertierter Referenzzeitreihe.

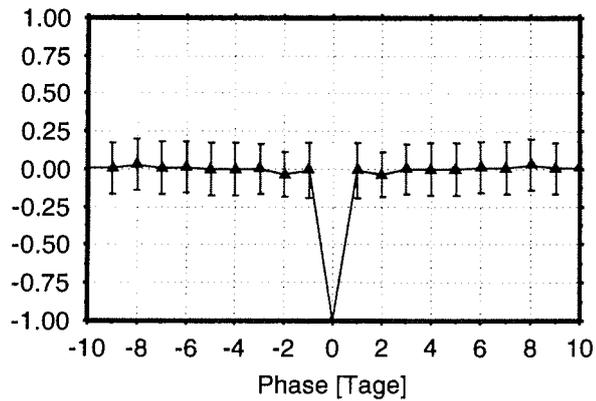


Abbildung 4.14 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Referenzzeitreihe mit invertierter Referenzzeitreihe.

Korrelation mit statistisch unabhängiger Testzeitreihe

Als Gegenteil wurde die Referenzzeitreihe abschließend mit einer von ihr statistisch unabhängigen Testzeitreihe korreliert (Abb 4.15). Die Werte für diese Zeitreihe wurden der gleichen Pseudozufallszahlenfolge, jedoch an einer anderen Stelle entnommen, so daß statistischen Unabhängigkeit gesichert ist.

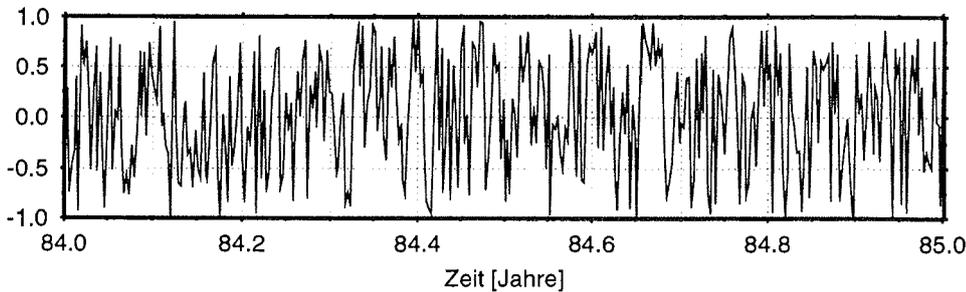


Abbildung 4.15 Zur Referenzzeitreihe statistisch unabhängige Testreihe für ein Beispieljahr (1984).

Im Ergebnis (Abb. 4.16) zeigt sich, daß sich die Korrelationskoeffizienten in einem Bereich von $-0.75 \leq \rho \leq 0.64$ bewegen. KKK's über 0.8 werden nicht erreicht.

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozone-Konzentration

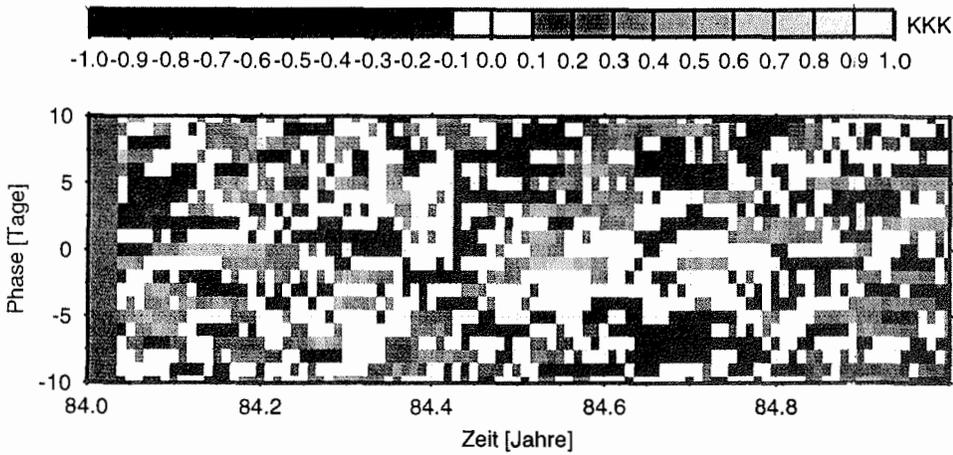


Abbildung 4.16 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Referenzzeitreihe mit statistisch, unabhängiger Testzeitreihe.

Die mittleren KKK's in Abb. 4.17 variieren zwar alle um Null, ein Korrelationsmaximum wie in den vorherigen Beispielen ist jedoch nicht feststellbar.

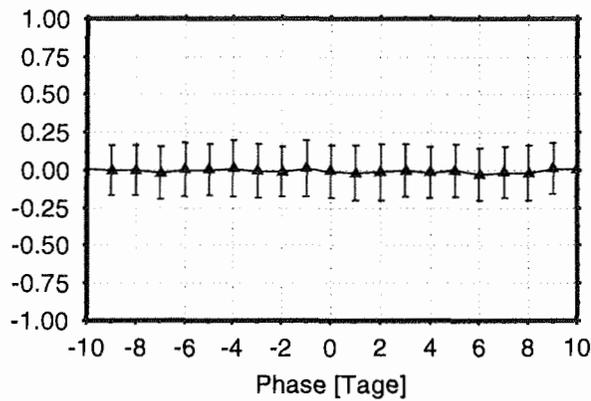


Abbildung 4.17 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Referenzzeitreihe mit statistisch, unabhängiger Testzeitreihe.

Zusammenfassung der Testergebnisse

Um Erfahrungen mit dem Verhalten des Korrelators zu gewinnen, wurden verschiedene Tests unter definierten Bedingungen vorgenommen. Das Ergebnis dieser Tests lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Unter Einwirkung von Phasenverschiebung und Rauschen werden für die Korrelationskoeffizienten im Bereich des Korrelationsmaximums Werte größer als 0.8 (bei Antikorrelation kleiner -0.8) erreicht.
- Im Fall statistischer Unabhängigkeit sind die maximale KKK's kleiner als 0.8 (bzw. größer -0.8).
- Die mittleren Kreuzkorrelationskoeffizienten je Phase weisen eine systematische Korrelation oder Antikorrelation, die die gesamte Zeitreihe betrifft durch ein deutliches Maximum aus.

Für die Auswertung von Korrelationen realer Daten lässt sich folgendes festhalten: *Unter der Voraussetzung der Signifikanz, können Zeitreihenabschnitte die ein Korrelationsmaximum größer als 0.8 aufweisen, als wahrscheinlich korreliert bzw. Zeitreihenabschnitte mit einem Korrelationsmaximum kleiner als -0.8 als wahrscheinlich anti-korreliert angenommen werden. Systematische Korrelation oder Antikorrelation drückt sich in einem Maximum der mittleren, phasenbezogenen Kreuzkorrelationskoeffizienten aus.*

4.2 Seesalz-Aerosol

4.2.1 Erwartete Ergebnisse

Den troposphärischen Seesalz-Aerosol-Transport kann man mit drei Phasen beschreiben - Produktion, Transport, Deposition. Die Messung der Seesalz-Aerosol-Konzentration an NEUMAYER erfolgt in Bodennähe kurz vor Eintreten der Deposition. Die weiteren Betrachtungen gehen von der Annahme aus, daß die kurzperiodische Variabilität der Seesalz-Aerosol-Konzentration von zwei Faktoren bestimmt wird.

1. Die kurzperiodische Änderung der Meereisbedeckung wirkt sich auf die Quelle des Seesalz-Aerosols, den Ozean aus. Abnehmende Meereisbedeckung bedeutet also eine größere Quellfläche. Entsprechende Windverhältnisse vorausgesetzt (siehe Abschnitt 2.2.2) wäre eine höhere Seesalz-Aerosol-Konzentration die Folge.
2. Aufgrund der täglich wechselnden Herkunft der Luftmassen, weist die Seesalz-Aerosol-Konzentration eine kurzperiodische herkunfts- bzw. transportspezifische Variabilität auf.

Korrelation mit gebietsbezogenen Eisbedeckungen

Die Korrelation der Seesalz-Aerosol-Zeitreihe mit gebietsbezogenen Eisbedeckungen zielt auf die Untersuchung des ersten Faktors. Die transportbedingte Variabilität bleibt unberücksichtigt (siehe Abschnitt 3.4). Ausgehend von der Annahme, daß ein direkter Zusammenhang zwischen der kurzfristigen Änderung der an NEUMAYER gemessenen Seesalz-Aerosol-Konzentration und der kurzperiodischen Schwankung der Meereisbedeckung besteht, sind Korrelationskoeffizienten nach folgendem Muster zu erwarten:

Antikorrelation: Aufgrund des Zusammenhangs Abnahme der Eisbedeckung gleich Vergrößerung der freien Wasserfläche gleich Vergrößerung der Quellfläche, kann eine Seesalz-Aerosol-Zunahme nur mit einer Abnahme der Eisbedeckung in Zusammenhang stehen, was eine Antikorrelation (Korrelationskoeffizienten < 0) zwischen beiden Zeitreihen bedeutet.

Sporadisches Auftreten: Da die Seesalz-Aerosol-Produktion an entsprechende Windbedingungen gebunden ist, die nicht zwangsläufig immer gleichzeitig mit der Vergrößerung der freien Seefläche auftreten müssen, kann nur ein sporadisches Auftreten einer solchen Antikorrelation erwartet werden.

Positive Phasenverschiebung: Da das Aerosol vom Quellgebiet zum Meßort transportiert wird, muß mit einer transportbedingten, positiven Phasenverschiebung in Größenordnung von mehreren Tagen gerechnet werden.

Korrelation mit trajektorienbezogenem, absolutem Seegebiet

Die trajektorienbezogenen Eisbedeckungen berücksichtigen beide Faktoren, Variabilität der Eisbedeckung und der Transportsituation gleichermaßen (siehe Abschnitt 3.4). Mit dem trajektorienbezogenen, absoluten Seegebiet ist eine Zeitreihe verfügbar, welche die effektive Quellfläche direkt beinhaltet. Anstelle vorstehend beschriebener *Antikorrelation* muß man in diesem Fall jedoch eine *Korrelation* zwischen beiden Zeitreihen erwarten. Die transportbedingte Phasenverschiebung entfällt, da sie von allen trajektorienbezogenen Eisbedeckungszeitreihen implizit berücksichtigt wird.

Die vorstehend für die gebietsbezogenen Eisbedeckungen und das trajektorienbezogene, absolute Seegebiet beschriebenen Kriterien wurden der Bewertung der Ergebnisse zugrunde gelegt. Weitere Kriterien waren Signifikanz der Kreuzkorrelationskoeffizienten (siehe Abschnitt 4.1.1) und deren Größe, wobei $|\rho| \geq 0.8$ erfüllt sein muß. Außerdem wurden die Ergebnisse mit Hilfe der mittleren, phasenbezogenen Kreuzkorrelationskoeffizienten auf systematisch, auftretende Korrelationsmaxima untersucht.

Im Falle eines positiven Ergebnisses der Korrelation mit den gebietsbezogenen Eisbedeckungen oder dem trajektorienbezogenem, absoluten Seegebiet würde sich ein wichtiger Hinweis auf die Herkunft des Seesalzaerosols ergeben, da beide Eisbedeckungszeitreihen unterschiedlich sensitiv für Fern- bzw. Nah-Transporte sind (siehe Abschnitt 3.4). Eine Zusammenstellung der möglichen Kombination und der sich damit ergebenden Hinweise zeigt Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1 Mögliche Ergebnisse der Korrelationsanalyse und sich daraus ergebende Hinweise für die Herkunft des Seesalz-Aerosols (+ steht für ein positives Ergebnis, – steht für ein negatives Ergebnis).

Ergebnis der Korrelation mit		Hinweis f. Herkunft aus
gebietsbez. RE	trajek.-bez. U_{See}	
+	+	Fern- und Nahbereich
+	–	Fernbereich
–	+	Nahbereich (u.U. Polynien)
–	–	keine Aussage möglich

4.2.2 Aufbereitung der Zeitreihe

Wie bereits erwähnt (siehe Abschnitt 2.2.2) liegen die Seesalz-Aerosol-Konzentrationen als 10-Tage-Mittelwerte vor, während die Eisbedeckungen als Tagesmittelwerte verfügbar sind. Prinzipiell bieten sich zwei Möglichkeiten zum weiteren Verfahren mit der Zeitreihe an:

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozon-Konzentration

- Extrapolation der Seesalz-Aerosol-Konzentrationen auf Tagesmittelwerte.
- Weitere Mittelung der Eisbedeckungen zu 10-Tage-Mittelwerten.

Da die Mittelung einen weiteren Informationsverlust bedeuten würde, wurde für die erste Möglichkeit entschieden. Zur Zeitreihenaufbereitung wurde das Programm "sample1d", welches Bestandteil der "General Mapping Tools" (GMT) ist, verwendet (siehe auch Abschnitt 2.3 und [Wessel und Smith, 1995]). Aufgrund der Eigenschaften dieses Programms wird die für den Korrelationsalgorithmus geforderte *Synchronität der Abtastwerte* erfüllt (siehe Abschnitt 4.1.1). Das Resultat der Bearbeitung ist für ein Jahr in Abbildung 4.18 dargestellt.

Da die kurzperiodische Variabilität der Zeitreihe Gegenstand der Untersuchung ist, wurden aus der Seesalz-Aerosol-Zeitreihe und den Meereisbedeckungs-Zeitreihen alle langperiodischen Anteile mittels Hochpaßfilterung (siehe Abschnitt 4.1.1) eliminiert. Damit wird außerdem die geforderte *Mittelwertsfreiheit* erfüllt.

In der so aufbereiteten Form wurde die Zeitreihe mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Korrelationsalgorithmus bearbeitet.

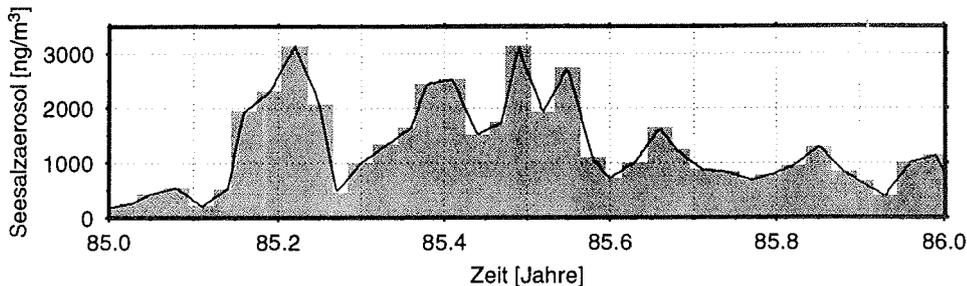


Abbildung 4.18 Extrapolation der Seesalz-Aerosol-Zeitreihe, Im Hintergrund sind die ursprünglichen 10-Tage-Mittelwerte, davor die Tagesmittelwerte dargestellt.

4.2.3 Übersicht über die Ergebnisse

Korrelation mit gebietsbezogener Eisbedeckung des östlichen Einzugsgebietes

Die Seesalz-Aerosol-Zeitreihe wurde mit den gebietsbezogenen Eisbedeckungszeitreihen des östlichen Einzugsgebietes korreliert. Die Ergebnisse sind im Anhang B, Abbildungen B.1 bis B.20 dargestellt.

Es werden Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) erreicht, die den formalen Kriterien (Signifikanz und $|\rho| \geq 0.8$) entsprechen. Das Auftreten dieser Korrelationen entspricht jedoch nicht dem erwarteten Muster. Vielmehr treten Korrelationsmaxima und -minima eher zufällig bei positiven und negativen Phasenverschiebungen auf. Obwohl die KKK's größer als 0.8 ausfallen, gleicht das Erscheinungsbild der erhaltenen Kreuzkorrelation eher dem der Testkorrelation zwischen einer Referenzzeitreihe und einer statistisch unabhängigen Zeitreihe (siehe Abb. 4.16). Wie in Abb. 4.19 zu sehen ist, zeigen auch die mittleren, phasenbezogenen KKK's kein Maximum, welches auf ein systematisches Korrelationsmaximum hinweisen würde.

Tabelle 4.2 faßt die in den einzelnen Segmenten des östlichen Einzugsgebietes erhaltenen Maxima und Minima des KKK zusammen.

Tabelle 4.2 Zusammenfassung der Maxima und Minima des Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) für die Korrelation Seesalz-Aerosol mit relativer Eisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet.

Segment	KKK-Minimum	KKK-Maximum
100 km	-0.96	0.97
200 km	-0.96	0.97
400 km	-0.95	0.97
800 km	-0.97	0.99
1600 km	-0.97	0.99

Korrelation mit gebietsbezogener Eisbedeckung des westlichen Einzugsgebietes

Die Seesalz-Aerosol-Zeitreihe wurde mit den gebietsbezogenen Eisbedeckungszeitreihen des westlichen Einzugsgebietes korreliert. Die Ergebnisse sind im Anhang B, Abbildungen B.21 bis B.40 dargestellt.

Auch hier werden Kreuzkorrelationskoeffizienten erreicht, die den formalen Kriterien (Signifikanz und $|\rho| \geq 0.8$) entsprechen. Das Auftreten dieser Korrelationen entspricht jedoch wiederum nicht dem erwarteten Muster. Das Erscheinungsbild ist mit dem bei der Korrelation mit den Eisbedeckungs-Zeitreihen des östlichen Einzugsgebietes erhaltenen vergleichbar. Entsprechend haben die diesbezüglichen Bemerkungen auch für die Korrelation mit den Eisbedeckungs-Zeitreihen des westlichen Einzugsgebietes Gültigkeit. Ein systematisches Korrelationsmaximum ist anhand der mittleren, phasenbezogenen KKK's nicht erkennbar (siehe Abb. 4.20).

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozon-Konzentration

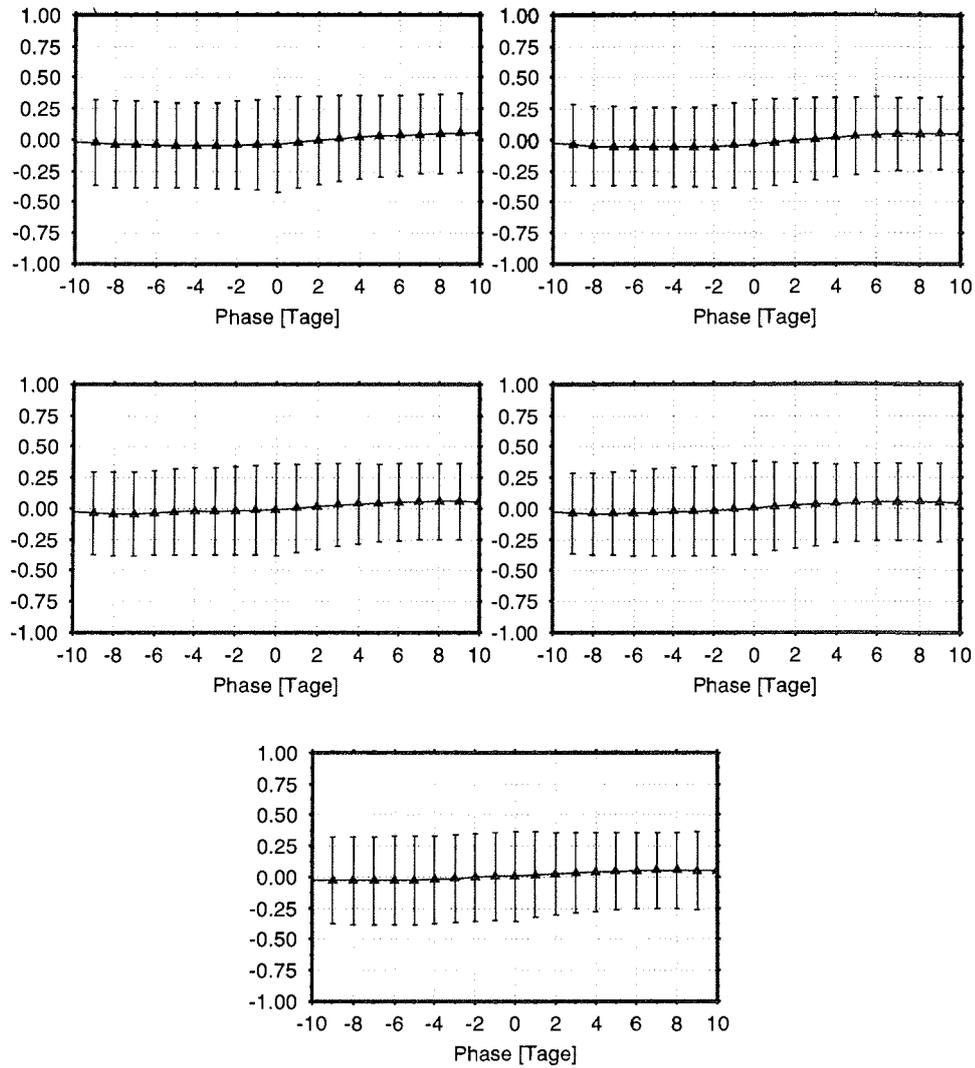


Abbildung 4.19 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Seesalz-Aerosol-Zeitreihe mit gebietsbezogener Eisbedeckung des östlichen Einzugsgebietes, oben, links: 100km-Segment, rechts: 200km-Segment, Mitte, links: 400-km-Segment, rechts: 800-km-Segment, unten: 1600-km-Segment.

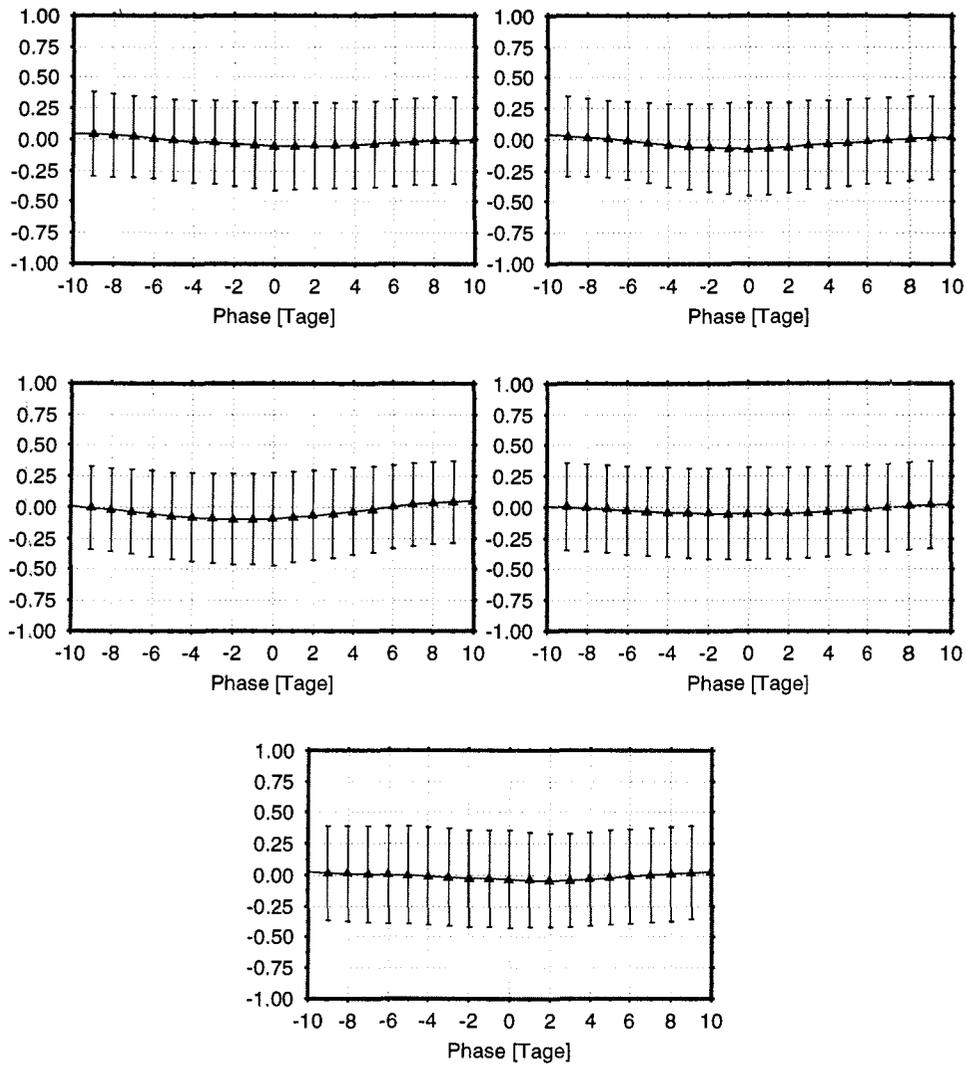


Abbildung 4.20 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Seesalz-Aerosol-Zeitreihe mit gebietsbezogener Eisbedeckung des westlichen Einzugsgebietes, oben, links: 100km-Segment, rechts: 200km-Segment, Mitte, links: 400-km-Segment, rechts: 800-km-Segment, unten: 1600-km-Segment.

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozone-Konzentration

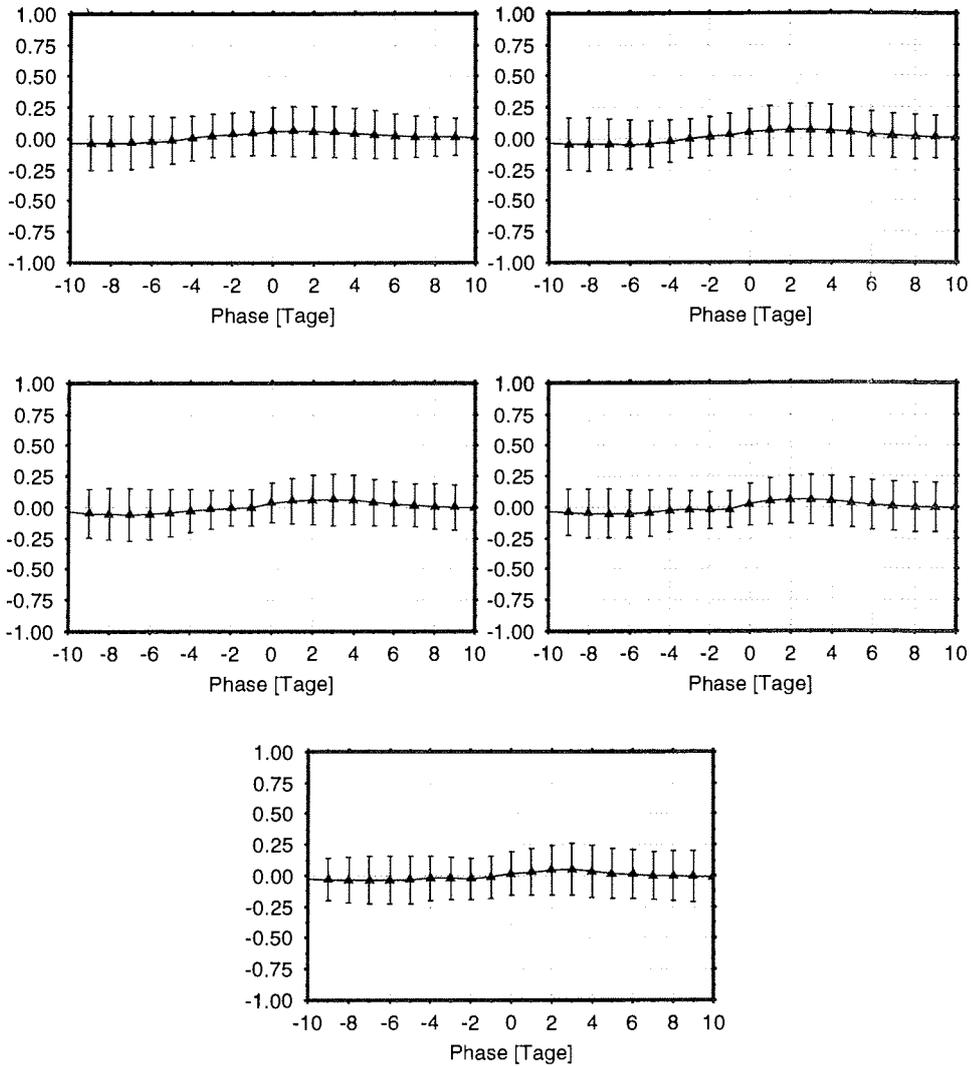


Abbildung 4.21 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Seesalz-Aerosol-Zeitreihe mit trajektorienbezogenem, absolutem Seegebiet, oben, links: 1-Tage-Traj., rechts: 2-Tage-Traj., Mitte, links: 3-Tage-Traj., rechts: 4-Tage-Traj., unten: 5-Tage-Traj.

Tabelle 4.3 Zusammenfassung der Maxima und Minima des Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) für die Korrelation Seesalz-Aerosol mit relativer Eisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet.

Segment	KKK-Minimum	KKK-Maximum
100 km	-0.94	0.97
200 km	-0.94	0.96
400 km	-0.94	0.96
800 km	-0.93	0.95
1600 km	-0.96	0.98

Korrelation mit trajektorienbezogenem, absolutem Seegebiet

Die Seesalz-Aerosol-Zeitreihe wurde mit dem trajektorienbezogenen, absoluten Seegebiet korreliert. Die Ergebnisse sind im Anhang B, Abbildungen B.41 bis B.45 dargestellt.

Es werden signifikante und der formalen Bedingung $|\rho| \geq 0.8$ genügende Kreuzkorrelationskoeffizienten erreicht. Die Extrema fallen jedoch wesentlich niedriger als bei der Korrelation mit den gebietsbezogenen Eisbedeckungen aus. Das Auftreten der Korrelationen erscheint wiederum eher zufällig in Zeit und Phase verteilt und entspricht somit nicht dem erwarteten Muster. Auch die mittleren, phasenbezogenen KKK's (Abb. 4.21) weisen kein Maximum auf, so daß offenbar auch kein anderweitiges, systematisches Korrelationsmaximum existiert.

Tabelle 4.4 faßt die für einzelnen Trajektorienlängen erhaltenen Maxima und Minima des KKK zusammen.

Tabelle 4.4 Zusammenfassung der Maxima und Minima des Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) für die Korrelation Seesalz-Aerosol mit trajektorienbezogenem, absolutem Seegebiet.

Länge	KKK-Minimum	KKK-Maximum
1 Tag	-0.77	0.81
2 Tage	-0.74	0.79
3 Tage	-0.74	0.79
4 Tage	-0.79	0.82
5 Tage	-0.83	0.83

4.2.4 Zusammenfassung und Diskussion

Es muß festgestellt werden, daß keine der Korrelationen die Erwartung erfüllt. Es konnten auch keine anderweitigen, systematisch auftretenden Korrelationsmaxima festgestellt werden. Vielmehr erscheinen die wenigen erhaltenen Kreuzkorrelationskoeffizienten, welche die formalen Bedingungen erfüllen, als eher zufällig in Zeit und Phase verteilt.

Für die Interpretation der Ergebnisse bei der Berechnung der Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen Seesalz-Aerosol-Konzentration und den verschiedenen Eisbedeckungs-Zeitreihen gibt es zwei Varianten:

1. Es gibt keinen direkten Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen Veränderung der Seesalz-Aerosol-Konzentration an NEUMAYER und der Änderung der Meereisbedeckung **oder**
2. Die Datenbasis ist nicht ausreichend.

Sicherlich war ein Problem der Untersuchung, daß die verfügbare Datenbasis den Anforderungen des Algorithmus nicht vollständig genügt. Die Extrapolation von 10-Tage-Mittelwerten zu Tagesmittelwerten stellt insofern nur eine Notlösung dar. Andererseits kommt die Umwandlung der Eisbedeckungen in 10-Tage-Mittel einer Tiefpaßfilterung gleich [Schönwiese, 1985] und würde die vorhandenen kurzperiodischen Änderungen aus der Zeitreihe entfernen und damit den Untersuchungsgegenstand beseitigen.

In erster Linie muß festgestellt werden, daß der Seesalz-Aerosol-Transport ein komplexerer Prozess ist, als allgemein angenommen. Damit die in Abschnitt 4.2.1 formulierten Erwartungen eintreten, müssen gleichzeitig mehrere Voraussetzungen erfüllt sein. Es muß eine offene Wasserfläche existieren, über der Windbedingungen vorherrschen, welche die Seesalz-Aerosol-Produktion begünstigen. Dieses Seesalz-Aerosol muß in die freie Atmosphäre gelangen (siehe 2.2.2) und die Transportbedingungen müssen derart sein, daß es über die freie Atmosphäre nach NEUMAYER transportiert wird. Offenbar treten diese Voraussetzungen, wenn überhaupt, nur selten gleichzeitig auf. Da der Produktionsmechanismus für das Seesalz-Aerosol gut bekannt ist und die Seesalz-Aerosol-Produktion kausal mit der Sturmaktivität verknüpft ist, kommt der Frage des Seesalz-Aerosol-Transports in der Troposphäre offenbar eine Schlüsselrolle zu. Deshalb sollen an dieser Stelle eine den Seesalz-Aerosol-Transport betreffende Vorstellung formuliert werden, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen wurden.

Hypothese zum Eintrag von Seesalz-Aerosols in die freie Atmosphäre

Wie in Abschnitt 2.2.2 ausgeführt, ist der Ozean die Quelle des Seesalz-Aerosols und die Seesalz-Aerosol-Produktion hängt entscheidend von den im Quellgebiet vorherrschenden

den Windgeschwindigkeiten ab. Obwohl großräumige Tiefdruckgebiete ganzjährig, regelmäßig nördlich von NEUMAYER vorbeiziehen [Jones und Simmonds, 1993] und dabei jedes dieser Tiefs im Sommer gewissermaßen direkt "vor der Haustür" Seesalz-Aerosol produziert, kann kein kausaler Zusammenhang zwischen Seesalz-Aerosol-Konzentration und Zyklonenaktivität hergestellt werden [Wyputta, 1994, Wagenbach u.a., 1988]. Mehr noch: Neben den herbstlichen Maxima des Seesalz-Aerosols, kommt es zu frühjährlichen Maxima, gerade dann, wenn die Eisbedeckung am ausgedehntesten ist. Als Erklärung führten Wagenbach u.a. [1988] ursprünglich die Herkunft des Seesalz-Aerosols auf Polynien zurück bzw. sie schrieben sie Ferntransporten zu, mußten diese aber nach Abschätzung der Produktions- und Depositionsraten wieder verwerfen [Wagenbach u.a., 1997]. All diese Erklärungsansätze beruhen auf der Fragestellung, ob ein Mechanismus existiert, der die Produktion oder den Transport in Ausnahmefällen (dann wenn an NEUMAYER Seesalz-Aerosol-Maxima gemessen werden) begünstigt. Man könnte aber anders auch nach einem Mechanismus suchen, der Produktion oder Transport i.A. blockiert, diese Blockierung unter bestimmten Bedingungen aber aufgehoben ist. Geht man beim Seesalz-Aerosol-Transport zunächst wiederum von einem Dreiphasenmodell (Produktion, Transport, Deposition) aus, erscheint es sinnvoll die Transportphase in zwei Abschnitten, Vertikal- und Horizontaltransport, zu betrachten, wobei sich hier auf den Vertikaltransport konzentriert werden soll.

Wie allgemein bekannt ist, herrschen innerhalb einer Zyklone die stärksten Winde in deren Zentrum sowie im Bereich der Fronten. Es ist also anzunehmen, daß man über dem freien Ozean genau in diesen Bereichen auch die höchsten Seesalz-Aerosol-Produktionsraten vorfindet. Der vertikale Seesalz-Aerosol-Transport in die freie Atmosphäre wird in diesen Bereichen jedoch wirksam durch die hier vorhandene frontale Bewölkung (konvektiv im Bereich der Kaltfront, stratiform im Bereich der Warmfront), die zumeist noch mit Niederschlägen gekoppelt ist (feuchte Deposition), unterbunden. Es stellt sich die Frage, was passiert, wenn ein solches Tiefdruckgebiet vom freien Ozean auf Meereisgebiet übertritt. Ein vorstellbares Szenarium wäre, daß infolge der Abkühlung der Luft beim Übertritt vom Wasser auf das Eis eine generelle Stabilisierung der Schichtung einsetzt. Dies könnte noch von einer Abnahme der Turbulenz in der planetarischen Grenzschicht, aufgrund der geringeren Rauigkeit der Meereisoberfläche gegenüber dem stürmischen Ozean begleitet werden. Eine zumindest teilweise Auflösung der konvektiven Bewölkung und eine Verringerung der Höhe der Grenzschicht wäre die Folge. Beides würde den vertikalen Transport von Seesalz-Aerosol jedoch begünstigen, da zum einen die feuchte Deposition des Seesalz-Aerosols verhindert wird zum anderen der Weg in die freie Atmosphäre kürzer ist. Die Dynamik dieser Prozesse wird vor allem von der Wassertemperatur im freien Ozean und den Temperaturen der beteiligten Luftmassen bestimmt. Besondere Konstellationen können dabei im Herbst und im Frühjahr eintreten, wenn die Wassertemperaturen im Ozean ihr Maximum erreichen bzw. wenn die polaren Luftmassen (Kaltfront) am kältesten sind, womit sich u.U. die herbst- und frühjährlichen Maxima der Seesalz-Aerosol-Konzentration erklären ließen.

4.2.5 Schlußfolgerungen

Das wesentliche Ergebnis der Kreuzkorrelationsanalyse von Seesalz-Aerosol-Konzentration und Meereisbedeckung ist, daß es offensichtlich *keinen direkten, kausalen Zusammenhang zwischen der an NEUMAYER gemessenen Seesalz-Aerosol-Konzentration und der Meereisbedeckung gibt*. Dies ist insofern unbefriedigend, da eine genauere Beschreibung von Seesalz-Aerosol-Herkunft und -Transport sowie der Entstehung der frühjährlich, gemessenen Seesalz-Aerosol-Maxima nach wie vor aussteht. Weitere Betrachtungen dazu müßten nach Meinung des Autors an folgenden Punkten ansetzen:

- Untersuchung des Seesalz-Aerosol-Eintrags in die freie Atmosphäre, wobei die im vorherigen Abschnitt dargelegte Hypothese ein Ansatzpunkt sein könnte.
- Untersuchung des Quellenfeldes des Seesalz-Aerosols unter expliziter Berücksichtigung von Polynien als potentielle Seesalz-Aerosol-Quellen. Basierend auf einem Ansatz für den Seesalz-Aerosol-Eintrag in die freie Atmosphäre könnten so dreidimensionale Seesalz-Aerosol-Konzentrationen berechnet werden, die wiederum Eingangsparemeter einer Transportmodellierung sein könnten.

4.3 Bodennahes Ozon

4.3.1 Erwartete Ergebnisse

Die kurzperiodische Variabilität der Bodenozonkonzentration an NEUMAYER ist vor allem auf die kurzfristige Veränderung der Herkunft der Luftmassen zurückzuführen. Wie in Abschnitt 2.2.3 dargestellt, wirken in der Antarktis zwei Mechanismen, welche die troposphärische Ozonkonzentration regulieren. Zum Einen wird offenbar Ozon stratosphärischer Herkunft in die Troposphäre eingemischt. Dieser Prozess ist gewissermaßen für die Basiskonzentration und damit für den saisonalen Verlauf der Ozonkonzentration verantwortlich. Er unterliegt jedoch auch einer eigenen kurzfristigen Variabilität, die von der Variation des stratosphärisch-troposphärischen Austauschs abhängt. Zum Zweiten wird das so entstandene Bodenozon kurzfristig unter gewissen Voraussetzungen über Meereis abgebaut. Insofern liegt die Vermutung nahe, daß der Luftmassentransport aus Meereisgebieten u.U. mit einer Verringerung der gemessenen Ozonkonzentration einhergeht und im Extremfall mit dem Auftreten troposphärischer Ozonminima in Verbindung steht. Da es sich hierbei um ein transportbedingtes Phänomen handelt ist es naheliegend den Zusammenhang zwischen der trajektorienbezogenen, absoluten Eisbedeckung und der Bodenozonkonzentration an NEUMAYER zu untersuchen. Ausgehend von der Annahme, daß ein Zusammenhang existiert sind also Korrelationskoeffizienten nach folgendem Muster zu erwarten:

Antikorrelation: Basierend auf dieser Annahme, kann eine Bodenozon-Abnahme nur mit einer Zunahme der Eisbedeckung in Zusammenhang stehen, was eine Antikorrelation (Korrelationskoeffizienten < 0) zwischen beiden Zeitreihen bedeutet.

Sporadisches Auftreten: Da der Ozonabbau über Meereis an gewisse Bedingungen gebunden ist, die nicht zwangsläufig kontinuierlich eintreten müssen, kann nur ein sporadisches Auftreten einer solchen Antikorrelation erwartet werden.

Diese Kriterien wurden der Bewertung der Ergebnisse zugrunde gelegt. Weitere Kriterien waren Signifikanz der Kreuzkorrelationskoeffizienten (siehe Abschnitt 4.1.1) und deren Größe, wobei $|\rho| \geq 0.8$ erfüllt sein muß. Außerdem wurden die Ergebnisse mit Hilfe der mittleren, phasenbezogenen Kreuzkorrelationskoeffizienten auf systematisch, auftretende Korrelationsmaxima untersucht.

4.3.2 Aufbereitung der Zeitreihe

Die Bodenozon-Zeitreihe liegt von 1995 bis 1996 in Form von Rohmeßwerten als 5min-Mittelwerte des Datenerfassungssystems vor. Die Rohmeßwerte wurden manuell validiert, wobei in der Zeitreihe enthaltene Eichdaten und statistische Datenausreißer

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozone-Konzentration

entfernt wurden. Zur weiteren Bearbeitung mit den täglichen Eisbedeckungen wurden diese Rohmeßwerte zu Tagesmittelwerten zusammengefaßt, womit auch die Forderung nach *Synchronität der Abtastwerte* erfüllt wird (siehe Abschnitt 4.1.1).

Um die langperiodische Variabilität zu eliminieren, wurden Bodenozone- und Eisbedeckungs-Zeitreihe hochpaßgefiltert und damit die Forderung nach *Mittelwertsfreiheit* erfüllt (vgl. Abschnitt 4.2.2).

4.3.3 Ergebnisse der Korrelation

Die Bodenozone-Zeitreihe wurde mit den trajektorienbezogenen, absoluten Eisbedeckungen korreliert. Die Ergebnisse sind im Anhang B, Abbildungen B.46 bis B.50 dargestellt.

Es treten den formalen Anforderungen (Signifikanz und $|\rho| \geq 0.8$) genügende Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) auf, wobei die Antikorrelationen die größeren Absolutbeträge der KKK's erreichen. Die Verteilung der Maxima nach Zeit und Phase erscheint aber eher zufällig und entspricht nicht der Erwartung. Die Darstellung der mittleren, phasenbezogenen Kreuzkorrelationskoeffizienten (Abb. 4.22) weist ein geringfügiges Maximum bei der Phasenlage Null auf, welches aber im Bereich der Schwankungsbreite der mittleren, phasenbezogenen KKK's liegt.

Tabelle 4.4 faßt die für einzelnen Trajektorienlängen erhaltenen Maxima und Minima des KKK zusammen.

Tabelle 4.5 Zusammenfassung der Maxima und Minima des Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) für die Korrelation Seesalz-Aerosol mit trajektorienbezogener, absoluter Eisbedeckung.

Länge	KKK-Minimum	KKK-Maximum
1 Tag	-0.69	0.72
2 Tage	-0.67	0.73
3 Tage	-0.82	0.79
4 Tage	-0.87	0.76
5 Tage	-0.85	0.76

4.3.4 Zusammenfassung und Diskussion

Auch für das Bodenozone muß festgestellt werden, daß die berechnete Korrelationen die Erwartung nicht erfüllt. Es konnten auch keine anderweitigen, systematisch auftretenden Korrelationsmaxima festgestellt werden. Vielmehr erscheinen die erhaltenen Kreuzkorrelationskoeffizienten, welche die formalen Bedingungen erfüllen, eher zufällig in Zeit und Phase verteilt.

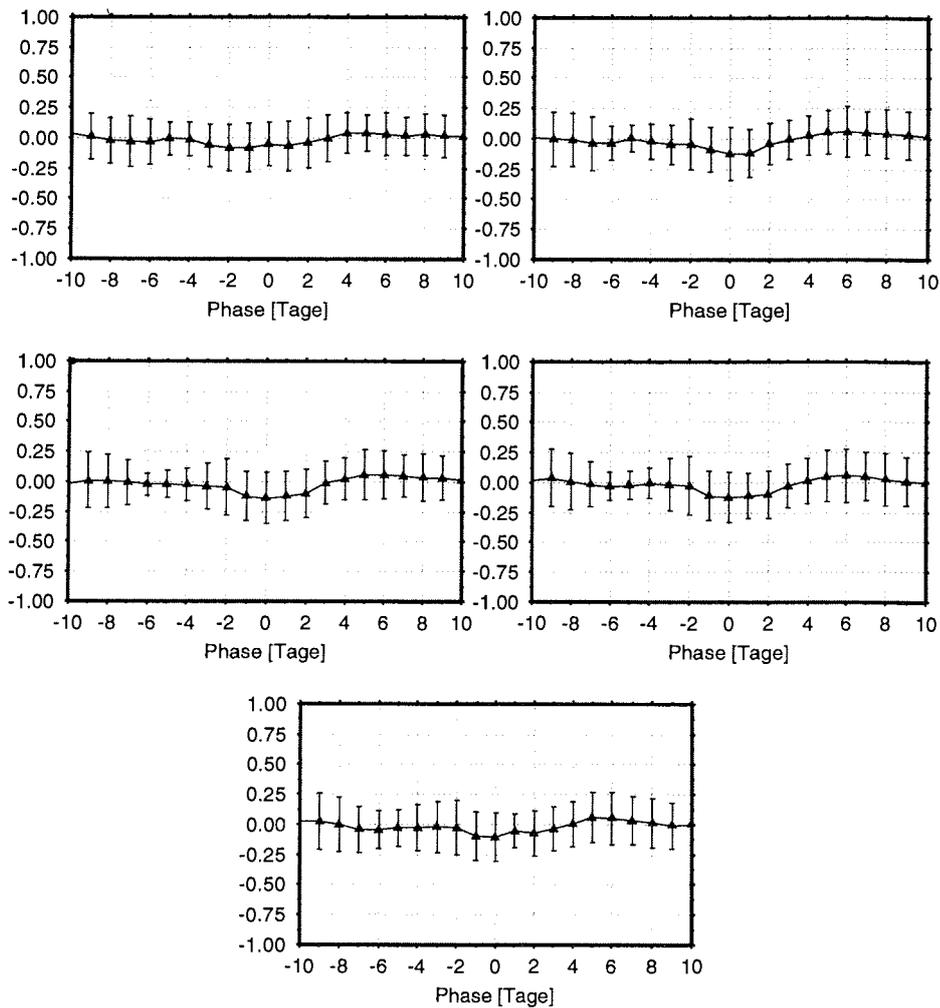


Abbildung 4.22 Mittlere, phasenbezogene Kreuzkorrelationskoeffizienten der Korrelation Bodenozone-Zeitreihe mit trajektorienbezogener, absoluter Eisbedeckung, oben,links: 1-Tage-Traj., rechts: 2-Tage-Traj., Mitte,links: 3-Tage-Traj., rechts: 4-Tage-Traj., unten: 5-Tage-Traj.

4. Kreuzkorrelationsanalyse der Seesalz-Aerosol- und der Bodenozon-Konzentration

Wie auch schon bei der Interpretation der Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse von Seesalz-Aerosol und Eisbedeckung muß man auch hier von zwei Interpretationsvarianten ausgehen.

1. Es gibt keinen direkten Zusammenhang zwischen der kurzperiodischen Veränderung der Bodenozon-Konzentration an NEUMAYER und der (transportbedingten) Änderung der Meereisbedeckung **oder**
2. Die Datenbasis ist nicht ausreichend.

Wie schon bei der Ableitung der zu erwartenden Ergebnisse formuliert, wird die kurzfristige Variabilität von zwei Faktoren bestimmt, über deren gegenseitiges Verhalten keine Aussagen existieren. Im Falle einer erheblich größeren Variabilität des Eintrags stratosphärischen Ozons gegenüber der transportbedingten Variabilität (Transport ozonarmer Luftmassen) würde letztere im Ozonsignal völlig unterdrückt und wäre somit nicht mehr explizit erkennbar.

Die Datenbasis ist in diesem Fall insofern besser, da für beide Parameter Tagesmittelwerte verfügbar waren. Betrachtet man jedoch den Zeitraum des Auftretens troposphärischer Ozonminima, den Wessel [1997] mit mehreren Stunden angibt, ist es denkbar daß der Einfluß ozonarmer Luftmassen schon durch die Bildung von Tagesmittel "weggeglättet" wird. Um eine höhere Zeitauflösung zu erreichen, wären aber zeitlich, höheraufgelöste Meereisdaten notwendig, die nicht zur Verfügung stehen.

Ein anderes Problem ist sicher die relative Ungenauigkeit der Trajektorienberechnung, die schon in Abschnitt 4.2.4 diskutiert wurde, hier aber möglicherweise das Ergebnis noch stärker beeinflusst, da es sich beim troposphärischen Ozonabbau um ein räumlich begrenztes, kurzfristiges Phänomen handelt.

4.3.5 Schlußfolgerungen

Das Hauptergebnis der Kreuzkorrelationsanalyse ist, daß es ausgehend von der aktuellen Datenlage *keinen* erkennbaren, kausalen Zusammenhang zwischen der an NEUMAYER gemessenen Bodenozon-Konzentration und der Meereisbedeckung gibt.

Auch hier liegt der Schlüssel zum weiteren Verständnis der gemessenen Konzentration nach Meinung des Autors bei einer tiefergehenden Analyse der Transportprozesse, vor allem des Eintrags stratosphärischen Ozons in die Troposphäre. Ein weiteres Problem ist dabei sicher, daß über den Verlauf und die genauen Hintergründe des troposphärischen Ozonabbaus in der Antarktis nur eine Hypothese von Wessel [1997] existiert.

5. Schlußbemerkungen & Ausblick

Ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit ist die umfassende Beschreibung der Meereisbedeckung für die Umgebung der Neumayer-Station. Mit der Bestimmung gebietsbezogener und trajektorienbezogener, täglicher Meereisbedeckungen wurden zwei Methoden entwickelt, die es erstmalig ermöglichen eine auf den Luftmassen-Transport bezogene Untersuchung der Meereisbedeckung für NEUMAYER und andere Meßorte durchzuführen. Dadurch war es möglich zu zeigen, daß es wesentliche, vor allem auch transportbedingte Unterschiede in der Eisbedeckung gibt, die eine Luftmasse auf ihrem Weg nach NEUMAYER beeinflussen können. Die allgemeinen Kenntnisse über den saisonalen Verlauf der Eisbedeckung wurden bestätigt und vertieft. So wurde festgestellt, daß Ost-Transporten zuzurechnende Luftmassen deutlich weniger vom Meereis beeinflußt werden als von Westen herantransportierte Luftmassen. West-Transporte führen ganzjährig im Nahbereich (1 bis 3 Tage vor Erreichen von NEUMAYER) häufiger über das küstennahe Meereis- oder Seegebiet und können damit u.U. von Polynien beeinflußt werden. Von Osten herantransportierte Luftmassen befinden sich dagegen im Nahbereich öfter über mit Schelf- oder Inlandeis bedeckten Gebieten.

Letztere Ergebnisse lassen bezogen auf die untersuchten atmosphärischen Spurenstoffe folgende Schlußfolgerungen zu: Wenn das nach NEUMAYER transportierte Seesalz-Aerosol aus Polynien stammt, dann müßte es bevorzugt mit West-Transporten zur Station gelangen, da diese im küstennahen Bereich Gebiete überqueren in denen bevorzugt Polynien auftreten. Sollte es jedoch aus eisfreien Seegebieten kommen, also über Ferntransporte nach NEUMAYER gelangen, dann müßte es auch bei Ost-Transporten auftreten. Der bodennahe Antransport ozonarmer Luftmassen müßte, da die Ozonzerstörung nach der Hypothese von Wessel [1997] an das Vorhandensein von Meereis gebunden ist, vorzugsweise mit West-Transporten in Zusammenhang stehen. Auch hier könnten Polynien eine besondere Rolle spielen, da in deren Randbereich durch Deposition von Seesalz-Aerosol und Überspülen mit Seewasser Seesalz und somit Bromverbindungen auf dem Meereis abgelagert werden. Damit wäre eine weitere Voraussetzung für den troposphärischen Ozonabbau in der Antarktis erfüllt. Eine Überprüfung beider Hypothesen war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da die als Grundgesamtheit für entsprechende statistische Verfahren verfügbare Datenbasis derzeit noch zu gering ist. Auf den so gewonnen Eisbedeckungszeitreihen aufbauend, wurde der Zusammenhang

5. *Schlußbemerkungen & Ausblick*

zwischen der kurzperiodischen Variabilität der Eisbedeckung und der kurzperiodischen Veränderung der an NEUMAYER gemessenen Konzentrationen von Seesalz-Aerosol und bodennahem Ozon untersucht. Dazu wurden Annahmen über den Transportverlauf gemacht, die mittels Kreuzkorrelationsanalyse zwischen der betreffenden Spurenstoff-Meßreihe und den verschiedenen Eisbedeckungs-Zeitreihen überprüft wurden. Es stellte sich heraus, daß es keinen kausalen Zusammenhang zwischen kurzperiodischer Variabilität von Meereisbedeckung und den beiden Spurenstoffen gibt. Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Meereisbedeckung und Spurenstoffen zeigte vor allem, daß der Transport von Spurenstoffen in die Antarktis Resultat komplexer atmosphärischer Prozesse ist, bei denen der Meereiseinfluß offenbar nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Datenbank für luftchemische Meßdaten eingerichtet. Hier wurden alle verfügbaren, das Luftchemische Observatorium der Neumayer-Station betreffenden Rohdaten zusammengefaßt und dokumentiert. Ebenso wurden dort die Ergebnisse dieser Arbeit, also die bearbeiteten Spurenstoff- und Eisbedeckungszeitreihen archiviert und stehen somit weiterführenden Studien zur Verfügung.

Aktuelle und zukünftige Aktivitäten

Seit Anfang 1997 werden im Luftchemischen Observatorium hochaufgelöste Aerosol-filterproben (Besaugungsintervall 1 bis 2 Tage) gesammelt. Damit werden zukünftig u.a. auch Ein- oder Zweitagesmittel der Seesalz-Aerosol-Konzentration verfügbar sein.

Ebenfalls seit Anfang 1997 werden zeitlich hochaufgelöste Aerosolgrößenspektren aufgezeichnet. Da ein Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Entfernung zum Herkunftsort des Aerosols vermutet wird, kann man hiervon weitere Erkenntnisse über den Aerosol-Transport erwarten.

Während der Sommerkampagne 1996/97 wurde eine neue Satellitenempfangsanlage auf NEUMAYER installiert, die den direkten Empfang von meereisrelevanten Satellitendaten in doppelt so hoher Auflösung ermöglicht, als die in dieser Arbeit verwendeten Eisbedeckungsdaten. Damit besteht die Möglichkeit den von Markus [1995] beschriebenen Polynialgorithmus auf die Daten anzuwenden und somit explizite Polyniendaten zu erhalten.

Allgemein ist festzustellen, daß mit jedem Meßjahr neue Daten die statistische Grundgesamtheit vergrößern und somit die Voraussetzungen für jede Art statistischer Untersuchungen ständig besser werden. In diesem Sinne wird auch die Bedeutung der Datenbank des Luftchemischen Observatoriums zukünftig wachsen. Deshalb wird diese Datenbank ständig ergänzt und soll in naher Zukunft der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

6. Literaturverzeichnis

- [Ansyco, 1994] Fa. Ansyco, Analytische Systeme und Komponenten. *Bedienungsanleitung zum Ozonanalysator, O³41M*. Fa. Ansyco, Analytische Systeme und Komponenten, Karlsruhe 1994.
- [Arpe und Cattle, 1993] K. Arpe und H. Cattle. A comparison of surface stress and precipitation fields in short range forecasts over the antarctic region. In: *J. Geophys. Res.*, 98:13.035–13.044, 1993.
- [Barrie u.a., 1988] L. A. Barrie u.a. Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower arctic atmosphere. In: *Nature*, 334:138–141, 1988.
- [Bendat und Pierson, 1971] J. S. Bendat und A. G. Piersol. *Random data: Analysis and measurement procedures*. Wiley-Interscience, New York/London/Sydney/Tokio, 1971.
- [Berth u.a., 1965] W. Berth u.a. *Wetterkunde*. transpress-Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1965.
- [Blanchard und Woodcock, 1957] A. H. Blanchard und D. Woodcock. Bubble formation and modification in the sea and its meteorological significance. In: *Tellus*, 9:145–158, 1957.
- [Bronstein und Semendjajew, 1979] I. N. Bronstein und K. A. Semendjajew. *Taschenbuch der Mathematik*. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1979.
- [Connolley und King, 1993] W. M. Connolley und J. C. King. Atmospheric water vapour transport to Antarctica inferred from radiosonde data. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 119:325–342, 1993.
- [DWD, 1993-1996] Deutscher Wetterdienst (DWD). Tägliche Rückwärtstrajektorien für die Neumayer-Station. 1992–1996.

-
- [Downey u.a., 1990] A. Downey u.a. Lower tropospheric transport over the southern ocean. In: *J. Atmospher. Res.*, 11:43–68, 1990.
- [Ebbeler, 1997] A. Ebbeler. *Untersuchungen zur Filtermeßmethodik bei der Bestimmung der Jahresgänge chemischer Komponenten des troposphärischen Aerosols an der Neumayer-Station*. Diplomarbeit, Universität Münster, 1997.
- [Fortak, 1982] H. Fortak. *Meteorologie*. Dietrich Reimer Verlag, Berlin, 1982.
- [Fritzsche, 1977] G. Fritzsche. *Informationsübertragung*. Verlag Technik, Berlin, 1977.
- [Gordon und Comiso, 1988] A. L. Gordon und J. C. Comiso. Polynias im Südpolarmeer. In: *Spektrum d. Wissenschaft*, 92–99, 8/1988.
- [Gube-Lenhardt, 1987] M. Gube-Lenhardt. The meteorological data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1983 and 1984. In: *Berichte zur Polarforschung*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1987.
- [Gube-Lenhardt und Obleitner, 1986] M. Gube-Lenhardt und F. Obleitner. The meteorological data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1981 and 1982. In: *Berichte zur Polarforschung*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1986.
- [Helmes, 1989] L. Helmes. The meteorological data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1985, 1986 and 1987. In: *Berichte zur Polarforschung*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1989.
- [Hidy, 1984] G. M. Hidy. *Aerosols, an industrial and environmental science*. Academic Press, Orlando, 1984.
- [Jones und Simmonds, 1993] I. Jones und D. A. Simmonds. A climatology of southern hemisphere extratropical cyclones. *Climate Dynamics*, 9:131–145, 1993.
- [Kleefeld, 1997] C. Kleefeld. *Untersuchungen der Saisonalität von atmosphärischem Dimethylsulfid in der Arktis und Antarktis*. Dissertation, Universität Bremen, 1997.
- [Knap, 1990] A. H. Knap. *The long-range atmospheric transport of natural and contaminant substances*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1990.
- [König-Langlo, 1992] G. König-Langlo. The meteorological data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1988, 1989, 1990 and 1991. In: *Berichte zur Polarforschung*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1992.

- [König-Langlo und Herber, 1996] G. Koenig-Langlo und A. Herber. The meteorological data of the Neumayer-Station for 1992, 1993 and 1994. In: *Berichte zur Polarforschung*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1996.
- [König-Langlo u.a., 1997] G. König-Langlo u.a. Intercomparison of climatology from the three coastal antarctic stations Durmont d'Durville, Neumayer and Halley with respect to aerosol and snowfall chemistry. In: *J. Geophys. Res.*, in Druck.
- [König-Langlo und Marx, 1997] G. Koenig-Langlo und B. Marx. The Meteorological Information System at the Alfred Wegener Institute. In: *Climate and Environmental Database Systems*. Edited by M. Lautenschlager and M. Reinke. Kluwer Academic Publisher, 1997.
- [Kottmeier, 1988] Ch. Kottmeier. Atmosphärische Strömungsvorgänge am Rande der Antarktis. In: *Berichte des Institutes für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover*. Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität, Hannover, 1988.
- [Kottmeier und Fay, 1997] Ch. Kottmeier, B. Fay. Trajectories in the antarctic lower troposphere. *J. Geophys. Res.*, in Druck.
- [Liu u.a., 1985] S. C. Liu u.a. On the origin of tropospheric ozone. In: *J. Geophys. Res.*, 85:7546–7552, 1985.
- [Liljequist und Čehak, 1984] G. H. Liljequist und K. Čehak. *Allgemeine Meteorologie*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1984.
- [Linke und Baur, 1970] F. Linke und F. Baur. *Meteorologisches Taschenbuch*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 1970.
- [Manins und Sawford, 1979] P. C. Manins und B. L. Sawford. A model of Katabatic Winds. In: *J. Atmos. Sci.*, 36:619–630, 1979.
- [Marks, 1987] R. Marks. Marine whitecaps in the North Atlantic and Greenland sea region. In: *Dt. hydrogr. Z.*, 40:71–79, 1987.
- [Markus, 1995] T. Markus. *Bestimmung von Küstenpolynien mit Daten passiver Mikrowellensensoren und Abschätzung ihres Einflusses auf Ozean und Atmosphäre*. Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde am Institut für Umweltphysik der Universität Bremen, 1995.
- [McConnell u.a., 1992] J. C. McConnell u.a. Photochemical bromine production implicated in arctic boundary-layer ozone depletion. In: *Nature*, 335:150–152, 1992

-
- [Minikin, 1994] A. Minikin. *Spurenstoff-glaziologische Untersuchungen des Filchner-Ronne-Schelfeises, Antarktis: Bestimmung der Tiefenverteilung und der Kontinentaleffekte ionischer Aerosolkomponenten*. Verlag Shaker, Heidelberg, 1994.
- [Minikin, 1996] A. Minikin. *Betriebsanleitung zum Luftchemischen Observatoriums der Neumayer-Station*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 1996.
- [Monhan u.a., 1986] E. Monhan u.a. A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption. In: *Oceanic whitecaps and their role in air-sea exchange processes.*, 167–174, D. Reidel Publishing Company, 1986.
- [Murayama u.a., 1992] S. Murayama u.a. Variations of tropospheric ozone concentration over Syowa Station, Antarctica. In: *Tellus*, 44B:262–272, 1992.
- [NSIDC, 1978-1996] National Snow and Ice Data Center. DMSP SMMR and SSM/I brightness temperature grids for the polar regions on CD-ROM. Boulder, 1978–1996.
- [NSIDC, 1992] National Snow and Ice Data Center. DMSP SSM/I brightness temperature grids for the polar regions on CD-ROM, Users guide. Boulder, 1992.
- [Pfaff, 1993] K. H. Pfaff. ^2H - und ^{18}O -Gehalte in den Niederschlägen in Abhängigkeit von der meteorologischen Situation im Bereich der Georg-von-Neumayer-Station. Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde an der naturwissenschaftlichen Fakultät der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 1993.
- [Pflüger u.a., 1990] U. Pflüger u.a. *Trajektorienberechnungen auf Basis des neuen Wettervorhersagesystems des Deutschen Wetterdienstes und ihre Anwendung für die Ausbreitungsrechnung*. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Forschung, Abschlußbericht zum FE-Vorhaben, 1990.
- [Platt, 1997] U. Platt. Rapid surface ozone loss - the role of halogen species. In: *Proceedings of the Third NySMAC meeting on "Atmospheric Research in Ny-Ålesund"*, 113–121, 1997.
- [Press u.a., 1988] W. H. Press u.a. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- [Saigne und Legrand, 1987] C. Saigne und M. Legrand. Measurements of methanesulfonic acid in Antarctic ice. In: *Nature*, 330:240–242, 1987.

- [Scherhag, 1948] R. Scherhag. *Neue Methoden der Wetteranalyse*. Springer-Verlag, Berlin, 1948.
- [Schmidt und König-Langlo, 1994] T. Schmidt und G. König-Langlo. Radiation measurement at the Georg-von-Neumayer-Station 1982–1992. In: *Berichte zur Polarforschung*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1994.
- [Schönwiese, 1985] C.-D. Schönwiese. *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Gebrüder Borntraeger, Berlin/Stuttgart, 1985.
- [Shaw, 1988] G. E. Shaw. Antarctic aerosols: a review. In: *Rev. of Geophys.*, 26:89–112, 1988.
- [Stull, 1988] R. B. Stull. *An introduction to boundary layer meteorology*. D. Reidel Publishing Company, 1988.
- [Thrush, 1988] B. A. Thrush. The chemistry of the stratosphere. In: *Rep. Prog. Phys.*, 51:1341-1371, 1988
- [Twitchell u.a., 1989] P. F. Twitchell u.a. *Polar and Arctic Lows*. A. Deepak Publishing, Hampton, 1989.
- [Wagenbach u.a., 1988] D. Wagenbach u.a. Coastal Antarctic aerosol: the pattern of its chemical composition and radionuclide content. In: *Tellus*, 40B:426–436, 1988.
- [Wagenbach u.a., 1997] D. Wagenbach u.a. Sea salt aerosol in coastal antarctic regions. In: *J. Geophys. Res.*, in Druck.
- [Warneck, 1988] P. Warneck. *Chemistry of the natural atmosphere*. Academic Press, San Diego 1988
- [Welch u.a., 1993] K. A. Welch u.a. Methanesulfonic acid in coastal Antarctic snow related to sea-ice extend. In: *Geophys. Res. Lett.*, 20:443–446, 1993.
- [Wessel, 1997] S. Wessel. Troposphärische Ozonvariationen in Polarregionen. In: *Berichte zur Polarforschung*. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1997.
- [Wessel u.a., 1998] S. Wessel. Tropospheric ozone depletion in polar regions, A comparison of observations in the Arctic and Antarctic. In: *Tellus.*, 50B:34–50, 1998.
- [Wessel und Smith, 1995] P. Wessel und W. H. Smith. *The Generic Mapping Tools (GMT) version 3.0 Technical Reference & Cookbook*. SOEST/NOAA, 1995.

[Winkler u.a., 1992] P. Winkler u.a. Regular fluctuations of surface ozone at Georg-von-Neumayer station. In: *Tellus*, 44B:33–40, 1992.

[Wyputta, 1994] U. Wyputta. Untersuchungen zum Spurenstofftransport in die Antarktis anhand von Messungen an der Georg-von-Neumayer-Station. *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung*, 15, 1994.

A. Ergebnisse der Meereisuntersuchung

A.1 Relative Meereisbedeckungen im östlichen Un- tersuchungsgebiet

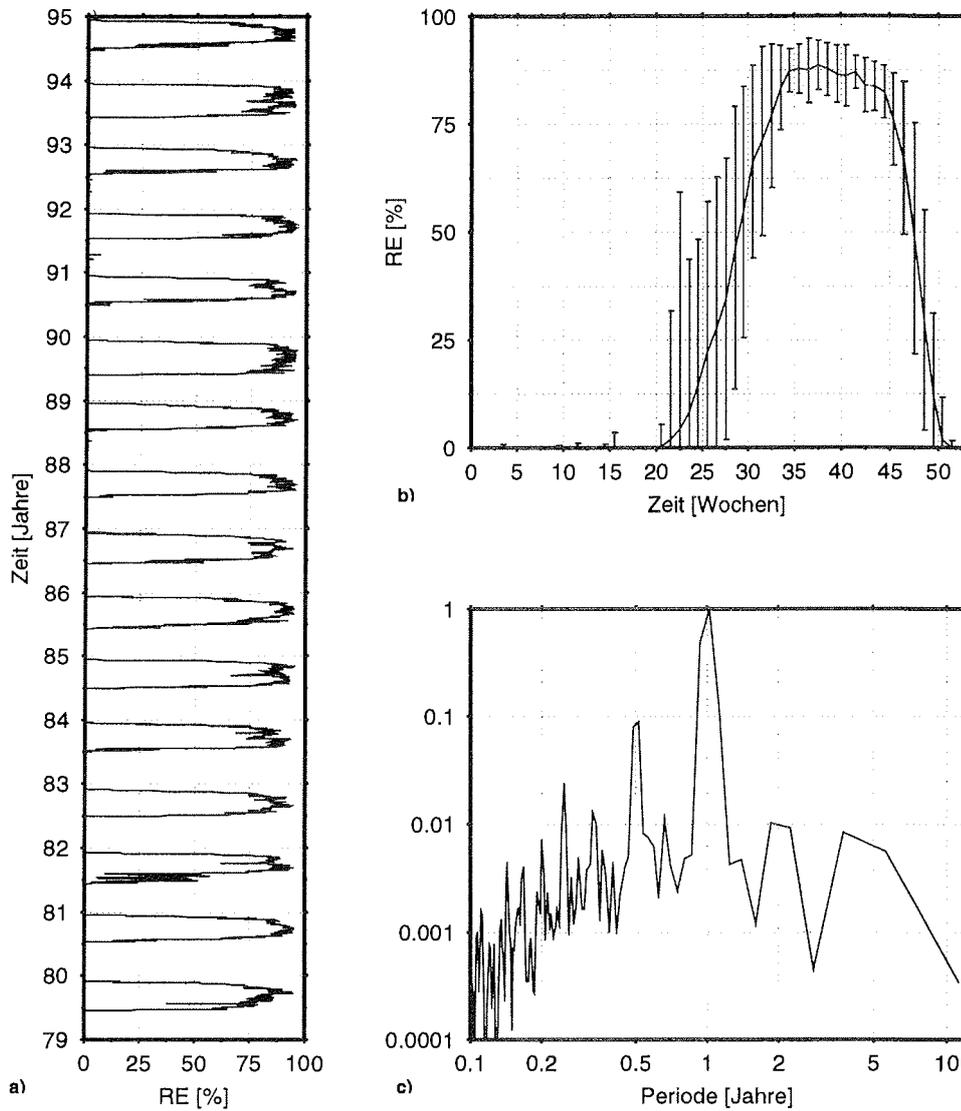


Abbildung A.1 Rel. Meereisbedeckung im östlichen Untersuchungsgebiet, Segment 100 km, 1979 bis 1995, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

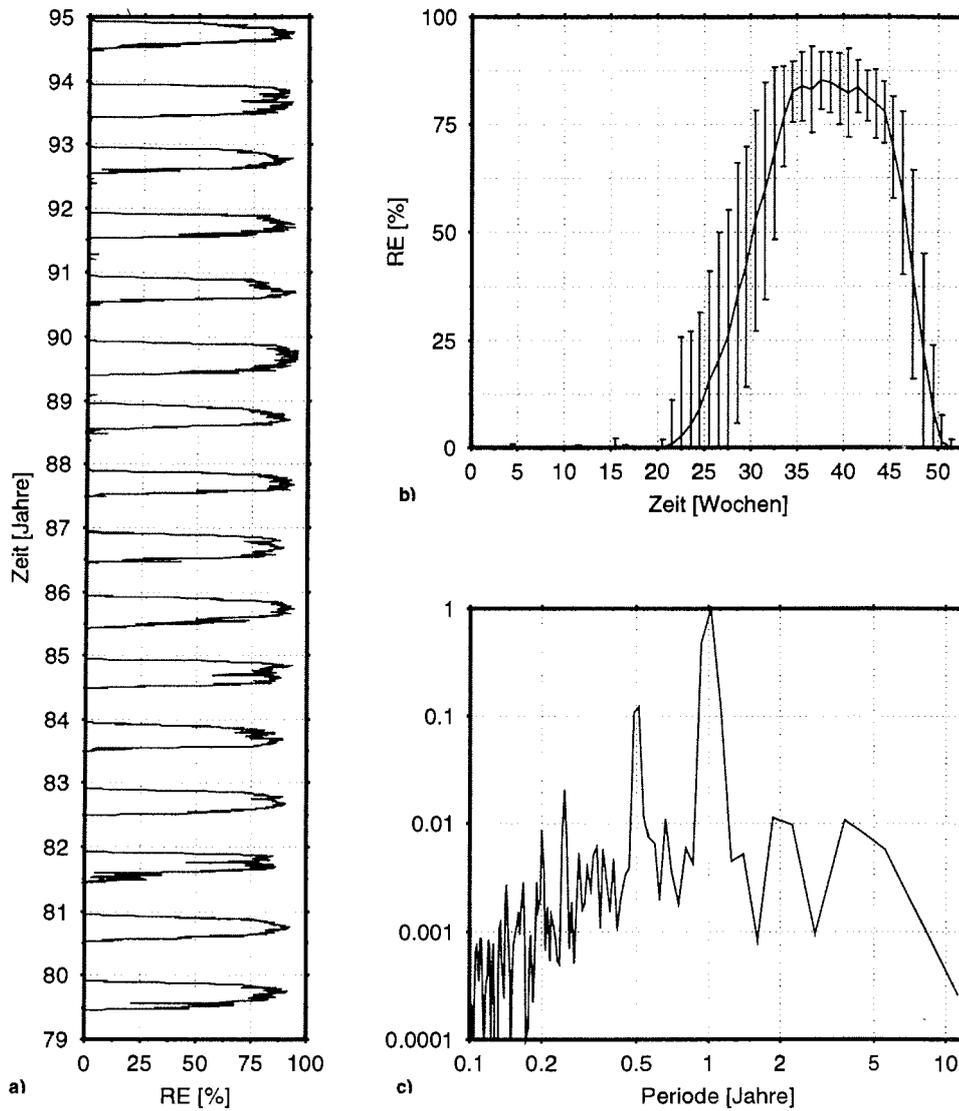


Abbildung A.2 Rel. Meereisbedeckung im östlichen Untersuchungsgebiet, Segment 200 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

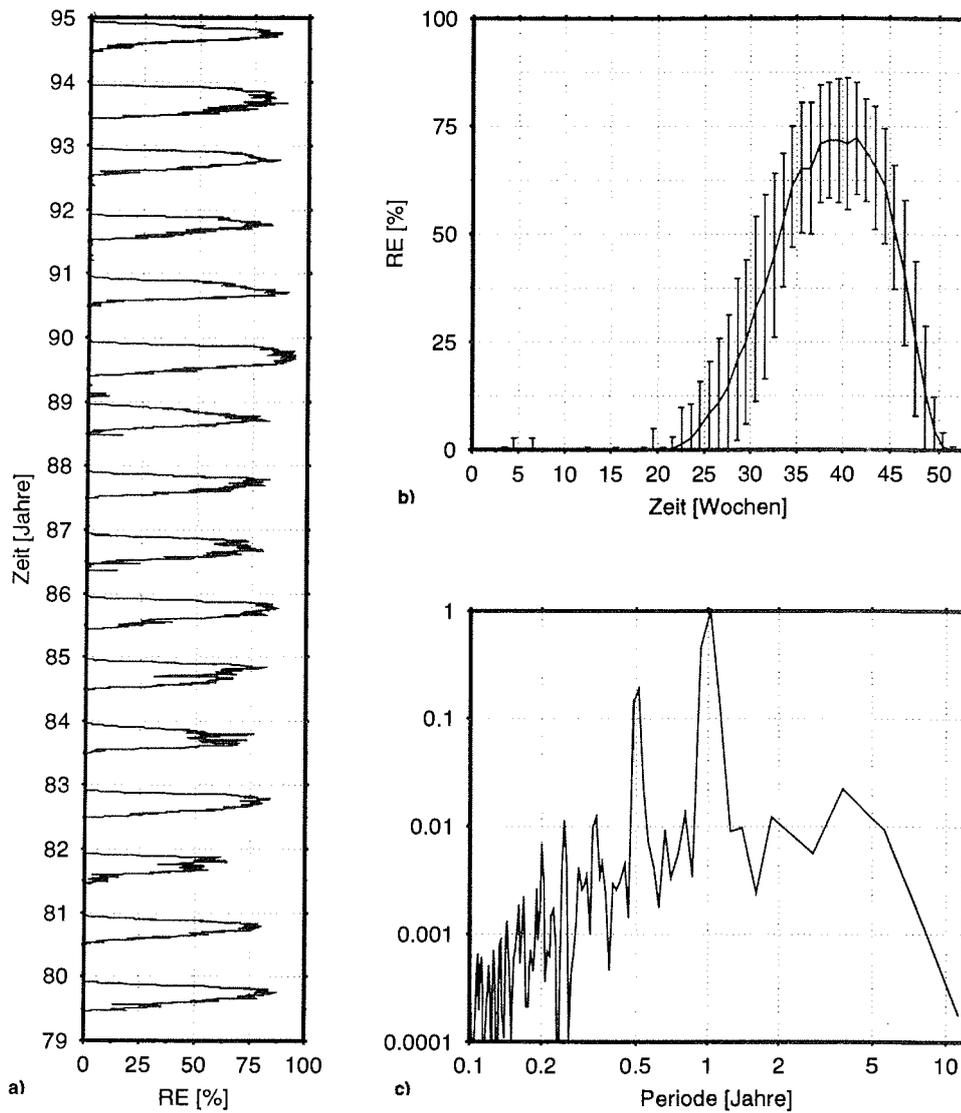


Abbildung A.3 Rel. Meereisbedeckung im östlichen Untersuchungsgebiet, Segment 400 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

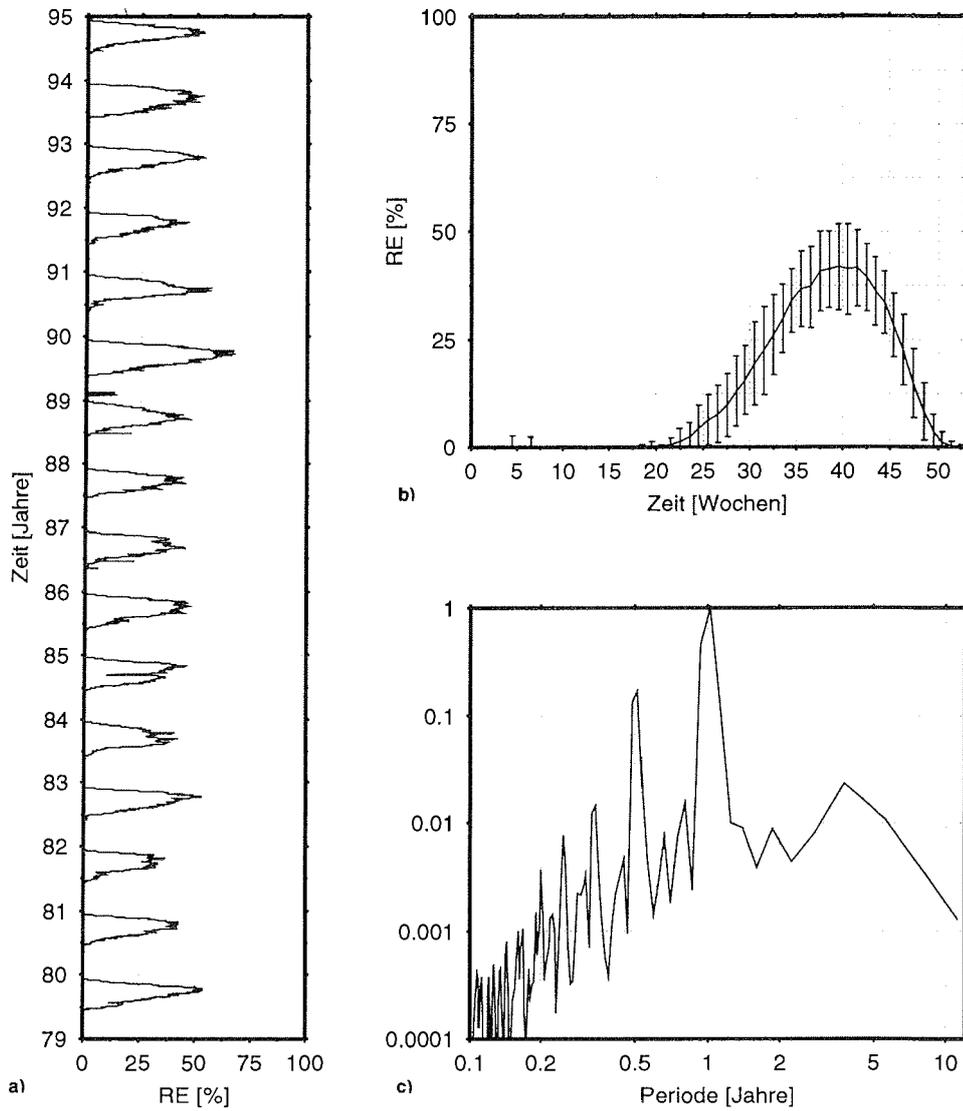


Abbildung A.4 Rel. Meereisbedeckung im östlichen Untersuchungsgebiet, Segment 800 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

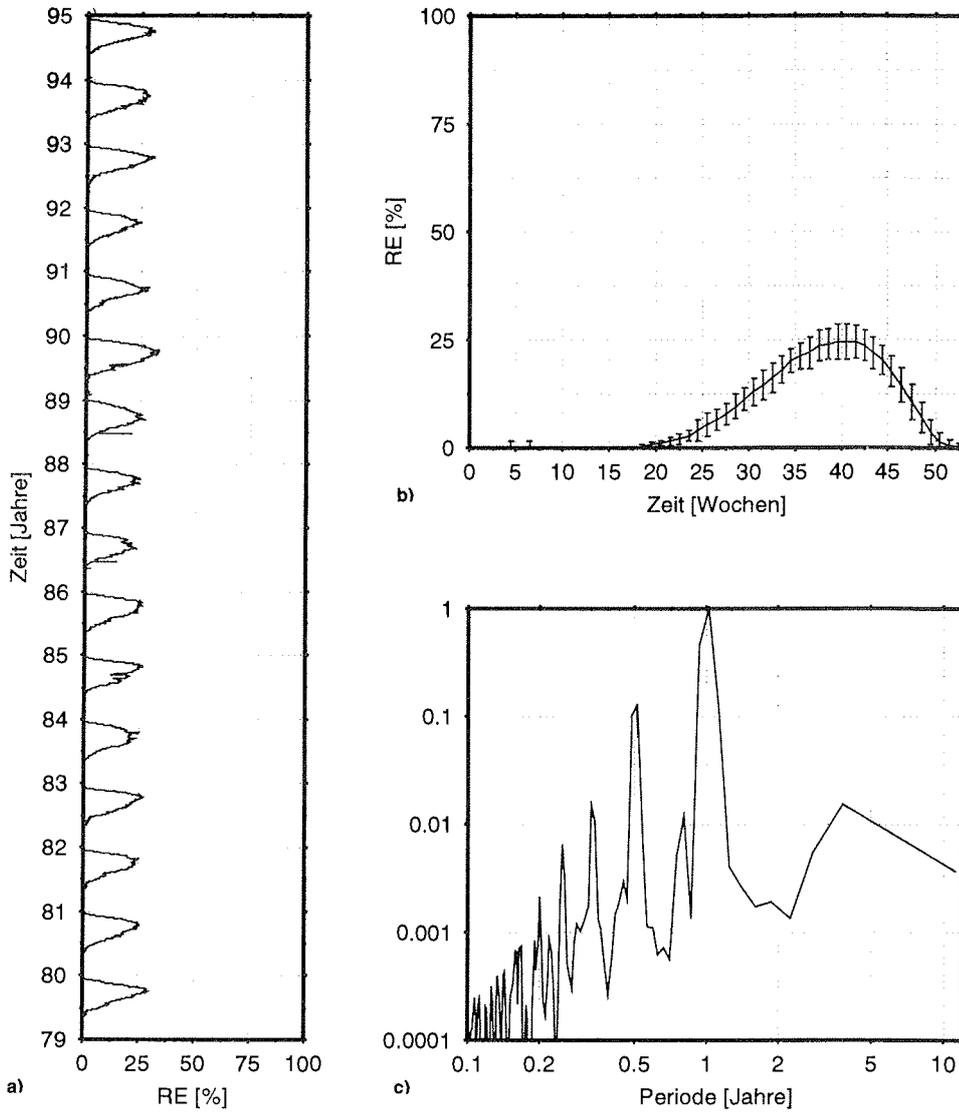


Abbildung A.5 Rel. Meereisbedeckung im östlichen Untersuchungsgebiet, Segment 1600 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

A.2 Relative Meereisbedeckungen im westlichen Untersuchungsgebiet

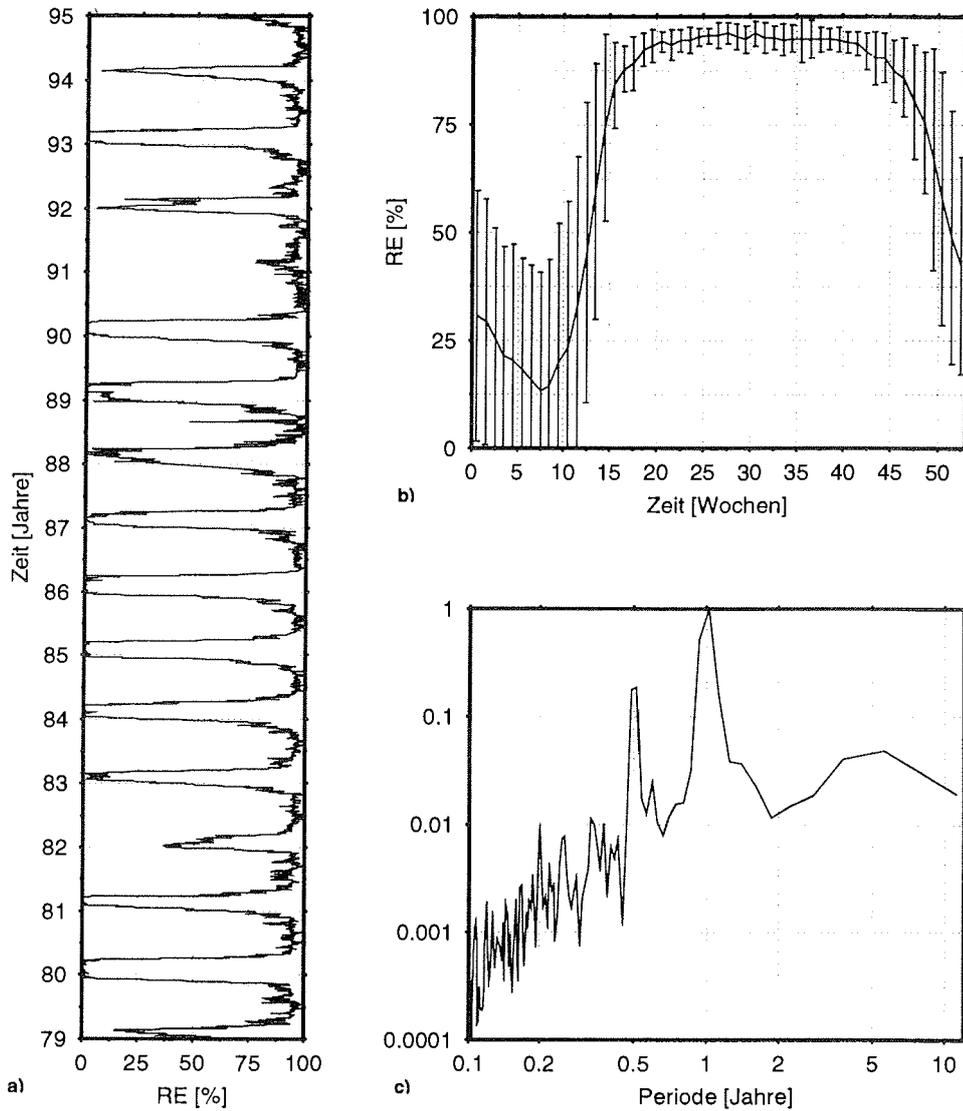


Abbildung A.6 Rel. Meereisbedeckung im westlichen Untersuchungsgebiet, Segment 100 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

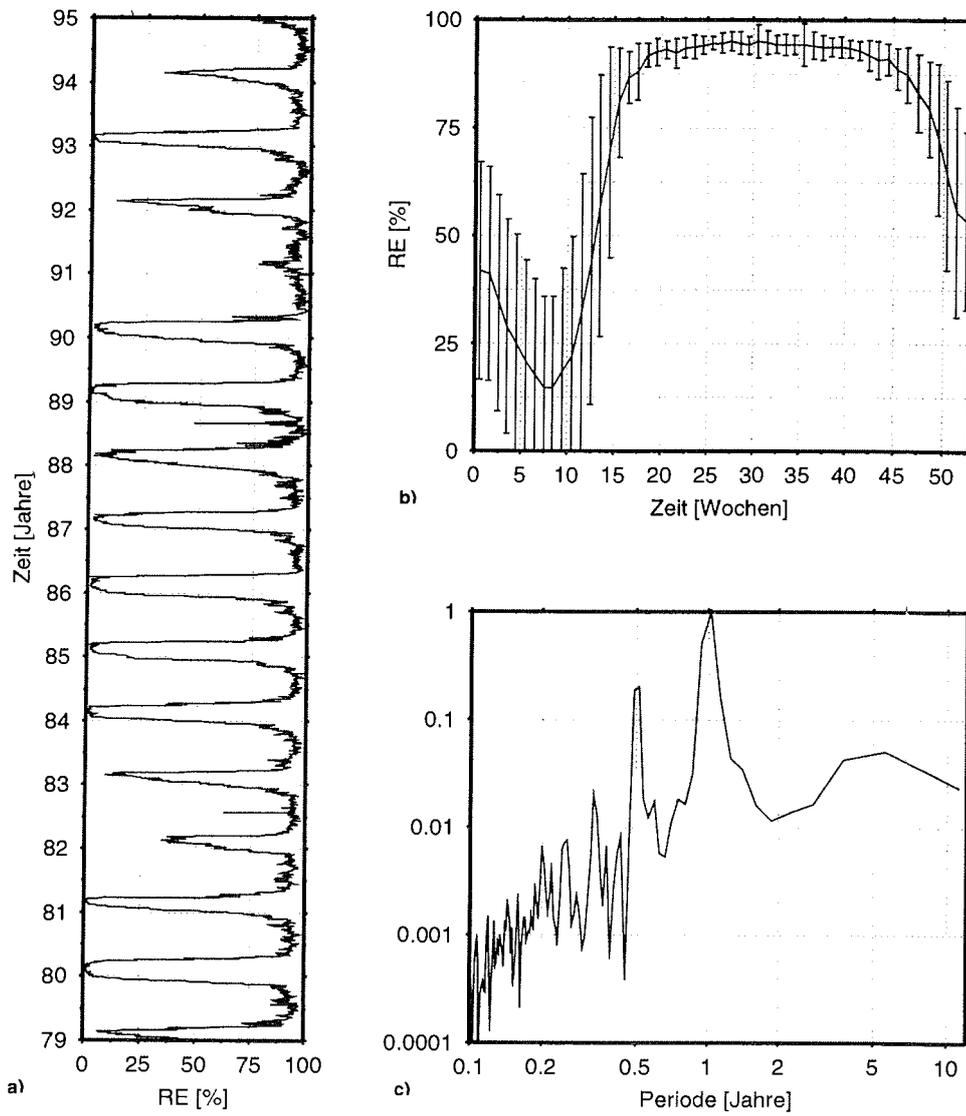


Abbildung A.7 Rel. Meereisbedeckung im westlichen Untersuchungsgebiet, Segment 200 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

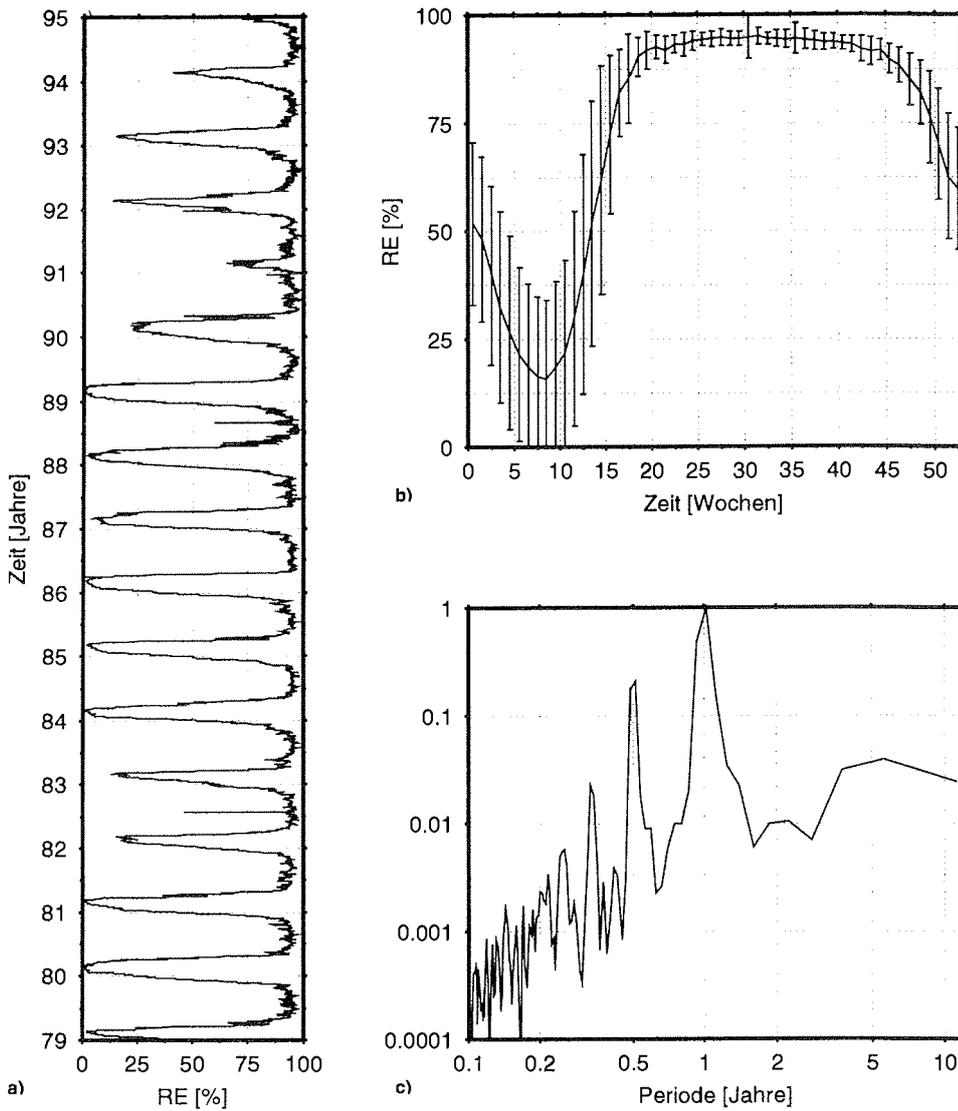


Abbildung A.8 Rel. Meereisbedeckung im westlichen Untersuchungsgebiet, Segment 400 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

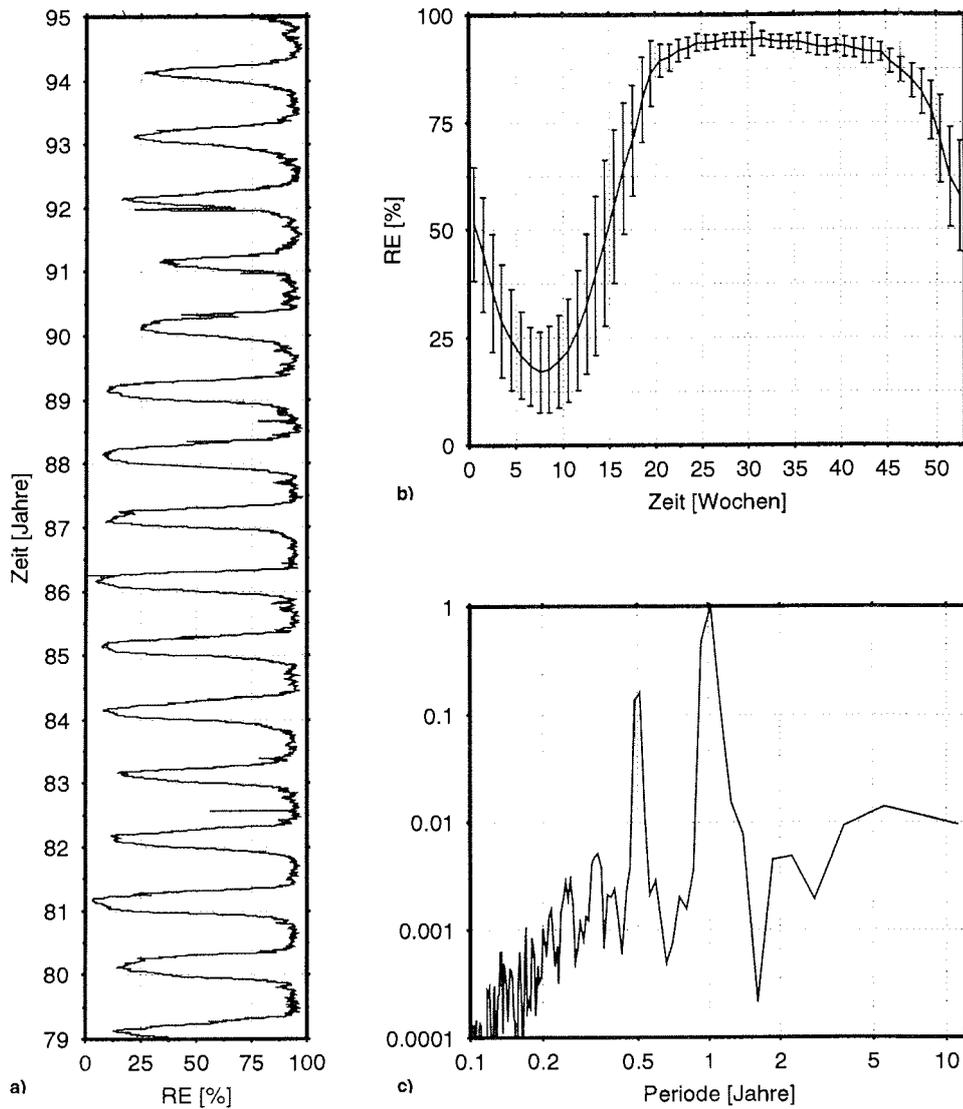


Abbildung A.9 Rel. Meereisbedeckung im westlichen Untersuchungsgebiet, Segment 800 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

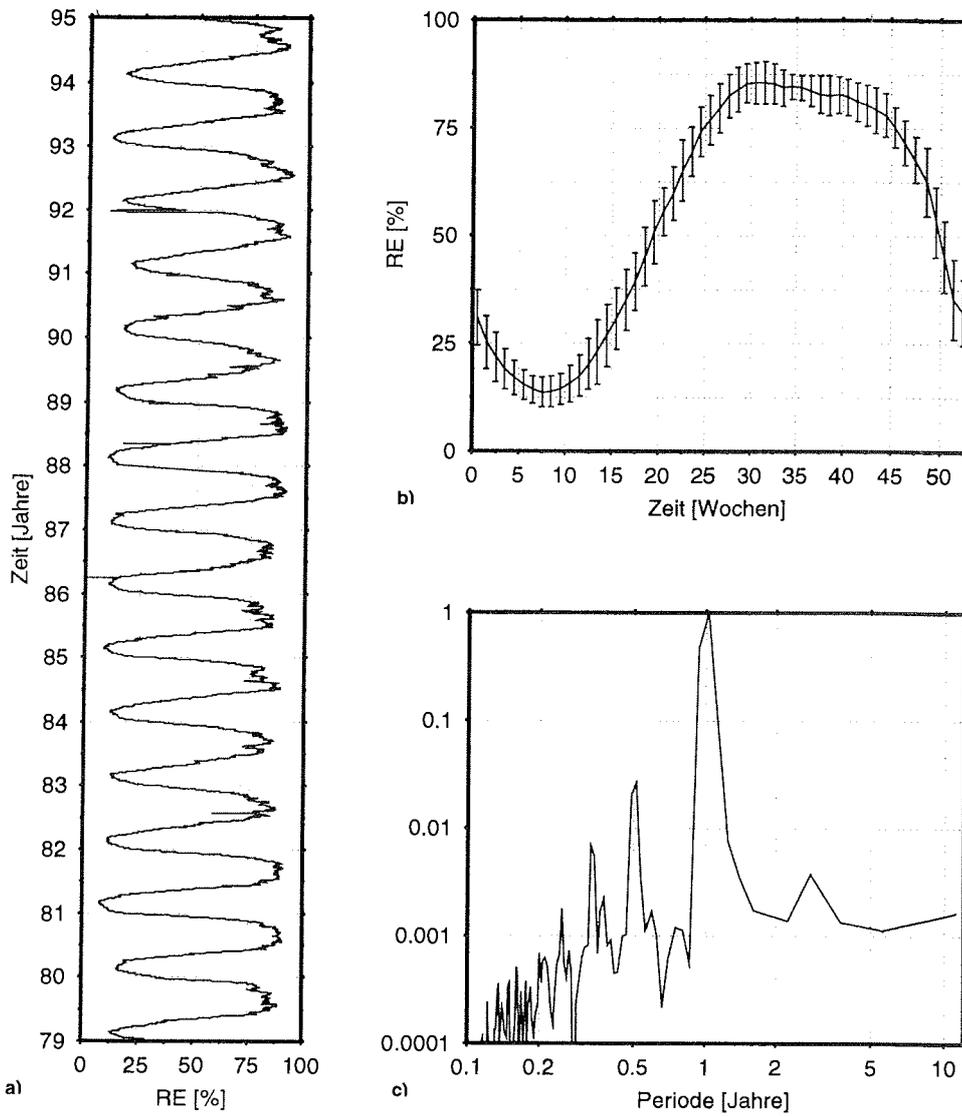


Abbildung A.10 Rel. Meereisbedeckung im westlichen Untersuchungsgebiet, Segment 1600 km, 1979 bis 1994, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

A.3 Trajektorienbezogene, relative Eisbedeckung des Gesamtseegebietes

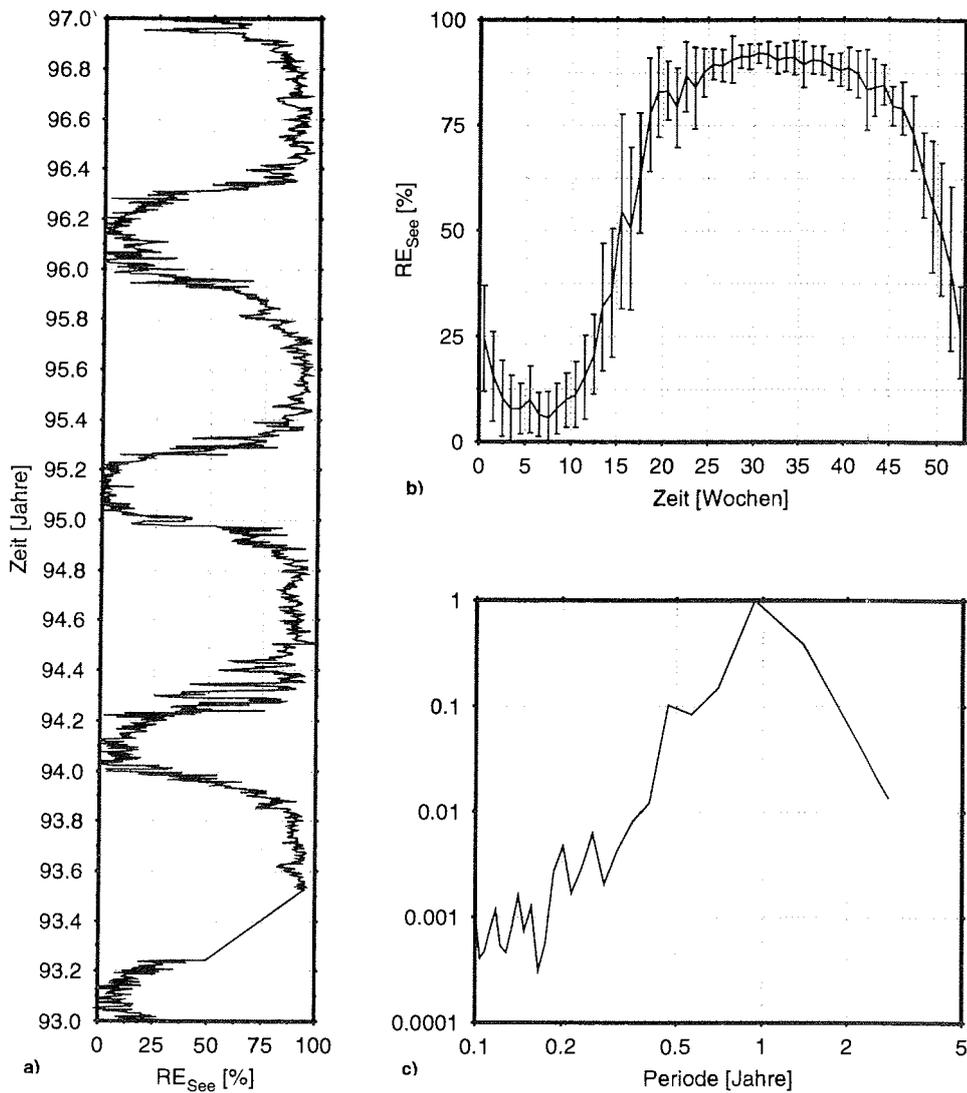


Abbildung A.11 Trajektorienbezogene, relative Eisbedeckung des Gesamtseegebietes, 1-Tag-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

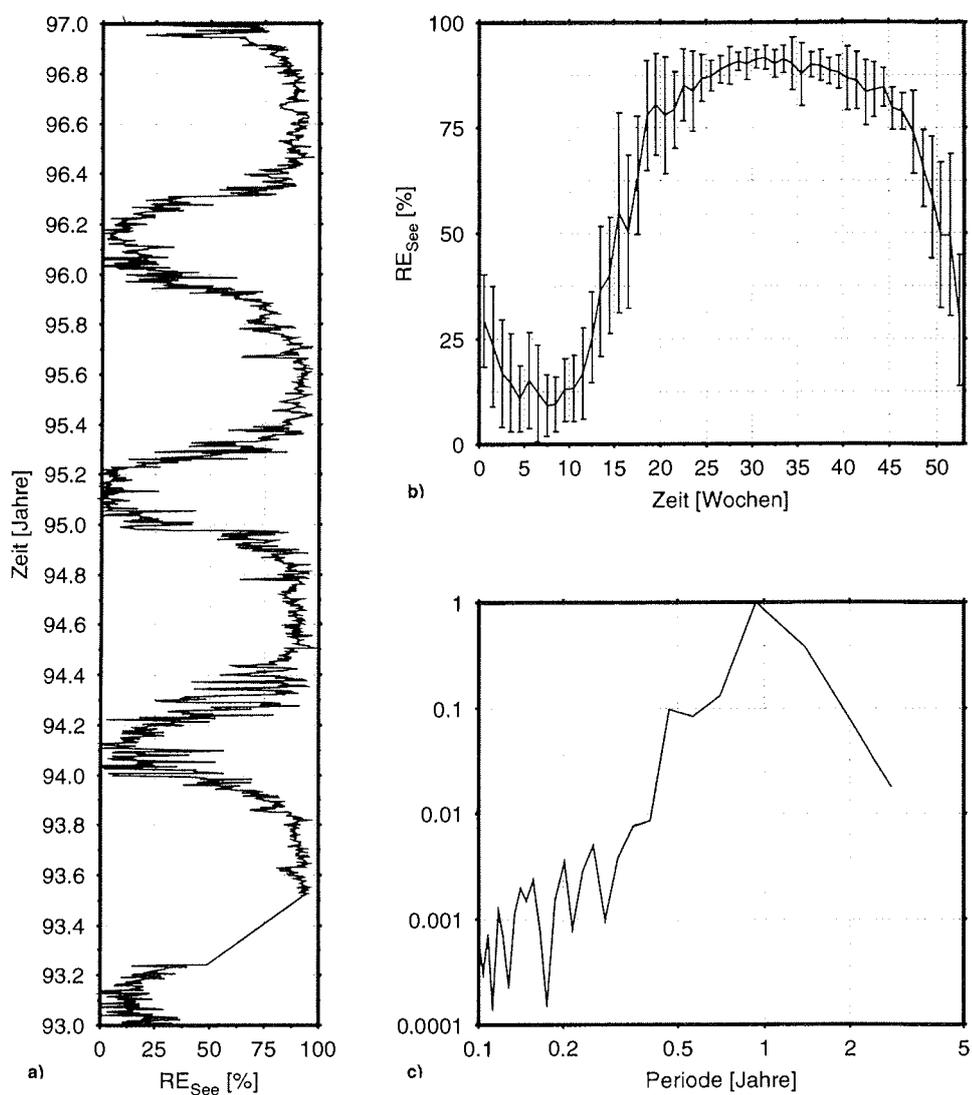


Abbildung A.12 Trajektorienbezogene, relative Eisbedeckung des Gesamtseegebietes, 2-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

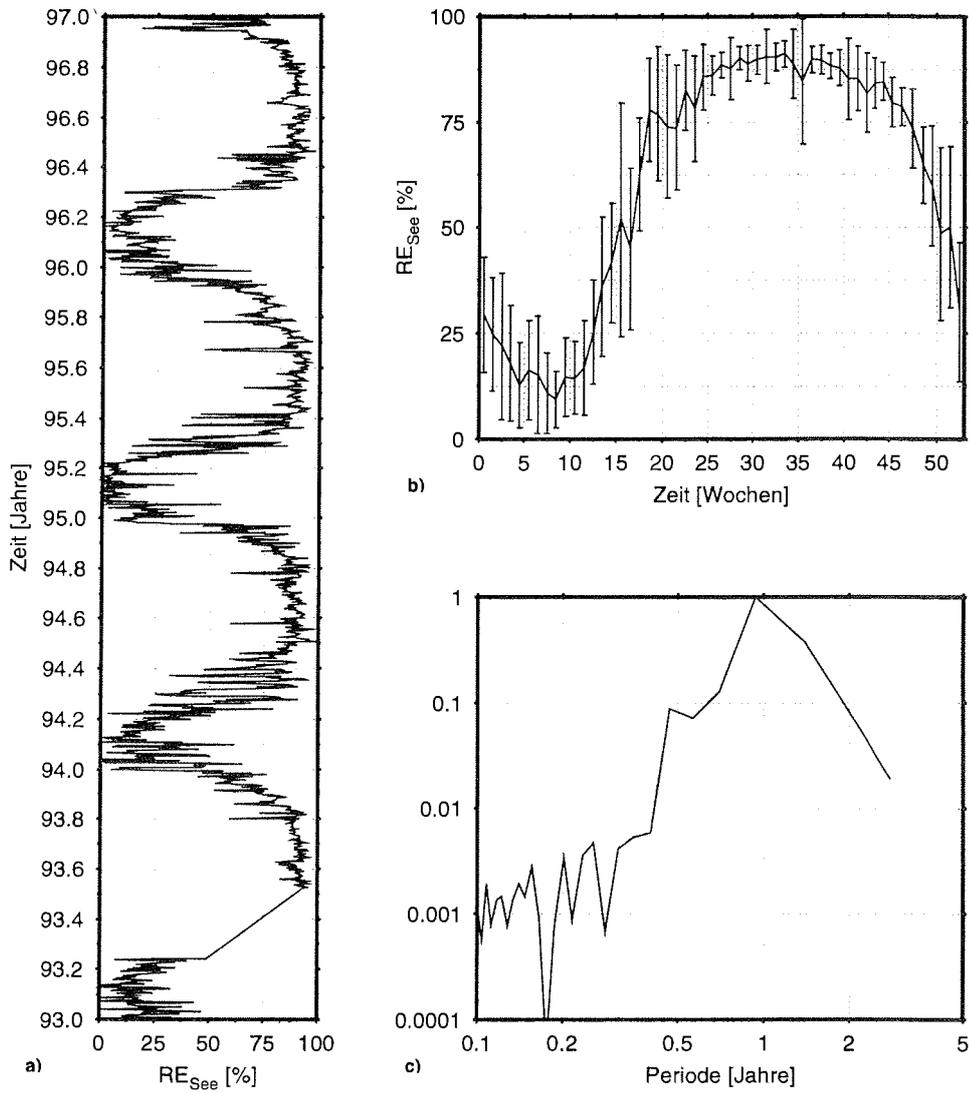


Abbildung A.13 Trajektorienbezogene, relative Eisbedeckung des Gesamtseegebietes, 3-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahrgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

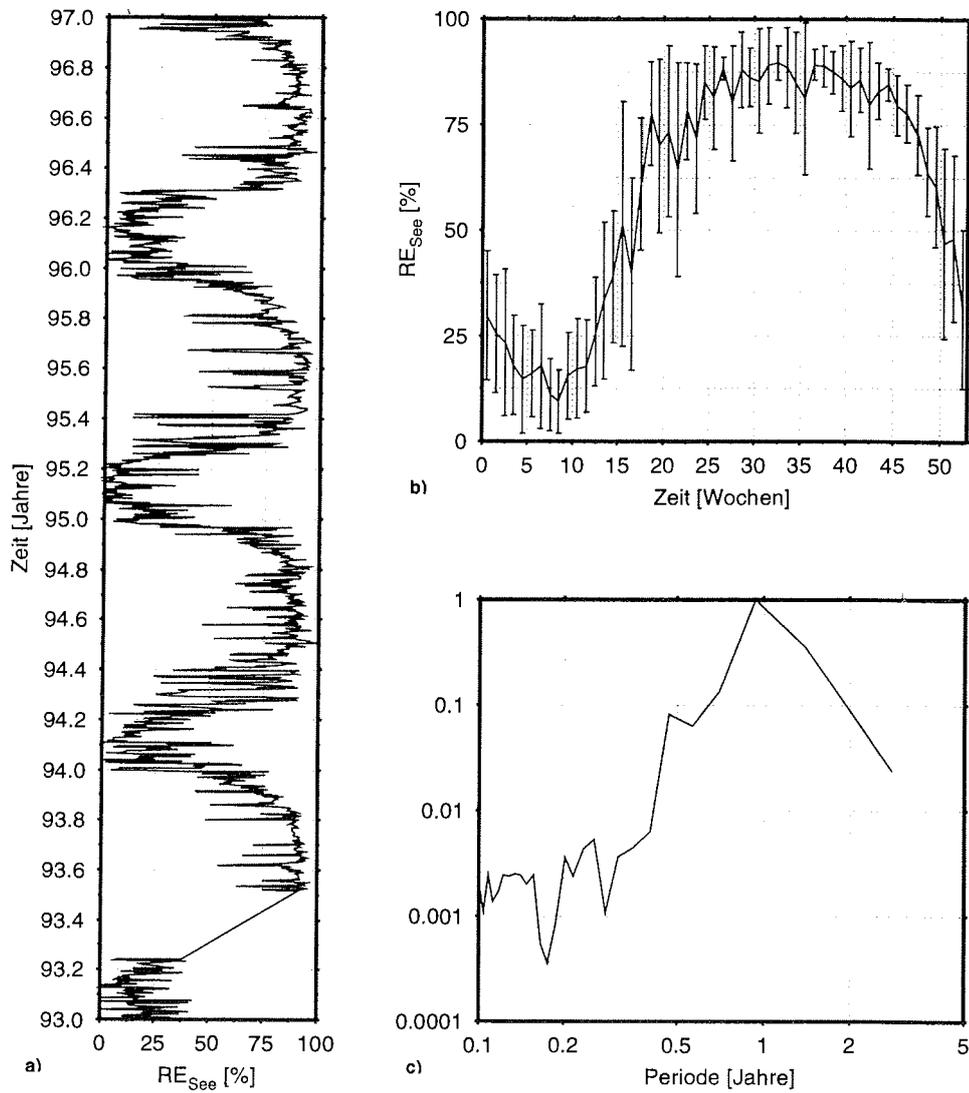


Abbildung A.14 Trajektorienbezogene, relative Eisbedeckung des Gesamtseegebietes, 4-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

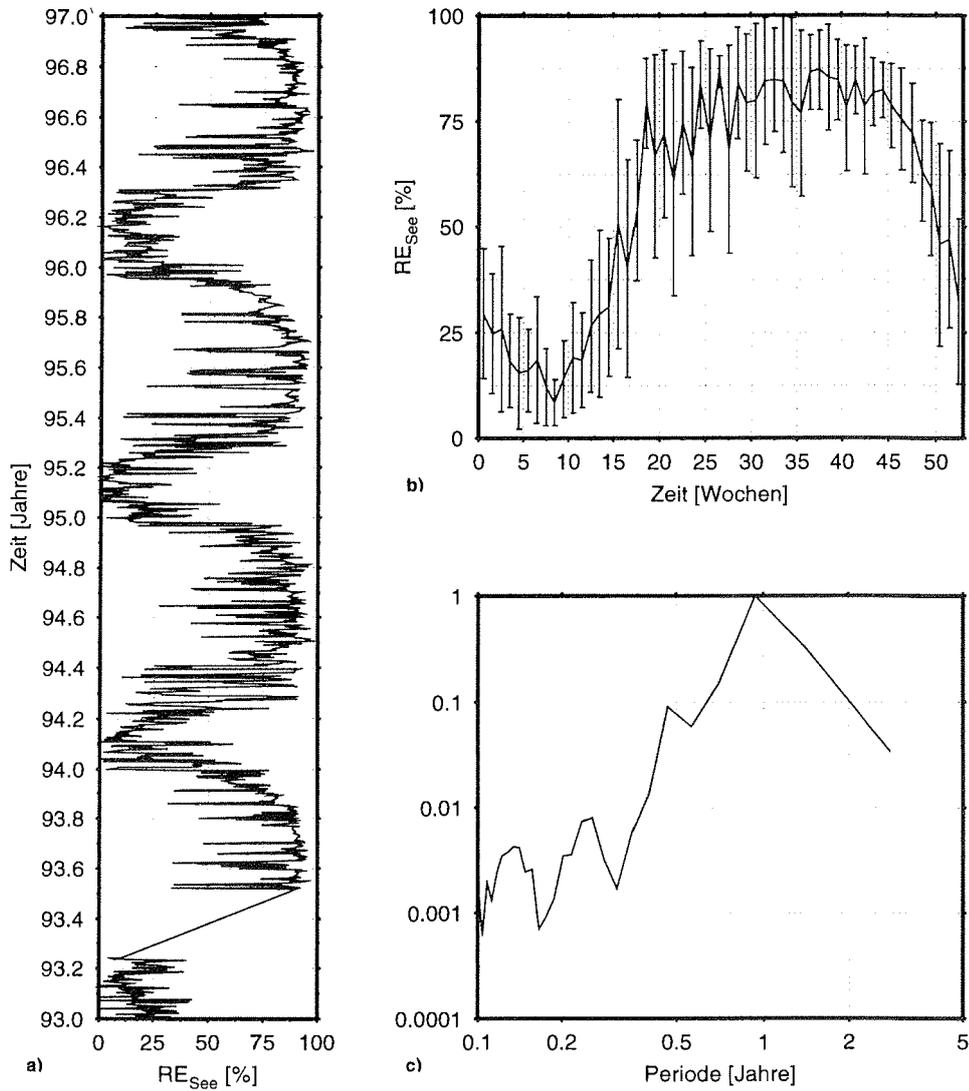


Abbildung A.15 Trajektorienbezogene, relative Eisbedeckung des Gesamtseegebietes, 5-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

A.4 Trajektorienbezogenes, absolutes Meereisgebiet

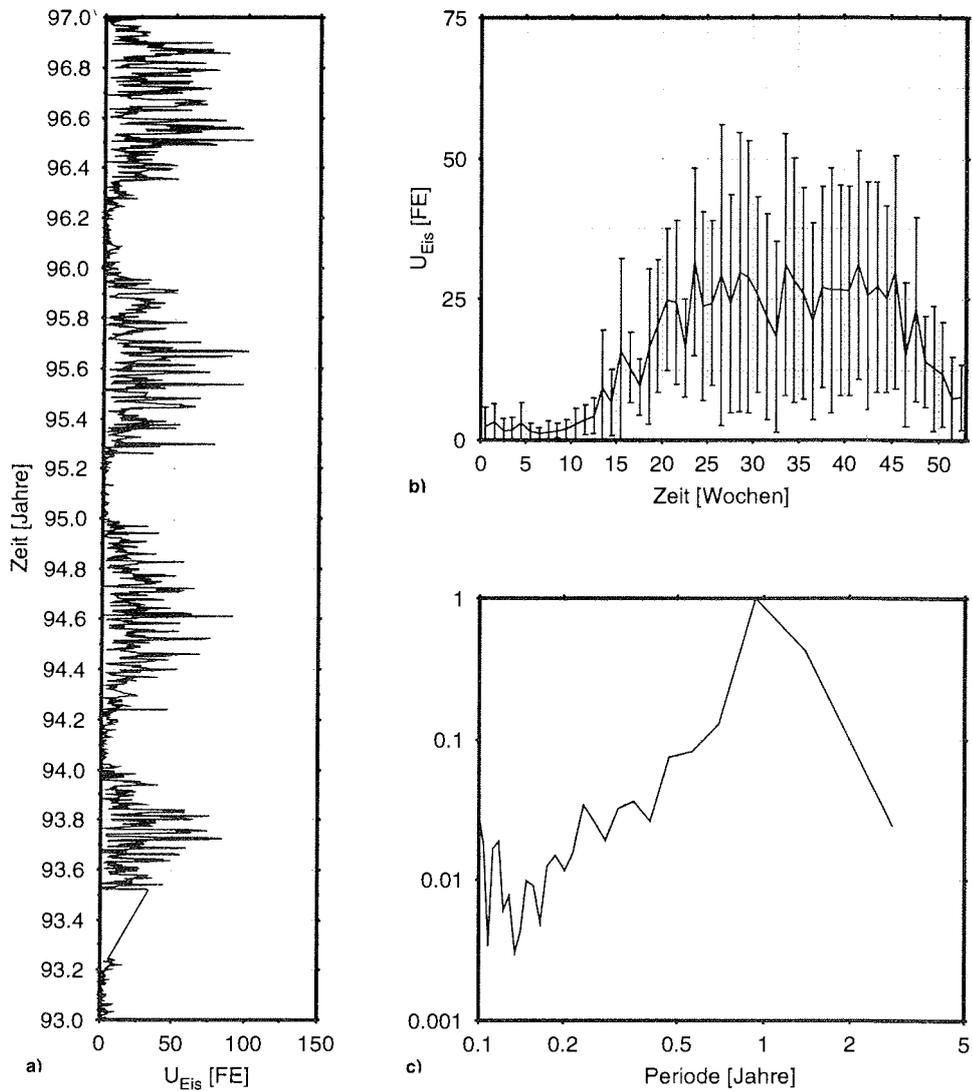


Abbildung A.16 Trajektorienbezogenes, absolutes Meereisgebiet, 1-Tag-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

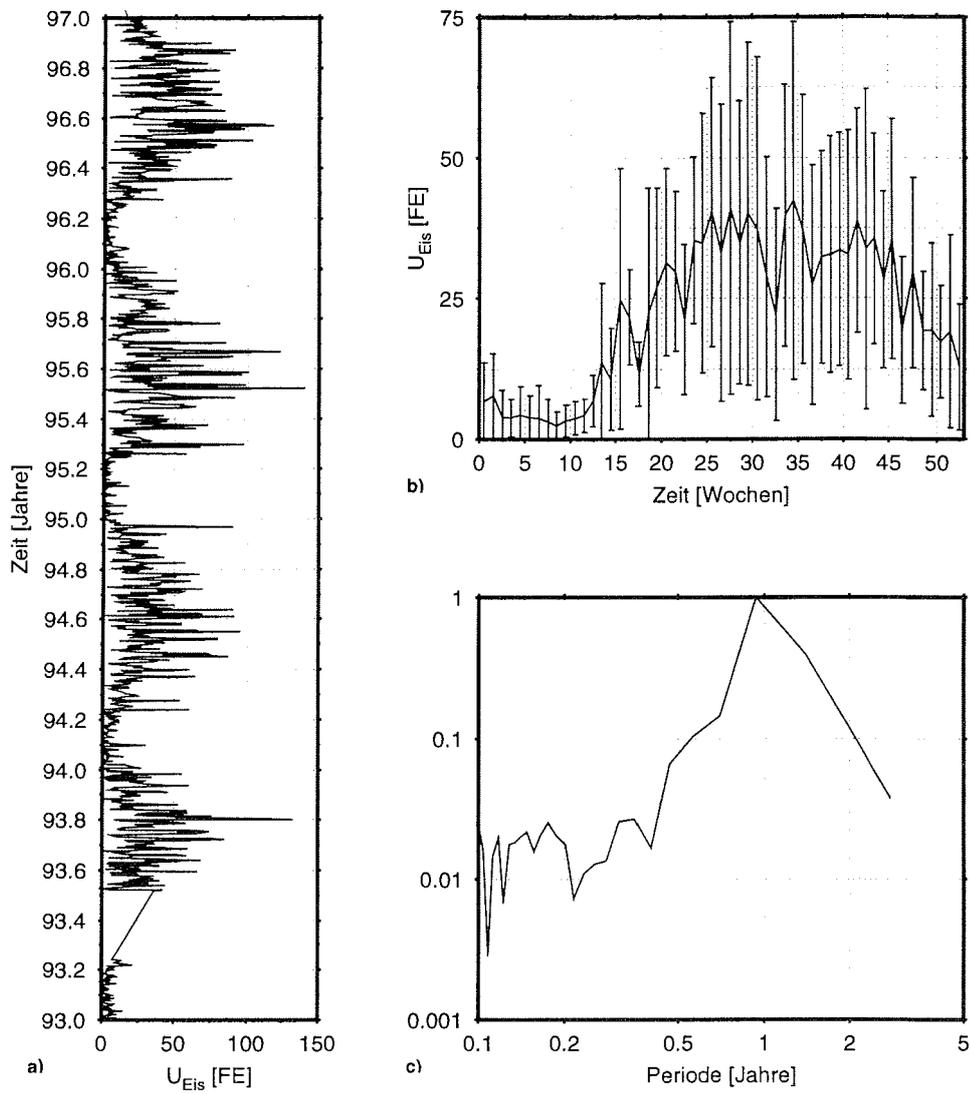


Abbildung A.17 Trajektorienbezogenes, absolutes Meereisgebiet, 2-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

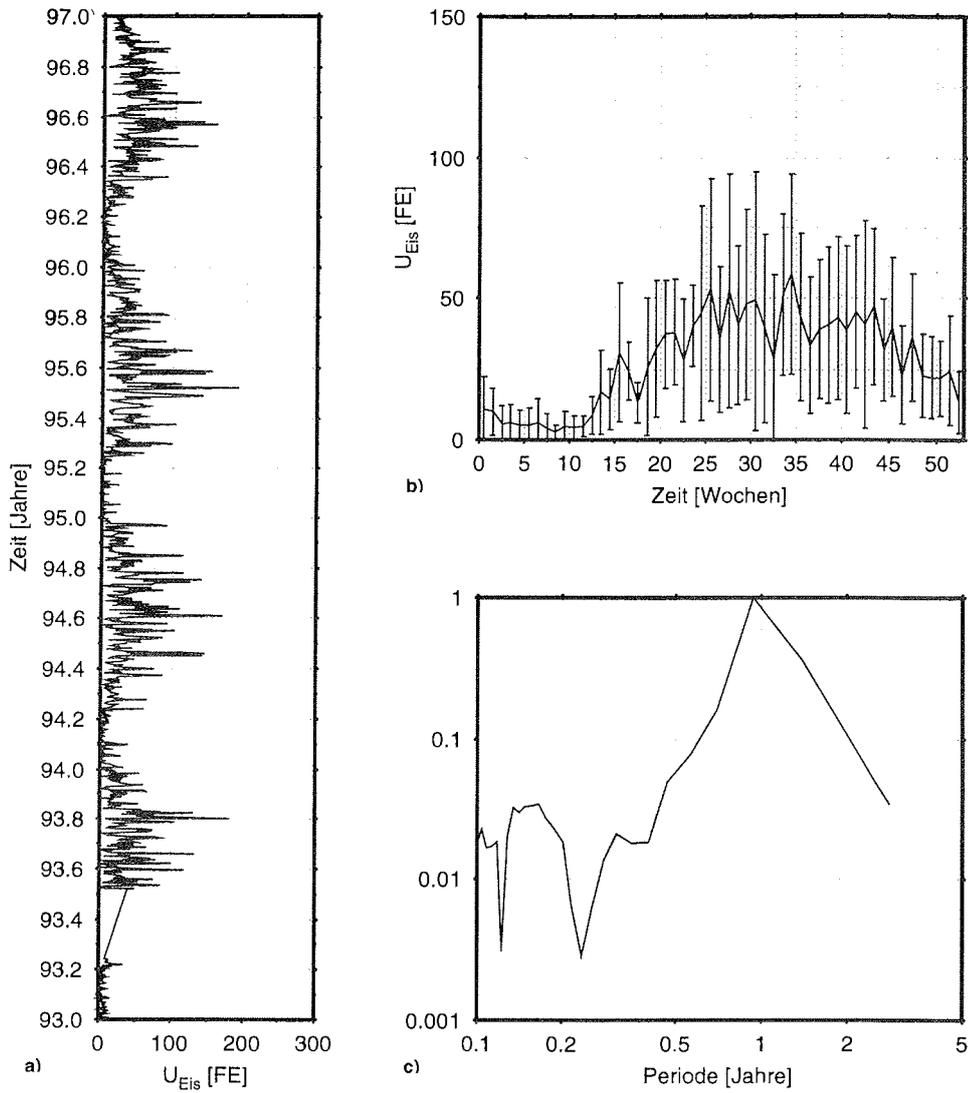


Abbildung A.18 Trajektorienbezogenes, absolutes Meereisgebiet, 3-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

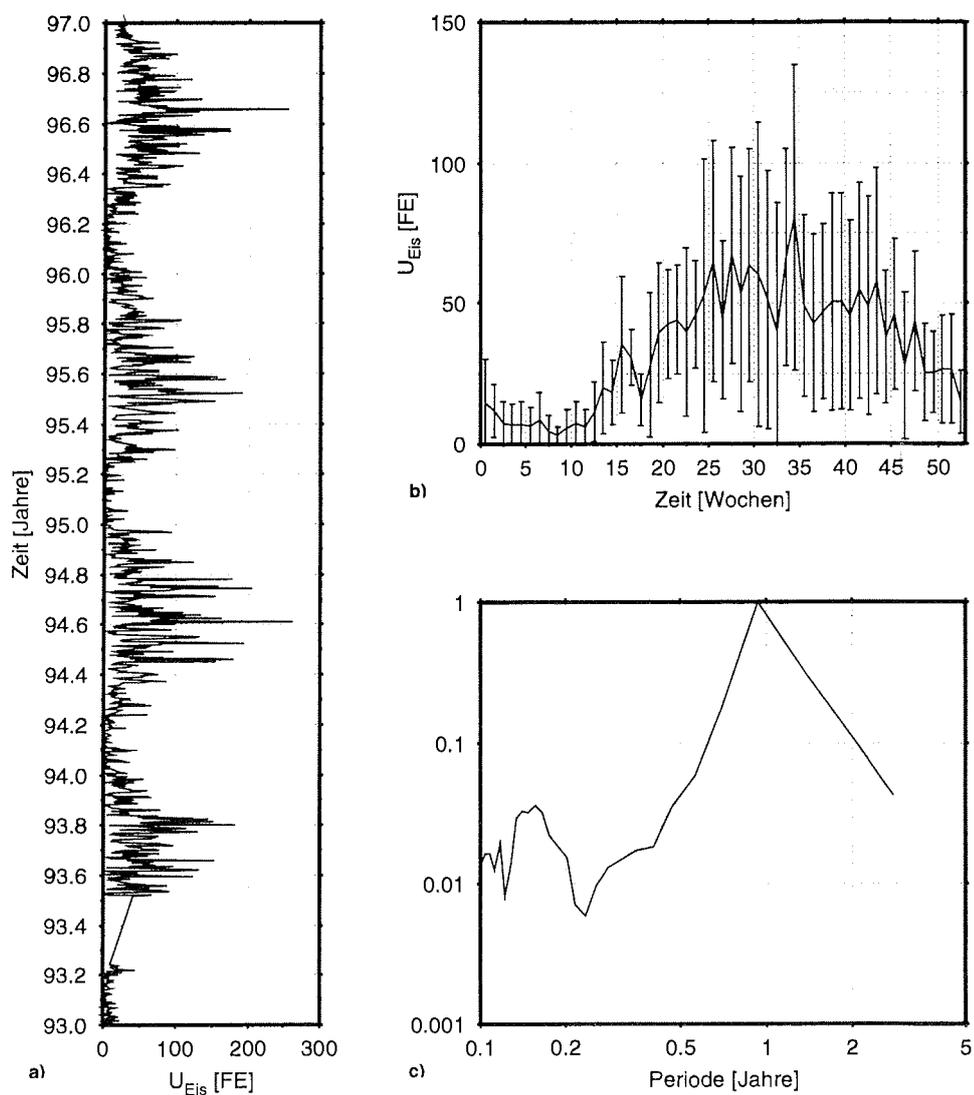


Abbildung A.19 Trajektorienbezogenes, absolutes Meereisgebiet, 4-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

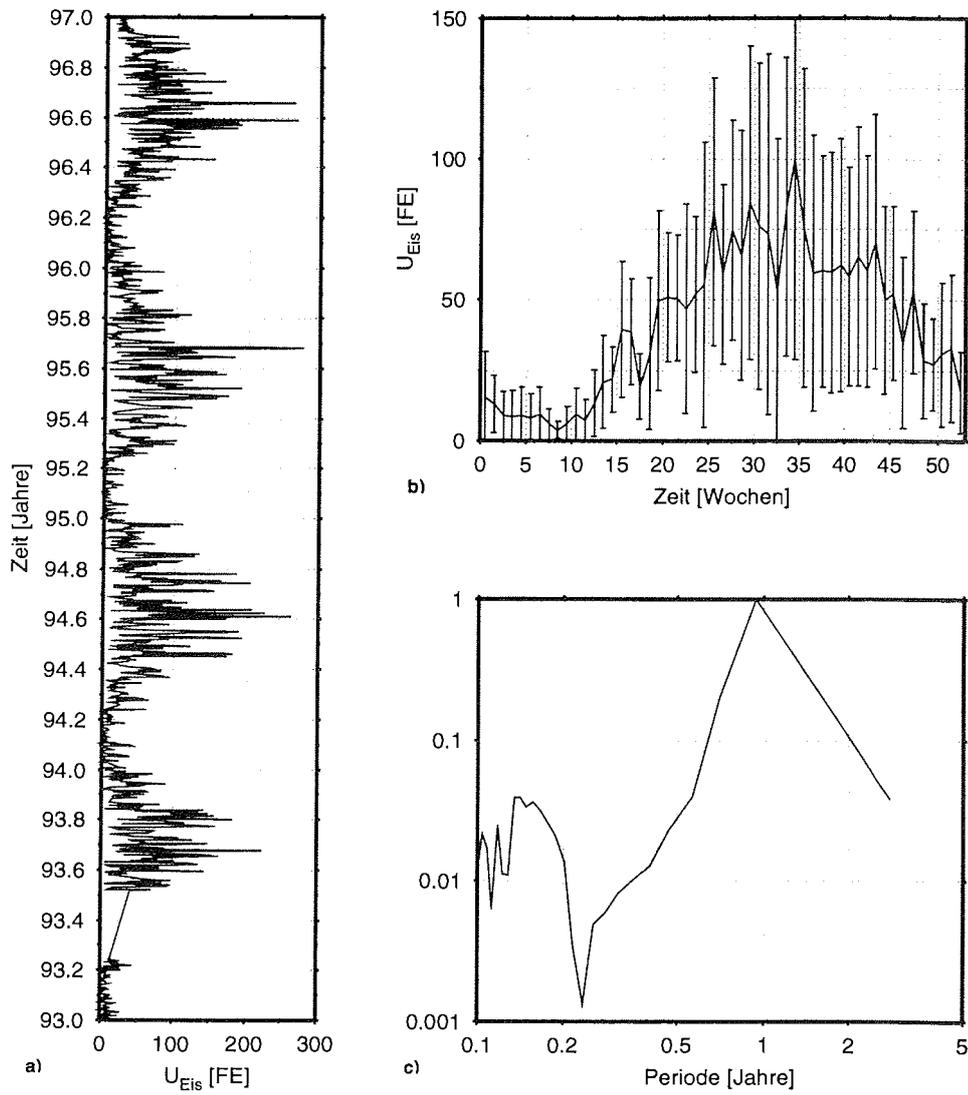


Abbildung A.20 Trajektorienbezogenes, absolutes Meereisgebiet, 5-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

A.5 Trajektorienbezogenes, absolutes Seegebiet

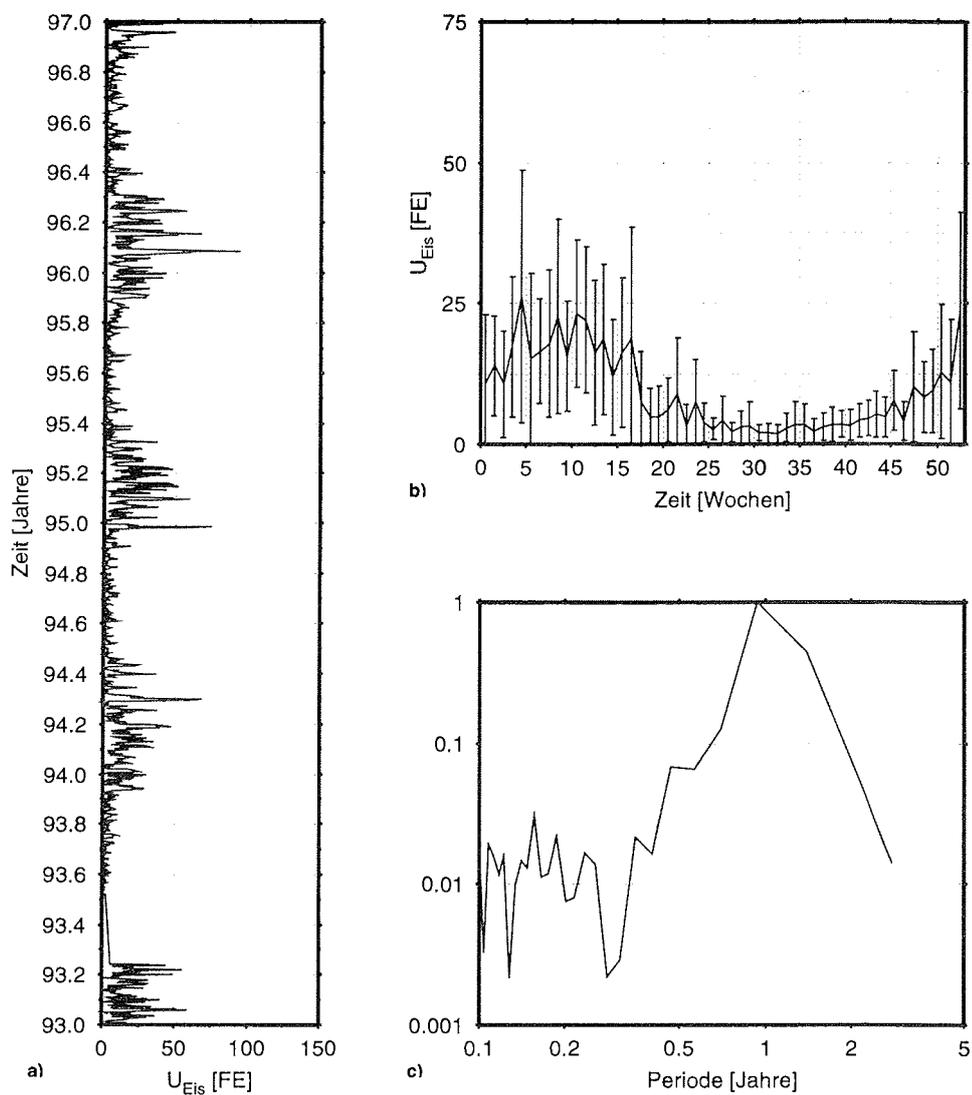


Abbildung A.21 Trajektorienbezogenes, absolutes Seegebiet, 1-Tag-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

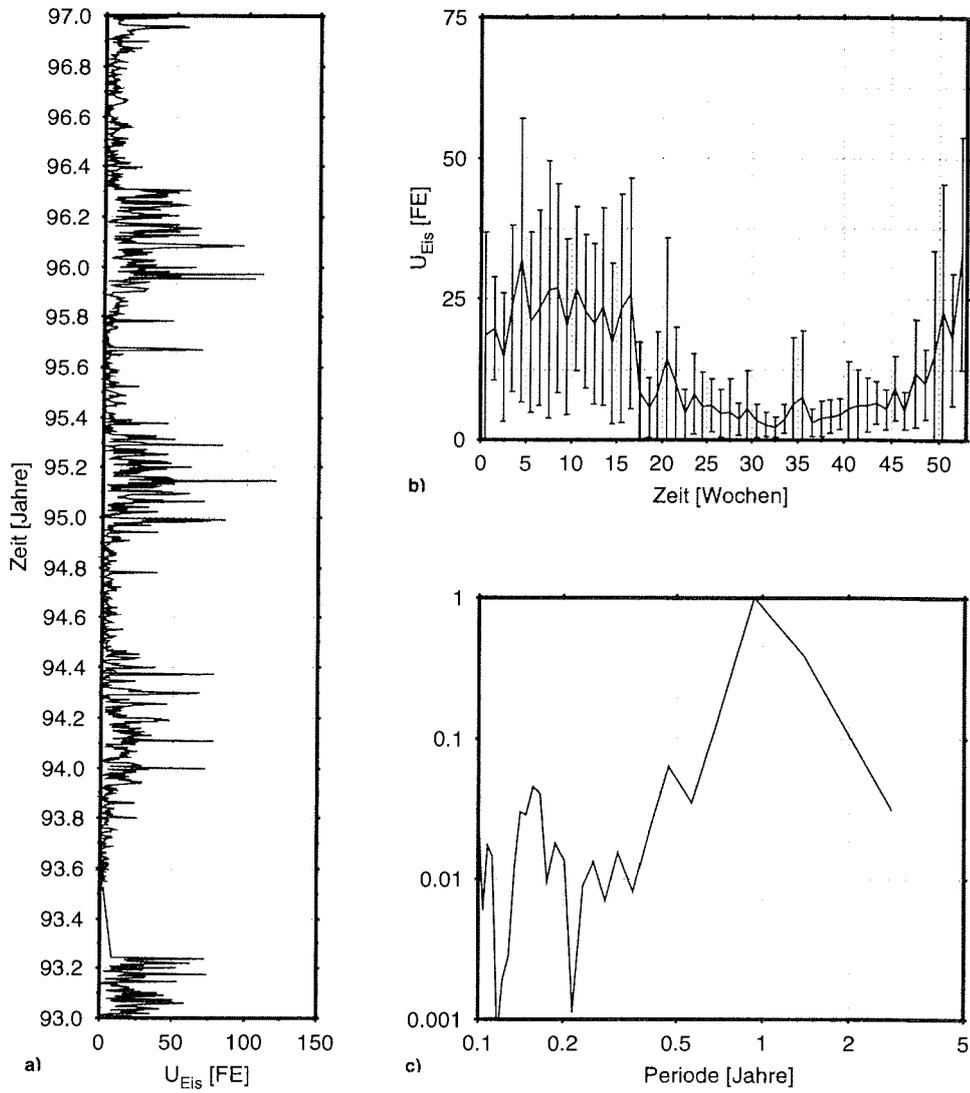


Abbildung A.22 Trajektorienbezogenes, absolutes Seegebiet, 2-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

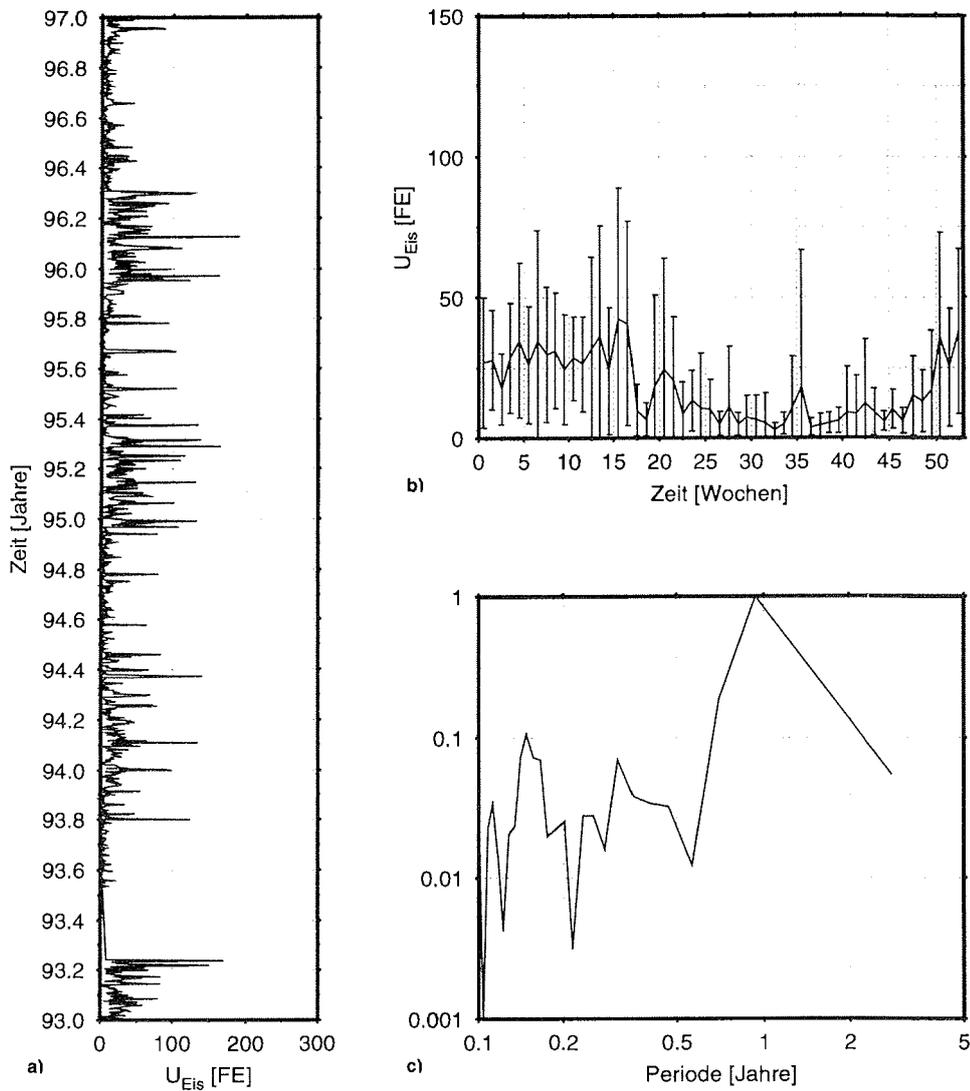


Abbildung A.23 Trajektorienbezogenes, absolutes Seegebiet, 3-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

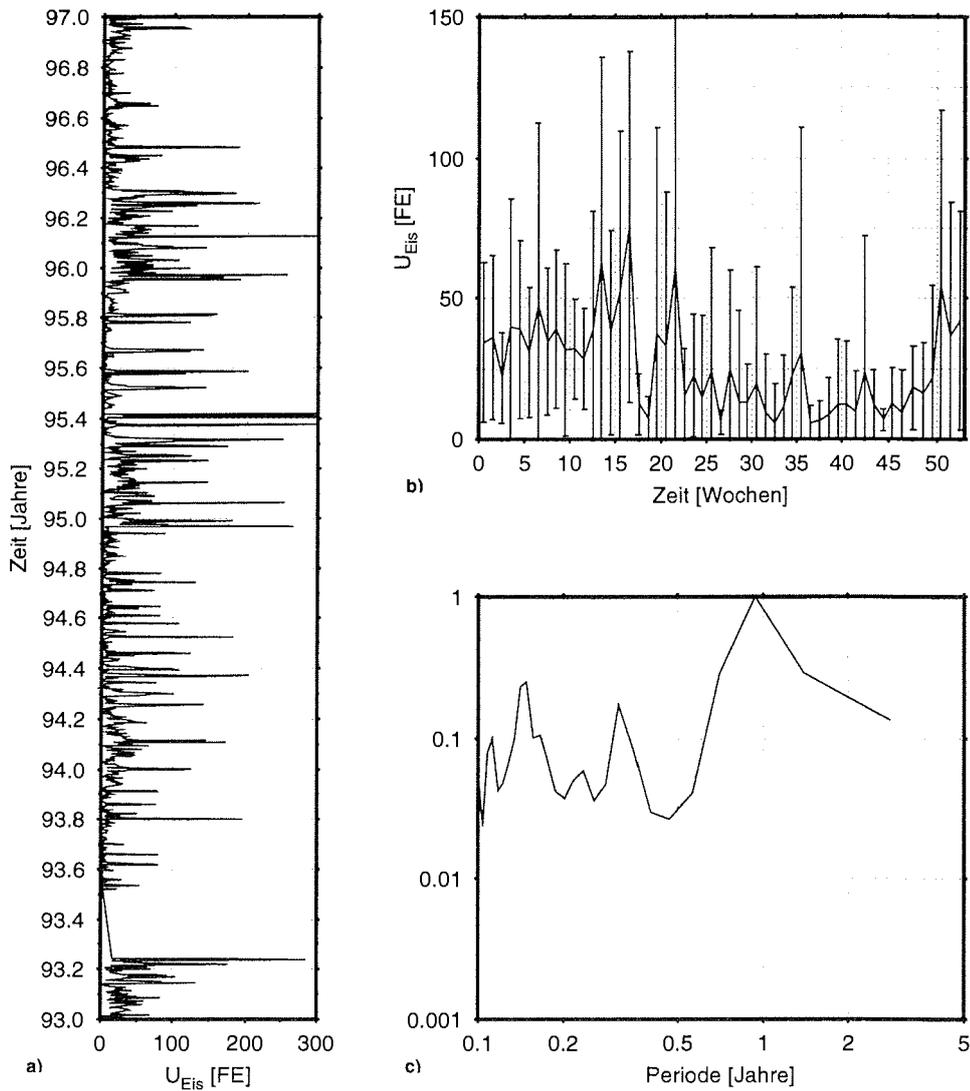


Abbildung A.24 Trajektorienbezogenes, absolutes Seegebiet, 4-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1997, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

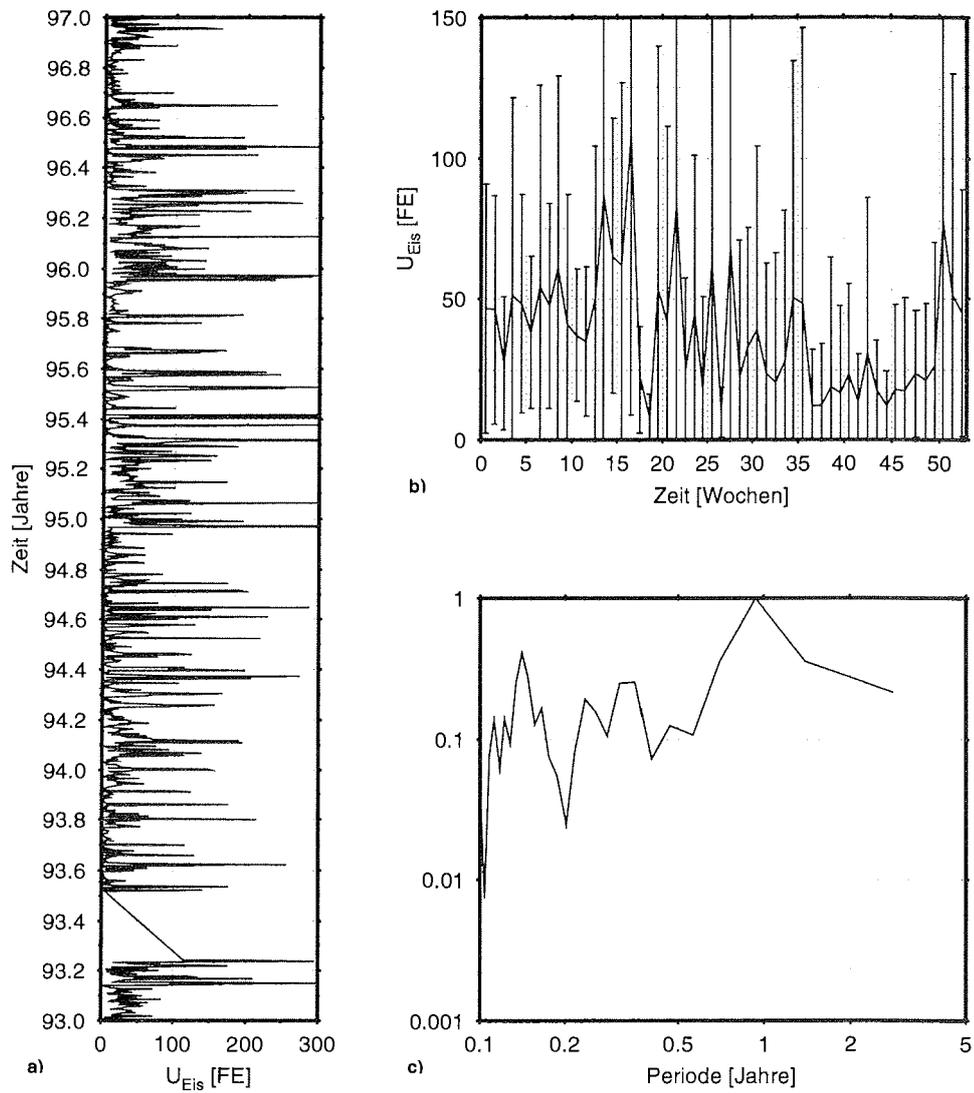


Abbildung A.25 Trajektorienbezogenes, absolutes Seegebiet, 5-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1996, a) Tagesmittelwerte, b) Jahresgang aus Wochenmittelwerten, c) Normiertes Leistungsdichtespektrum.

B. Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalysen

B.1 Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse für Seesalz-Aerosol

B.1.1 Kreuzkorrelation von Seesalz-Aerosol mit Meereisbedeckungen des östlichen Einzugsgebietes

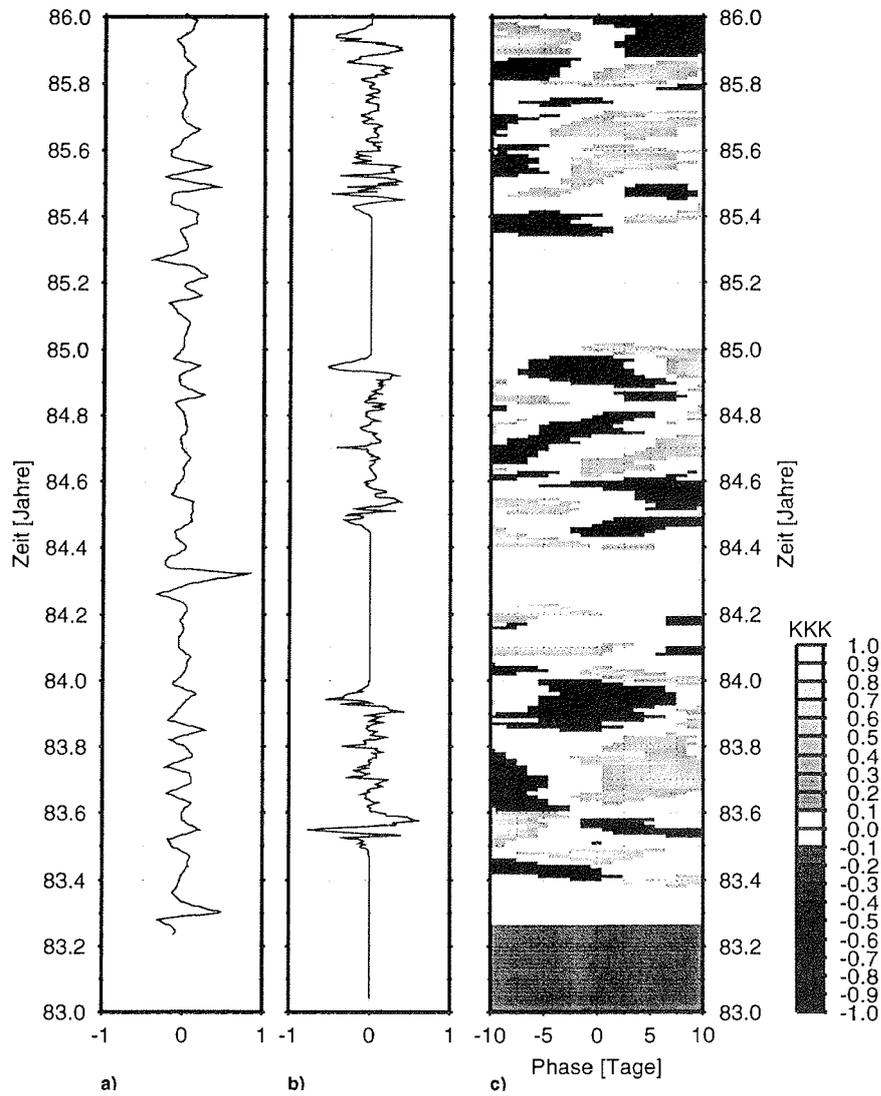


Abbildung B.1 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 100 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

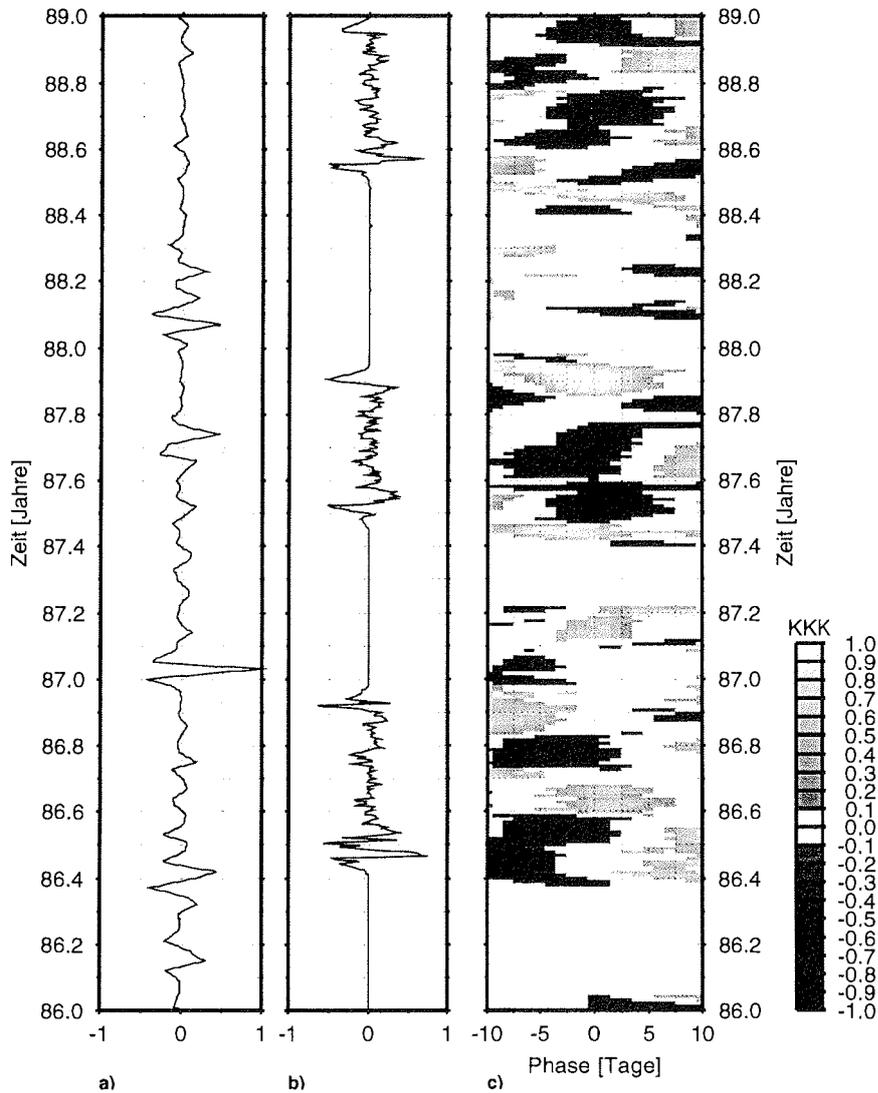


Abbildung B.2 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 100 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

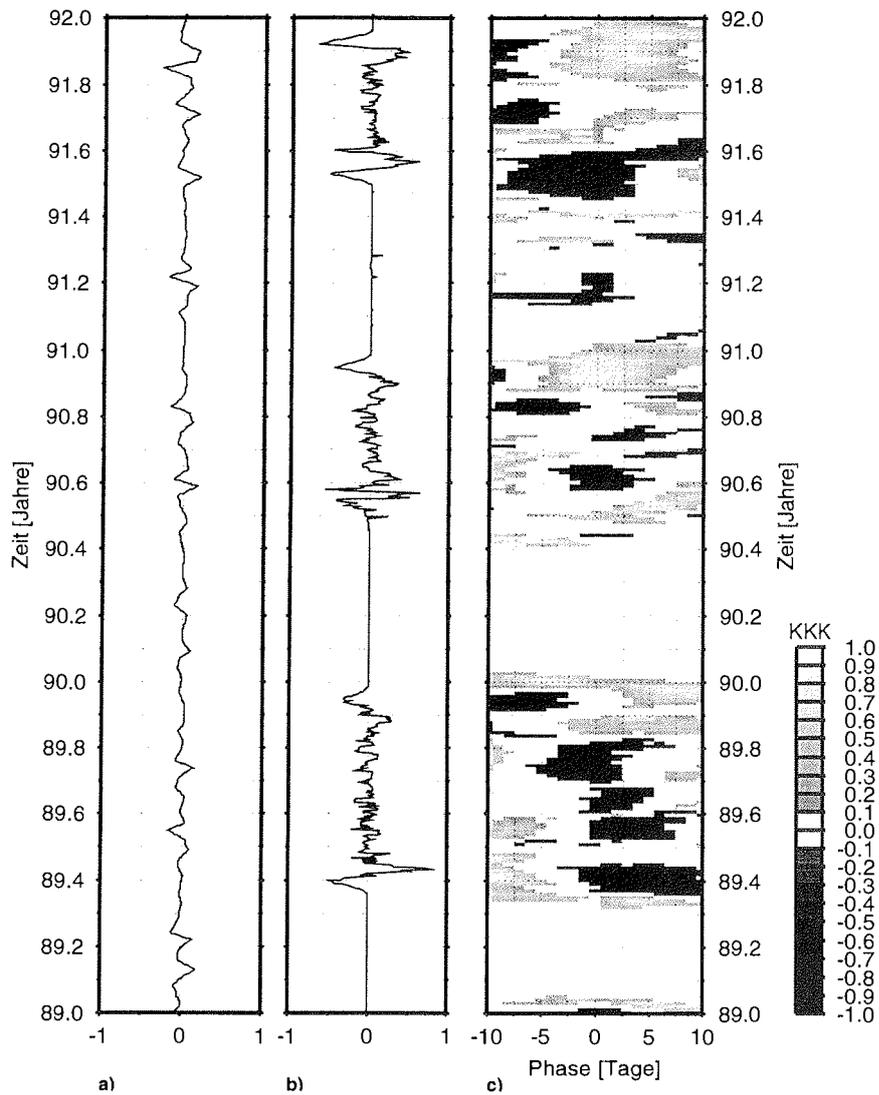


Abbildung B.3 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 100 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

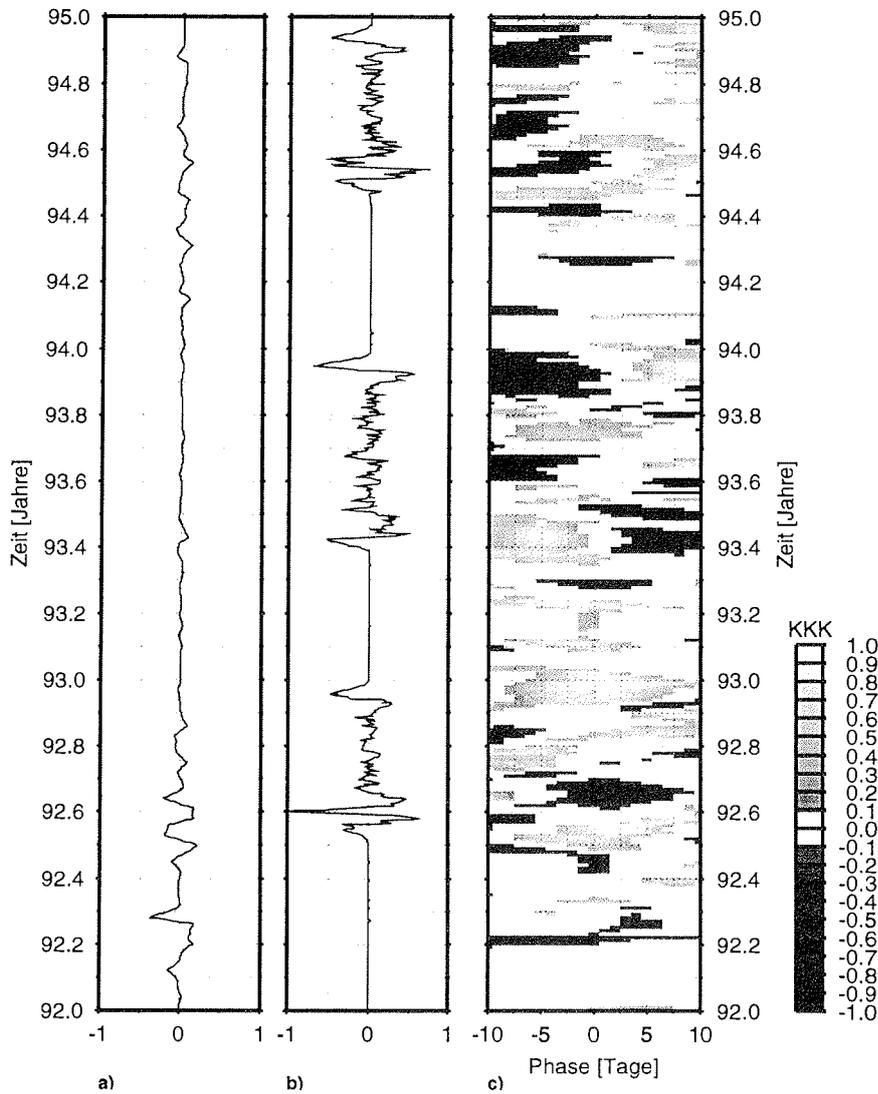


Abbildung B.4 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 100 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

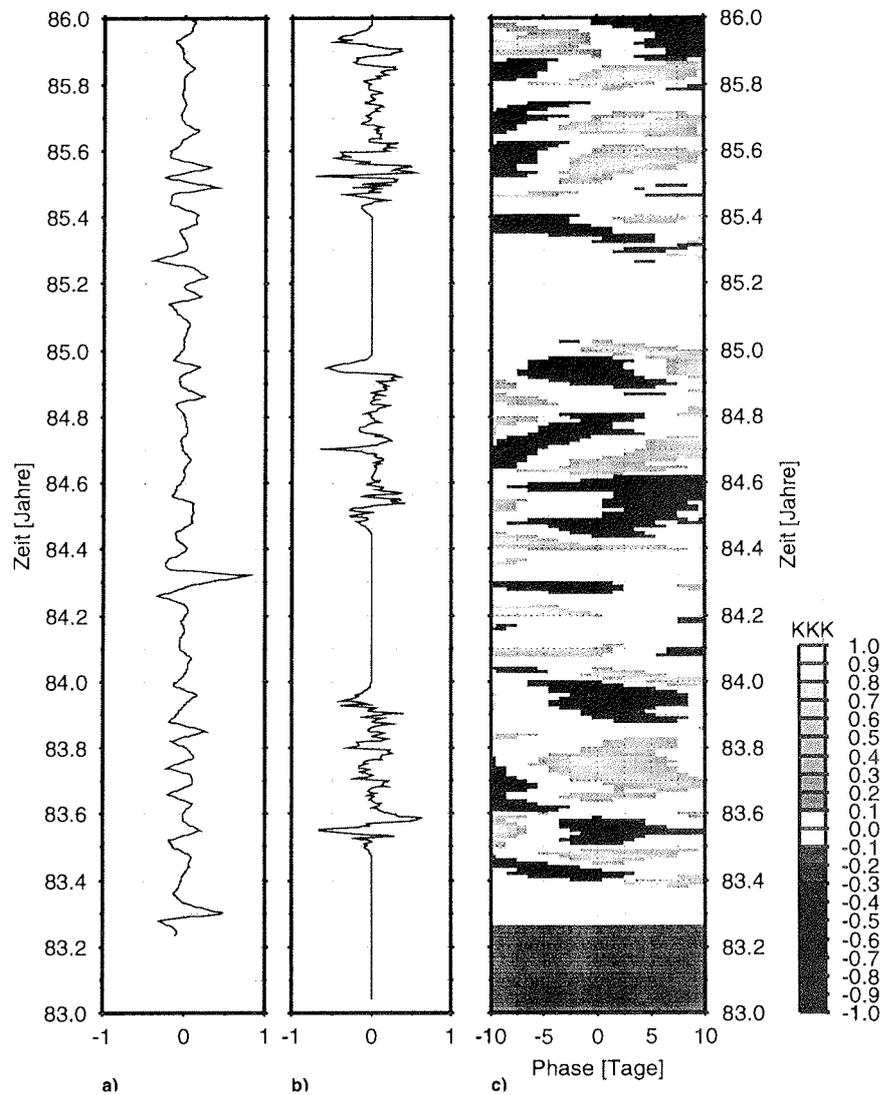


Abbildung B.5 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 200 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

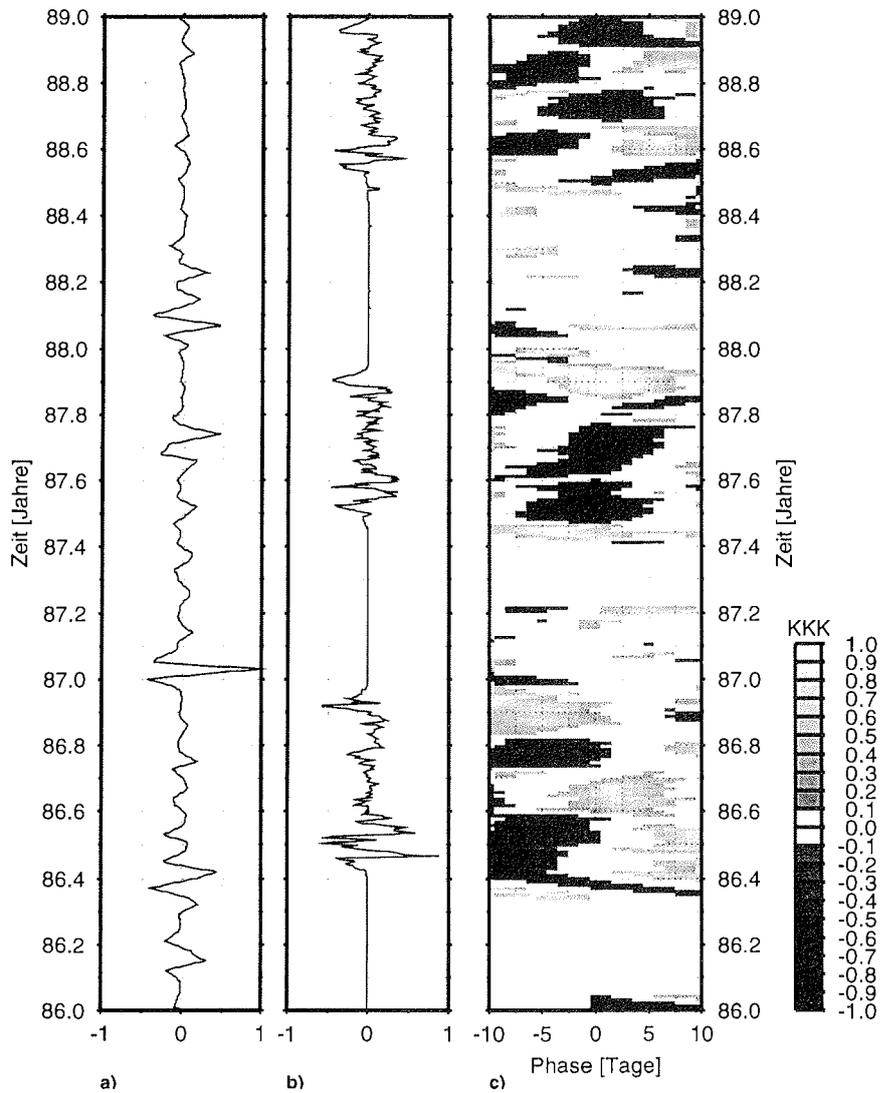


Abbildung B.6 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 200 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

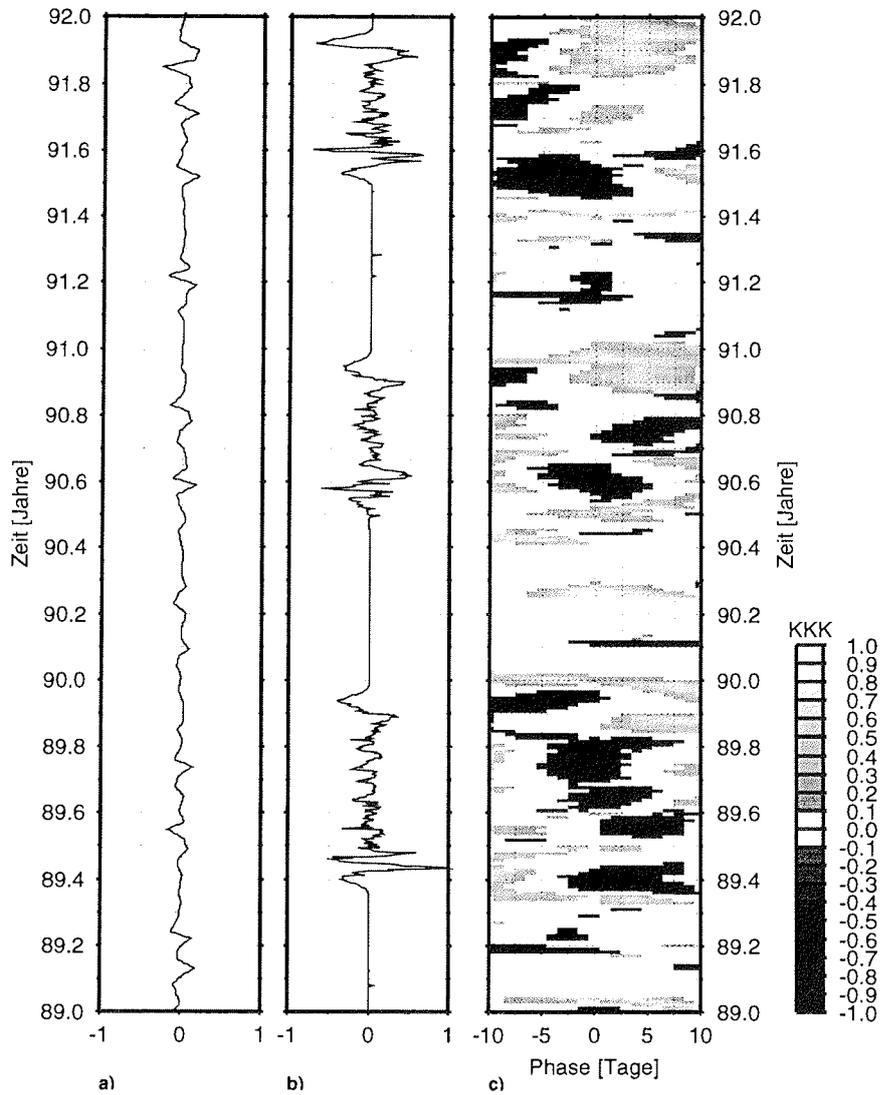


Abbildung B.7 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 200 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

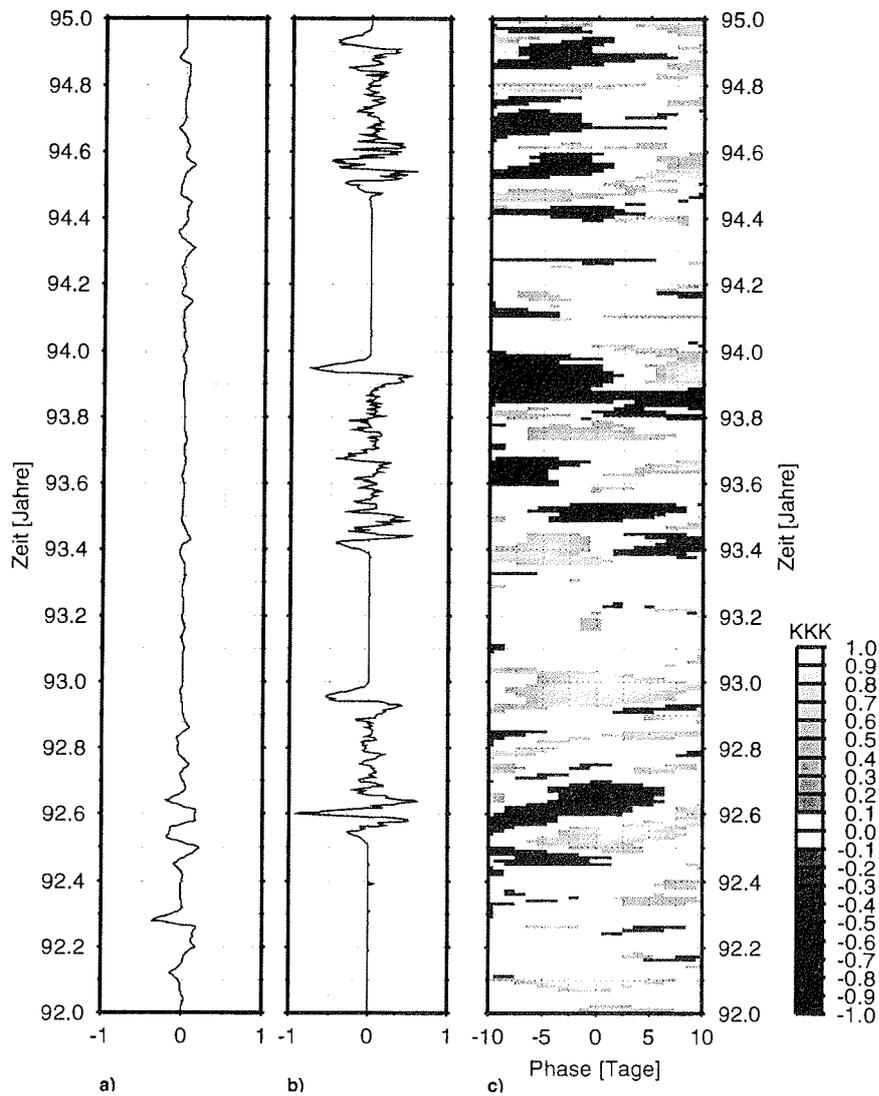


Abbildung B.8 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 200 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

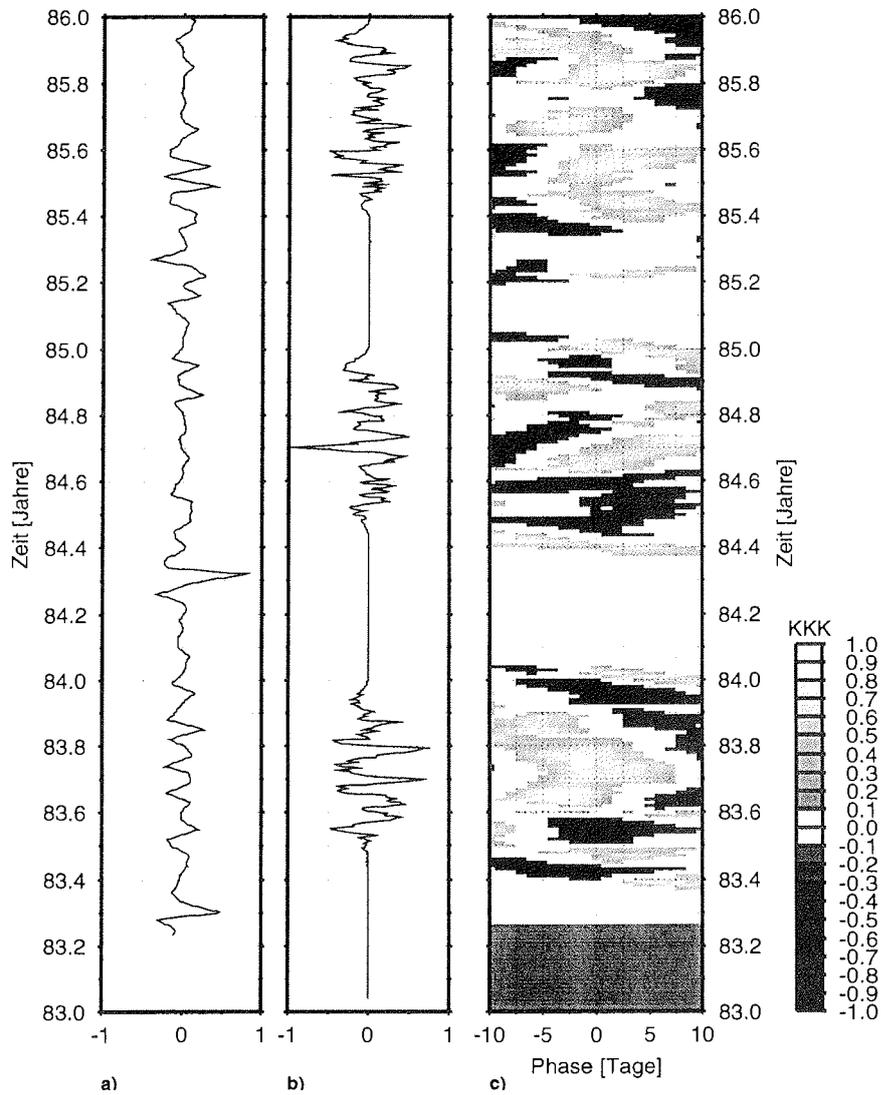


Abbildung B.9 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 400 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

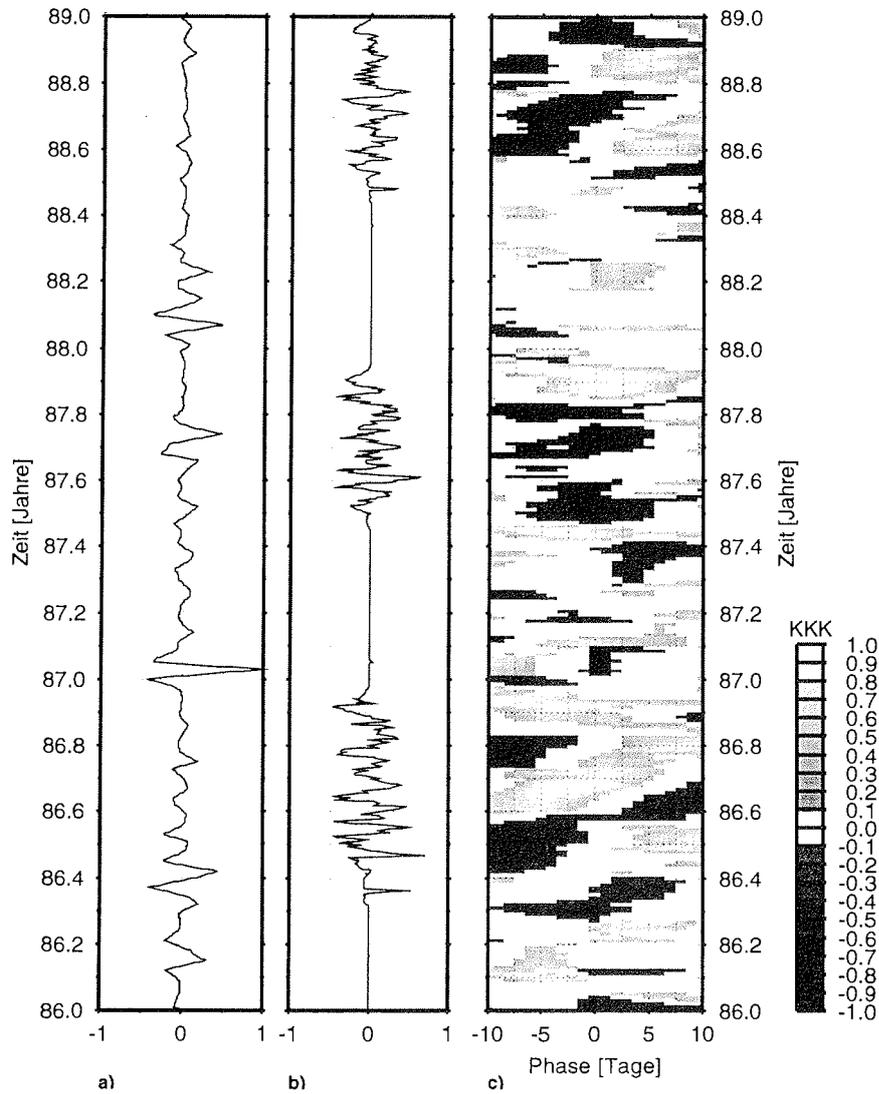


Abbildung B.10 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 400 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

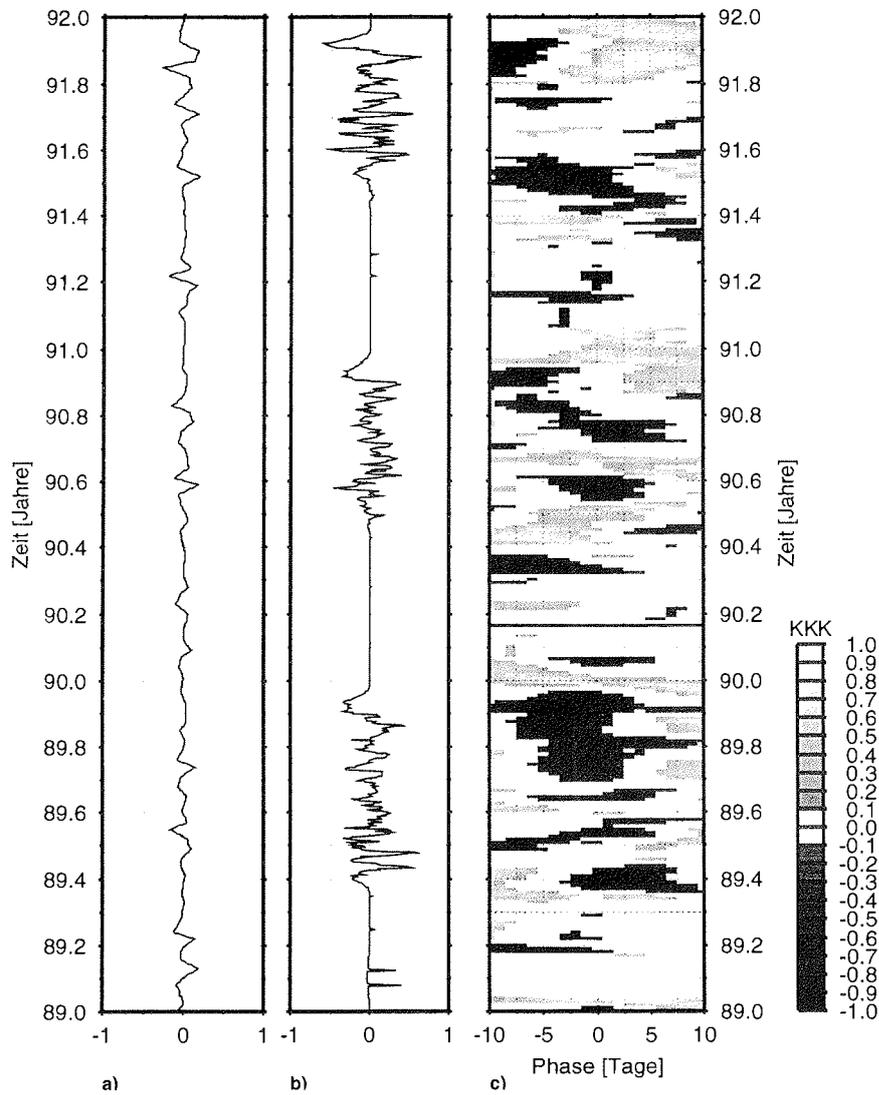


Abbildung B.11 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 400 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

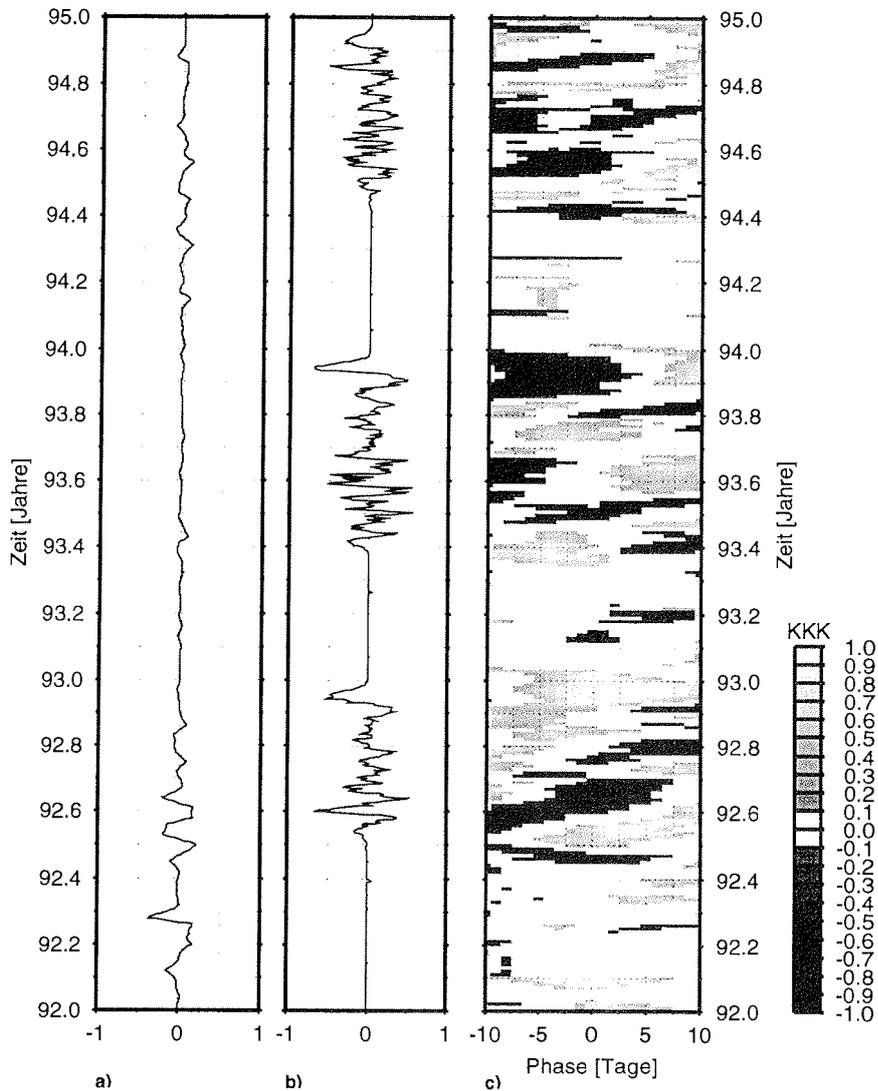


Abbildung B.12 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 400 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

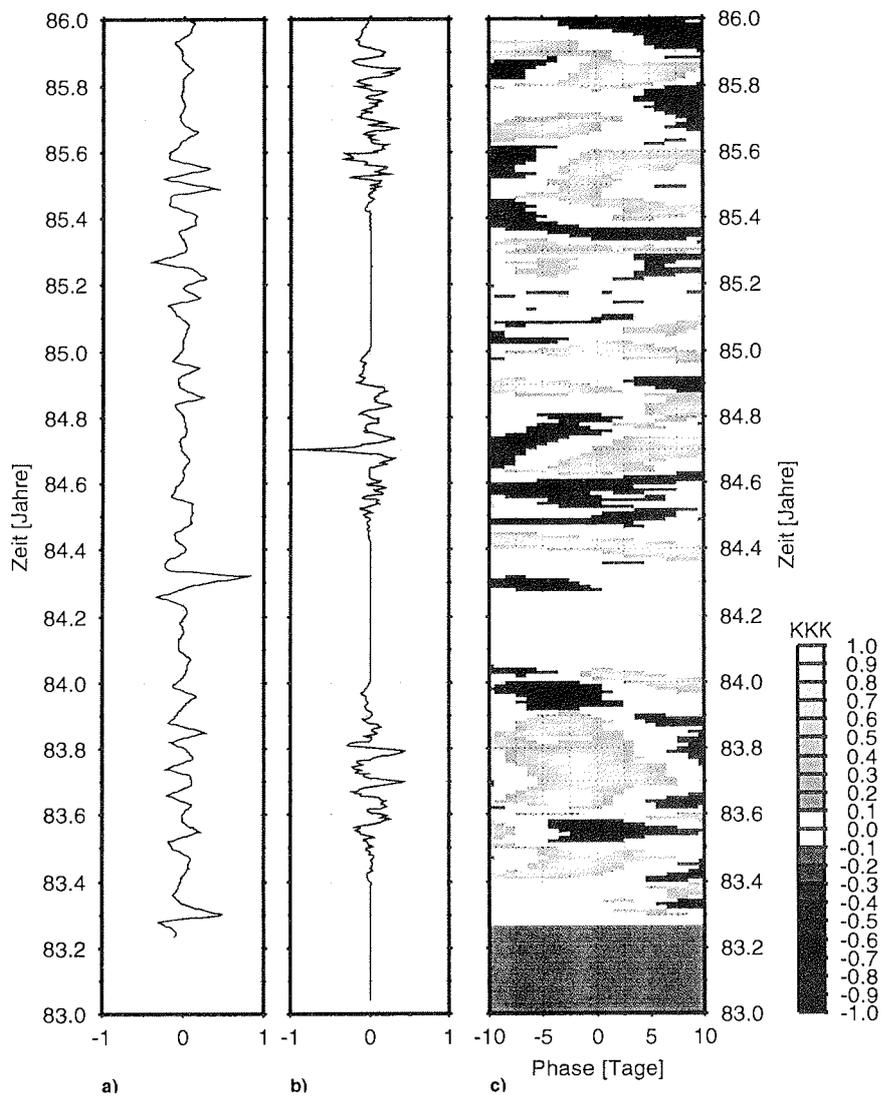


Abbildung B.13 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 800 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

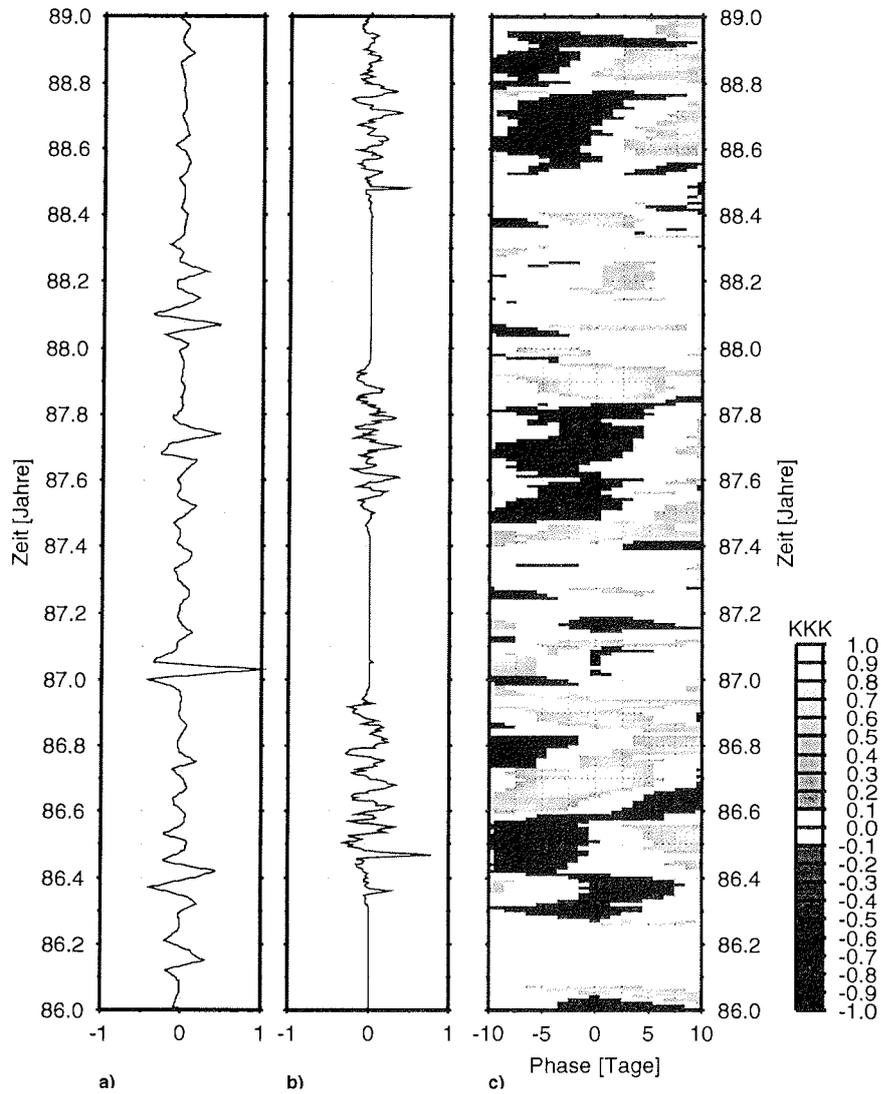


Abbildung B.14 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 800 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

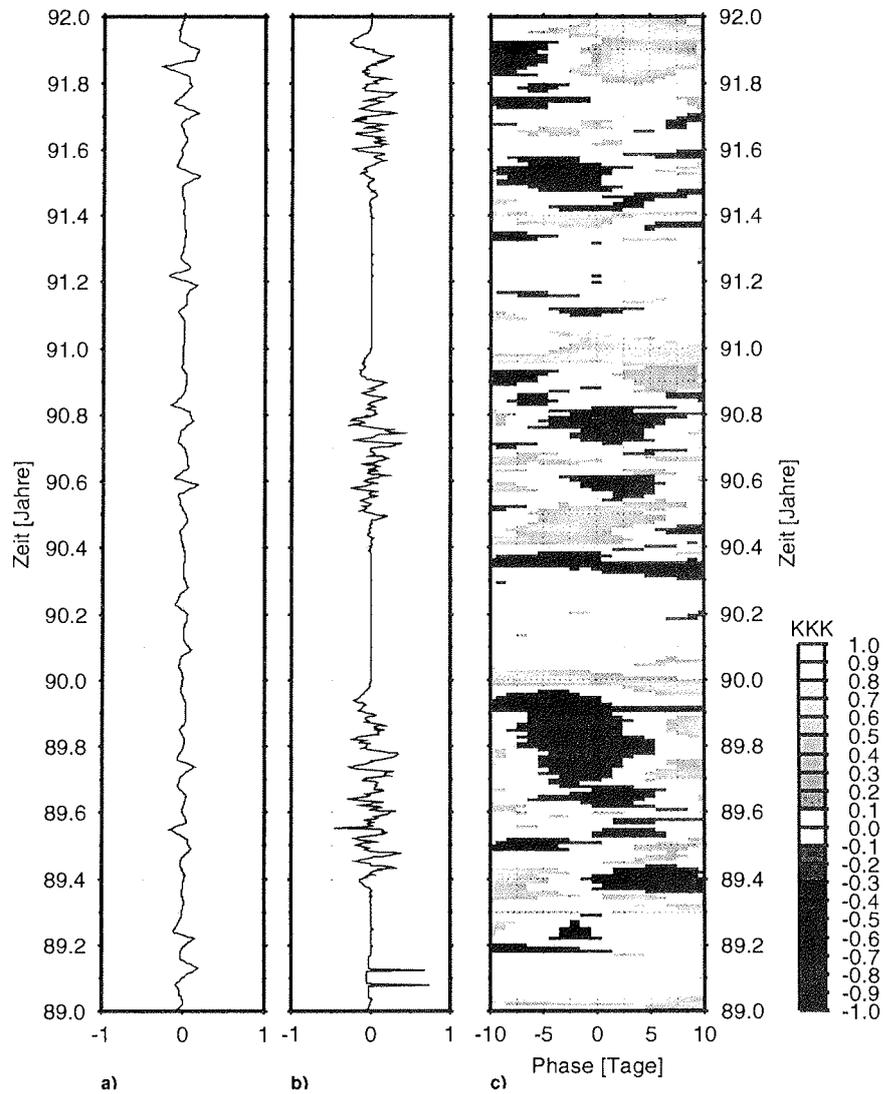


Abbildung B.15 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 800 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

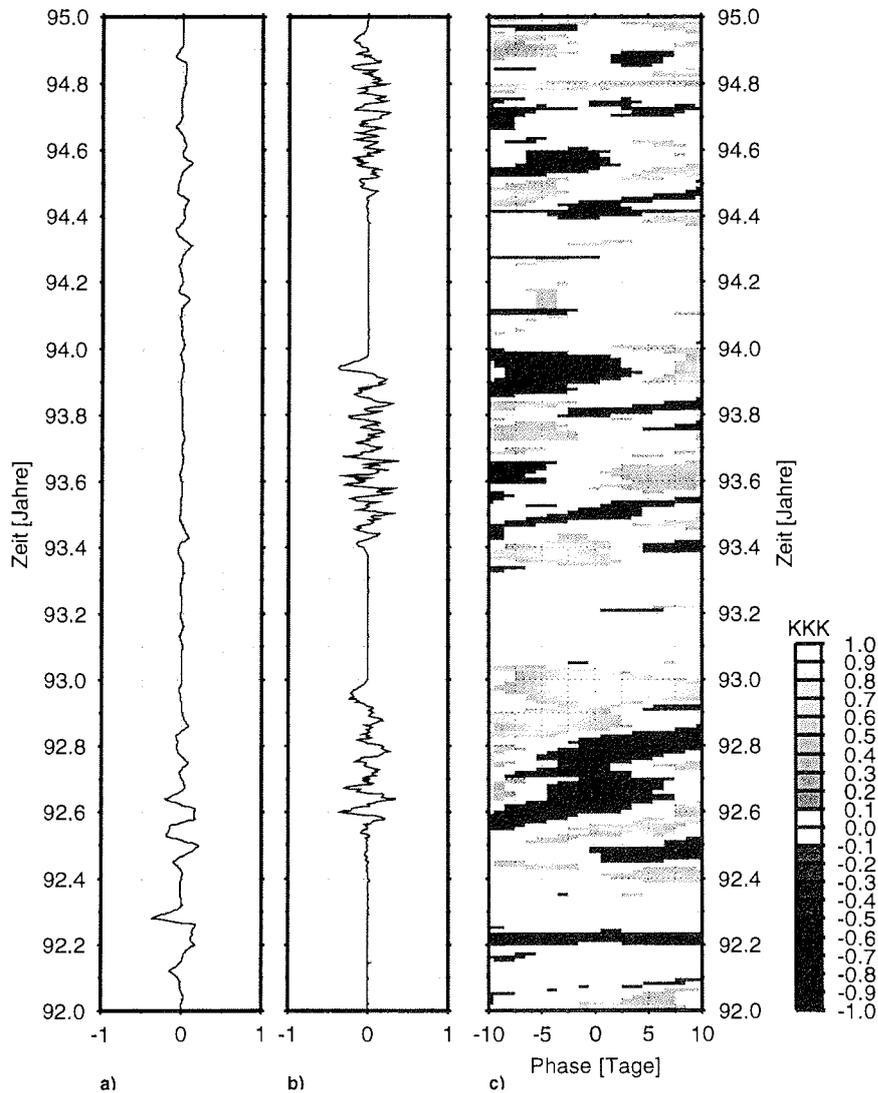


Abbildung B.16 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 800 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

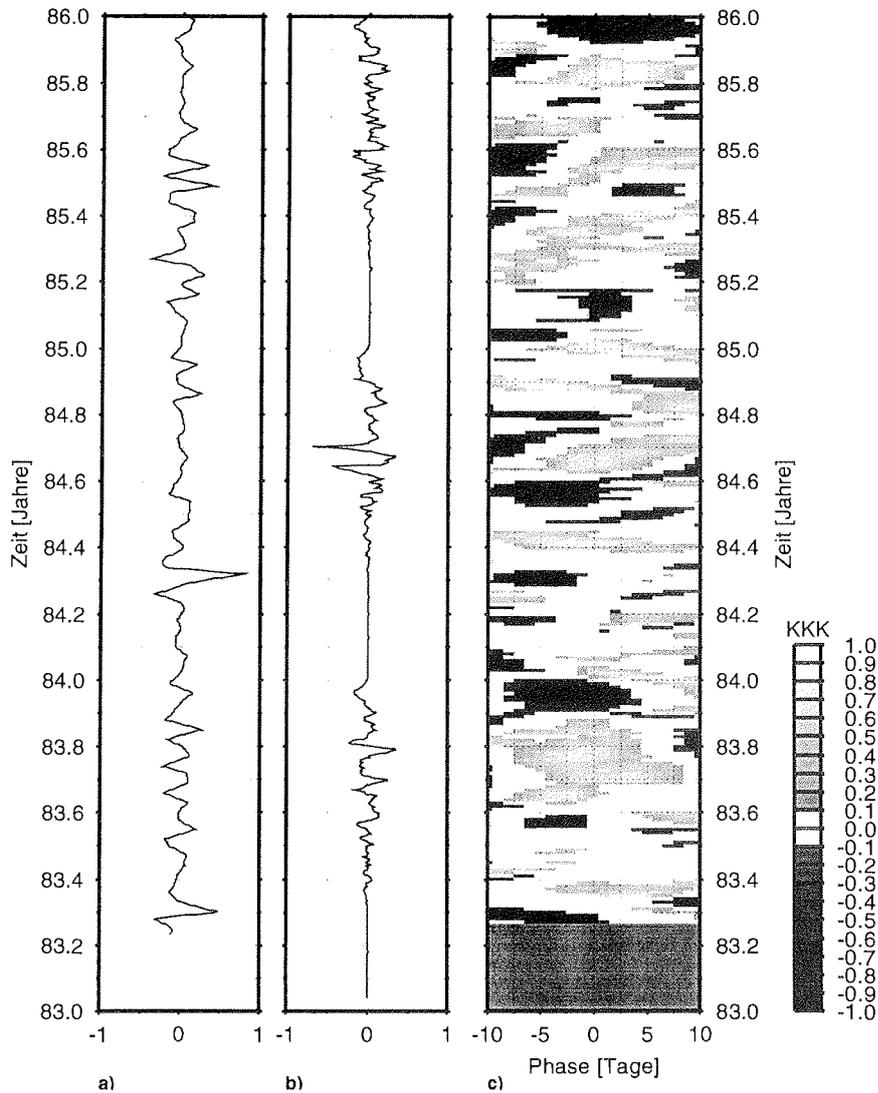


Abbildung B.17 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 1600 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

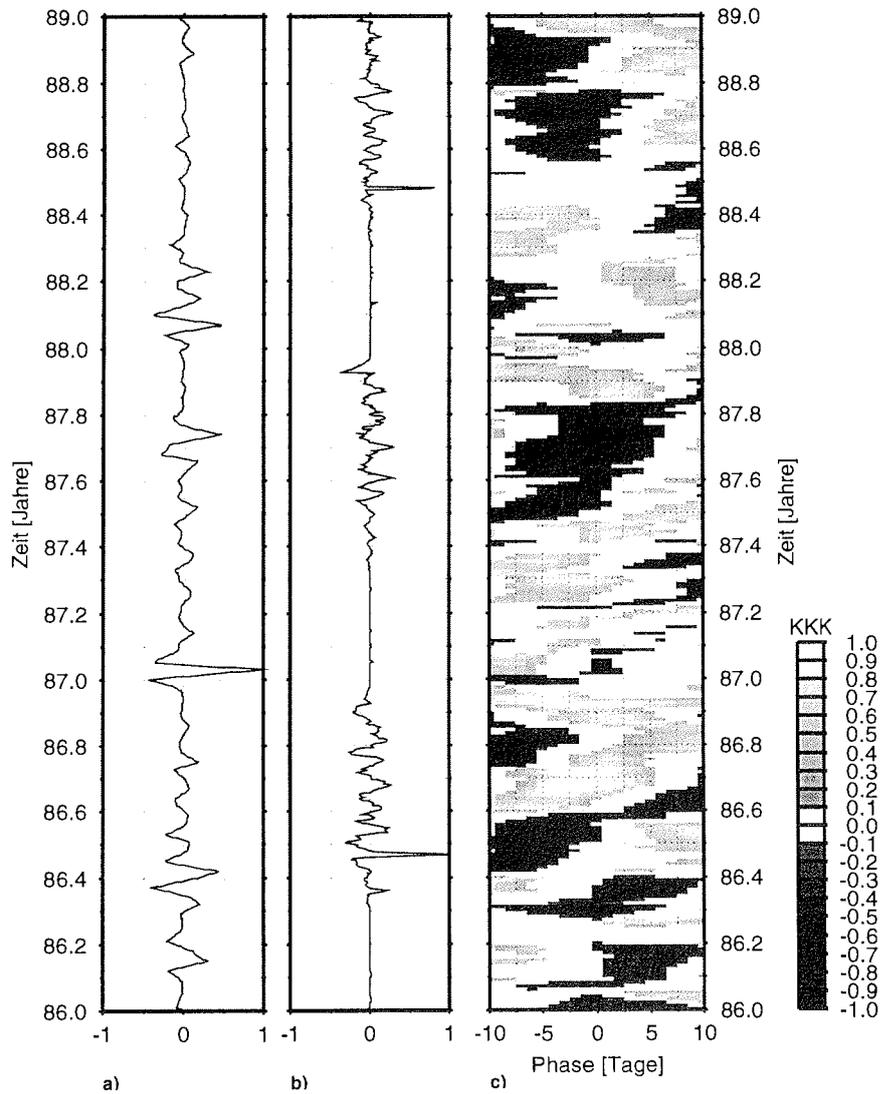


Abbildung B.18 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 1600 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

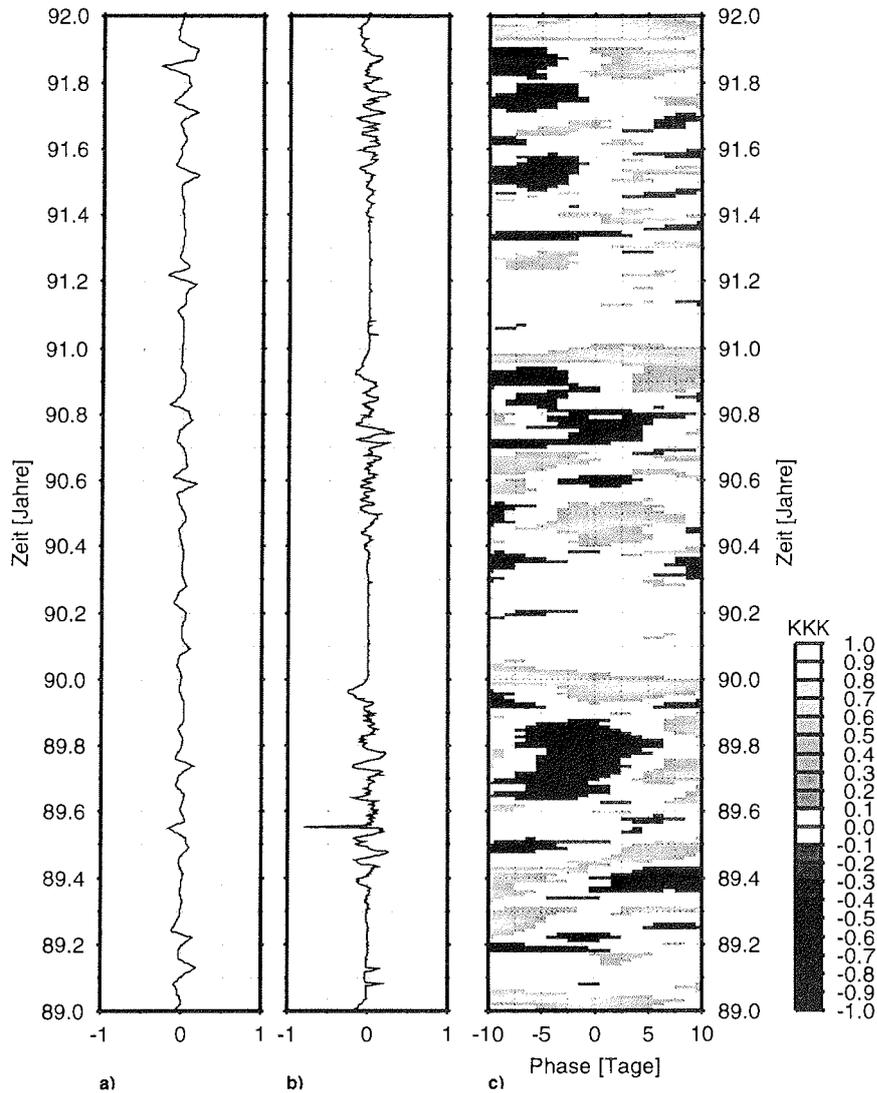


Abbildung B.19 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 1600 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

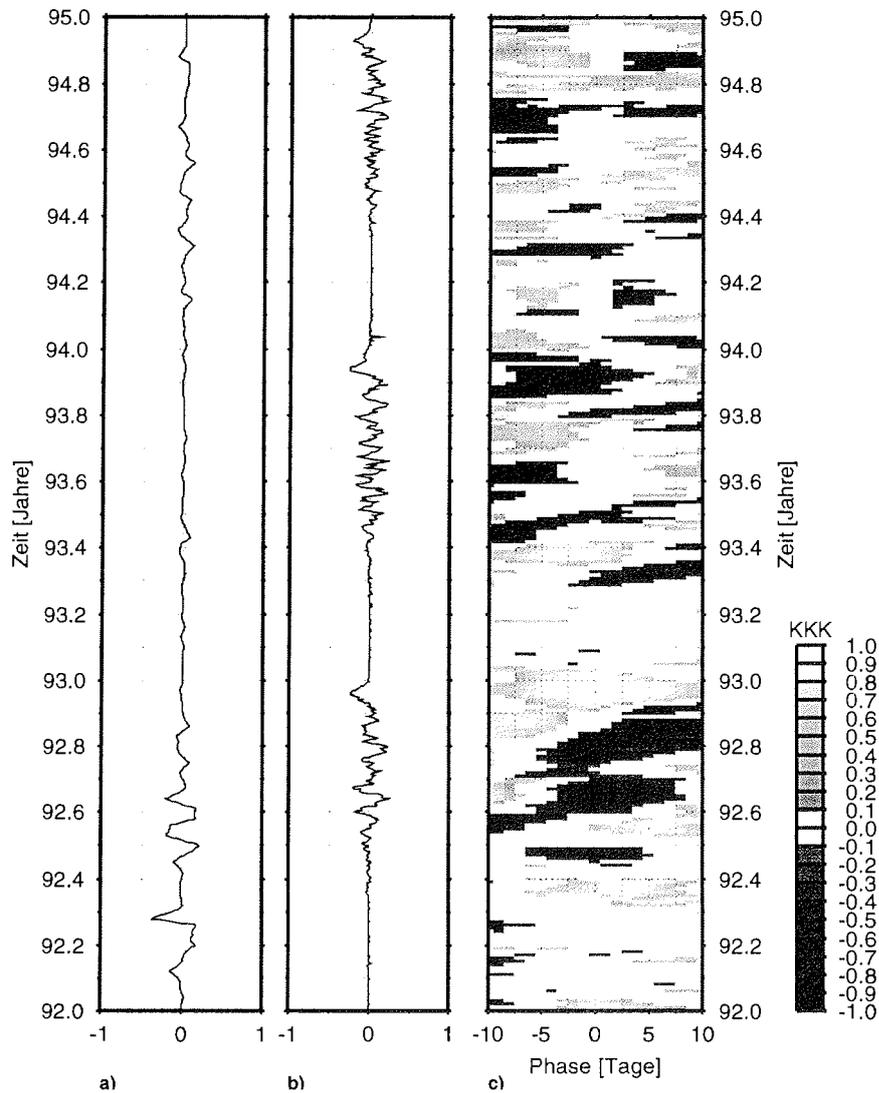


Abbildung B.20 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im östlichen Einzugsgebiet, Segment 1600 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

B.1.2 Kreuzkorrelation von Seesalz-Aerosol mit Meereisbedeckungen des westlichen Einzugsgebietes

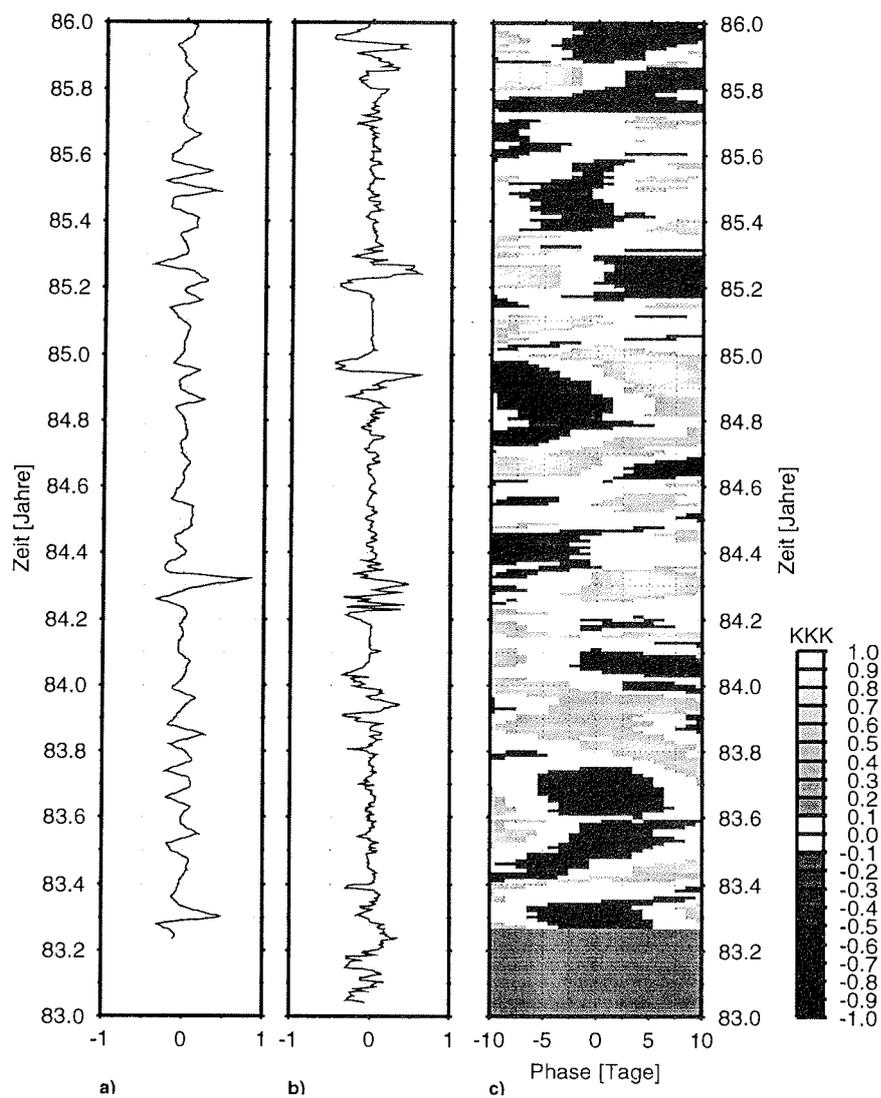


Abbildung B.21 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 100 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

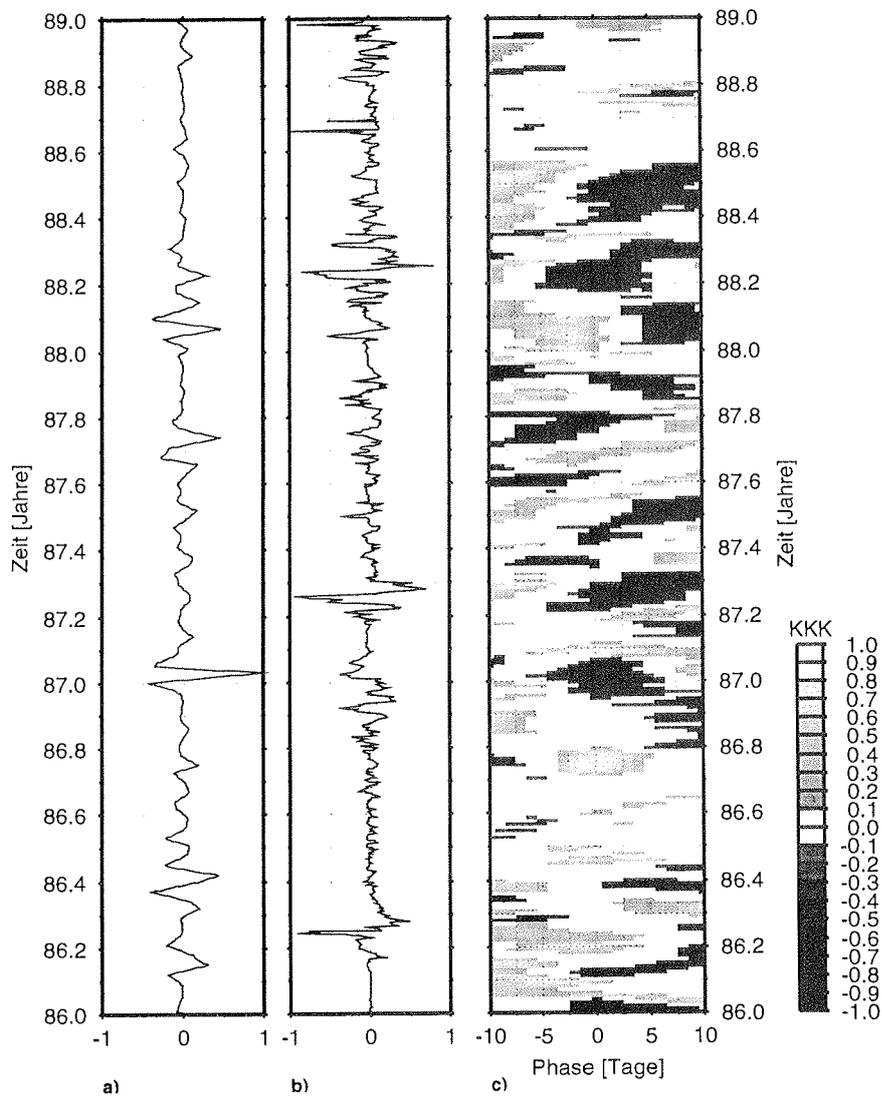


Abbildung B.22 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 100 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

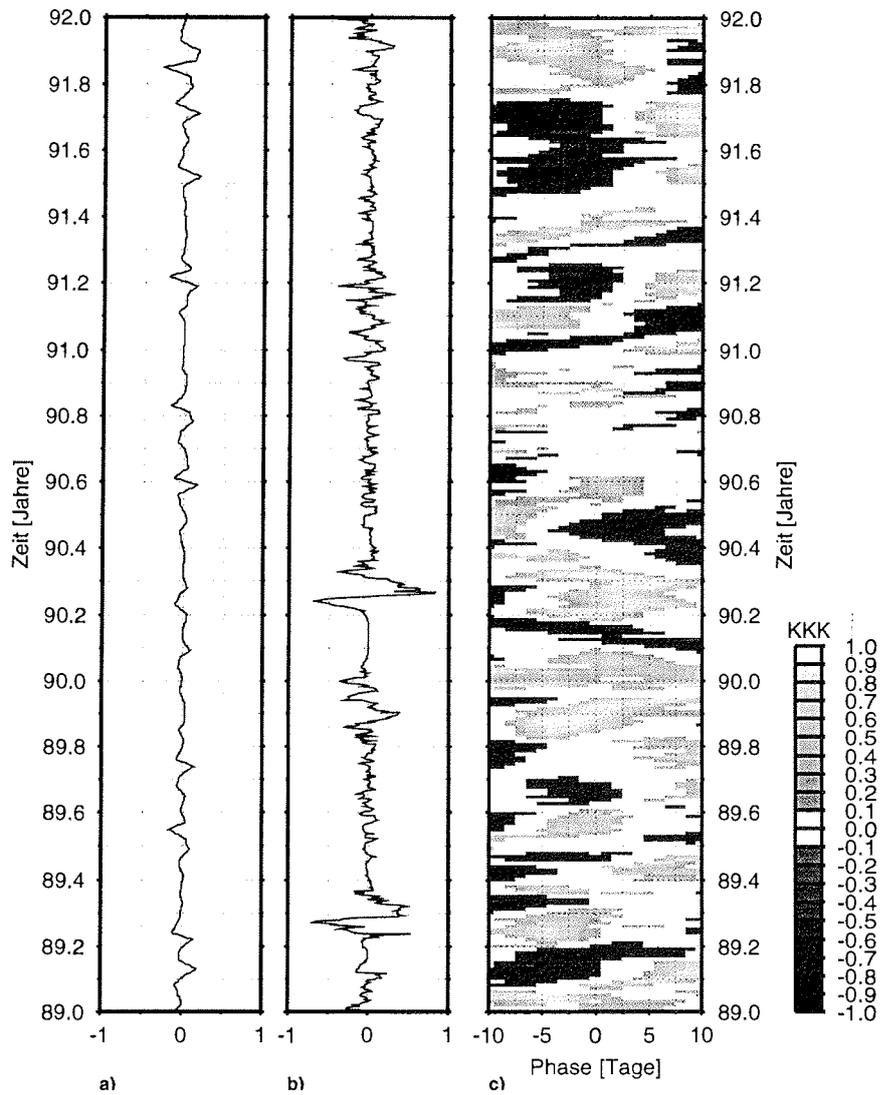


Abbildung B.23 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 100 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

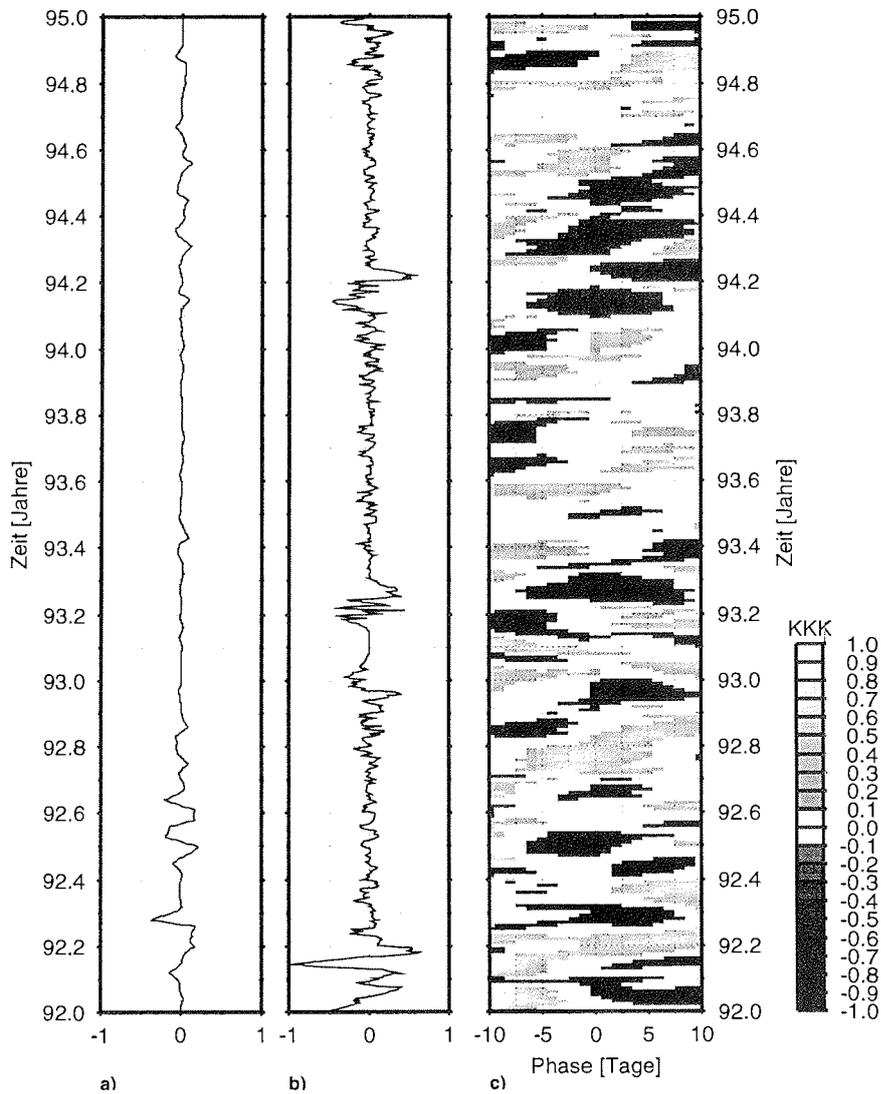


Abbildung B.24 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 100 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

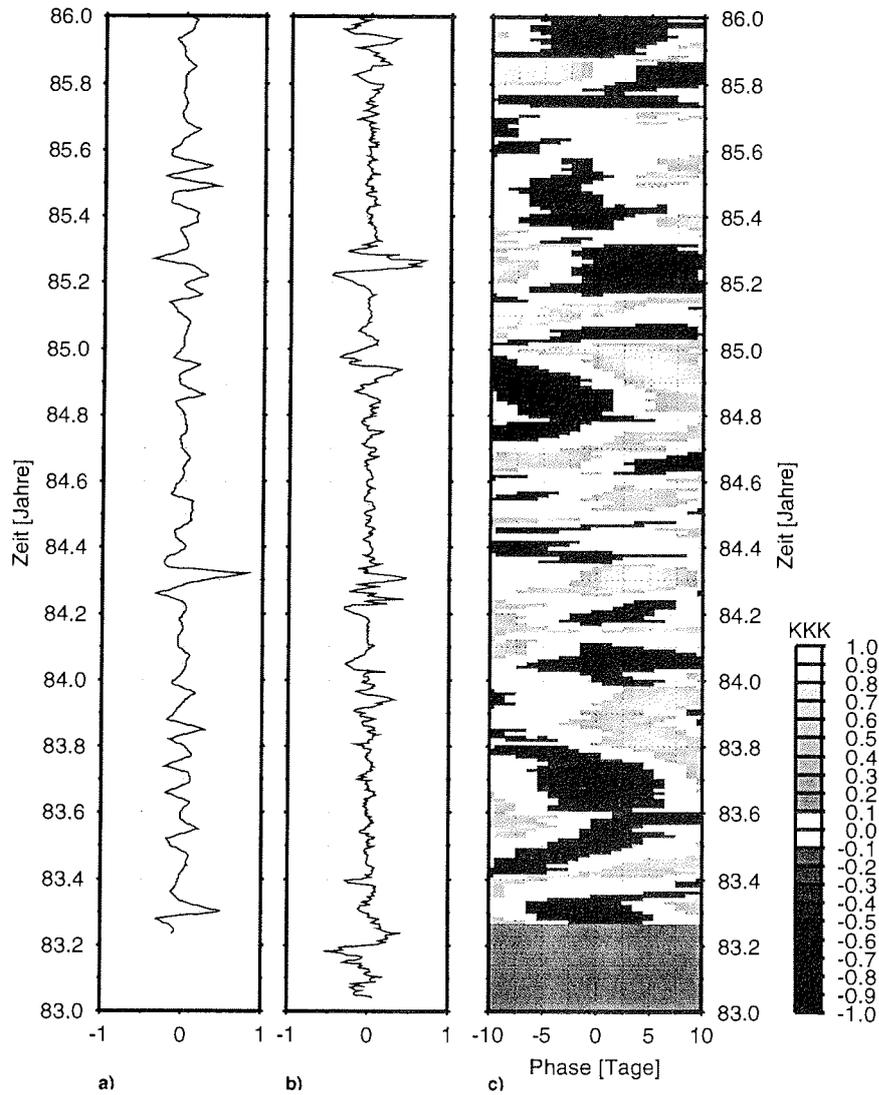


Abbildung B.25 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 200 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

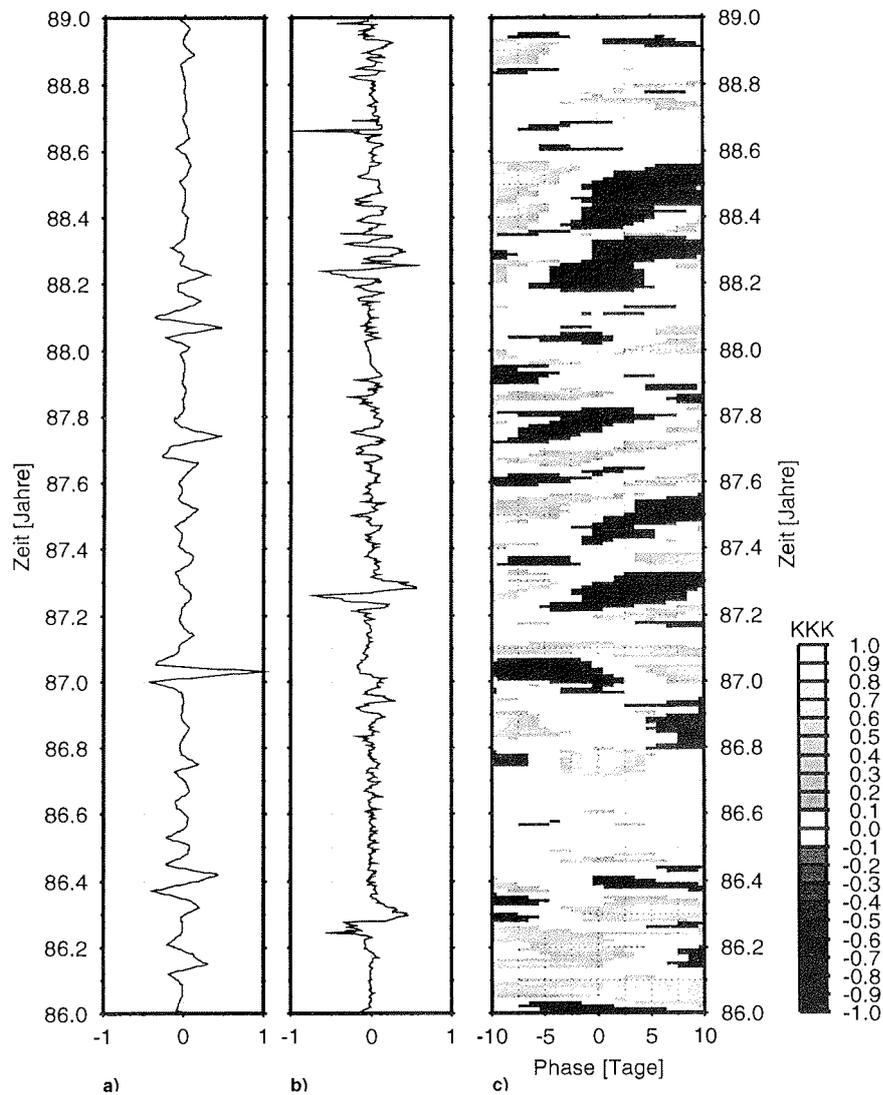


Abbildung B.26 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 200 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

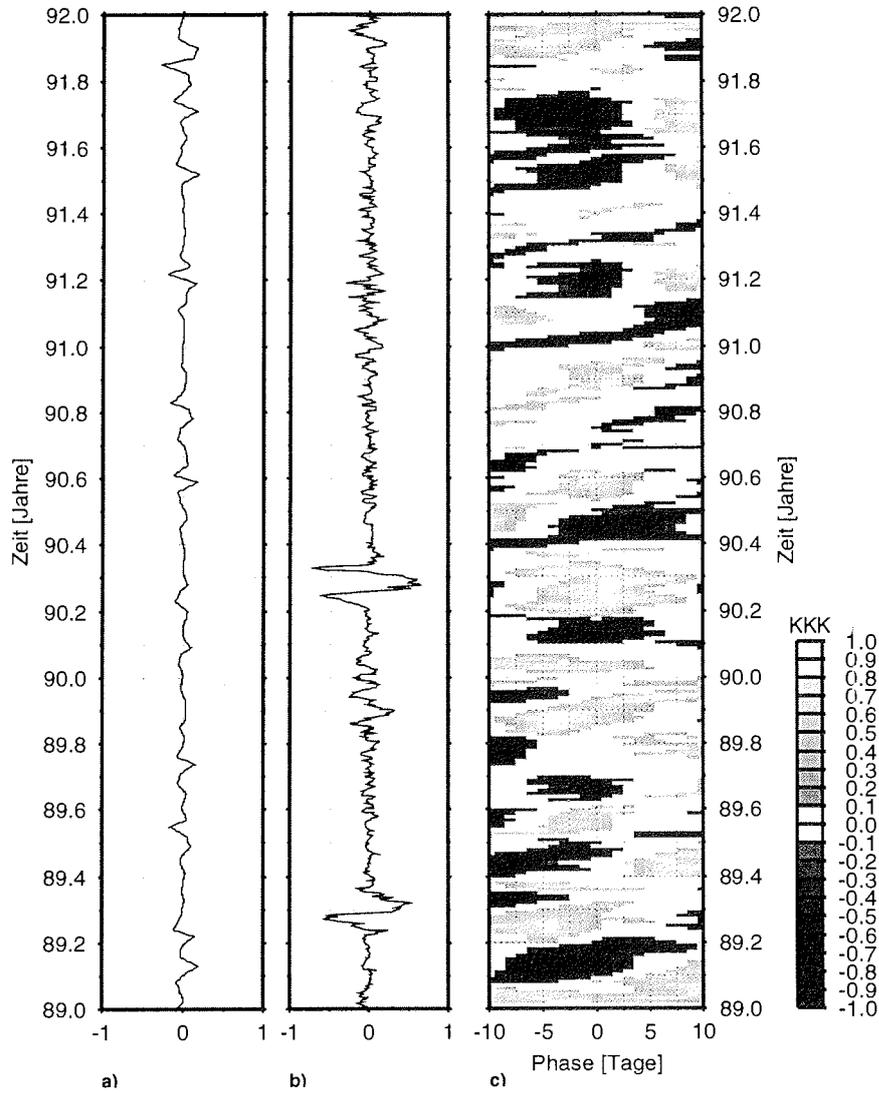


Abbildung B.27 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 200 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

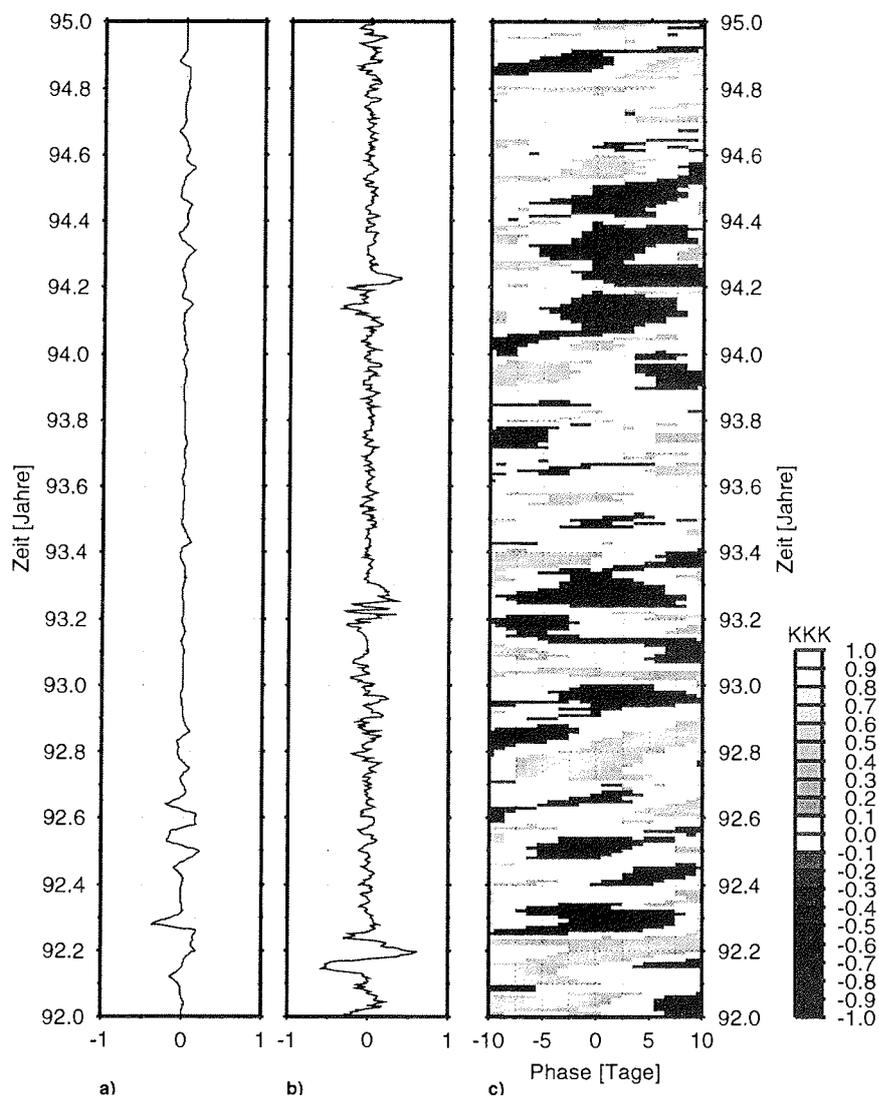


Abbildung B.28 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 200 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

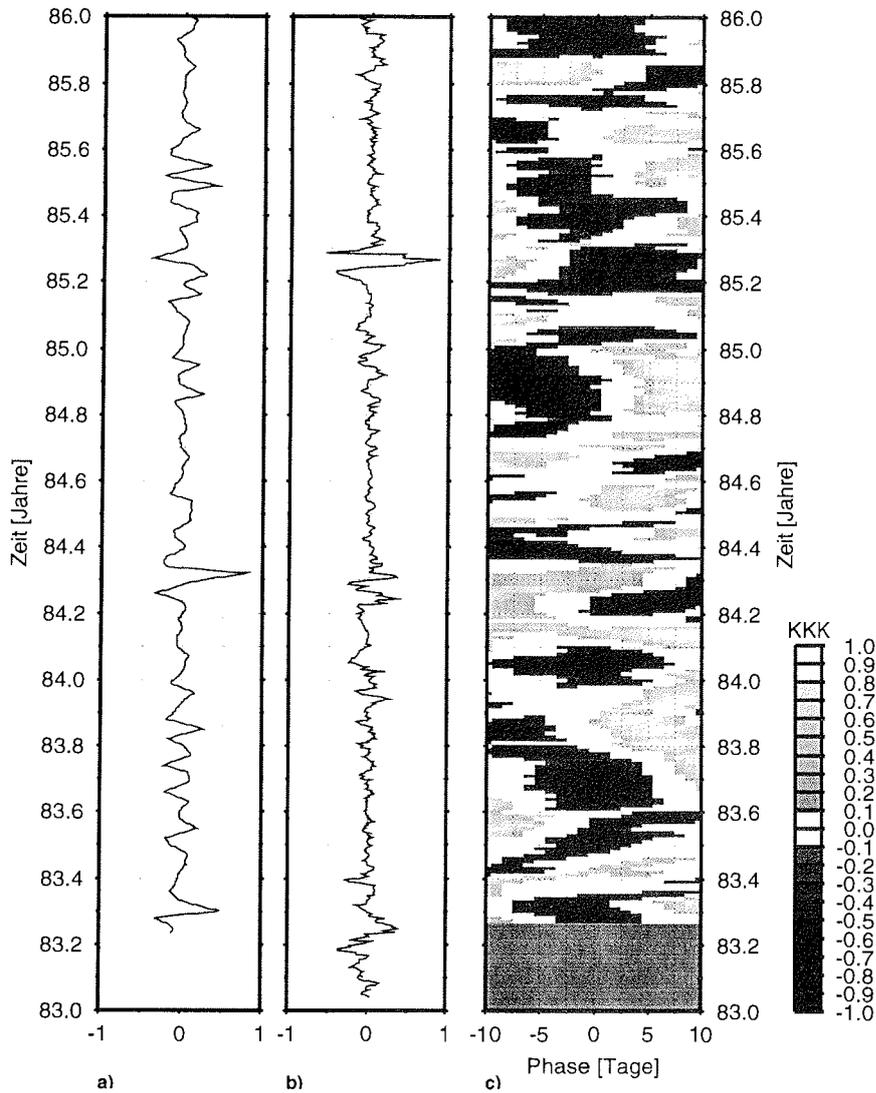


Abbildung B.29 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 400 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

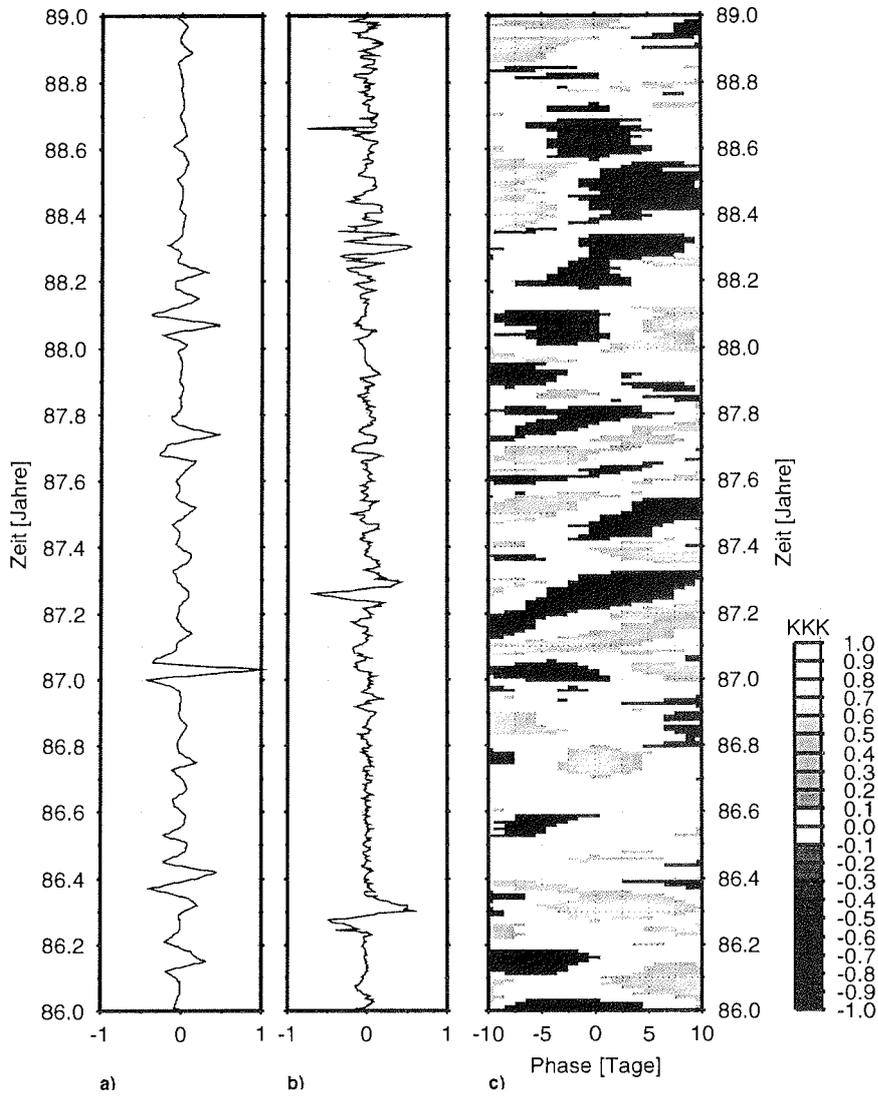


Abbildung B.30 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 400 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

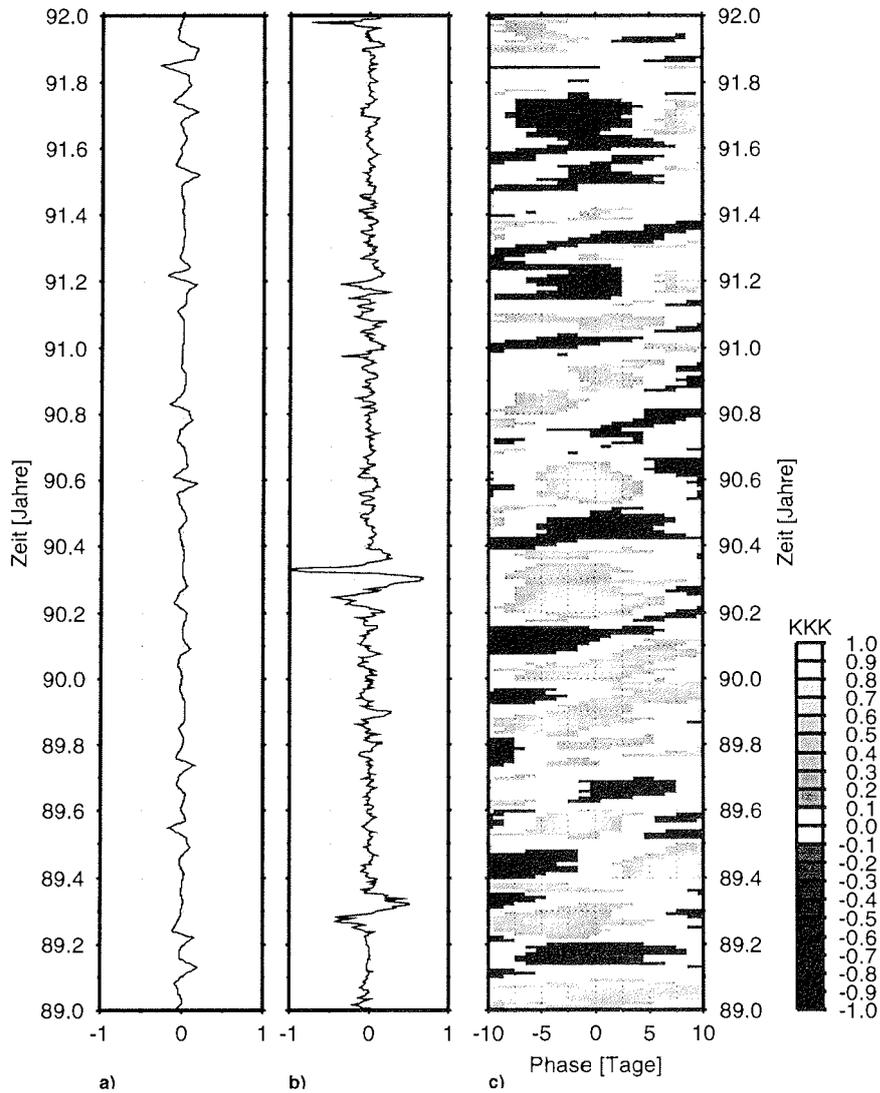


Abbildung B.31 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 400 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

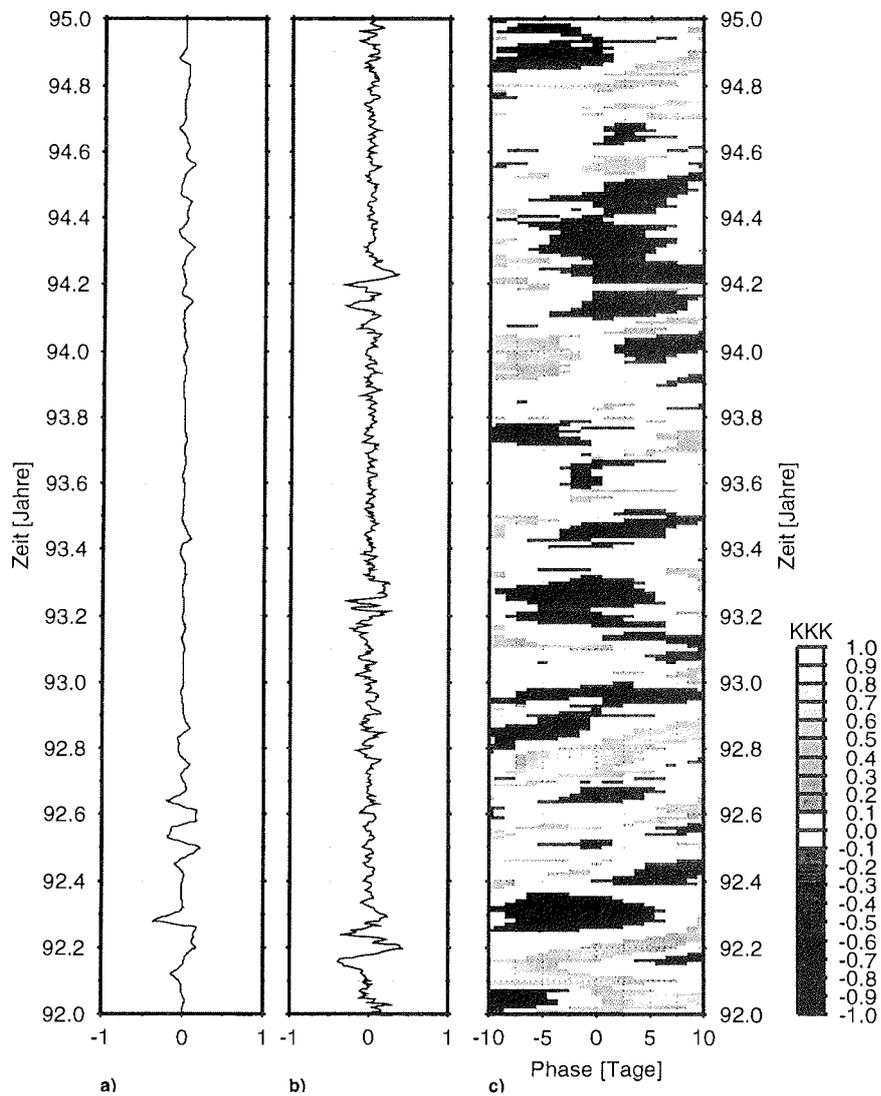


Abbildung B.32 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 400 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

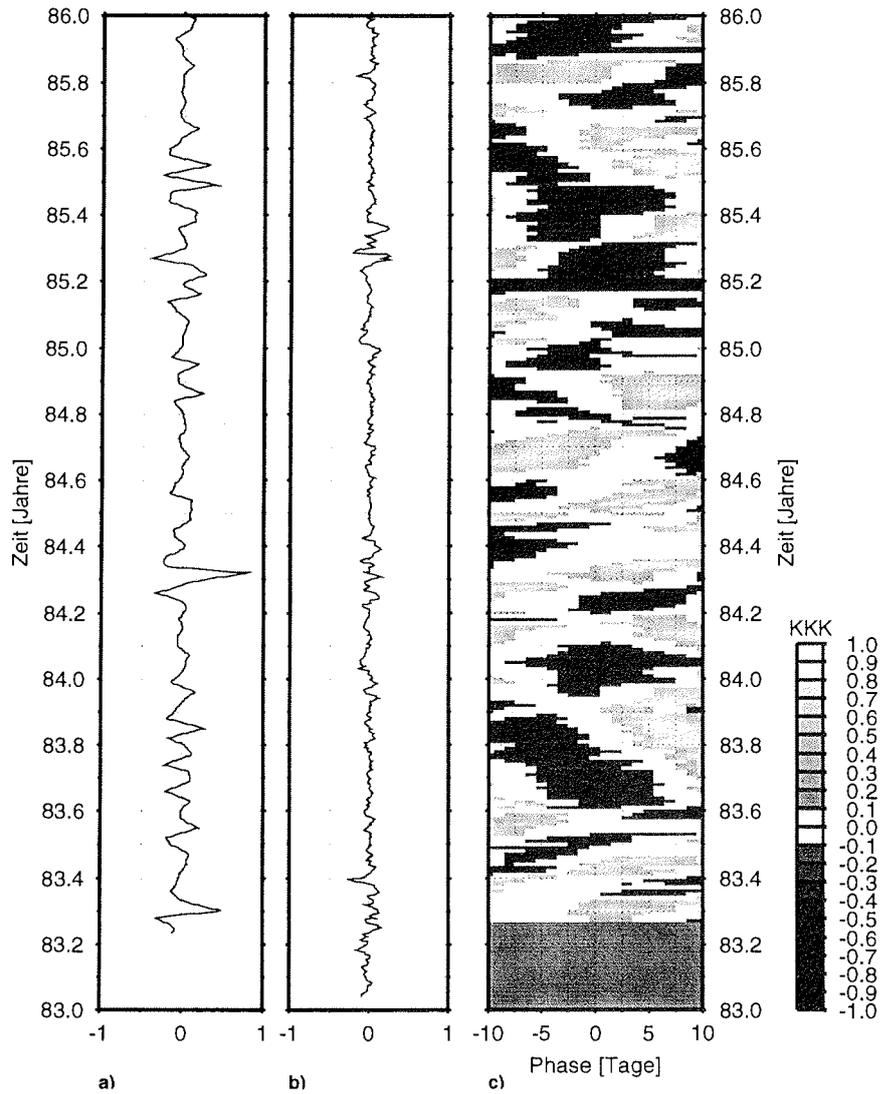


Abbildung B.33 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 800 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

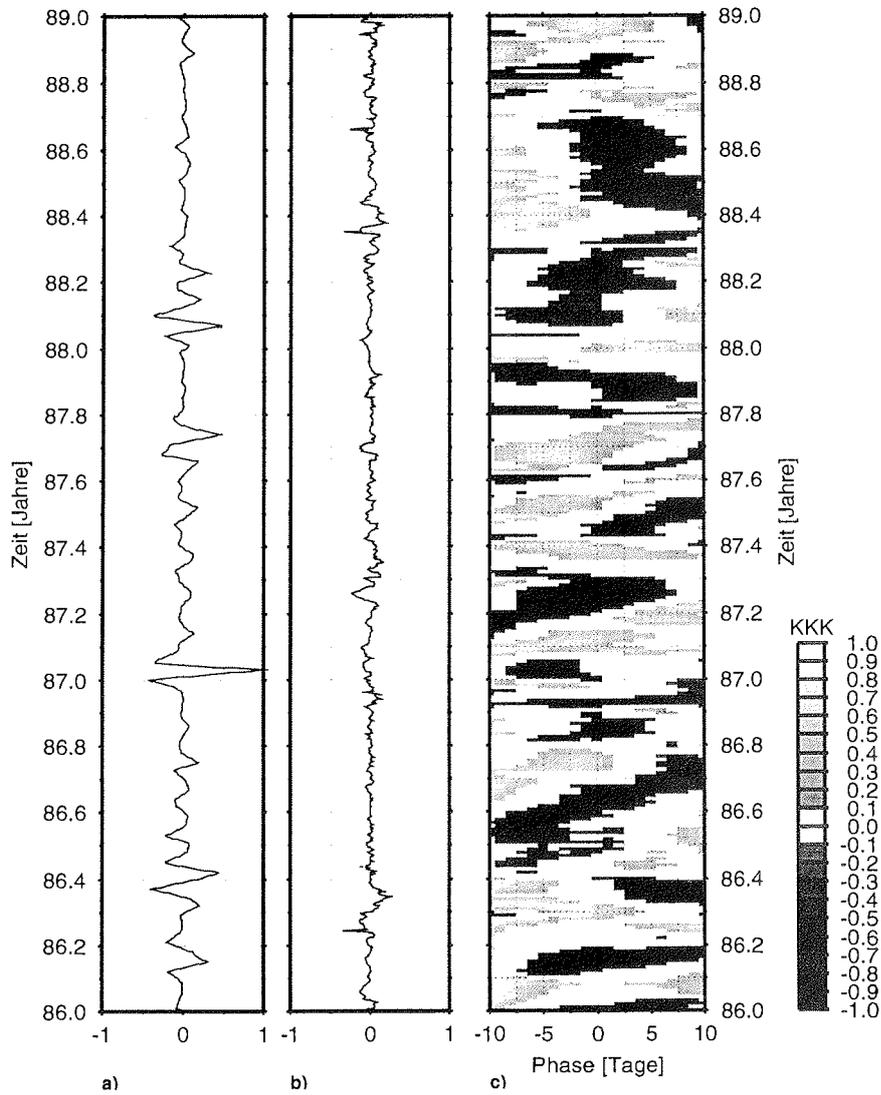


Abbildung B.34 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 800 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

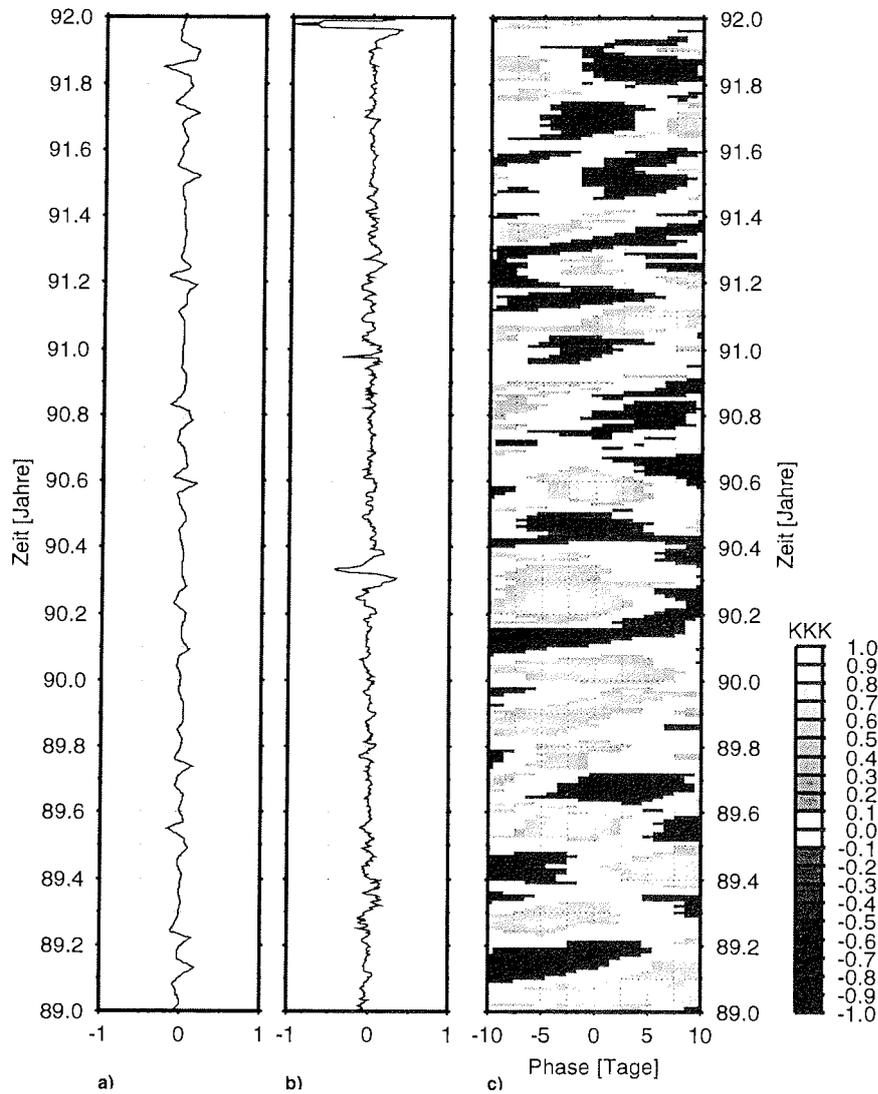


Abbildung B.35 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 800 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

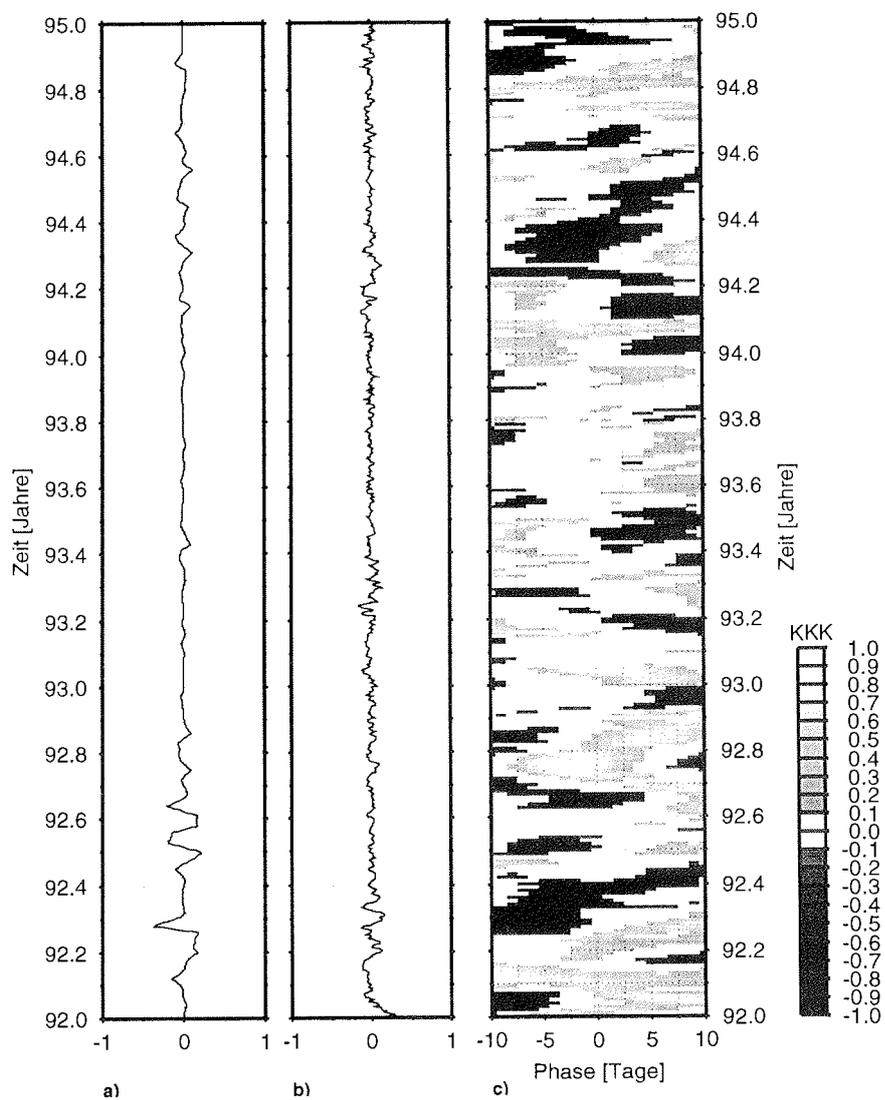


Abbildung B.36 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 800 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

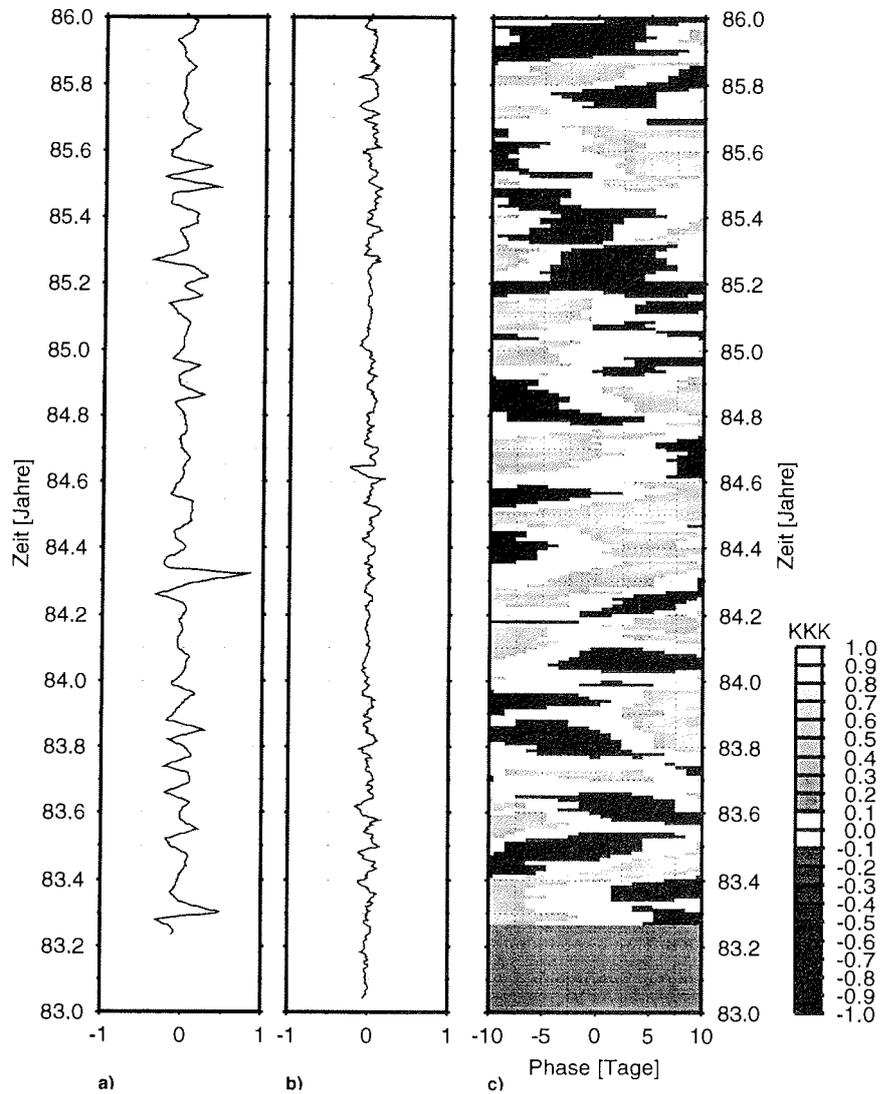


Abbildung B.37 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 1600 km, 1983 bis 1985, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

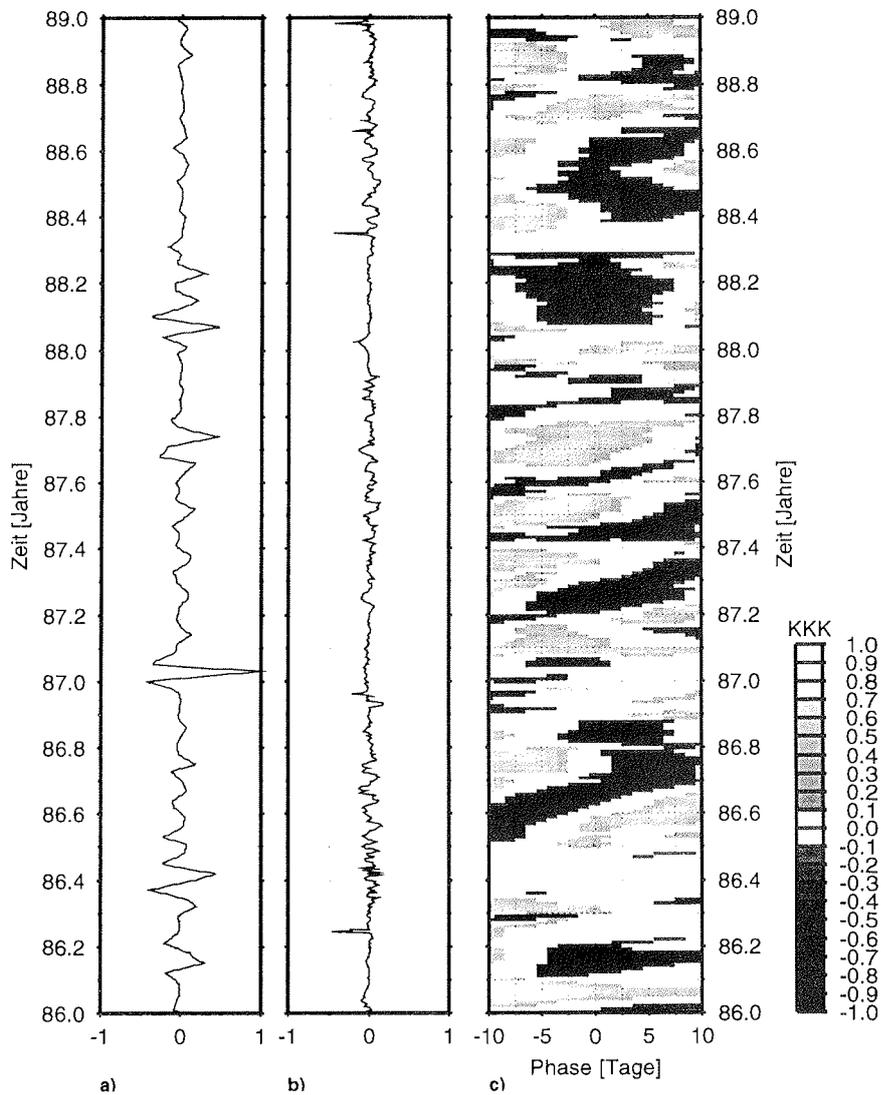


Abbildung B.38 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 1600 km, 1986 bis 1988, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

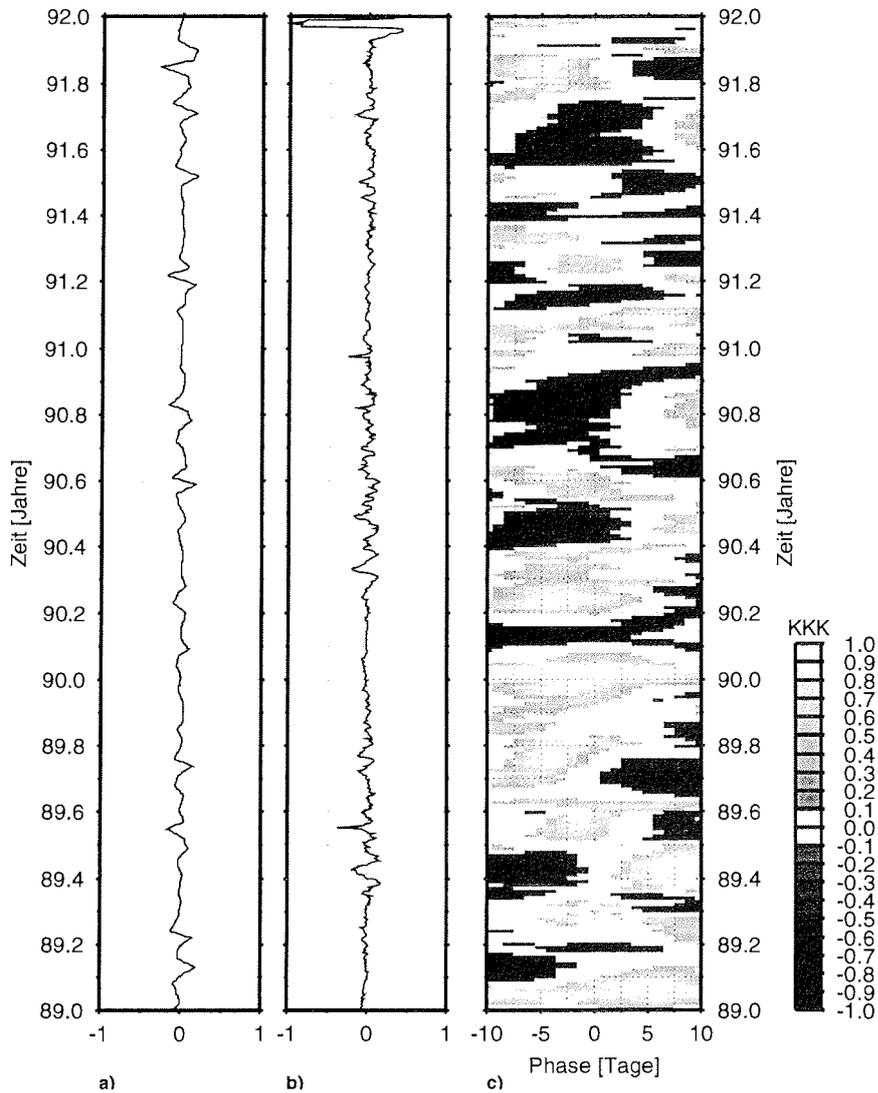


Abbildung B.39 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 1600 km, 1989 bis 1991, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

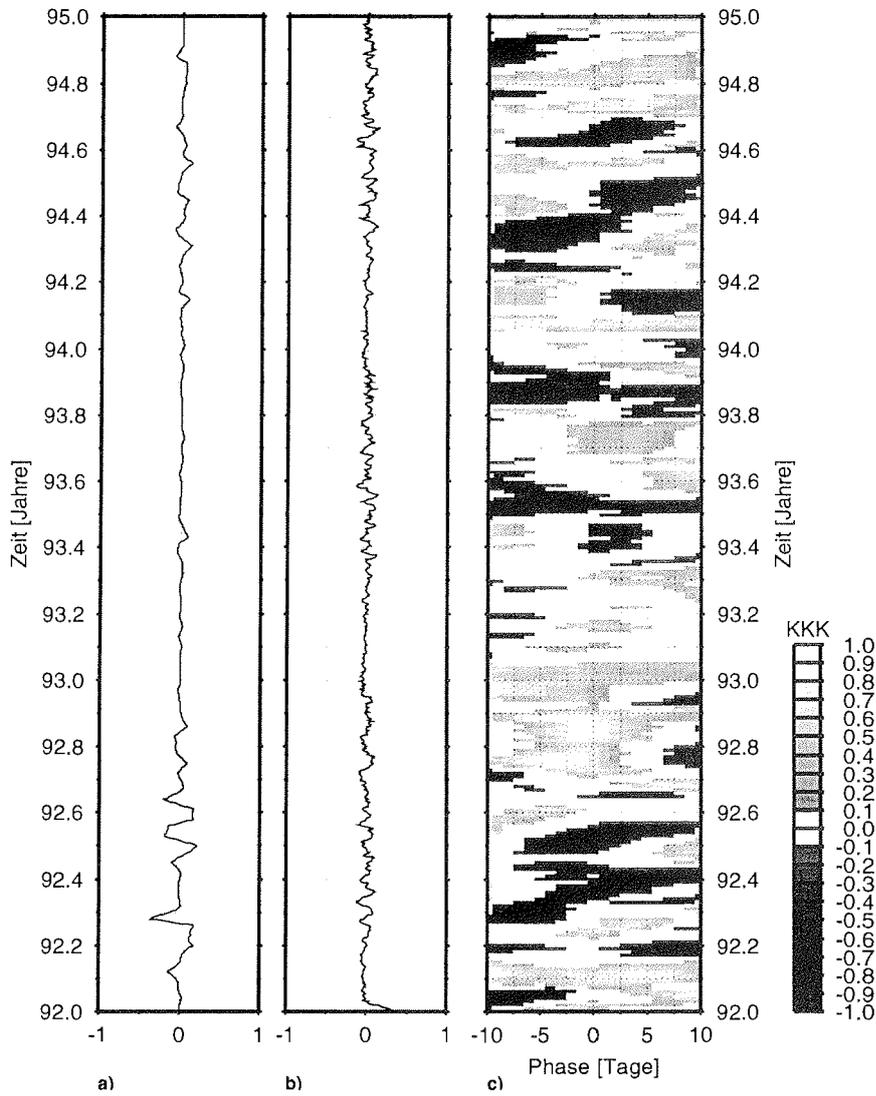


Abbildung B.40 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit rel. Meereisbedeckung im westlichen Einzugsgebiet, Segment 1600 km, 1992 bis 1994, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

B.1.3 Kreuzkorrelation von Seesalz-Aerosol mit dem trajektorienbezogenen, absoluten Seegebiet

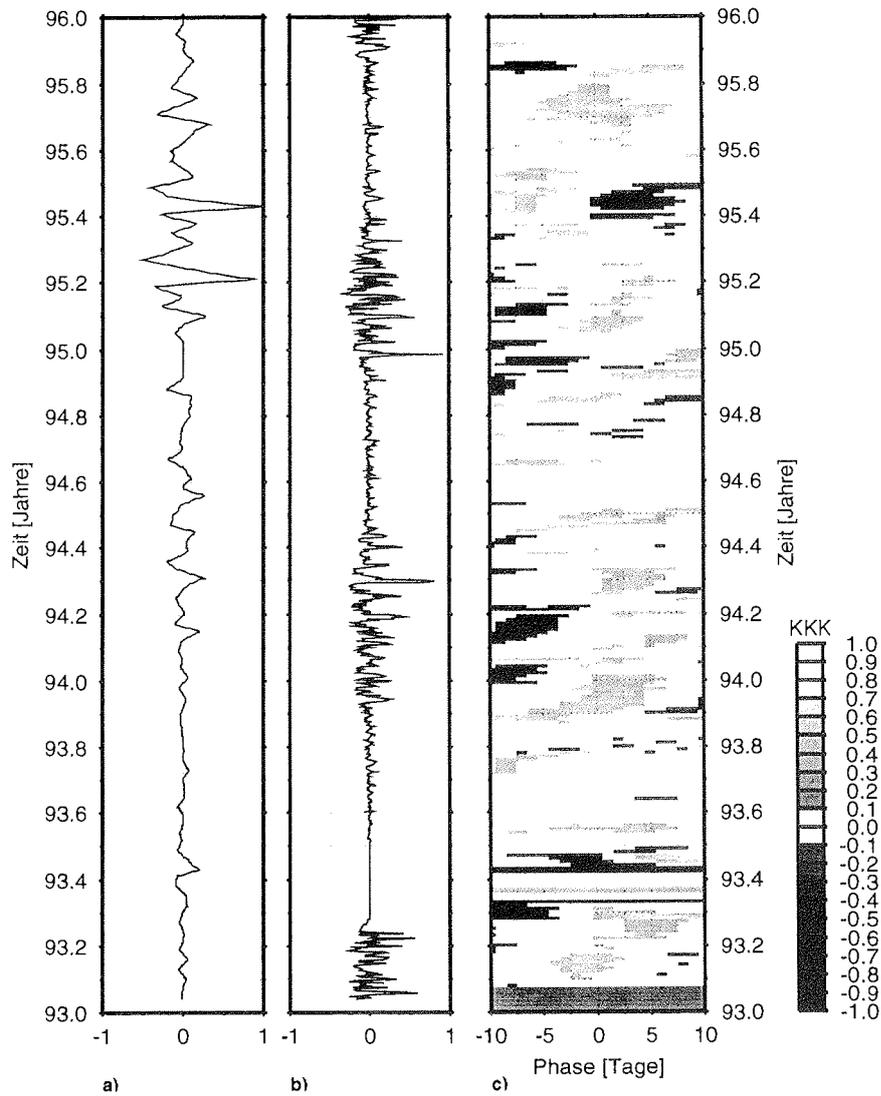


Abbildung B.41 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit traj.-bez., abs. Seegebiet, 1-Tag-Trajektorie, 1993 bis 1995, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

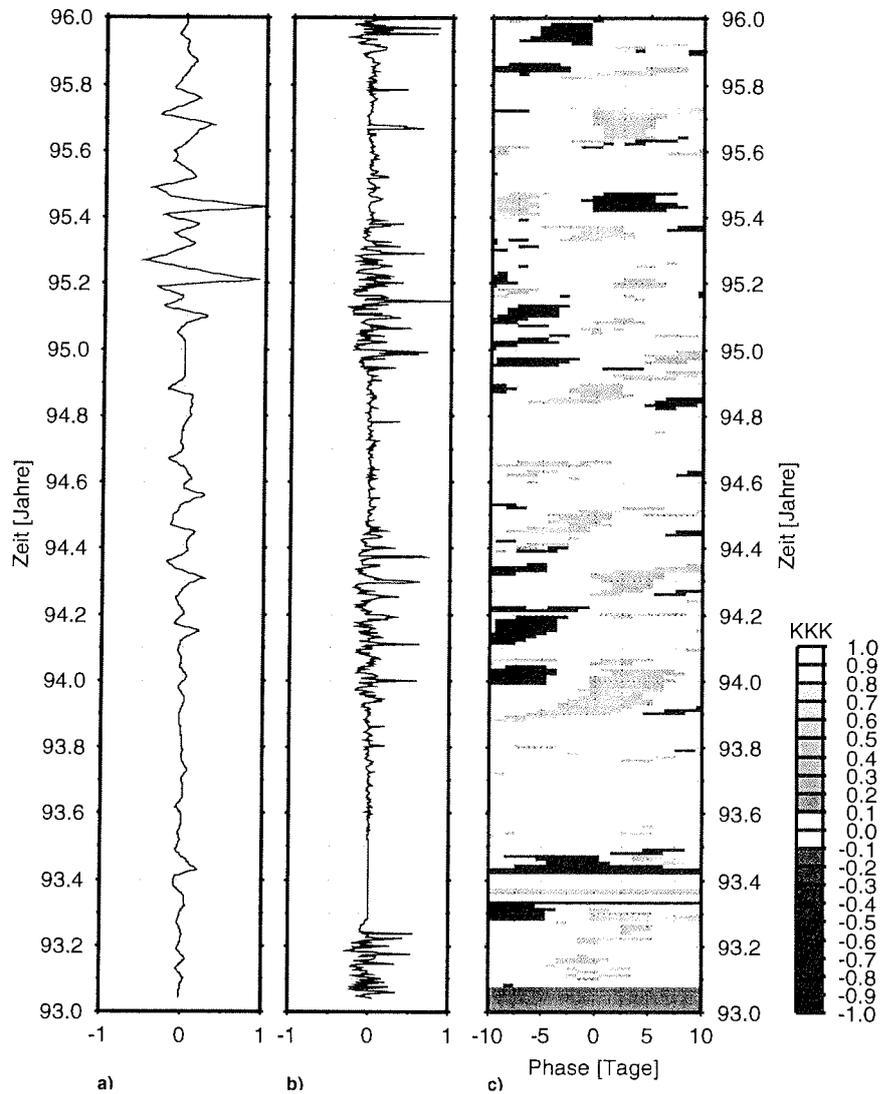


Abbildung B.42 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit traj.-bez., abs. Seegebiet, 2-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1995, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

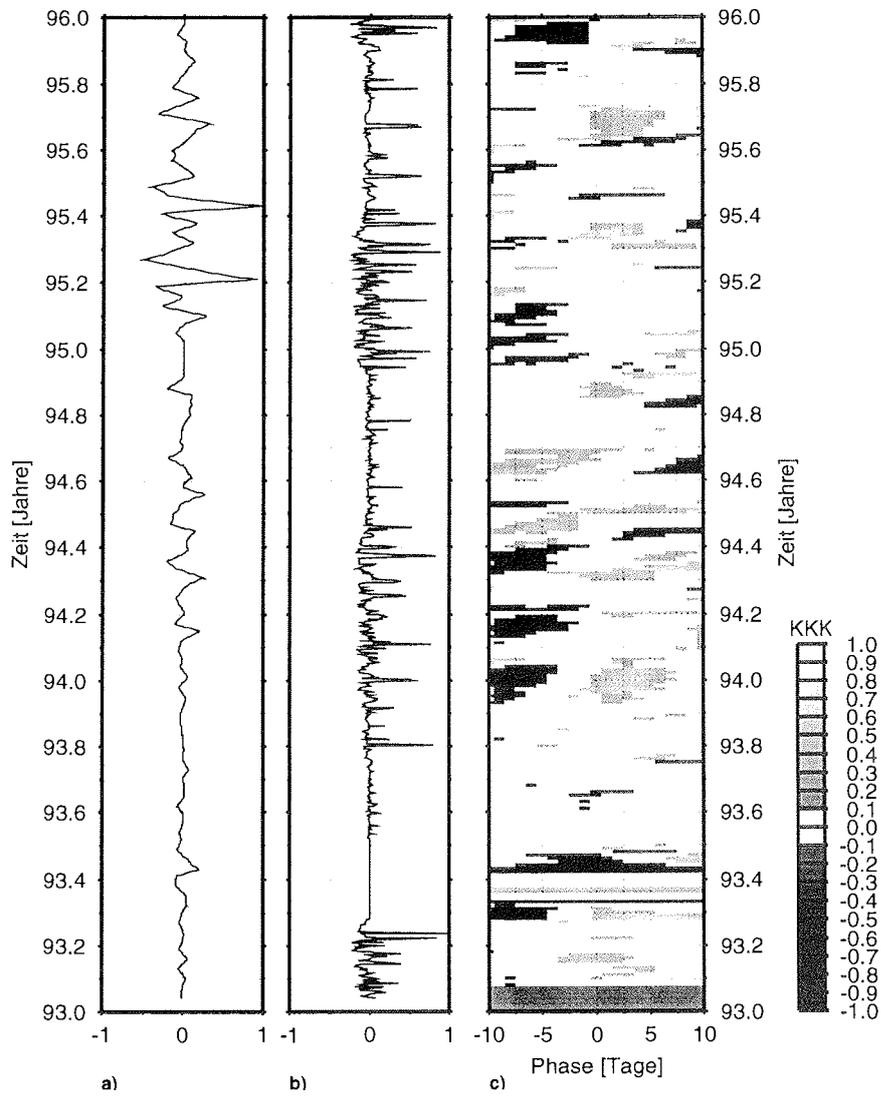


Abbildung B.43 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit traj.-bez., abs. Seegebiet, 3-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1995, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

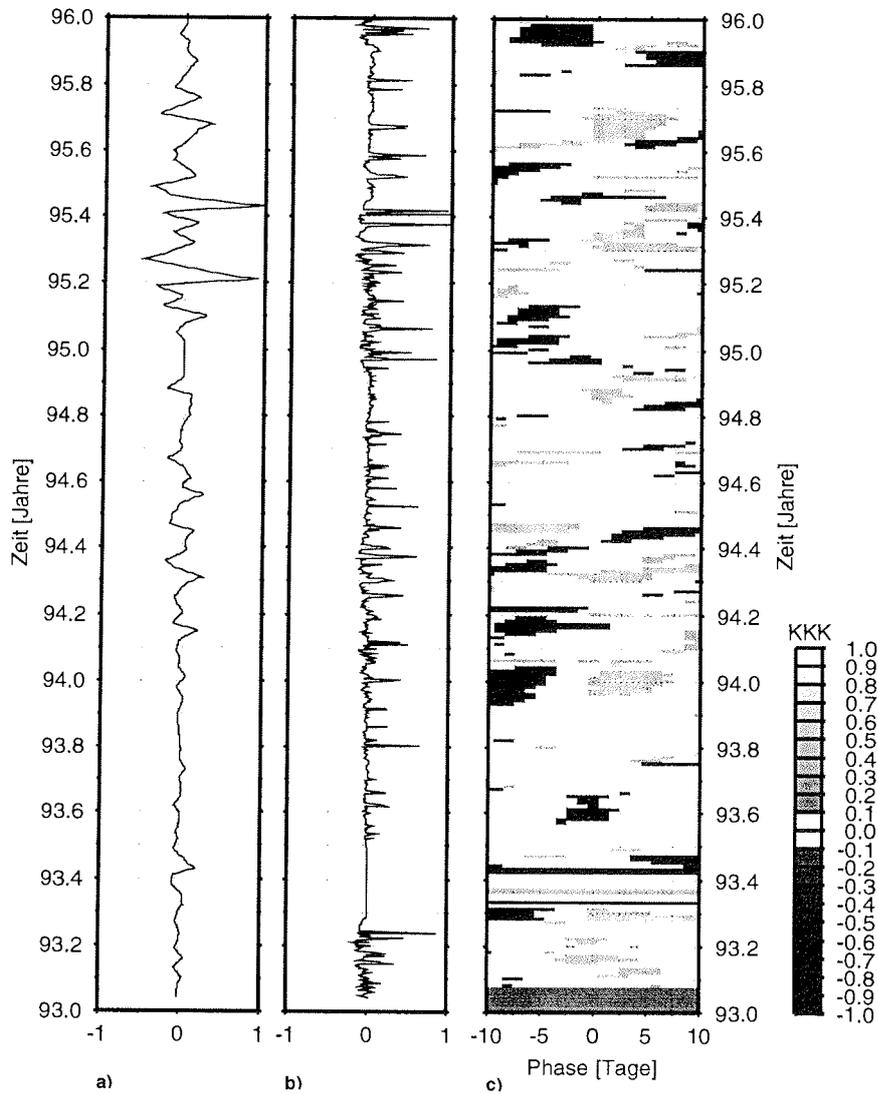


Abbildung B.44 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit traj.-bez., abs. Seegebiet, 4-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1995, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

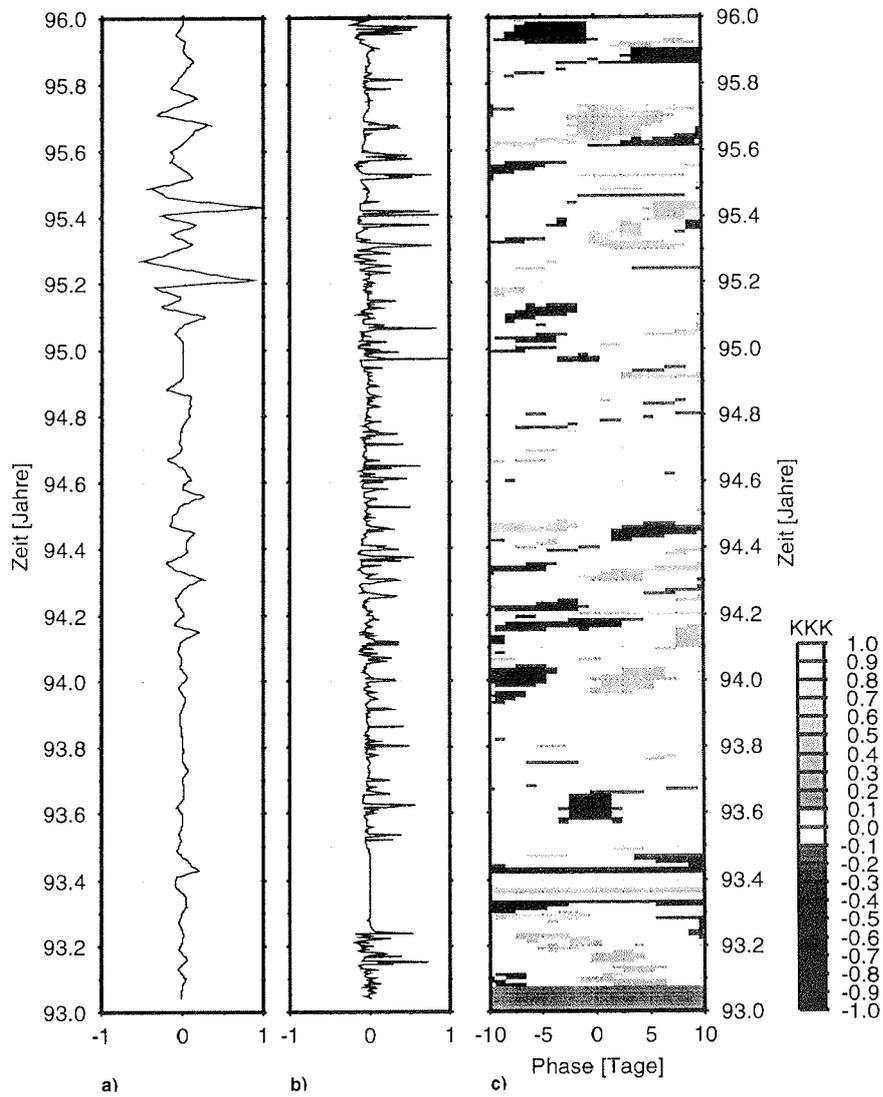


Abbildung B.45 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Seesalz-Aerosol mit traj.-bez., abs. Seegebiet, 5-Tage-Trajektorie, 1993 bis 1995, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

**B.2 Kreuzkorrelation von Bodenozone mit der tra-
jektorienbezogenen, absoluten Meereisbedeckung**

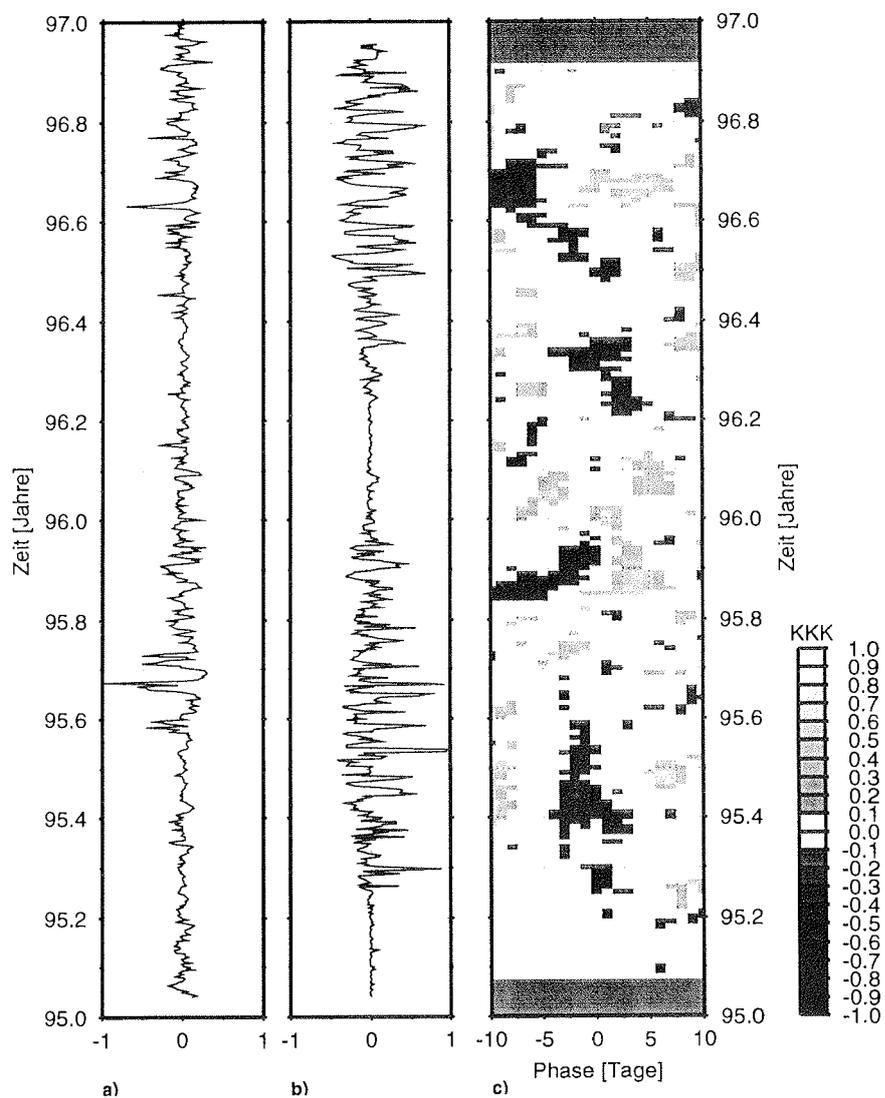


Abbildung B.46 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Bodenzon mit traj.-bez., abs. Meereisbedeckung, 1-Tag-Trajektorie, 1995 und 1996, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Bodenzons, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationkoeffizienten.

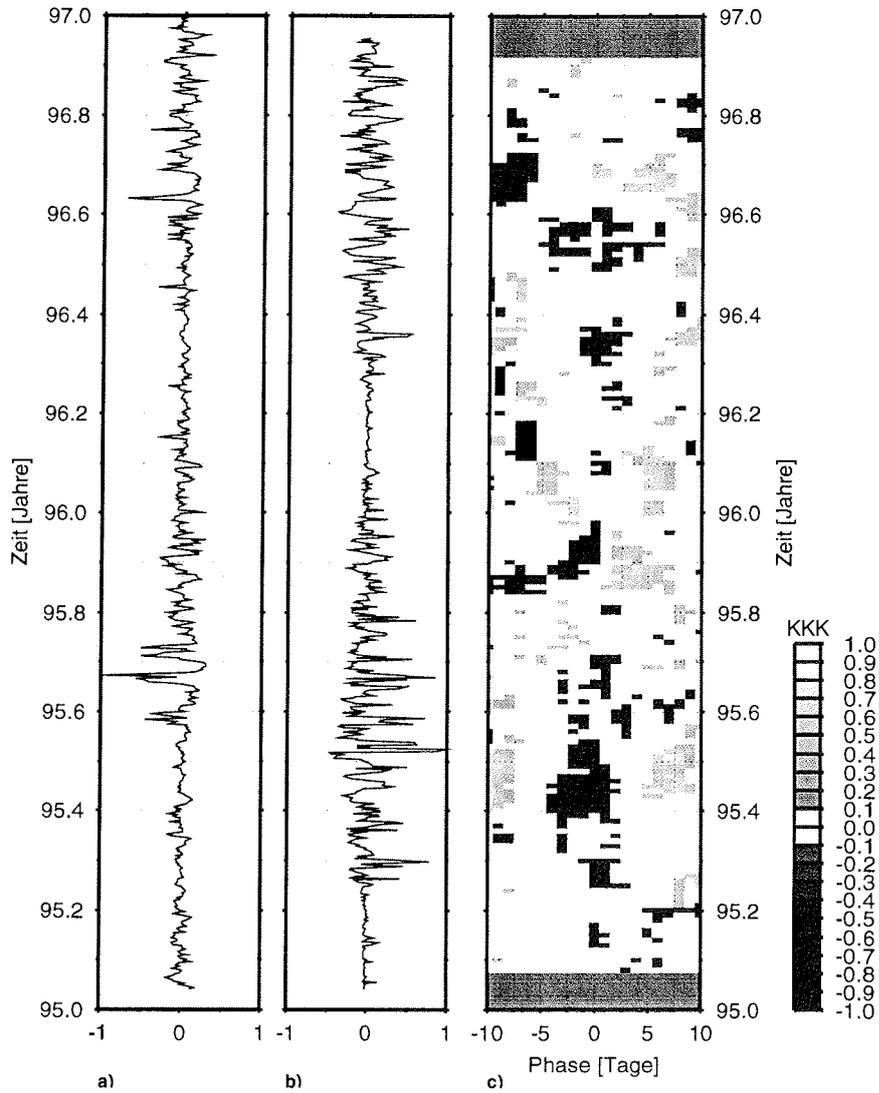


Abbildung B.47 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Bodenozone mit traj.-bez., abs. Meereisbedeckung, 2-Tage-Trajektorie, 1995 und 1996, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Bodenzons, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

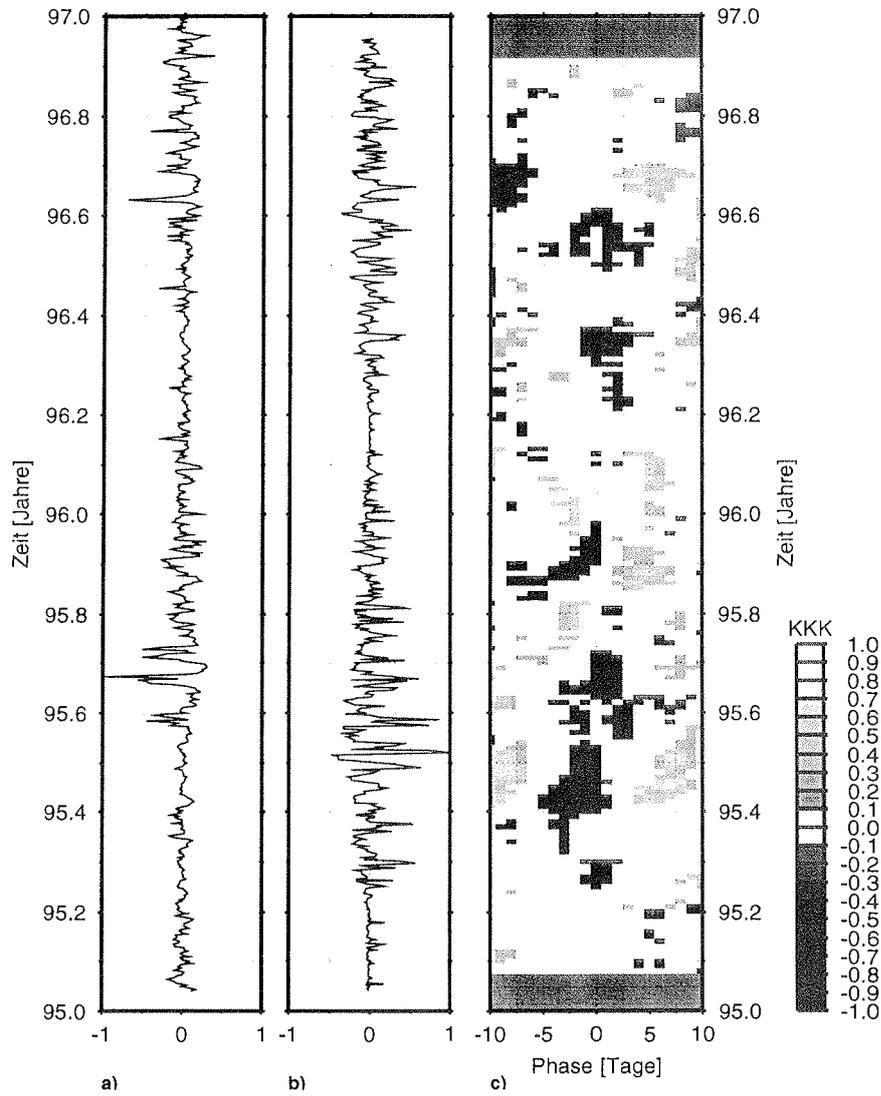


Abbildung B.48 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Bodenzon mit traj.-bez., abs. Meereisbedeckung, 3-Tage-Trajektorie, 1995 und 1996, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Bodenzons, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

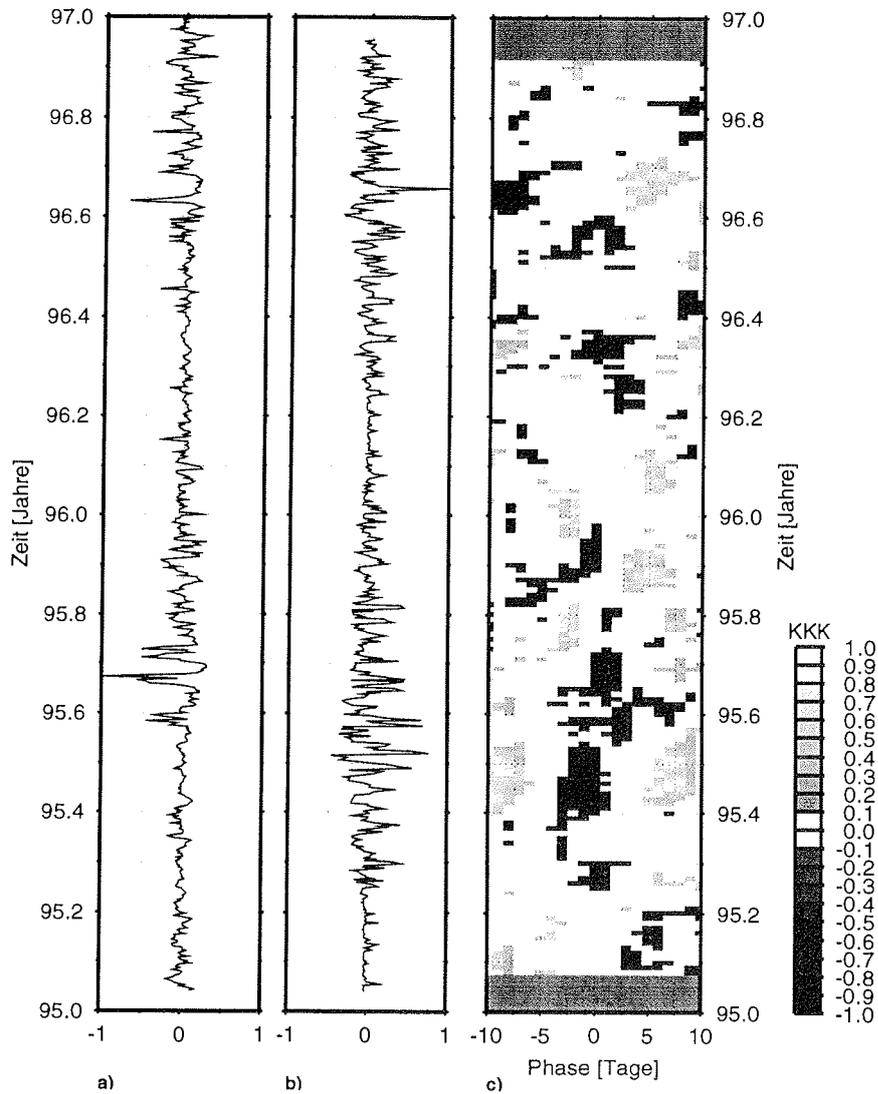


Abbildung B.49 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Bodenozon mit traj.-bez., abs. Meereisbedeckung, 4-Tage-Trajektorie, 1995 und 1996, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Bodenozons, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

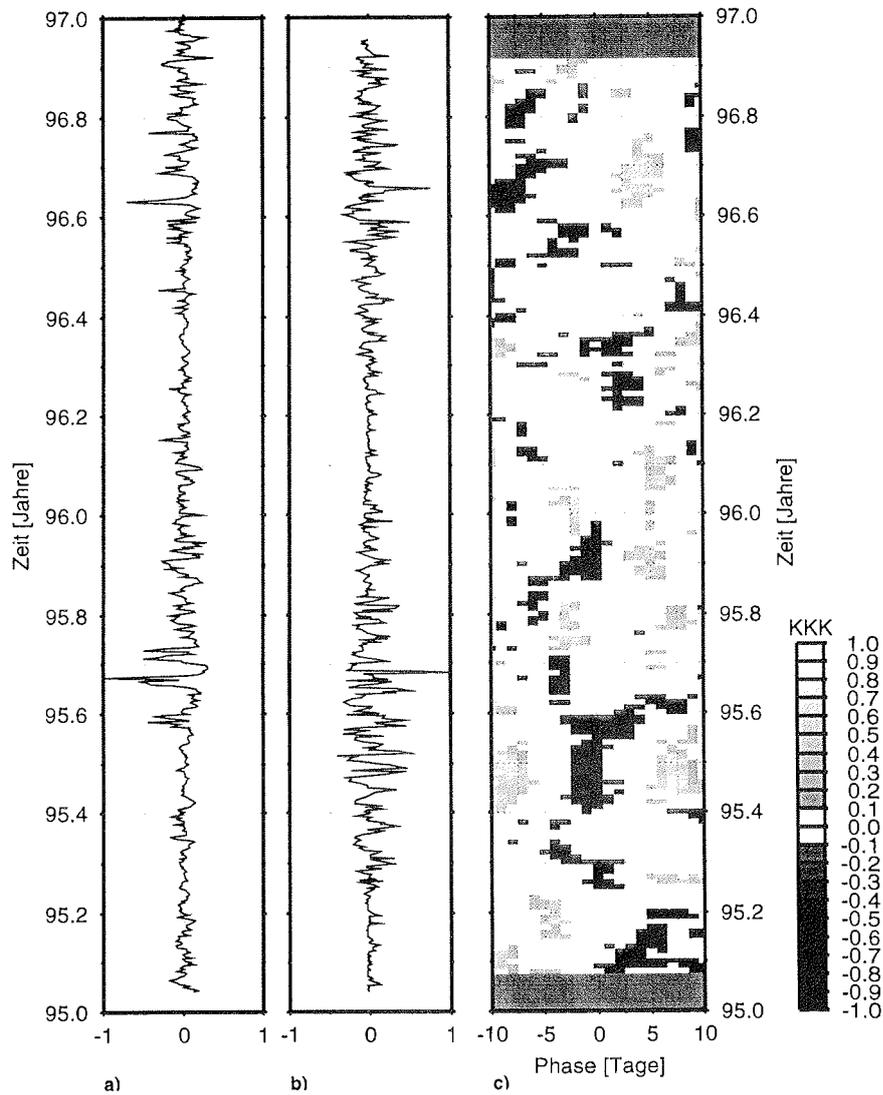


Abbildung B.50 Kreuzkorrelationskoeffizienten (KKK) der Korrelation Bodenzon mit traj.-bez., abs. Meereisbedeckung, 5-Tage-Trajektorie, 1995 und 1996, a) normierte, kurzperiodische Variabilität des Bodenzons, b) normierte, kurzperiodische Variabilität der rel. Eisbedeckung, c) Kreuzkorrelationskoeffizienten.

C. Sonstiges

Tabelle C.1 Zusammenfassung des direkten Meßprogramms am luftchemischen Observatorium der Neumayer-Station, Stand: Überwinterung 1996, Abkürzungen und Symbole: * Durchführung der Messungen nur während der Sommersaison; AWI Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven; IUPH Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg; Mainz Institut für Atmosphärische Physik, Universität Mainz; DWD Deutscher Wetterdienst Hohenpeißenberg und Hamburg [Minikin 96].

Kategorie	Meßgröße	Meßmethode	Institut
Partikel-bezogene Meßgrößen	Partikel (>10 nm)	Kondensationskernzähler	AWI/Mainz
	ultrafeine Partikel (>3 nm)	Kondensationskernzähler	AWI
	Partikelgrößenspektren 0.09-7 μm	Laser-Aerosolspektrometer*	AWI
	Ruß (black carbon)	Aethalometer	AWI
	Gesamt-PAH Partikel-Lichtstreuoeffizient	Photoionisation integrierendes Nephelometer	AWI/IUPH AWI
Spurengase (bodennah)	^{222}Rn	α -Spektroskopie von ^{214}Po	IUPH
	O_3	naßchemisch (KJ) UV-Absorption	DWD AWI
Spurengase (Vertikalsondierungen)	Säulendichte O_3 , NO_2 , OClO , ...	UV-Spektroskopie (DOAS)	IUPH
	O_3	Ozonsonde	AWI

Tabelle C.2 Zusammenfassung des Probennahmeprogramms am luftchemischen Observatorium der Neumayer-Station, Stand: Überwinterung 1996, Abkürzungen und Symbole: * Durchführung der Probennahmen nur während der Sommersaison; ** nicht mehr Bestandteil des Routine-Probennahmeprogramms; IUPH Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg; AWI Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven; IAR Institut für Atmosphärische Radioaktivität, Freiburg; KFA Kernforschungsanlage, Jülich; ÖFS Österreichisches Forschungszentrum, Seibersdorf; GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Institut für Hydrologie, München-Neuherberg [Minkin 96].

Kategorie	Sammelmethode	analysierte Komponente	Institut
langlebige Spurengase	komprimierte Luft (200 bar)	CH ₄ , ¹³ CH ₄ , CH ₃ H, ¹⁴ CH ₄	IUPH
		⁸⁵ Kr	IUPH/IAR
		SF ₆	IUPH
	komprimierte Luft (1 bar) (Flask-Sammlung)	CO ₂ , dzCO ₂ , CO ¹⁸ O N ₂ O, CH ₄	IUPH
	chemische Absorption (NaOH)	vzCO ₂	IUPH
Wasserdampf	Molekularsieb	H ₂ O, δ ² H, ³ H	IUPH
	Kühlfalle	H ₂ O, δ ² H, δ ¹⁸ O, ³ H	IUPH
reaktive Spurengase	Chemisorption (Au)	DMS*	AWI
	LowVol-Filter (imprägniert)	SO ₂	AWI/IUPH
	Flask-Sammlung	leichte NMHCs**	KFA
Aerosol	HighVol-Filter (Whatman 541)	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , MSA, Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , ...	IUPH
		δ ¹⁵ N (NO ₃ ⁻), δ ³⁴ S (SO ₄ ²⁻)*	IUPH/OFS
		(Pb, Zn, Mn, Al)**	IUPH
	HighVol-Filter (Whatman QMA)	²¹⁰ Pb, ⁷ Be, ¹⁰ Be**	IUPH
	LowVol-Filter (Teflon/Nylon u.a.)	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , MSA, Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , ... (HNO ₃)	IUPH/AWI
		Spurenelemente**	IUPH
Berner Impaktor	(SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ MSA, Na ⁺)	AWI	
Neuschnee		SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , MSA, Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , ...	IUPH/AWI
		δ ² H, δ ¹⁸ O	GSF/AWI

Vielen Dank

... meiner Familie, für ihre Unterstützung und ihre große Geduld, ohne die diese Arbeit unmöglich gewesen wäre.

... Prof. Otto Schrems, für die Begutachtung der Arbeit, die fachliche und sachliche Unterstützung und die freundliche Aufnahme in seine Arbeitsgruppe.

... Prof. Klaus Dethloff, für die Begutachtung der Arbeit und seine vielen fachlichen und sachlichen Hinweise.

... Dr. Andreas Minikin, Dr. Rolf Weller und Dr. Gert König-Langlo, für ihre ständige Hilfs- und Diskussionsbereitschaft, angefangen bei der Themenfindung bis zur Anfertigung dieser Arbeit. Danke, ohne Euch wäre das wohl nix geworden!

... Dr. Saad El Naggar, für seine moralische Unterstützung – die sanften Tritte, die wohl jeder Doktorand von Zeit zu Zeit nötig hat.

... allen anderen KollegInnen, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Folgende Hefte der Reihe „Berichte zur Polarforschung“ sind bisher erschienen:

- **Sonderheft Nr. 1/1981** – „Die Antarktis und ihr Lebensraum“
Eine Einführung für Besucher – Herausgegeben im Auftrag von SCAR
- **Heft Nr. 1/1982** – „Die Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“
zusammengestellt von Heinz Köhnen
- **Heft Nr. 2/1982** – „Deutsche Antarktis-Expedition 1980/81 mit FS ‚Meteor‘“
First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Liste der Zooplankton- und Mikronektonnetzfüänge
zusammengestellt von Norbert Klages
- **Heft Nr. 3/1982** – „Digitale und analoge Krill-Echolot-Rohdatenerfassung an Bord des Forschungsschiffes ‚Meteor‘“ (im Rahmen von FIBEX 1980/81, Fahrtabschnitt ANT III), von Bodo Morgenstern
- **Heft Nr. 4/1982** – „Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“
Liste der Planktonfänge und Lichtstärkemessungen
zusammengestellt von Gerd Hubold und H. Eberhard Drescher
- **Heft Nr. 5/1982** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982“
by G. Hempel and R. B. Heywood
- **Heft Nr. 6/1982** – „Antarktis-Expedition 1981/82 (Unternehmen ‚Eiswarte‘)“
zusammengestellt von Gode Gravenhorst
- **Heft Nr. 7/1982** – „Marin-Biologisches Begleitprogramm zur Standorterkundung 1979/80 mit MS ‚Polar-
sirkel‘ (Pre-Site Survey)“ – Stationslisten der Mikronekton- und Zooplanktonfänge sowie der Bodenfischerei
zusammengestellt von R. Schneppenheim
- **Heft Nr. 8/1983** – „The Post-Fibex Data Interpretation Workshop“
by D. L. Cram and J.-C. Freytag with the collaboration of J. W. Schmidt, M. Mall, R. Kresse, T. Schwinghammer
- **Heft Nr. 9/1983** – „Distribution of some groups of zooplankton in the inner Weddell Sea in summer 1979/80“
by I. Hempel, G. Hubold, B. Kaczmaruk, R. Keller, R. Weigmann-Haass
- **Heft Nr. 10/1983** – „Fluor im antarktischen Ökosystem“ – DFG-Symposium November 1982
zusammengestellt von Dieter Adelung
- **Heft Nr. 11/1983** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982 (II)“
Data of micronekton and zooplankton hauls, by Uwe Piatkowski
- **Heft Nr. 12/1983** – „Das biologische Programm der ANTARKTIS-I-Expedition 1983 mit FS ‚Polarstern‘“
Stationslisten der Plankton-, Benthos- und Grundschieppnetzfüänge und Liste der Probennahme an Robben
und Vögeln, von H. E. Drescher, G. Hubold, U. Piatkowski, J. Plötz und J. Voß
- **Heft Nr. 13/1983** – „Die Antarktis-Expedition von MS ‚Polarbjörn‘ 1982/83“ (Sommerkampagne zur
Atka-Bucht und zu den Kräul-Bergen), zusammengestellt von Heinz Köhnen
- **Sonderheft Nr. 2/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition von FS ‚Polarstern‘ (Kapstadt, 20. Januar 1983 –
Rio de Janeiro, 25. März 1983)“, Bericht des Fahrtleiters Prof. Dr. Gotthilf Hempel
- **Sonderheft Nr. 3/1983** – „Sicherheit und Überleben bei Polarexpeditionen“
zusammengestellt von Heinz Köhnen
- **Heft Nr. 14/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition (ANTARKTIS I) von FS ‚Polarstern‘ 1982/83“
herausgegeben von Gotthilf Hempel
- **Sonderheft Nr. 4/1983** – „On the Biology of Krill *Euphausia superba*“ – Proceedings of the Seminar
and Report of the Krill Ecology Group, Bremerhaven 12. - 16. May 1983, edited by S. B. Schnack
- **Heft Nr. 15/1983** – „German Antarctic Expedition 1980/81 with FRV ‚Walther Herwig‘ and RV ‚Meteor‘“ –
First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Data of micronekton and zooplankton hauls
by Uwe Piatkowski and Norbert Klages
- **Sonderheft Nr. 5/1984** – „The observatories of the Georg von Neumayer Station“, by Ernst Augstein
- **Heft Nr. 16/1984** – „FIBEX cruise zooplankton data“
by U. Piatkowski, I. Hempel and S. Rakusa-Suszczewski
- **Heft Nr. 17/1984** – Fahrtbericht (cruise report) der ‚Polarstern‘-Reise ARKTIS I, 1983“
von E. Augstein, G. Hempel und J. Thiede
- **Heft Nr. 18/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,
Bericht von den Fahrtabschnitten 1, 2 und 3, herausgegeben von D. Fütterer
- **Heft Nr. 19/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,
Bericht vom Fahrtabschnitt 4, Punta Arenas-Kapstadt (Ant-II/4), herausgegeben von H. Köhnen
- **Heft Nr. 20/1984** – „Die Expedition ARKTIS II des FS ‚Polarstern‘ 1984, mit Beiträgen des FS ‚Valdivia‘
und des Forschungsflugzeuges ‚Falcon 20‘ zum Marginal Ice Zone Experiment 1984 (MIZEX)“
von E. Augstein, G. Hempel, J. Schwarz, J. Thiede und W. Weigel
- **Heft Nr. 21/1985** – „Euphausiid larvae in plankton from the vicinity of the Antarctic Peninsula,
February 1982“ by Sigrid Marschall and Elke Mizdalski
- **Heft Nr. 22/1985** – „Maps of the geographical distribution of macrozooplankton in the Atlantic sector of
the Southern Ocean“ by Uwe Piatkowski
- **Heft Nr. 23/1985** – „Untersuchungen zur Funktionsmorphologie und Nahrungsaufnahme der Larven
des Antarktischen Krills *Euphausia superba* Dana“ von Hans-Peter Marschall

- Heft Nr. 24/1985** – „Untersuchungen zum Periglazial auf der König-Georg-Insel Südshetlandinseln/ Antarktika. Deutsche physiogeographische Forschungen in der Antarktis. – Bericht über die Kampagne 1983/84“ von Dietrich Barsch, Wolf-Dieter Blümel, Wolfgang Flügel, Roland Mäusbacher, Gerhard Stäblein, Wolfgang Zick
- * **Heft Nr. 25/1985** – „Die Expedition ANTARKTIS III mit FS ‚Polarstern‘ 1984/1985“ herausgegeben von Gotthilf Hempel.
 - * **Heft Nr. 26/1985** – “The Southern Ocean”; A survey of oceanographic and marine meteorological research work by Hellmer et al.
 - * **Heft Nr. 27/1986** – „Spätpleistozäne Sedimentationsprozesse am antarktischen Kontinentalhang vor Kapp Norvegia, östliche Weddell-See“ von Hannes Grobe
 - Heft Nr. 28/1986** – „Die Expedition ARKTIS III mit ‚Polarstern‘ 1985 mit Beiträgen der Fahrteilnehmer, herausgegeben von Rainer Gersonde
 - * **Heft Nr. 29/1986** – „5 Jahre Schwerpunktprogramm ‚Antarktisforschung‘ der Deutschen Forschungsgemeinschaft.“ Rückblick und Ausblick. Zusammengestellt von Gotthilf Hempel, Sprecher des Schwerpunktprogramms
 - Heft Nr. 30/1986** – “The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1981 and 1982“ by Marianne Gube and Friedrich Obleitner
 - * **Heft Nr. 31/1986** – „Zur Biologie der Jugendstadien der Notothenioidei (Pisces) an der Antarktischen Halbinsel“ von A. Kellermann
 - * **Heft Nr. 32/1986** – „Die Expedition ANTARKTIS IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86“ mit Beiträgen der Fahrteilnehmer, herausgegeben von Dieter Fütterer
 - Heft Nr. 33/1987** – „Die Expedition ANTARKTIS-IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86 – Bericht zu den Fahrtabschnitten ANT-IV/3-4“ von Dieter Karl Fütterer
 - Heft Nr. 34/1987** – „Zoogeographische Untersuchungen und Gemeinschaftsanalysen an antarktischen Makroplankton“ von U. Piatkowski
 - Heft Nr. 35/1987** – „Zur Verbreitung des Meso- und Makrozooplanktons in Oberflächenwasser der Weddell See (Antarktis)“ von E. Boysen-Ennen
 - Heft Nr. 36/1987** – „Zur Nahrungs- und Bewegungsphysiologie von *Salpa thompsoni* und *Salpa fusiformis*“ von M. Reinke
 - Heft Nr. 37/1987** – “The Eastern Weddell Sea Drifting Buoy Data Set of the Winter Weddell Sea Project (WWSP)“ 1986 by Heinrich Hoerber und Marianne Gube-Lehnhardt
 - Heft Nr. 38/1987** – “The Meteorological Data of the Georg von Neumayer Station for 1983 and 1984“ by M. Gube-Lehnhardt
 - Heft Nr. 39/1987** – „Die Winter-Expedition mit FS ‚Polarstern‘ in die Antarktis (ANT V/1-3)“ herausgegeben von Sigrd Schnack-Schiel
 - Heft Nr. 40/1987** – “Weather and Synoptic Situation during Winter Weddell Sea Project 1986 (ANT V/2) July 16 - September 10, 1986“ by Werner Rabe
 - Heft Nr. 41/1988** – „Zur Verbreitung und Ökologie der Seegurken im Weddellmeer (Antarktis)“ von Julian Gutt
 - Heft Nr. 42/1988** – “The zooplankton community in the deep bathyal and abyssal zones of the eastern North Atlantic“ by Werner Beckmann
 - * **Heft Nr. 43/1988** – “Scientific cruise report of Arctic Expedition ARK IV/3“ Wissenschaftlicher Fahrtbericht der Arktis-Expedition ARK IV/3, compiled by Jörn Thiede
 - * **Heft Nr. 44/1988** – “Data Report for FV ‚Polarstern‘ Cruise ARK IV/1, 1987 to the Arctic and Polar Fronts“ by Hans-Jürgen Hirche
 - Heft Nr. 45/1988** – „Zoogeographie und Gemeinschaftsanalyse des Makrozoobenthos des Weddellmeeres (Antarktis)“ von Joachim Voß
 - Heft Nr. 46/1988** – “Meteorological and Oceanographic Data of the Winter-Weddell-Sea Project 1986 (ANT V/3)“ by Eberhard Fahrbach
 - Heft Nr. 47/1988** – „Verteilung und Herkunft glazial-mariner Gerölle am Antarktischen Kontinentalrand des östlichen Weddellmeeres“ von Wolfgang Oskierski
 - Heft Nr. 48/1988** – „Variationen des Erdmagnetfeldes an der GvN-Station“ von Arnold Brodscholl
 - * **Heft Nr. 49/1988** – „Zur Bedeutung der Lipide im antarktischen Zooplankton“ von Wilhelm Hagen
 - * **Heft Nr. 50/1988** – „Die gezeitenbedingte Dynamik des Ekström-Schelfeises, Antarktis“ von Wolfgang Kobarg
 - Heft Nr. 51/1988** – „Ökomorphologie nototheniider Fische aus dem Weddellmeer, Antarktis“ von Werner Ekau
 - Heft Nr. 52/1988** – „Zusammensetzung der Bodenfauna in der westlichen Fram-Straße“ von Dieter Piepenburg
 - * **Heft Nr. 53/1988** – „Untersuchungen zur Ökologie des Phytoplanktons im südöstlichen Weddellmeer (Antarktis) im Jan./Febr. 1985“ von Eva-Maria Nöthig
 - Heft Nr. 54/1988** – „Die Fischfauna des östlichen und südlichen Weddellmeeres: geographische Verbreitung, Nahrung und trophische Stellung der Fischarten“ von Wiebke Schwarzbach
 - Heft Nr. 55/1988** – “Weight and length data of zooplankton in the Weddell Sea in austral spring 1986 (Ant. V/3)“ by Elke Mizdalski
 - Heft Nr. 56/1989** – “Scientific cruise report of Arctic expeditions ARK IV/1, 2 & 3“ by G. Krause, J. Meinke und J. Thiede

- Heft Nr. 57/1989 – „Die Expedition ANTARKTIS V mit FS ‚Polarstern‘ 1986/87“
Bericht von den Fahrtabschnitten ANT V/4-5 von H. Miller und H. Oerter
- Heft Nr. 58/1989 – „Die Expedition ANTARKTIS VI mit FS ‚Polarstern‘ 1987/88“
von D. K. Fütterer
 - Heft Nr. 59/1989 – „Die Expedition ARKTIS V/1a, 1b und 2 mit FS ‚Polarstern‘ 1988“
von M. Spindler
 - Heft Nr. 60/1989 – „Ein zweidimensionales Modell zur thermohalinen Zirkulation unter dem Schelfeis“
von H. H. Hellmer
 - Heft Nr. 61/1989 – „Die Vulkanite im westlichen und mittleren Neuschwabenland,
Vestfjella und Ahlmannryggen, Antarktika“ von M. Peters
 - Heft Nr. 62/1989 – „The Expedition ANTARKTIS VII/1 and 2 (EPOS I) of RV ‚Polarstern‘
in 1988/89“, by I. Hempel
 - Heft Nr. 63/1989 – „Die Eisalgenflora des Weddellmeeres (Antarktis): Artenzusammensetzung und Biomasse
sowie Ökophysiologie ausgewählter Arten“ von Annette Bartsch
 - Heft Nr. 64/1989 – „Meteorological Data of the G.-v.-Neumayer-Station (Antarctica)“ by L. Helmes
 - Heft Nr. 65/1989 – „Expedition Antarktis VII/3 in 1988/89“ by I. Hempel, P. H. Schalk, V. Smetacek
 - Heft Nr. 66/1989 – „Geomorphologisch-glaziologische Detailkartierung
des arid-hochpolaren Borgmassivet, Neuschwabenland, Antarktika“ von Karsten Brunk
 - Heft Nr. 67/1990 – „Identification key and catalogue of larval Antarctic fishes“,
edited by Adolf Kellermann
 - Heft Nr. 68/1990 – „The Expedition Antarktis VII/4 (Epos leg 3) and VII/5 of RV ‚Polarstern‘ in 1989“,
edited by W. Arntz, W. Ernst, I. Hempel
 - Heft Nr. 69/1990 – „Abhängigkeiten elastischer und rheologischer Eigenschaften des Meereises vom
Eisgefüge“, von Harald Hellmann
 - Heft Nr. 70/1990 – „Die beschalten benthischen Mollusken (Gastropoda und Bivalvia) des
Weddellmeeres, Antarktis“, von Stefan Hain
 - Heft Nr. 71/1990 – „Sedimentologie und Paläomagnetik an Sedimenten der Maudkuppe (Nordöstliches
Weddellmeer)“, von Dieter Cordes
 - Heft Nr. 72/1990 – „Distribution and abundance of planktonic copepods (Crustacea) in the Weddell Sea
in summer 1980/81“, by F. Kurbjewit and S. Ali-Khan
 - Heft Nr. 73/1990 – „Zur Frühdiagenese von organischem Kohlenstoff und Opal in Sedimenten des südlichen
und östlichen Weddellmeeres“, von M. Schlüter
 - Heft Nr. 74/1990 – „Expeditionen ANTARKTIS-VIII/3 und VIII/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1989“
von Rainer Gersonde und Gotthilf Hempel
 - Heft Nr. 75/1991 – „Quartäre Sedimentationsprozesse am Kontinentalhang des Süd-Orkey-Plateaus im
nordwestlichen Weddellmeer (Antarktis)“, von Sigrun Grünig
 - Heft Nr. 76/1990 – „Ergebnisse der faunistischen Arbeiten im Benthal von King George Island
(Südshetlandinseln, Antarktis)“, von Martin Rauschert
 - Heft Nr. 77/1990 – „Verteilung von Mikroplankton-Organismen nordwestlich der Antarktischen Halbinsel
unter dem Einfluß sich ändernder Umweltbedingungen im Herbst“, von Heinz Klöser
 - Heft Nr. 78/1991 – „Hochauflösende Magnetostratigraphie spätquartärer Sedimente arktischer
Meeresgebiete“, von Norbert R. Nowaczyk
 - Heft Nr. 79/1991 – „Ökophysiologische Untersuchungen zur Salinitäts- und Temperaturtoleranz
antarktischer Grünalgen unter besonderer Berücksichtigung des *b*-Dimethylsulfoniumpropionat
(DMSP) - Stoffwechsels“, von Ulf Karsten
 - Heft Nr. 80/1991 – „Die Expedition ARKTIS VIII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“,
herausgegeben von Jörn Thiede und Gotthilf Hempel
 - Heft Nr. 81/1991 – „Paläoglazilogie und Paläozeanographie im Spätquartär am Kontinentalrand des
südlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Martin Melles
 - Heft Nr. 82/1991 – „Quantifizierung von Meeresseigenschaften: Automatische Bildanalyse von
Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsverteilungen“, von Hajo Eicken
 - Heft Nr. 83/1991 – „Das Fließen von Schelfeisen - numerische Simulationen
mit der Methode der finiten Differenzen“, von Jürgen Determann
 - Heft Nr. 84/1991 – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII/1-2, 1989 mit der Winter Weddell Gyre Study
der Forschungsschiffe ‚Polarstern‘ und ‚Akademik Fedorov‘“, von Ernst Augstein,
Nikolai Bagriantsev und Hans Werner Schenke
 - Heft Nr. 85/1991 – „Zur Entstehung von Unterwassereis und das Wachstum und die Energiebilanz
des Meereises in der Atka Bucht, Antarktis“, von Josef Kipfstuhl
 - Heft Nr. 86/1991 – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht vom
Fahrtabschnitt ANT-VIII/5“, von Heinz Miller und Hans Oerter
 - Heft Nr. 87/1991 – „Scientific cruise reports of Arctic expeditions ARK VI/1-4 of RV ‚Polarstern‘
in 1989“, edited by G. Krause, J. Meincke & H. J. Schwarz
 - Heft Nr. 88/1991 – „Zur Lebensgeschichte dominanter Copepodenarten (*Calanus finmarchicus*,
C. glacialis, *C. hyperboreus*, *Metridia longa*) in der Framstraße“, von Sabine Diehl

- Heft Nr. 89/1991** – „Detaillierte seismische Untersuchungen am östlichen Kontinentalrand des Weddell-Meereres vor Kapp Norvegia, Antarktis“, von Norbert E. Kaul
- Heft Nr. 90/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-VIII/6-7“, herausgegeben von Dieter Karl Fütterer und Otto Schrems
- Heft Nr. 91/1991** – “Blood physiology and ecological consequences in Weddell Sea fishes (Antarctica)“, by Andreas Kunzmann
- Heft Nr. 92/1991** – „Zur sommerlichen Verteilung des Mesozooplanktons im Nansen-Becken, Nordpolarmeere“, von Nicolai Mumm
- Heft Nr. 93/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII mit FS ‚Polarstern‘, 1990. Bericht vom Fahrtabschnitt ARK VII/2“, herausgegeben von Gunther Krause
- Heft Nr. 94/1991** – „Die Entwicklung des Phytoplanktons im östlichen Weddellmeer (Antarktis) beim Übergang vom Spätwinter zum Frühjahr“, von Renate Scharek
- Heft Nr. 95/1991** – „Radioisotopenstratigraphie, Sedimentologie und Geochemie jungquartärer Sedimente des östlichen Arktischen Ozeans“, von Horst Bohrmann
- Heft Nr. 96/1991** – „Holozäne Sedimentationsentwicklung im Scoresby Sund, Ost-Grönland“, von Peter Mariefeld
- Heft Nr. 97/1991** – „Strukturelle Entwicklung und Abkühlungsgeschichte von Heimfrontfjella (Westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Joachim Jacobs
- Heft Nr. 98/1991** – „Zur Besiedlungsgeschichte des antarktischen Schelfes am Beispiel der Isopoda (Crustacea, Malacostraca)“, von Angelika Brandt
- * **Heft Nr. 99/1992** – “The Antarctic ice sheet and environmental change: a three-dimensional modelling study“, by Philippe Huybrechts
 - * **Heft Nr. 100/1992** – „Die Expeditionen ANTARKTIS IX/1-4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1990/91“ herausgegeben von Ulrich Bathmann, Meinhard Schulz-Baldes, Eberhard Fahrbach, Victor Smetacek und Hans-Wolfgang Hubberten
 - Heft Nr. 101/1992** – „Wechselbeziehungen zwischen Schwermetallkonzentrationen (Cd, Cu, Pb, Zn) im Meerwasser und in Zooplanktonorganismen (Copepoda) der Arktis und des Atlantiks“, von Christa Pohl
 - Heft Nr. 102/1992** – „Physiologie und Ultrastruktur der antarktischen Grünalge *Prasiola crispera* ssp. *antarctica* unter osmotischem Stress und Austrocknung“, von Andreas Jacob
 - * **Heft Nr. 103/1992** – „Zur Ökologie der Fische im Weddellmeer“, von Gerd Hubold
 - Heft Nr. 104/1992** – „Mehrkanaelige adaptive Filter für die Unterdrückung von multiplen Reflexionen in Verbindung mit der freien Oberfläche in marinen Seismogrammen“, von Andreas Rosenberger
 - Heft Nr. 105/1992** – “Radiation and Eddy Flux Experiment 1991 (REFLEX II)“, von Jörg Hartmann, Christoph Kottmeier und Christian Wamser
 - Heft Nr. 106/1992** – „Ostracoden im Epipelagial vor der Antarktischen Halbinsel - ein Beitrag zur Systematik sowie zur Verbreitung und Populationsstruktur unter Berücksichtigung der Saisonalität“, von Rüdiger Kock
 - * **Heft Nr. 107/1992** – „ARCTIC '91: Die Expedition ARK-VIII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“, von Dieter K. Fütterer
 - Heft Nr. 108/1992** – „Dehnungsbeben an einer Störungszone im Ekström-Schelfeis nördlich der Georg-von-Neumayer-Station, Antarktis. – Eine Untersuchung mit seismologischen und geodätischen Methoden“, von Uwe Nixdorf.
 - * **Heft Nr. 109/1992** – „Spätquartäre Sedimentation am Kontinentalrand des südöstlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Michael Weber.
 - * **Heft Nr. 110/1992** – „Sedimentfazies und Bodenwasserstrom am Kontinentalhang des norwestlichen Weddellmeeres“, von Isa Brehme.
 - Heft Nr. 111/1992** – „Die Lebensbedingungen in den Solekanalchen des antarktischen Meereises“, von Jürgen Weissenberger.
 - Heft Nr. 112/1992** – „Zur Taxonomie von rezenten benthischen Foraminiferen aus dem Nansen Becken, Arktischer Ozean“, von Jutta Wollenburg.
 - Heft Nr. 113/1992** – „Die Expedition ARKTIS VIII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“, herausgegeben von Gerhard Kattner.
 - * **Heft Nr. 114/1992** – „Die Gründungsphase deutscher Polarforschung, 1865 - 1875“, von Reinhard A. Krause.
 - Heft Nr. 115/1992** – “Scientific Cruise Report of the 1991 Arctic Expedition ARK VIII/2 of RV ‚Polarstern‘ (EPOS II)“, by Eike Rachor.
 - Heft Nr. 116/1992** – “The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station (Antarctica) for 1988, 1989, 1990 and 1991“, by Gert König-Langlo.
 - Heft Nr. 117/1992** – „Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der zentralen Heimfrontfjella (westliches Dronning Maud Land / Antarktis)“, von Peter Schulze.
 - Heft Nr. 118/1993** – „Die mafischen Gänge der Shackleton Range / Antarktika: Petrographie, Geochemie, Isotopengeochemie und Paläomagnetik“, von Rüdiger Hotten.
 - * **Heft Nr. 119/1993** – „Gefrierschutz bei Fischen der Polarmeere“, von Andreas P. A. Wöhrmann.
 - * **Heft Nr. 120/1993** – “East Siberian Arctic Region Expedition '92: The Laptev Sea - its Significance for Arctic Sea-Ice Formation and Transpolar Sediment Flux“, by D. Dethleff, D. Nürnberg, E. Reimnitz, M. Saarsjo and Y. P. Sachenko. – “Expedition to Novaja Zemlja and Franz Josef Land with RV ‚Dainie Zelentsy‘“, by D. Nürnberg and E. Groth.

- * Heft Nr. 121/1993 – „Die Expedition ANTARKTIS X/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Michael Spindler, Gerhard Dieckmann und David Thomas
- Heft Nr. 122/1993 – „Die Beschreibung der Korngestalt mit Hilfe der Fourier-Analyse: Parametrisierung der morphologischen Eigenschaften von Sedimentpartikeln“, von Michael Diepenbroek.
- * Heft Nr. 123/1993 – „Zerstörungsfreie hochauflösende Dichteuntersuchungen mariner Sedimente“, von Sebastian Gerland.
- Heft Nr. 124/1993 – „Umsatz und Verteilung von Lipiden in arktischen marinen Organismen unter besonderer Berücksichtigung unterer trophischer Stufen“, von Martin Graeve.
- Heft Nr. 125/1993 – „Ökologie und Respiration ausgewählter arktischer Bodenfischarten“, von Christian F. von Dorrien.
- Heft Nr. 126/1993 – „Quantitative Bestimmung von Paläoumweltparametern des Antarktischen Oberflächenwassers im Spätquartier anhand von Transferfunktionen mit Diatomeen“, von Ulrich Zielinski
- * Heft Nr. 127/1993 – „Sedimenttransport durch das arktische Meereis: Die rezente lithogene und biogene Materialfracht“, von Ingo Wollenburg.
- Heft Nr. 128/1993 – „Cruise ANTARKTIS X/3 of RV ‚Polarstern‘: CTD-Report“, von Marek Zwierz.
- Heft Nr. 129/1993 – „Reproduktion und Lebenszyklen dominanter Copepodenarten aus dem Weddellmeer, Antarktis“, von Frank Kurbjewit
- Heft Nr. 130/1993 – „Untersuchungen zu Temperaturregime und Massenhaushalt des Filchner-Ronne-Schelfeises, Antarktis, unter besonderer Berücksichtigung von Anfrier- und Abschmelzprozessen“, von Klaus Grosfeld
- Heft Nr. 131/1993 – „Die Expedition ANTARKTIS X/5 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Rainer Gersonde
- Heft Nr. 132/1993 – „Bildung und Abgabe kurzketziger halogener Kohlenwasserstoffe durch Makroalgen der Polarregionen“, von Frank Laturnus
- Heft Nr. 133/1994 – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1993 (REFLEX II)“, by Christoph Kottmeier, Jörg Hartmann, Christian Wamser, Axel Bocher, Christof Lüpkes, Dietmar Freese and Wolfgang Cohrs
- * Heft Nr. 134/1994 – „The Expedition ARKTIS-IX/1“, edited by Hajo Eicken and Jens Meincke
- Heft Nr. 135/1994 – „Die Expeditionen ANTARKTIS X/6-8“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Václav Smetacek, Hein de Baar, Eberhard Fahrbach und Gunter Krause
- Heft Nr. 136/1994 – „Untersuchungen zur Ernährungsökologie von Kaiserpinguinen (*Aptenodytes forsteri*) und Königspinguinen (*Aptenodytes patagonicus*)“, von Klemens Pütz
- * Heft Nr. 137/1994 – „Die kanozoische Vereisungsgeschichte der Antarktis“, von Werner U. Ehrmann
- Heft Nr. 138/1994 – „Untersuchungen stratosphärischer Aerosole vulkanischen Ursprungs und polarer stratosphärischer Wolken mit einem Mehrwellenlängen-Lidar auf Spitzbergen (79° N, 12° E)“, von Georg Beyerle
- Heft Nr. 139/1994 – „Charakterisierung der Isopodenfauna (Crustacea, Malacostraca) des Scotia-Bogens aus biogeographischer Sicht: Ein multivariater Ansatz“, von Holger Winkler.
- Heft Nr. 140/1994 – „Die Expedition ANTARKTIS X/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Peter Lemke
- Heft Nr. 141/1994 – „Satellitenaltimetrie über Eis – Anwendung des GEOSAT-Altimeters über dem Ekströmisen, Antarktis“, von Clemens Heidland
- Heft Nr. 142/1994 – „The 1993 Northeast Water Expedition. Scientific cruise report of RV ‚Polarstern‘ Arctic cruises ARK IX/2 and 3, USCG ‚Polar Bear‘ cruise NEWP and the NEWLAND expedition“, edited by Hans-Jürgen Hirche and Gerhard Kattner
- Heft Nr. 143/1994 – „Detaillierte retraktionsseismische Untersuchungen im inneren Scoresby Sund Ost-Grönland“, von Nolker Fechner
- Heft Nr. 144/1994 – „Russian-German Cooperation in the Siberian Shelf Seas: Geo-System Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens, Hans-Wolfgang Hubberten, Sergey M. Pryamikov and Rüdiger Stein
- * Heft Nr. 145/1994 – „The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report of RV ‚Polarstern‘ Arctic Cruises IX/2 and 3“, edited by Gerhard Kattner and Hans-Jürgen Hirche.
- Heft Nr. 146/1994 – „Radiation Measurements at the German Antarctic Station Neumayer 1982 - 1992“, by Torsten Schmidt and Gerd König-Langlo.
- Heft Nr. 147/1994 – „Krustenstrukturen und Verlauf des Kontinentalrandes im Weddell-See / Antarktis“, von Christian Hübscher.
- * Heft Nr. 148/1994 – „The expeditions NORILSK/TAYMYR 1993 and BUNGER OASIS 1993/94 of the AWI Research Unit Potsdam“, edited by Martin Melles.
- ** Heft Nr. 149/1994 – „Die Expedition ARCTIC '93. Der Fahrabschnitt ARK-IX/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1993“, herausgegeben von Dieter K. Fütterer.
- Heft Nr. 150/1994 – „Der Energiebedarf der Pygoscelis-Pinguine: eine Synopse“, von Boris M. Culik.
- Heft Nr. 151/1994 – „Russian-German Cooperation: The Transdrift I Expedition to the Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens and Valeriy Y. Karpiy.
- Heft Nr. 152/1994 – „Die Expedition ANTARKTIS-X mit FS ‚Polarstern‘ 1992. Bericht von den Fahrabschnitten / ANT-X / 1a und 2“, herausgegeben von Heinz Miller.
- Heft Nr. 153/1994 – „Aminosäuren und Huminstoffe im Stickstoffkreislauf polarer Meere“, von Ulrike Hubberten.
- Heft Nr. 154/1994 – „Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea“, by Claudio Richter.

- Heft Nr. 155/1995** – „Benthos in polaren Gewässern“, herausgegeben von Christian Wiencke und Wolf Arntz.
- Heft Nr. 156/1995** – „An adjoint model for the determination of the mean oceanic circulation, air-sea fluxes and mixing coefficients“, by Reiner Schlitzer.
- Heft Nr. 157/1995** – „Biochemische Untersuchungen zum Lipidstoffwechsel antarktischer Copepoden“, von Kirsten Fahl.
- * **Heft Nr. 158/1995** – „Die Deutsche Polarforschung seit der Jahrhundertwende und der Einfluß Erich von Drygalskis“, von Cornelia Lüdecke.
- * **Heft Nr. 159/1995** – „The distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the Arctic Ocean: Implications for the freshwater balance of the halocline and the sources of deep and bottom waters“, by Dorothea Bauch.
- * **Heft Nr. 160/1995** – „Rekonstruktion der spätquartären Tiefenwasserzirkulation und Produktivität im östlichen Südatlantik anhand von benthischen Foraminiferenvergesellschaftungen“, von Gerhard Schmiedl.
- Heft Nr. 161/1995** – „Der Einfluß von Salinität und Lichtintensität auf die Osmolytkonzentrationen, die Zellvolumina und die Wachstumsraten der antarktischen Eisdiatomeen *Chaetoceros sp.* und *Navicula sp.* unter besonderer Berücksichtigung der Aminosäure Prolin“, von Jürgen Nothnagel.
- Heft Nr. 162/1995** – „Meereistransportiertes lithogenes Feinmaterial in spätquartären Tiefseesedimenten des zentralen östlichen Arktischen Ozeans und der Framstraße“, von Thomas Letzig.
- Heft Nr. 163/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/2 mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94“, herausgegeben von Rainer Gersonde.
- Heft Nr. 164/1995** – „Regionale und altersabhängige Variation gesteinsmagnetischer Parameter in marinen Sedimenten der Arktis“, von Thomas Frederichs.
- Heft Nr. 165/1995** – „Vorkommen, Verteilung und Umsatz biogener organischer Spurenstoffe: Sterole in antarktischen Gewässern“, von Georg Hanke.
- Heft Nr. 166/1995** – „Vergleichende Untersuchungen eines optimierten dynamisch-thermodynamischen Meereismodells mit Beobachtungen im Weddellmeer“, von Holger Fischer.
- * **Heft Nr. 167/1995** – „Rekonstruktionen von Paläo-Umweltparametern anhand von stabilen Isotopen und Faunen-Vergesellschaftungen planktischer Foraminiferen im Südatlantik“, von Hans-Stefan Niebler
- Heft Nr. 168/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS XII mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT XII/1 und 2“, herausgegeben von Gerhard Kattner und Dieter Karl Fütterer
- Heft Nr. 169/1995** – „Medizinische Untersuchung zur Circadianrhythmik und zum Verhalten bei Überwinterern auf einer antarktischen Forschungsstation“, von Hans Wortmann
- Heft-Nr. 170/1995** – DFG-Kolloquium: Terrestrische Geowissenschaften – Geologie und Geophysik der Antarktis.
- Heft Nr. 171/1995** – „Strukturentwicklung und Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der nördlichen Heimfrontfjella (westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Wilfried Bauer.
- Heft Nr. 172/1995** – „Die Struktur der Erdkruste im Bereich des Scoresby Sund, Ostgrönland: Ergebnisse refraktionssismischer und gravimetrischer Untersuchungen“, von Holger Mandler.
- Heft Nr. 173/1995** – „Paläozoische Akkretion am paläopazifischen Kontinentalrand der Antarktis in Nordvictorialand – P-T-D-Geschichte und Deformationsmechanismen im Bowers Terrane“, von Stefan Matzer.
- Heft Nr. 174/1995** – „The Expedition ARKTIS-X/2 of RV ‚Polarstern‘ in 1994“, edited by Hans-W. Hubberten
- Heft Nr. 175/1995** – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1994“, edited by Christine Siebert and Gmityr Bolshiyarov.
- * **Heft Nr. 176/1995** – „Russian-German Cooperation: Laptev Sea System“, edited by Heidemarie Kassens, Dieter Piepenburg, Jörn Thiede, Leonid Timokhov, Hans-Wolfgang Hubberten and Sergey M. Priamikov.
- Heft Nr. 177/1995** – „Organischer Kohlenstoff in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans: Terrigener Eintrag und marine Produktivität“, von Carsten J. Schubert
- Heft Nr. 178/1995** – „Cruise ANTARKTIS XII/4 of RV ‚Polarstern‘ in 1995: CTD-Report“, by Jüri Sildam.
- Heft Nr. 179/1995** – „Benthische Foraminiferenfaunen als Wassermassen-, Produktions- und Eisdriftanzeiger im Arktischen Ozean“, von Jutta Wollenburg.
- Heft Nr. 180/1995** – „Biogenopal und biogenes Barium als Indikatoren für spätquartäre Produktivitätsänderungen am antarktischen Kontinentalhang, atlantischer Sektor“, von Wolfgang J. Bonn.
- Heft Nr. 181/1995** – „Die Expedition ARKTIS X/1 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach.
- Heft Nr. 182/1995** – „Laptev Sea System: Expeditions in 1994“, edited by Heidemarie Kassens.
- Heft Nr. 183/1996** – „Interpretation digitaler Parasound Echolotaufzeichnungen im östlichen Arktischen Ozean auf der Grundlage physikalischer Sedimenteigenschaften“, von Uwe Bergmann.
- Heft Nr. 184/1996** – „Distribution and dynamics of inorganic nitrogen compounds in the troposphere of continental, coastal, marine and Arctic areas“, by Maria Dolores Andrés Hernández.
- Heft Nr. 185/1996** – „Verbreitung und Lebensweise der Aphroditen und Polynoiden (Polychaeta) im östlichen Weddellmeer und im Lazarevmeer (Antarktis)“, von Michael Sillker.
- Heft Nr. 186/1996** – „Reconstruction of Late Quaternary environmental conditions applying the natural radionuclides ^{230}Th , ^{10}Be , ^{231}Pa and ^{238}U : A study of deep-sea sediments from the eastern sector of the Antarctic Circumpolar Current System“, by Martin Frank.
- Heft Nr. 187/1996** – „The Meteorological Data of the Neumayer Station (Antarctica) for 1992, 1993 and 1994“, by Gert König-Langlo and Andreas Herber.
- Heft Nr. 188/1996** – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe.
- Heft Nr. 189/1996** – „Die Expedition ARKTIS-VII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“, herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe

- Heft Nr. 190/1996** – "Cruise report of the Joint Chilean-German-Italian Magellan, Victor Hensen' Campaign in 1994", edited by Wolf Arntz and Matthias Gorny.
- Heft Nr. 191/1996** – „Leitfähigkeits- und Dichtemessung an Eisbohrkernen“, von Frank Wilhelms.
- Heft Nr. 192/1996** – „Photosynthese-Charakteristika und Lebensstrategie antarktischer Makroalgen“, von Gabriele Weykam.
- Heft Nr. 193/1996** – „Heterogene Reaktionen von N_2O_5 und Hbr und ihr Einfluß auf den Ozonabbau in der polaren Stratosphäre“, von Sabine Seisel.
- Heft Nr. 194/1996** – „Ökologie und Populationsdynamik antarktischer Ophiuroiden (Echinodermata)“, von Corinna Dahm.
- Heft Nr. 195/1996** – „Die planktische Foraminifere *Neoglobobulimina pachyderma* (Ehrenberg) im Weddellmeer, Antarktis“, von Doris Berberich.
- Heft Nr. 196/1996** – „Untersuchungen zum Beitrag chemischer und dynamischer Prozesse zur Variabilität des stratosphärischen Ozons über der Arktis“, von Birgit Heese.
- Heft Nr. 197/1996** – "The Expedition ARKTIS-XI/2 of 'Polarstern' in 1995", edited by Gunther Krause.
- Heft Nr. 198/1996** – „Geodynamik des Westantarktischen Riftsystems basierend auf Apatit-Spaltspuranalysen“, von Frank Lisker.
- Heft Nr. 199/1996** – "The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report on CTD Measurements of RV 'Polarstern' Cruises ARKTIS IX/2 and 3", by Gerion Budéus and Wolfgang Schneider.
- Heft Nr. 200/1996** – "Stability of the Thermohaline Circulation in analytical and numerical models", by Gerrit Lohmann.
- Heft Nr. 201/1996** – „Trophische Beziehungen zwischen Makroalgen und Herbivoren in der Potter Cove (King George-Insel, Antarktis)“, von Katrin Iken.
- Heft Nr. 202/1996** – „Zur Verbreitung und Respiration ökologisch wichtiger Bodentiere in den Gewässern um Svalbard (Arktis)“, von Michael K. Schmid.
- Heft Nr. 203/1996** – „Dynamik, Rauigkeit und Alter des Meereises in der Arktis – Numerische Untersuchungen mit einem großskaligen Modell“, von Markus Harder.
- Heft Nr. 204/1996** – „Zur Parametrisierung der stabilen atmosphärischen Grenzschicht über einem antarktischen Schelfeis“, von Dörthe Handorf.
- Heft Nr. 205/1996** – "Textures and fabrics in the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation", by Thorsteinn Thorsteinsson.
- Heft Nr. 206/1996** – „Der Ozean als Teil des gekoppelten Klimasystems: Versuch der Rekonstruktion der glazialen Zirkulation mit verschiedenen komplexen Atmosphärenkomponenten“, von Kerstin Fieg.
- Heft Nr. 207/1996** – „Lebensstrategien dominanter antarktischer Oithonidae (Cyclopoida, Copepoda) und Oncaeidae (Poecilostomatoida, Copepoda) im Bellingshausenmeer“, von Cornelia Metz.
- Heft Nr. 208/1996** – „Atmosphäreneinfluß bei der Fernerkundung von Meereis mit passiven Mikrowellenradiometern“, von Christoph Oelke.
- Heft Nr. 209/1996** – „Klassifikation von Radarsatellitendaten zur Meereiserkennung mit Hilfe von LIne-Scanner-Messungen“, von Axel Bochert.
- Heft Nr. 210/1996** – „Die mit ausgewählten Schwämmen (Hexactinellida und Demospongiae) aus dem Weddellmeer, Antarktis, vergesellschaftete Fauna“, von Kathrin Kunzmann.
- Heft Nr. 211/1996** – "Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1995 and the Expedition KOLYMA 1995", by Dima Yu. Bolshiyarov and Hans-W. Hubberten.
- Heft Nr. 212/1996** – "Surface-sediment composition and sedimentary processes in the central Arctic Ocean and along the Eurasian Continental Margin", by Ruediger Stein, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan, and Kirsten Fahl.
- Heft Nr. 213/1996** – „Gonadenentwicklung und Eiproduktion dreier *Calanus*-Arten (Copepoda): Freilandbeobachtungen, Histologie und Experimente“, von Barbara Niehoff.
- Heft Nr. 214/1996** – „Numerische Modellierung der Übergangszone zwischen Eisschild und Eisschelf“, von Christoph Mayer.
- Heft Nr. 215/1996** – „Arbeiten der AWI-Forschungsstelle Potsdam in Antarktika, 1994/95“, herausgegeben von Ulrich Wand.
- Heft Nr. 216/1996** – „Rekonstruktion quartärer Klimaänderungen im atlantischen Sektor des Südpolarmees anhand von Radiolarien“, von Uta Brathauer.
- Heft Nr. 217/1996** – „Adaptive Semi-Lagrange-Finite-Elemente-Methode zur Lösung der Flachwassergleichungen: Implementierung und Parallelisierung“, von Jörn Behrens.
- Heft Nr. 218/1997** – "Radiation and Eddy Flux Experiment 1995 (REFLEX III)", by Jörg Hartmann, Axel Bochert, Dietmar Freese, Christoph Kottmeier, Dagmar Nagel and Andreas Reuter.
- Heft Nr. 219/1997** – „Die Expedition ANTARKTIS-XII mit FS ‚Polarstern‘ 1995. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XII/3, herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter.
- Heft Nr. 220/1997** – „Ein Beitrag zum Schwerfeld im Bereich des Weddellmeeres, Antarktis. Nutzung von Altimetermessungen des GEOSAT und ERS-1“, von Tilo Schöne.
- Heft Nr. 221/1997** – „Die Expeditionen ANTARKTIS-XIII/1-2 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1995/96“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Mike Lukas und Victor Smetacek.
- Heft Nr. 222/1997** – "Tectonic Structures and Glaciomarine Sedimentation in the South-Eastern Weddell Sea from Seismic Reflection Data", by László Oszkó.

- Heft Nr. 223/1997** – „Bestimmung der Meereisdicke mit seismischen und elektromagnetisch-induktiven Verfahren“, von Christian Haas.
- Heft Nr. 224/1997** – „Troposphärische Ozonvariationen in Polarregionen“, von Silke Wessel.
- Heft Nr. 225/1997** – „Biologische und ökologische Untersuchungen zur kryopelagischen Amphipodenfauna des arktischen Meeres“, von Michael Poltermann.
- Heft Nr. 226/1997** – „Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XI/1 of RV 'Polarstern' in 1995“, edited by Eike Rächor.
- Heft Nr. 227/1997** – „Der Einfluß kompatibler Substanzen und Kryoprotektoren auf die Enzyme Malatdehydrogenase (MDH) und Glucose-6-phosphat-Dehydrogenase (G6P-DH) aus *Acrosiphonia arctica* (Chlorophyta) der Arktis“, von Katharina Kück.
- Heft Nr. 228/1997** – „Die Verbreitung epibenthischer Mollusken im chilenischen Beagle-Kanal“, von Katrin Linse.
- Heft Nr. 229/1997** – „Das Mesozooplankton im Laptevmeer und östlichen Nansen-Becken - Verteilung und Gemeinschaftsstrukturen im Spätsommer“, von Hinrich Hanssen.
- Heft Nr. 230/1997** – „Modell eines adaptierbaren, rechnergestützten, wissenschaftlichen Arbeitsplatzes am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung“, von Lutz-Peter Kurdelski.
- Heft Nr. 231/1997** – „Zur Ökologie arktischer und antarktischer Fische: Aktivität, Sinnesleistungen und Verhalten“, von Christopher Zimmermann.
- Heft Nr. 232/1997** – „Persistente chlororganische Verbindungen in hochantarktischen Fischen“, von Stephan Zimmermann.
- Heft Nr. 233/1997** – „Zur Ökologie des Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP)-Gehaltes temperierter und polarer Phytoplanktongemeinschaften im Vergleich mit Laborkulturen der Coccolithophoridae *Emiliania huxleyi* und der antarktischen Diatomee *Nitzschia lecontei*“, von Doris Meyerdirks.
- Heft Nr. 234/1997** – „Die Expedition ARCTIC '96 des FS „Polarstern“ (ARK XIII) mit der Arctic Climate System Study (ACSYS)“, von Ernst Augstein und den Fahrtteilnehmern.
- Heft Nr. 235/1997** – „Polonium-210 und Blei-210 im Südpolarmeer: Natürliche Tracer für biologische und hydrographische Prozesse im Oberflächenwasser des Antarktischen Zirkumpolarstroms und des Weddellmeeres“, von Jana Friedrich.
- Heft Nr. 236/1997** – „Determination of atmospheric trace gas amounts and corresponding natural isotopic ratios by means of ground-based FTIR spectroscopy in the high Arctic“, by Arndt Meier.
- Heft Nr. 237/1997** – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR/SEVERNAYA ZEMLYA 1996“, edited by Martin Melles, Birgit Hagedorn and Dmitri Yu. Bolshiyarov.
- Heft Nr. 238/1997** – „Life strategy and ecophysiology of Antarctic macroalgae“, by Iván M. Gómez.
- Heft Nr. 239/1997** – „Die Expedition ANTARKTIS XIII/4-5 des Forschungsschiffes „Polarstern“ 1996“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach und Dieter Gerdes.
- Heft Nr. 240/1997** – „Untersuchungen zur Chrom-Speziation in Meerwasser, Meereis und Schnee aus ausgewählten Gebieten der Arktis“, von Heide Giese.
- Heft Nr. 241/1997** – „Late Quaternary glacial history and paleoceanographic reconstructions along the East Greenland continental margin: Evidence from high-resolution records of stable isotopes and ice-rafted debris“, by Seung-Il Nam.
- Heft Nr. 242/1997** – „Thermal, hydrological and geochemical dynamics of the active layer at a continuous permafrost site, Taymyr Peninsula, Siberia“, by Julia Boike.
- Heft Nr. 243/1997** – „Zur Paläoozeanographie hoher Breiten: Stellvertreterdaten aus Foraminiferen“, von Andreas Mackensen.
- Heft Nr. 244/1997** – „The Geophysical Observatory at Neumayer Station, Antarctica, Geomagnetic and seismological observations in 1995 and 1996“, by Alfons Eckstaller, Thomas Schmidt, Viola Graw, Christian Müller and Johannes Røgenhagen.
- Heft Nr. 245/1997** – „Temperaturbedarf und Biogeographie mariner Makroalgen - Anpassung mariner Makroalgen an tiefe Temperaturen“, von Bettina Bischoff-Bäsmann.
- Heft Nr. 246/1997** – „Ökologische Untersuchungen zur Fauna des arktischen Meeres“, von Christine Friedrich.
- Heft Nr. 247/1997** – „Entstehung und Modifizierung von marinen gelösten organischen Substanzen“, von Berit Kirchoff.
- Heft Nr. 248/1997** – „Laptev Sea System: Expeditions in 1995“, edited by Heidemarie Kassens.
- Heft Nr. 249/1997** – „The Expedition ANTARKTIS XIII/3 (EASIZ I) of RV 'Polarstern' to the eastern Weddell Sea in 1996“, edited by Wolf Arntz and Julian Gutt.
- Heft Nr. 250/1997** – „Vergleichende Untersuchungen zur Ökologie und Biodiversität des Mega-Epibenthos der Arktis und Antarktis“, von Andreas Starmans.
- Heft Nr. 251/1997** – „Zeitliche und räumliche Verteilung von Mineralvergesellschaftungen in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans und ihre Nützlichkeit als Klimaindikatoren während der Glazial/Interglazial-Wechsel“, von Christoph Vogt.
- Heft Nr. 252/1997** – „Solitäre Ascidien in der Potter Cove (King George Island, Antarktis). Ihre ökologische Bedeutung und Populationsdynamik“, von Stephan Kühne.
- Heft Nr. 253/1997** – „Distribution and role of microprotozoa in the Southern Ocean“, by Christine Klaas.
- Heft Nr. 254/1997** – „Die spätquartäre Klima- und Umweltgeschichte der Bungee-Oase, Ostantarktis“, von Thomas Kulbe.

- Heft Nr. 255/1997** – "Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/2 of RV 'Polarstern' in 1997", edited by Ruediger Stein and Kirsten Fahl.
- Heft Nr. 256/1998** – „Das Radionuklid Tritium im Ozean: Meßverfahren und Verteilung von Tritium im Südatlantik und im Weddellmeer“, von Jürgen Sültenfuß.
- Heft Nr. 257/1998** – „Untersuchungen der Saisonalität von atmosphärischem Dimethylsulfid in der Arktis und Antarktis“, von Christoph Kleefeld.
- Heft Nr. 258/1998** – „Bellingshausen- und Amundsenmeer: Entwicklung eines Sedimentationsmodells“, von Frank-Oliver Nilsche.
- Heft Nr. 259/1998** – "The Expedition ANTARKTIS-XIV/4 of RV 'Polarstern' in 1997", by Dieter K. Fütterer.
- Heft Nr. 260/1998** – „Die Diatomeen der Laptevsee (Arktischer Ozean): Taxonomie und biogeographische Verbreitung“, von Holger Cremer
- Heft Nr. 261/1998** – „Die Krustenstruktur und Sedimentdecke des Eurasischen Beckens, Arktischer Ozean: Resultate aus seismischen und gravimetrischen Untersuchungen“, von Estella Weigelt.
- Heft Nr. 262/1998** – "The Expedition ARKTIS-XIII/3 of RV 'Polarstern' in 1997", by Gunther Krause.
- Heft Nr. 263/1998** – „Thermo-tektonische Entwicklung von Oates Land und der Shackleton Range (Antarktis) basierend auf Spaltspuranalysen“, von Thorsten Schäfer.
- Heft Nr. 264/1998** – „Messungen der stratosphärischen Spurengase ClO, HCl, O₃, N₂O, H₂O und OH mittels flugzeuggetragener Submillimeterwellen-Radiometrie“, von Joachim Urban.
- Heft Nr. 265/1998** – „Untersuchungen zu Massenhaushalt und Dynamik des Ronne Ice Shelves, Antarktis“, von Astrid Lambrecht.
- Heft Nr. 266/1998** – "Scientific Cruise Report of the Kara Sea Expedition of RV 'Akademic Boris Petrov' in 1997", edited by Jens Matthiessen and Oleg Stepanets.
- Heft Nr. 267/1998** – „Die Expedition ANTARKTIS-XIV mit FS ‚Polarstern‘ 1997. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XIV/3“, herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter.
- Heft Nr. 268/1998** – „Numerische Modellierung der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Meereis in der arktischen Eisrandzone“, von Gerit Birnbaum.
- Heft Nr. 269/1998** – "Kalabatic wind and Boundary Layer Front Experiment around Greenland (KABEG '97)", by Günther Heinemann.
- Heft Nr. 270/1998** – "Architecture and evolution of the continental crust of East Greenland from integrated geophysical studies", by Vera Schindwein.
- Heft Nr. 271/1998** – "Winter Expedition to the Southwestern Kara Sea - Investigations on Formation and Transport of Turbid Sea-Ice", by Dirk Dethleff, Per Loewe, Dominik Weiel, Hartmut Nies, Gesa Kuhlmann, Christian Bahe and Gennady Tarasov.
- Heft Nr. 272/1998** – „FTIR-Emissionsspektroskopische Untersuchungen der arktischen Atmosphäre“, von Edo Becker.
- Heft Nr. 273/1998** – „Sedimentation und Tektonik im Gebiet des Agulhas Rückens und des Agulhas Plateaus („SETARAP“)“, von Gabriele Uenzelmann-Neben.
- Heft Nr. 274/1998** – "The Expedition ANTARKTIS XIV/2", by Gerhard Kattner.
- Heft Nr. 275/1998** – „Die Auswirkung der 'NorthEastWater'-Polynya auf die Sedimentation von NO-Grönland und Untersuchungen zur Paläo-Ozeanographie seit dem Mittelweichsel“, von Hanne Notholt.
- Heft Nr. 276/1998** – „Interpretation und Analyse von Potentialfelddaten im Weddellmeer, Antarktis: der Zerfall des Superkontinents Gondwana“, von Michael Studinger.
- Heft Nr. 277/1998** – „Koordiniertes Programm Antarktisforschung“. Berichtskolloquium im Rahmen des Koordinierten Programms „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten“, herausgegeben von Hubert Miller.
- Heft Nr. 278/1998** – „Messung stratosphärischer Spurengase über Ny-Ålesund, Spitzbergen, mit Hilfe eines bodengebundenen Mikrowellen-Radiometers“, von Uwe Raffalski.
- Heft Nr. 279/1998** – "Arctic Paleo-River Discharge (APARD). A New Research Programme of the Arctic Ocean Science Board (AOSB)", edited by Ruediger Stein.
- Heft Nr. 280/1998** – „Fernerkundungs- und GIS-Studien in Nordostgrönland“ von Friedrich Jung-Rothenhäusler.
- Heft Nr. 281/1998** – „Rekonstruktion der Oberflächenwassermassen der östlichen Laptevsee im Holozän anhand von aquatischen Palynomorphen“, von Martina Kunz-Pirring.
- Heft Nr. 282/1998** – "Scavenging of ²³¹Pa and ²³⁰Th in the South Atlantic: Implications for the use of the ²³¹Pa/²³⁰Th ratio as a paleoproductivity proxy", by Hans-Jürgen Walter.
- Heft Nr. 283/1998** – „Sedimente im arktischen Meereis - Eintrag, Charakterisierung und Quantifizierung“, von Frank Lindemann.
- Heft Nr. 284/1998** – „Langzeitanalyse der antarktischen Meereisbedeckung aus passiven Mikrowellendaten“, von Christian H. Thomas.
- Heft Nr. 285/1998** – „Mechanismen und Grenzen der Temperaturanpassung beim Pierwurm *Arenicola marina* (L.)“, von Angela Sommer.
- Heft Nr. 286/1998** – „Energieumsätze benthischer Filtrierer der Potter Cove (King George Island, Antarktis)“, von Jens Kowalke.
- Heft Nr. 287/1998** – "Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Research from the Barents Sea up to the Laptev Sea", edited by Eike Rachor.

- Heft Nr. 288/1998** – „Alfred Wegener. Kommentiertes Verzeichnis der schriftlichen Dokumente seines Lebens und Wirkens“, von Ulrich Wutzke.
- Heft Nr. 289/1998** – „Retrieval of Atmospheric Water Vapor Content in Polar Regions Using Spaceborne Microwave Radiometry“, by Jungang Miao.
- Heft Nr. 290/1998** – „Strukturelle Entwicklung und Petrogenese des nördlichen Kristallingürtels der Shackleton Range, Antarktis: Proterozoische und Ross-orogene Krustendynamik am Rand des Ostantarktischen Kratons“, von Axel Brommer.
- Heft Nr. 291/1998** – „Dynamik des arktischen Meereises - Validierung verschiedener Rheologieansätze für die Anwendung in Klimamodellen“, von Martin Kreyscher.
- Heft Nr. 292/1998** – „Anthropogene organische Spurenstoffe im Arktischen Ozean, Untersuchungen chlorierter Biphenyle und Pestizide in der Laptevsee, technische und methodische Entwicklungen zur Probenahme in der Arktis und zur Spurenstoffanalyse“, von Sven Utschakowski.
- Heft Nr. 293/1998** – „Rekonstruktion der spätquartären Klima- und Umweltgeschichte der Schirmacher Oase und des Wohlthat Massivs (Ostantarktika)“, von Markus Julius Schwab.
- Heft Nr. 294/1998** – „Besiedlungsmuster der benthischen Makrofauna auf dem ostgrönländischen Kontinentalhang“, von Klaus Schnack.
- Heft Nr. 295/1998** – „Gehäuseuntersuchungen an planktischen Foraminiferen hoher Breiten: Hinweise auf Umweltveränderungen während der letzten 140.000 Jahre“, von Harald Hommers.
- Heft Nr. 296/1998** – „Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/1 of RV 'Polarstern' in 1997“, edited by Michael Spindler, Wilhelm Hagen and Dorothea Stübing.
- Heft Nr. 297/1998** – „Radiometrische Messungen im arktischen Ozean - Vergleich von Theorie und Experiment“, von Klaus-Peter Johnsen.
- Heft Nr. 298/1998** – „Patterns and Controls of CO₂ Fluxes in Wet Tundra Types of the Taimyr Peninsula, Siberia - the Contribution of Soils and Mosses“, by Martin Sommerkorn.
- Heft Nr. 299/1998** – „The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica. Synopsis of research performed within the frame of the Argentinean-German Cooperation at the Dallmann Laboratory and Jubany Station (King George Island, Antarctica, 1991 - 1997)“, by Christian Wiencke, Gustavo Ferreyra, Wolf Arntz & Carlos Rinaldi.
- Heft Nr. 300/1999** – „The Kara Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' 1997: First Results of a Joint Russian-German Pilot Study“, edited by Jens Matthiessen, Oleg V. Stepanets, Ruediger Stein, Dieter K. Fütterer, and Eric M. Galimov.
- Heft Nr. 301/1999** – „The Expedition ANTARKTIS XV/3 (EASIZ II)“, edited by Wolf E. Arntz and Julian Gutt.
- Heft Nr. 302/1999** – „Sterole im herbstlichen Weddellmeer (Antarktis): Großräumige Verteilung, Vorkommen und Umsatz“, von Anneke Mühlebach.
- Heft Nr. 303/1999** – „Polare stratosphärische Wolken: Lidar-Beobachtungen, Charakterisierung von Entstehung und Entwicklung“, von Jens Biele.
- Heft Nr. 304/1999** – „Spätquartäre Paläoumweltbedingungen am nördlichen Kontinentalrand der Barents- und Kara-See. Eine Multi-Parameter-Analyse“, von Jochen Knies.
- Heft Nr. 305/1999** – „Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study (ARTIST)“, by Jörg Hartmann, Frank Albers, Stefania Argentini, Axel Bocher, Ubaldo Bonafé, Wolfgang Cohrs, Alessandro Conidi, Dietmar Freese, Teodoro Georgiadis, Alessandro Ippoliti, Lars Kaleschke, Christof Lüpkes, Uwe Maixner, Gianguseppe Mastrantonio, Fabrizio Ravegnani, Andreas Reuter, Giuliano Trivellone and Angelo Viola.
- Heft Nr. 306/1999** – „German-Russian Cooperation: Biogeographic and biostratigraphic investigations on selected sediment cores from the Eurasian continental margin and marginal seas to analyze the Late Quaternary climatic variability“, edited by Robert R. Spielhagen, Max S. Barash, Gennady I. Ivanov, and Jörn Thiede.
- Heft Nr. 307/1999** – „Struktur und Kohlenstoffbedarf des Makrobenthos am Kontinentalhang Ostgrönlands“, von Dan Seiler.
- Heft Nr. 308/1999** – „ARCTIC '98: The Expedition ARK-XIV/1a of RV 'Polarstern' in 1998“, edited by Wilfried Jokat.
- Heft Nr. 309/1999** – „Variabilität der arktischen Ozonschicht: Analyse und Interpretation bodengebundener Millimeterwellenmessungen“, von Björn-Martin Sinnhuber.
- Heft Nr. 310/1999** – „Rekonstruktion von Meereisdrift und terrigenem Sedimenteintrag im Spätquartär: Schwermineralassoziationen in Sedimenten des Laptev-See-Kontinentalrandes und des zentralen Arktischen Ozeans“, von Marion Behrends.
- Heft Nr. 311/1999** – „Parameterisierung atmosphärischer Grenzschichtprozesse in einem regionalen Klimamodell der Arktis“, von Christoph Abegg.
- Heft Nr. 312/1999** – „Solare und terrestrische Strahlungswechselwirkung zwischen arktischen Eisflächen und Wolken“, von Dietmar Freese.
- Heft Nr. 313/1999** – „Snow accumulation on Ekströmsisen, Antarctica“, by Elisabeth Schlosser, Hans Oerter and Wolfgang Graf.
- Heft Nr. 314/1999** – „Die Expedition ANTARKTIS XV/4 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach.
- Heft Nr. 315/1999** – „Expeditions in Siberia in 1998“, edited by Volker Rachold.
- Heft Nr. 316/1999** – „Die postglaziale Sedimentationsgeschichte der Laptevsee: schwermineralogische und sedimentpetrographische Untersuchungen“, von Bernhard Peregovich.
- Heft-Nr. 317/1999** – „Adaption an niedrige Temperaturen: Lipide in Eisdiatomeen“, von Heidi Lehmal.
- Heft-Nr. 318/1999** – „Effiziente parallele Lösungsverfahren für elliptische partielle Differentialgleichungen in der numerischen Ozeanmodellierung“, von Natalja Rakowsky.

Heft-Nr. 319/1999 – „The Ecology of Arctic Deep-Sea Copepods (Euchaetidae and Aetideidae). Aspects of their Distribution, Trophodynamics and Effect on the Carbon Flux“, by Holger Auel.

Heft-Nr. 320/1999 – „Modellstudien zur arktischen stratosphärischen Chemie im Vergleich mit Meßdaten“, von Veronika Eyring.

Heft-Nr. 321/1999 – „Analyse der optischen Eigenschaften des arktischen Aerosols“, von Dagmar Nagel.

Heft-Nr. 322/1999 – „Messungen des arktischen stratosphärischen Ozons: Vergleich der Ozonmessungen in Ny-Ålesund, Spitzbergen, 1997 und 1998“, von Jens Langer

Heft-Nr. 323/1999 – „Untersuchung struktureller Elemente des südöstlichen Weddellmeeres / Antarktis auf der Basis mariner Potentialfelddaten“, von Uwe F. Meyer.

Heft-Nr. 324/1999 – „Geochemische Verwitterungstrends eines basaltischen Ausgangsgesteins nach dem spätpleistozänen Gletscherrückzug auf der Taimyrhalbinsel (Zentralsibirien) - Rekonstruktion an einer sedimentären Abfolge des Lama Sees“, von Stefanie K. Harwart.

Heft-Nr. 325/1999 – „Untersuchungen zur Hydrologie des arktischen Meereises - Konsequenzen für den kleinskaligen Stofftransport“, von Johannes Freitag.

Heft-Nr. 326/1999 – „Die Expedition ANTARKTIS XIV/2 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach.

Heft-Nr. 327/1999 – „Gemeinschaftsanalytische Untersuchungen der Harpacticoidenfauna der Magellanregion, sowie erste similaritätsanalytische Vergleiche mit Assoziationen aus der Antarktis“, von Kai Horst George.

Heft-Nr. 328/1999 – „Rekonstruktion der Paläo-Umweltbedingungen am Laptev-See-Kontinentalrand während der beiden letzten Glazial/Interglazial-Zyklen anhand sedimentologischer und mineralogischer Untersuchungen“, von Claudia Müller.

Heft-Nr. 329/1999 – „Räumliche und zeitliche Variationen atmosphärischer Spurengase aus bodengebundenen Messungen mit Hilfe eines Michelson Interferometers“, von Justus Notholt.

Heft-Nr. 330/1999 – „The 1998 Danish-German Excursion to Disko Island, West Greenland“, edited by Angelika Brandt, Helge A. Thomsen, Henning Heide-Jørgensen, Reinhardt M. Kristensen and Hilke Ruhberg.

Heft-Nr. 331/1999 – „Poseidon“ Cruise No. 243 (Reykjavik - Greenland - Reykjavik, 24 August - 11 September 1998): Climate change and the Viking-age fjord environment of the Eastern Settlement, sw Greenland“, by Gerd Hoffmann, Antoon Kuijpers, and Jörn Thiede.

Heft-Nr. 332/1999 – „Modeling of marine biogeochemical cycles with an emphasis on vertical particle fluxes“, by Regina Usbeck.

Heft-Nr. 333/1999 – „Die Tanaidaceenfauna des Beagle-Kanals und ihre Beziehungen zur Fauna des antarktischen Festlandssockels“, von Anja Schmidt.

Heft-Nr. 334/1999 – „D-Aminosäuren als Tracer für biogeochemische Prozesse im Fluß-Schelf-Ozean-System der Arktis“, von Hans Peter Fitznar.

Heft-Nr. 335/1999 – „Ökophysiologische Ursachen der limitierten Verbreitung reptanter decapoder Krebse in der Antarktis“, von Markus Frederich.

Heft-Nr. 336/1999 – „Ergebnisse der Untersuchung des grönländischen Inlandeises mit dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren in der Umgebung von NGRIP“, von Fidan Göktas.

Heft-Nr. 337/1999 – „Paleozoic and mesozoic tectono-thermal history of central Dronning Maud Land, East Antarctica, – evidence from fission-track thermochronology“, by Stefanie Meier.

Heft-Nr. 338/1999 – „Probleme hoher Stoffwechselraten bei Cephalopoden aus verschiedenen geographischen Breiten“, von Susanne Zielinski.

Heft-Nr. 339/1999 – „The Expedition ARKTIS XV/1“, edited by Gunther Krause.

Heft-Nr. 340/1999 – „Microbial Properties and Habitats of Permafrost Soils on Taimyr Peninsula, Central Siberia“, by Nicolé Schmidt.

Heft-Nr. 341/1999 – „Photoacclimation of phytoplankton in different biogeochemical provinces of the Southern Ocean and its significance for estimating primary production“, by Astrid Bracher.

Heft-Nr. 342/1999 – „Modern and Late Quaternary Depositional Environment of the St. Anna Trough Area, Northern Kara Sea“, edited by Ruediger Stein, Kirsten Fahl, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan, and Gennady Tarasov.

Heft-Nr. 343/1999 – „ESF-IMPACT Workshop/Oceanic impacts: mechanisms and environmental perturbations, 15 - 17 April 1999 in Bremerhaven“, edited by Rainer Gersonde and Alexander Deutsch.

Heft-Nr. 344/1999 – „Die Klimageschichte der hohen nördlichen Breiten seit dem mittleren Miozän: Hinweise aus sedimentologischen- und mineralogischen Analysen (OPD Leg 151, zentrale Framstraße)“, von Amelie Winkler.

Heft-Nr. 345/1999 – „Kurzfristige Klimaschwankungen im Scotiameer und Ergebnisse zur Kalbungsgeschichte der Antarktis während der letzten 200 000 Jahre“, von Annette Hofmann.

Heft-Nr. 346/2000 – „Glazialmarine Sedimentationsentwicklung am westantarktischen Kontinentalrand im Amundsen- und Bellingshausenmeer - Hinweise auf Paläoweltveränderungen während der quartären Klimazyklen“, von Claus-Dieter Hillenbrand

Heft-Nr. 347/2000 – „Zur Ökologie des Phytoplanktons im arktischen Laptevmeer - ein jahreszeitlicher Vergleich“, von Kirsten Tuschling.

Heft-Nr. 348/2000 – „Untersuchungen zum Fettstoffwechsel des Südlichen See-Elefanten (*Mirounga leonina* L.) in der Antarktis“, von Sven Ramdohr.

Heft-Nr. 349/2000 – „Licht- und Temperatureinfluß auf den enzymatischen Oxidationsschutz der antarktischen Eisdiatomee *Entomoneis kufferathii* Manguin“, von Raimund Schriek.

- Heft-Nr. 350/2000** – „Die Expedition ARKTIS XV/3 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1999“
herausgegeben von Ursula Schauer.
- Heft-Nr. 351/2000** – „Dissolution kinetics of biogenic silica in marine environments“, by Dirk Rickert.
- Heft-Nr. 352/2000** – „Geometrie und Kinematik des tertiären Deckenbaus im West Spitzbergen Falten- und Überschiebungsgürtel, Brøggerhalvøya, Svalbard“, von Kerstin Saalman.
- Heft-Nr. 353/2000** – „Zur Ökologie der Benthos-Foraminiferen der Potter Cove (King George Island, Antarktis)“, von Michaela Mayer.
- Heft-Nr. 354/2000** – „Expeditions in Siberia in 1999“, edited by Volker Rachold.
- Heft-Nr. 355/2000** – „Temperaturrekonstruktion im Tropischen Atlantik für das Letzte Glaziale Maximum: CLIMAP neu betrachtet.“, von Carsten Porthun.
- Heft-Nr. 356/2000** – „Niederfrequente Variabilität großräumiger atmosphärischer Zirkulationsstrukturen in spektralen Modellen niederer Ordnung“, von Antje Weisheimer.
- Heft-Nr. 357/2000** – „Late Quaternary paleoclimatic reconstructions along the Eurasian continental margin“, by Hans Peter Kleiber.
- Heft-Nr. 358/2000** – „Holocene environmental history of East Greenland - evidence from lake sediments“, by Bernd Wagner.
- Heft-Nr. 359/2000** – „Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Ecology of the White Sea with Emphasis on its Deep Basin“, edited by Eike Rachor.
- Heft-Nr. 360/2000** – „Scientific Cruise Report of the Joint Russian-German Kara-Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' in 1999“, edited by Ruediger Stein and Oleg Stepanets.
- Heft-Nr. 361/2000** – „Planktic foraminifer ecology and stable isotope geochemistry in the Arctic Ocean: implications from water column and sediment surface studies for quantitative reconstructions of oceanic parameters“ by Renate Volkmann.
- Heft-Nr. 362/2000** – „Eisbohrkernuntersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität von Temperatur und Niederschlagsrate im Spätholozän in Nordgrönland“, von Matthias Schwager.
- Heft-Nr. 363/2000** – „Benthische Peracarida (Crustacea, Malacostraca) des arktischen Mellemfjordes, West-Grönland“, von Anne-Nina Lörz.
- Heft-Nr. 364/2000** – Die Expeditionen ANTARKTIS XVI / 3-4 des Forschungsschiffes „POLARSTERN“ 1999,
herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek und Manfred Reinke.
- Heft-Nr. 365/2000** – „Organic carbon in Late Quaternary sediments: Responses to paleoenvironmental changes in the Laptev and Kara seas (Arctic Ocean)“, by Bettina Boucsein.
- Heft-Nr. 366/2000** – „Flugzeuggestützte Topographie- und Schweremessung: Meßsystem und Anwendung auf die Region Framstraße, Spitzbergen und Nordostgrönland“, von Tobias Boebel.
- Heft-Nr. 367/2000** – „Messung dielektrischer Eigenschaften polarer Eiskerne“, von Frank Wilhelms.
- Heft-Nr. 368/2000** – „The Expedition ARKTIS-XV/2 of RV 'Polarstern' in 1999“, edited by Wilfried Jokat.
- Heft-Nr. 369/2000** – „Interpretation seismischer und gravimetrischer Daten des Weddellmeeres, Antarktis“, von Johannes Rogenhagen.
- Heft-Nr. 370/2000** – „Struktureigenschaften und Nahrungsbedarf der Zoobenthosgemeinschaften im Bereich des Lomonossowrückens im Arktischen Ozean“, von Hendrik Deubel.
- Heft-Nr. 371/2000** – „Die Rolle der Schneebedeckung für die Kryptogamen-Vegetation in der maritimen Antarktis (Potter-Halbinsel, King George Island)“, von Jana Barbro Winkler.
- Heft-Nr. 372/2000** – „Biodiversity of the Weddell Sea: macrozoobenthic species (demersal fish included) sampled during the expedition ANT XIII/3 (EASIZ I) with RV 'Polarstern“, edited by Julian Gutt, Boris I. Sirenko, Wolf E. Arntz, Igor S. Smirnov, and Claude De Broyer.
- Heft-Nr. 373/2000** – „Benthische Foraminiferen im Boreas-Becken, Grönlandsee: Verbreitung und paläo-ozeanographische Rekonstruktionen für die letzten 450.000 Jahre“, von Sabine Magnus.
- Heft-Nr. 374/2000** – „Scherwellendoppelbrechungsanalyse von Registrierungen der Stationen des seismologischen Netzwerkes an der Neumayer Station, Antarktis: Seismische Anisotropie und die tektonische Entwicklung des Kontinentalrandes Queen Maud Lands“, von Christian Müller.
- Heft-Nr. 375/2000** – „Effects of enhanced UV-radiation on photosynthesis of Arctic/cold-temperate macroalgae“, by Kai Bischof.
- Heft-Nr. 376/2000** – „Saisonalität und kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols und des bodennahen Ozons in der Antarktis (Neumayer-Station) unter Berücksichtigung der Meereisbedeckung“, von Jörg Hofmann

* vergiffen/out of print.
** nur noch beim Autor/only from the author.

