

UNIVERSITÄT BREMEN
Institut für Umweltphysik
Ozeanographie

**Interpretation von
FCKW-Datensätzen im Weddellmeer**

Dissertation

von

Olaf Klatt

Postadresse:
Kufsteiner Straße
D-28359 Bremen



Universität Bremen
Institut für Umweltphysik
Februar 2002

Abstract

The aim of this thesis is to generate a circulation scheme of the deep water masses of the Weddell Sea with the primary objective to estimate production rates of different sources of these water masses using chlorofluorocarbon(CFC) data.

Repeated observations of CFC for a section along the Prime Meridian from Antarctica (70°S) to approximately 50°S are presented for the period 1984 – 1998. In addition CFC data from the Weddell Sea section (Kapp Norvegia – Joinville Island) for the period 1992 – 1998 are considered. For various observed CFC features at this sections CFC time series have been generated. This have been done particular for two deep cores of CFC-11 maxima adjoining the southern and northern margins of the Weddell Basin and elevated CFC concentrations over and slightly south of the Middle Atlantic Ridge. The two deep cores represent the southern inflow and the northern outflow of recently ventilated water masses into respective out of the Weddell Basin. The mid-depth core shows recently ventilated water which has been produced in the northern part of the Weddell Sea.

Due to the fact that existing concepts are insufficient for the interpretation of such data sets a new method of analyzing CFC data has been developed. The new technique uses parameter fitting to the CFC time series for the various cores for all realizations, and an age distribution rather than a fixed mean age of the tracer containing fraction. The outcome of this approach is the best fit of the age distribution, i.e. the fraction and the age of recently ventilated water. In contrast to previous methods more information about the age structure and a better error estimation could be derived.

The convolution of the CFC and the velocity field over the area of the mentioned cores results in the CFC transport through the section in this cores. The ratio of this value and the CFC surface concentration at the time of the water mass formation is an estimation of the transport of recently ventilated water within the core. Applying this to the deep cores at both sections a circulation scheme of the deep recently ventilated water could be estimated. From this scheme the production rates of the source in the western Weddell Sea and east of it (off Amery Ice Shelf) have been derived. Furthermore, the transport of the ventilated water of the mid-depth core has given an estimation of the productivity of the northern Weddell Sea. The comparison of these three sources has shown a surprising result: The production rates of all sources are in the same range (2.1 ± 0.8 Sv western Weddell Sea; 2.4 ± 0.8 Sv Amery Ice Shelf, about 3 Sv northern Weddell Sea). This finding reduces the relative importance of the western Weddell Sea as source of AABW.

1	EINLEITUNG	1
2	OZEANOGRAPHIE DES WEDDELLMEERES	7
2.1	DER SÜDLICHE OZEAN.....	7
2.2	TOPOGRAPHIE DES WEDDELLMEERES UND DES WEDDELL-BECKENS	9
2.2.1	<i>Begrenzung</i>	9
2.2.2	<i>Bathymetrie</i>	10
2.3	DIE HAUPTWASSERMASSEN IM WEDDELLMEER	11
2.4	TIEFEN- UND BODENWASSERMASSEN-BILDUNG	13
2.4.1	<i>Bildung von Schelf-Wassermassen</i>	14
2.4.2	<i>Bildung von Bodenwasser</i>	15
2.4.3	<i>Bildung von Tiefenwasser</i>	16
2.5	ZIRKULATION DES TIEFEN WEDDELLMEERES	17
3	TRACERMETHODIK.....	21
3.1	FLUORKOHLLENWASSERSTOFFE	21
3.1.1	<i>FCKW-Eintrag in den Ozean</i>	22
3.2	KLASSISCHE KONZEPTE ZUR BESTIMMUNG DES ALTERS EINER WASSERMASSE MITTELS FCKW-VERTEILUNGEN	24
3.2.1	<i>Konzentrationsalter</i>	24
3.2.2	<i>Verhältnialter</i>	26
3.3	BESTIMMUNG DES ALTERS EINER WASSERMASSE DURCH ANPASSUNG EINER ALTERSVERTEILUNG AN FCKW-KONZENTRATIONEN WIEDERHOLER SCHNITTE	27
3.3.1	<i>Altersverteilung</i>	27
3.3.2	<i>Anpassung der Altersverteilung</i>	32
3.4	BESTIMMUNG DES TRANSPORTS VON JUNGEM WASSER SENKRECHT ZU EINEM SCHNITT.....	35
3.4.1	<i>Regionale Methode</i>	35
3.4.2	<i>Lokale Methode</i>	36
3.5	ALTERSBESTIMMUNGEN MITTELS TRITIUM UND HELIUM.....	37
3.5.1	<i>Tritium</i>	37
3.5.2	<i>Helium</i>	39
3.5.3	<i>Tritium-Helium Alter</i>	41
3.5.4	<i>Stabiles-Tritium-Alter</i>	41

4	DER FCKW-DATENSATZ.....	43
4.1	AJAX LEG 2	44
4.2	ANT V/2	45
4.3	METEOR 11/5	45
4.4	ANT X/4	46
4.4.1	<i>FCKW-Daten des Null-Meridians</i>	47
4.4.2	<i>FCKW-Schnitt durch das Weddellmeer</i>	49
4.5	ANT XII/3.....	50
4.6	ANT XIII/4	52
4.7	ANT XV/4.....	54
4.8	STRÖMUNGSMESSUNGEN	57
5	BEOBACHTUNGEN.....	59
5.1	DER NULL-MERIDIAN-SCHNITT	59
5.2	DER WEDDELLMEER SCHNITT.....	63
5.3	BEREICH UM DAS SÜD-ORKNEY-PLATEAU	67
6	AUSWERTUNG DES NULL-MERIDIAN-SCHNITTES.....	69
6.1	DEFINITION DER WASSERMASSEN-KERNE AUF DEM NULL-MERIDIAN	69
6.2	BESTIMMUNG DER SÄTTIGUNG DER QUELLWASSERMASSEN.....	71
6.3	BERECHNUNG DES ALTERS UND DES ANTEILS DER JUNGEN KOMPONENTE MITTELS KLASSISCHER KONZEPTE	73
6.3.1	<i>Konzentrationsalter</i>	74
6.3.2	<i>Verhältnialter</i>	75
6.3.3	<i>Zusammenfassung</i>	75
6.4	BERECHNUNG DES ALTERS UND DES ANTEILS DER JUNGEN KOMPONENTE MITTELS ANPASSUNG EINER ALTERSVERTEILUNG.....	76
6.5	ABSCHÄTZUNG DER AUSWIRKUNGEN VON VARIABILITÄT AUF FCKW- KONZENTRATIONEN	82
6.6	BERECHNUNG DES TRANSPORTES VON JUNGEN WASSERS DURCH DEN NULL- MERIDIAN-SCHNITT	86
6.7	ZUSAMMENFASSUNG	90

7	AUSWERTUNG DES WEDDELLMEER-SCHNITTES	93
7.1	DEFINITION DER WASSERMASSEN-KERNE AUF DEM WEDDELLMEER-SCHNITT....	93
7.2	ABSCHÄTZUNG DER ALTER DER JUNGEN KOMPONENTEN	94
7.2.1	<i>Abschätzung des Alters der jungen Komponente des nördlichen Kerns an der Antarktischen Halbinsel.....</i>	<i>94</i>
7.2.2	<i>Abschätzung des Alters der jungen Komponente des südlichen Kerns.....</i>	<i>95</i>
7.3	BERECHNUNG DES TRANSPORTES VON VENTILIERTEM WASSER IN DEN KERNEN.	95
7.3.1	<i>Vorläufige Berechnung.....</i>	<i>96</i>
7.3.2	<i>Verbleib von PBBW im Weddellmeer.....</i>	<i>96</i>
7.3.3	<i>Endgültige Berechnung</i>	<i>98</i>
8	DISKUSSION	101
8.1	TIEFER SÜDLICHER EINSTROM IN DAS WESTLICHE WEDDELLMEER	101
8.2	TIEFER NÖRDLICHER AUSSTROM AUS DEM WESTLICHEN WEDDELLMEER	102
8.2.1	<i>Einmischen von rezirkuliertem PBBW in den nördlichen Kern</i>	<i>102</i>
8.2.2	<i>Ausgänge</i>	<i>103</i>
8.3	NÖRDLICHER STROM IM LCDW BEREICH	105
8.4	ZUSAMMENHANG VON TRANSPORTRATEN JUNGEN WASSERS UND QUELLSTÄRKEN	106
8.5	VERGLEICH MIT DER LITERATUR UND BEWERTUNG	107
8.5.1	<i>Weddellmeer</i>	<i>108</i>
8.5.2	<i>Prydz Bucht.....</i>	<i>111</i>
8.5.3	<i>LCDW-Bereich.....</i>	<i>111</i>
8.6	BEWERTUNG.....	112
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	115
10	ANHANG	123
10.1	FCKW-MESSAPPARATUR	123
10.1.1	<i>Das Messverfahren.....</i>	<i>123</i>
10.2	DIE ANNAHME EINES STATIONÄREN OZEANS	125
10.3	BESTIMMUNGSGRÖßEN DER KERNDDEFINITION	126
10.4	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	128
10.5	TABELLENVERZEICHNIS	130
10.6	VERWENDETE GRÖßEN.....	131
10.7	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	133
11	LITERATUR	135

1 Einleitung

Ozeanische Wassermassen sind durch potentielle¹ Temperatur, Salzgehalt, Nährstoffe und die Konzentration gelöster Gase gekennzeichnet. Diese Eigenschaften nimmt eine Wassermasse im Wesentlichen an der Meeresoberfläche durch Wärme- oder Gasaustausch und durch Niederschlag und Verdunstung an. Dieser Vorgang wird Wassermassenbildung genannt. Beim Absinken in den tiefen Ozean verlieren die Wassermassen den Kontakt mit der Atmosphäre, so dass sich konservative Eigenschaften nur noch durch Mischung verändern können; die molekulare Diffusion ist dabei praktisch immer vernachlässigbar. Allerdings werden ca. 75% der Meeresoberfläche von warmen Wasser geringer Dichte bedeckt, der sog. Warmwassersphäre. Diese Schicht wirkt sozusagen als Deckel des Ozeans, denn der Austausch mit der darunterliegenden Kaltwassersphäre größerer Dichte, die etwa 75% des Volumens des Weltmeeres einnimmt [Fahrbach, 1995], ist aufgrund der stabilen Schichtung minimal. Nur in hohen Breiten erreicht die Kaltwassersphäre die Oberfläche. Die polaren Ozeane stellen also die "Fenster" dar, durch das der größte Teil des Tiefen- und Bodenwassers des Weltozeans gebildet wird. Dort werden an der Oberfläche durch Abkühlung und/oder durch Salzeintrag (aufgrund von Eisbildung) Wassermassen großer Dichte gebildet. Wird lokal die Dichte so weit erhöht, dass eine statisch instabile Schichtung entsteht, sinkt das Oberflächenwasser bis zu einer Tiefe ab in der Wasser gleicher Dichte vorzufinden ist. Zur Kompensation der Vertikalbewegung ist oberflächennah eine Horizontalbewegung in das und in der Tiefe eine Horizontalbewegung aus dem Wassermassenbildungsgebiet erforderlich [Marshall und Schott, 1999]. Das entstehende Strömungssystem wird aufgrund des Antriebs thermohaline Zirkulation genannt. In Abb. 1 ist diese Zirkulation für den Weltozean grob schematisch dargestellt. Es sind die beiden wichtigsten Regionen der Tiefen- und Bodenwassermassenbildung erkennbar: Eine im Nordatlantik, die andere im Weddellmeer östlich der Antarktischen Halbinsel. Dort gebildete Wassermassen breiten sich in den gesamten Weltozean aus. Mit dieser Ausbreitung ist ein polwärtiger Wärmetransport in der Größenordnung von 1 PW (10^{15} Watt) verbunden. Dieser Wert liegt in der Größenordnung des Wärmetransportes der

¹ Aufgrund der Kompressibilität des Meerwassers ist die in situ Temperatur druckabhängig. In der Ozeanographie wird deshalb die potentielle Temperatur verwendet, d.h. die Temperatur, die ein Wasserpaket hätte, nachdem es adiabatisch vom in situ Druck auf einen Referenzdruck gebracht wurde. Als Referenzdruck wird entweder der Atmosphärendruck oder ein höherer Druck verwendet, da die adiabatischen Erwärmung auch vom Salzgehalt abhängig ist und dadurch Änderungen hervorgerufen werden, die umso größer sind je größer der Unterschied zwischen dem Druck und dem Referenzdruck ist. Somit ist z.B. θ die potentielle Temperatur bei Atmosphärendruck (0 dbar hydrostatischer Druck) und θ_4 bei einem Referenzdruck von 4000 dbar. Die potentielle Temperatur stellt eine konservative Größe dar.

atmosphärischen Zirkulation, die thermohaline Zirkulation des Ozeans stellt damit eines der Schlüsselemente des globalen Klimasystems dar.

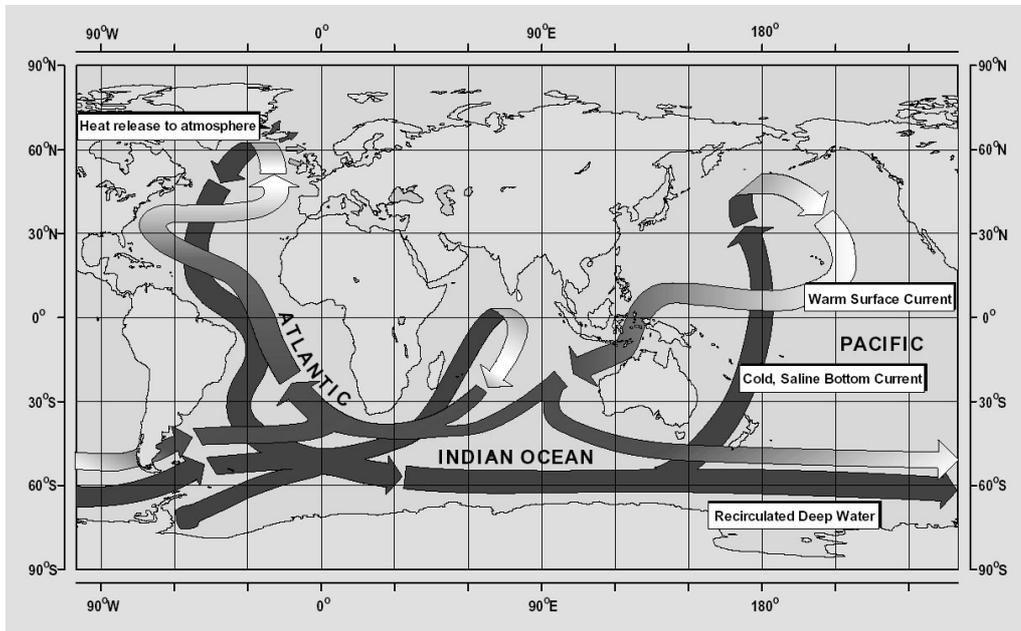


Abb. 1: Schematische Darstellung der Thermohalinen Zirkulation des Ozeans [Broecker, modifiziert von Meier-Reimer, 2001]

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem südlichen Antrieb dieser Zirkulation. Im Südlichen Ozean wird unter anderem das sogenannte Antarktische Bodenwasser (AABW) gebildet, welches einen großen Teil des Bodens des Weltozeans bedeckt [Wüst, 1939; Reid und Lynn, 1971; Emery und Meincke, 1986] und ca. 30% des Volumens des gesamten Weltmeeres einnimmt [Fahrbach, 1993]. Abb. 2 zeigt die Ausbreitung des AABW anhand der $\sigma_4 = 45,92 \text{ kg/m}^3$ Isopykne². Diese Dichte eignet sich zur Trennung der Einflussgebiete der nördlichen und südlichen Quellen, da das Arktische Bodenwassers, wenn es in den nordwestlichen Atlantik einströmt eine geringere Dichte hat. Somit zeigen alle Wassermassen größer Dichte einen signifikanten Einfluss von AABW [Talley, 1999].

² In der Ozeanographie wird statt der Dichte ρ oft die Dichteanomalie σ angegeben. Die Dichteanomalie ist definiert durch $\sigma(S,T,p) = \rho(S,T,p) - 10^3 \text{ kg/m}^3$. Aufgrund der Kompressibilität des Meerwassers wird (ähnlich der potentiellen Temperatur; siehe Fußnote 1) meist die potentielle Dichteanomalie σ_θ betrachtet. Diese ist statt der von Temperatur von der potentiellen Temperatur abhängig. Ferner wird auch die potentielle Dichte relativ zu einer Referenzdruck betrachtet, so ist z.B. σ_4 die potentielle Dichteanomalie bei einem Referenzdruck von 4000 dbar, d.h. $\sigma_4 = f(S,\theta_4,p)$.

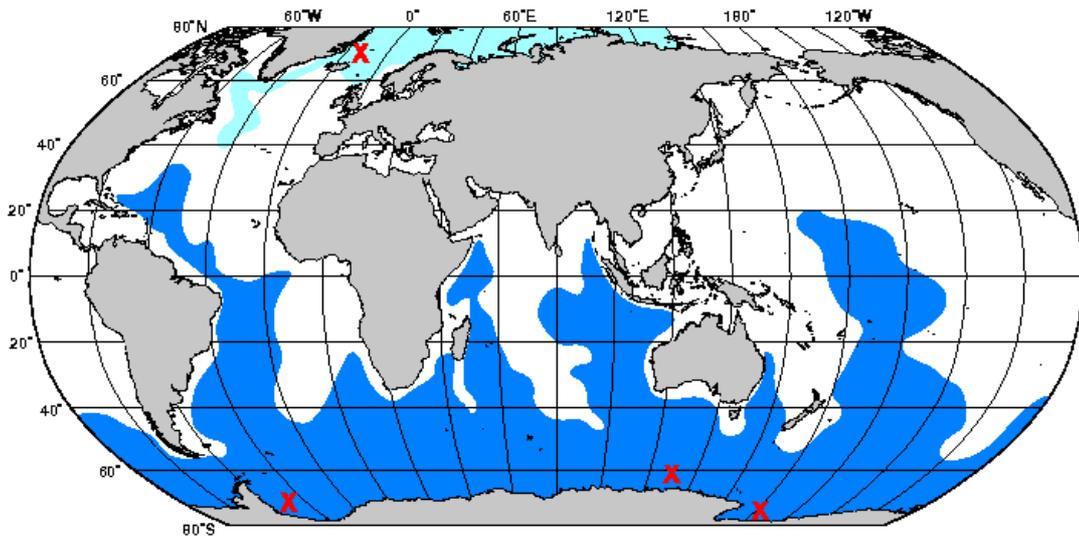


Abb. 2: Die Ausbreitung des Antarktischen Bodenwassers am Boden des Weltozeans anhand der $\sigma_4=45,92 \text{ kg/m}^3$ Isopykne (dunkel schraffiert); hell schraffiert der Einflussbereich des Nordatlantischen Tiefenwassers, weiße Gebiete zeigen sowohl nördlichen als auch südlichen Einfluss; Kreuze zeigen die Ort der Bodenwasserbildung [Talley, 1999].

Unbeantwortete Fragen des südlichen Antriebes der globalen thermohalinen Zirkulation sind: "Wo wird wieviel Boden- und Tiefenwasser produziert?", "Auf welchem Weg verlässt das frisch belüftete Wasser das Weddellmeer", und "Wie groß ist die Bedeutung des Weddellmeeres im Vergleich zu den anderen Gebieten der Boden- und Tiefenwasserproduktion?". Diese Fragen sind Gegenstand einer langen wissenschaftlichen Diskussion. Schon früh wurde das südwestliche Weddellmeer als Hauptquelle der Wassermassenbildung des Südlichen Ozeans vermutet, siehe z.B. [Brennecke, 1921; Mosby, 1934; Wüst, 1935]. Carmack [1977] schätzte den Anteil von im südwestlichen Weddellmeer produzierten AABW zu ca. 70% ab. Auch elf Jahre später behaupteten Foldvik und Gammelsrød [1988], dass ca. 80% des Bodenwassers in dieser Region gebildet werden. Bis zur Mitte der 1990er Jahre wurden diese beiden Arbeiten wiederholt zitiert z.B. [Fahrbach, 1993; Mensch et al., 1996; Weppernig et al., 1996]. Erst in den letzten Jahren wurde die Annahme des südwestlichen Weddellmeeres als nahezu ausschließliche Quelle von AABW in Frage gestellt. So schätzten Orsi et al. [1999] den Anteil des gesamten Atlantischen Sektors des Südlichen Ozeans zu ca. 60% ab. Allerdings umfasst ihre Definition des Atlantischen Sektors das Gebiet von $70^\circ\text{W} - 80^\circ\text{O}$, also ca. 42% des gesamten südlichen Ozeans, wobei nicht klar wird, wie groß der Anteil des Weddellmeeres an diesen 60% ist. Auch stellen neuere Modellergebnisse, die einen signifikanten Einstrom frisch belüfteten

Tiefenwassers aus dem Osten in das Weddellmeer zeigen, die relative Bedeutung des Weddellmeeres bei der Boden- und Tiefenwasserbildung in Frage (siehe [Schodlok *et al.*, 2001]).

Unter anderem zur Klärung dieser Fragen wurden verschiedene ozeanographische Programme ins Leben gerufen. In diesen Programmen wurden vermehrt auch Verteilungen anthropogener Spurenstoffe (wie FCKWs) im Ozean gemessen. In den ersten Arbeiten zur Wassermassenausbreitung in der Norwegischen- und der Grönlandsee [Bullister und Weiss, 1983] und der im äquatorialen Atlantik [Weiss *et al.*, 1985] wurden Konzepte wie Konzentrationsalter und Verhältnisalter (siehe Kapitel 3.2) entwickelt. In der Folge wurden FCKW-Untersuchungen auch von anderen Autoren erfolgreich durchgeführt. So schätzte Rhein [1991] Ventilationsraten für die Norwegische- und die Grönlandsee mit Hilfe von F11- und F12-Verteilungen ab. Doney und Bullister [1992] beobachteten die Ausbreitung frisch gebildeten Wassers im östlichen Nordatlantik. Insbesondere wurden auch die Wassermassenbildung und -ausbreitung im Weddellmeer und anhand von FCKW-Daten untersucht (siehe z.B. [Schlosser *et al.*, 1991; Haine *et al.*, 1998; Mensch *et al.*, 1998a]). Dabei wurde deutlich, dass die oben erwähnten "klassischen" Konzepte nicht ausreichend sind, das Verhalten des Ozeans zu beschreiben, da diese Konzepte Mischung (fast) völlig vernachlässigen. Aufgrund dieser Mischungsvorgänge ist nicht möglich, einer Wassermasse ein eindeutiges Alter im Sinne einer einzelnen Zahl zuzuordnen. In der physikalischen Ozeanographie wird daher in der letzten Zeit vermehrt über die mit diesen Mischungsvorgängen verbundene Altersstruktur von Wassermassen diskutiert. Dabei stellte sich die Berücksichtigung einer (quasi) kontinuierlichen Verteilung der Alter als realistischerer Ansatz heraus [Beining und Roether, 1996; Khatiwala *et al.*, 2001]. Diese Verteilung wird Altersspektrum oder Altersverteilung genannt (siehe Abschnitt 3.3.1). Aufgrund dessen ist der Sinn einfacher Größen wie Konzentrationsalter oder Verhältnisalter für den jeweiligen Einzelfall zu hinterfragen. Es ist offensichtlich, dass die "klassischen" Werkzeuge der Tracer-Ozeanographie das Potential dieser Stoffe unvollständig nutzen. Somit scheint es nötig, weitere Methoden zur Interpretation von FCKW-Daten zu schaffen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zur Klärung der oben genannten offenen Fragen ("wo wird wie viel Wasser gebildet", "welche Ausbreitungswege nimmt es" und "nach der relativen Bedeutung des Weddellmeeres") zu leisten. Dazu soll ein Zirkulationsschema der frisch belüfteten Wassermassen des tiefen Weddellmeeres erstellt werden. Dabei steht die Frage nach den Produktionsraten der Quellen dieser Wassermassen im Vordergrund. Aufgrund der oben erwähnten Probleme mit den bisherigen Konzepten der Tracer-Ozeanographie wird zunächst eine neue Methode zur Abschätzungen der Altersstruktur von frisch gebildeten Wassermassen entwickelt (siehe Abschnitt 3.3). Diese Methode wird dann auf die FCKW-Daten von sechs Wiederholungen des ozeanographi-

schen Schnittes auf dem Null-Meridian im Weddellmeer angewandt. Anhand dieser Ergebnisse zusammen mit weiteren FCKW-Messungen im Weddellmeer sollen dann das oben erwähnte Ziel erreicht werden.

Die Arbeit gliedert sich im Einzelnen wie folgt: In dem einleitenden Kapitel 2 werden die Topographie und die Wassermassen sowie deren Zirkulation im Weddellmeer dargestellt. Kapitel 3 beschreibt sowohl die klassischen Konzepte zur Berechnung von Altern aus Tracerdaten als auch das neu entwickelte Verfahren. Anschließend erfolgt die Vorstellung der Daten (Kapitel 4) und der daraus resultierenden Verteilungen (Kapitel 5). Die Kapitel 6 und 7 haben die Auswertung der FCKW-Daten und die Kombination dieser Daten mit dem Strömungsfeld zum Inhalt. In der Diskussion (Kapitel 8) wird aus den Ergebnissen das Strömungsschema der frischbelüfteten tiefen Wassermassen abgeleitet und insbesondere die Produktionsraten der verschiedenen Quellen bestimmt. Im abschließenden Kapitel 9 ist die Zusammenfassung und der Ausblick auf zukünftige Arbeiten zu finden.

2 Ozeanographie des Weddellmeeres

Das Weddellmeer stellt ein Randmeer des Südlichen Ozeans dar. Deshalb wird diesem Kapitel ein kurzer Überblick dieses Ozeans vorangestellt. Danach wird die Topographie des Weddellmeeres beschrieben und die Hauptwassermassen und ihre Bildung dargestellt. Anschließend wird die Zirkulation dieser Wassermassen im Weddellmeer gezeigt.

2.1 Der Südliche Ozean

Der Südliche Ozean umfasst die Meeresgebiete um den antarktischen Kontinent bis 60°S und damit eine Fläche von $20,3 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. Im Gegensatz zum Arktischen Ozean, der fast vollständig von Landmassen umgeben ist, wird im Südlichen Ozean der Wassermassen-Austausch mit dem Weltmeer nicht durch Landmassen behindert. Er stellt damit das Verbindungsglied zwischen den drei großen Ozeanen (Atlantischer, Indischer und Pazifischer Ozean) dar. Das Strömungssystem des Südlichen Ozean ist durch den am nördlichen Rand ostwärts verlaufenden Antarktischen Zirkumpolarstrom (Antarctic Circumpolar Current, ACC) geprägt, der mit einem Transport von ca. 130 Sv (1 Sv = 1 Sverdrup = $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) das stärkste Strömungssystem des Weltmeeres ist (z.B. [Nowlin und Klinck, 1986; Whitworth und Nowlin, 1987; Marshall et al., 1993]). Dieses Strömungsband ist durch drei Hauptfronten gekennzeichnet: Von Nord nach Süd die Subantarktischefront, die Polarfront und die Südliche Zirkumpolarstromfront [Fahrbach, 1995]). Dem Kontinent vorgelagert ist ein Band gegenläufiger, d.h. westwärts gerichteter Strömung, der Antarktische Küstenstrom [Deacon, 1937]. Zwischen diesen beiden windgetriebenen Strömungsbändern (Westwinddrift bzw. Ostwinddrift) existieren drei subpolare Wirbel, der Ross-, der Amery- und der Weddellwirbel.

Eine wichtige Komponente des Südlichen Ozeans stellt das Meereis dar, dessen Ausdehnung von einem starken Jahresgang geprägt ist. Die minimale Ausdehnung der Eisbedeckung ist im Mittel ca. $4 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, in den Monaten März bis Oktober wächst diese Fläche auf den fünffachen Wert an (durchschnittlich ca. $20 \cdot 10^6 \text{ km}^2$). Dann sind der größte Teil des südlichen Ozeans und auch Gebiete nördlich davon mit Meereis bedeckt [Spindler, 1990], siehe Abb. 3.

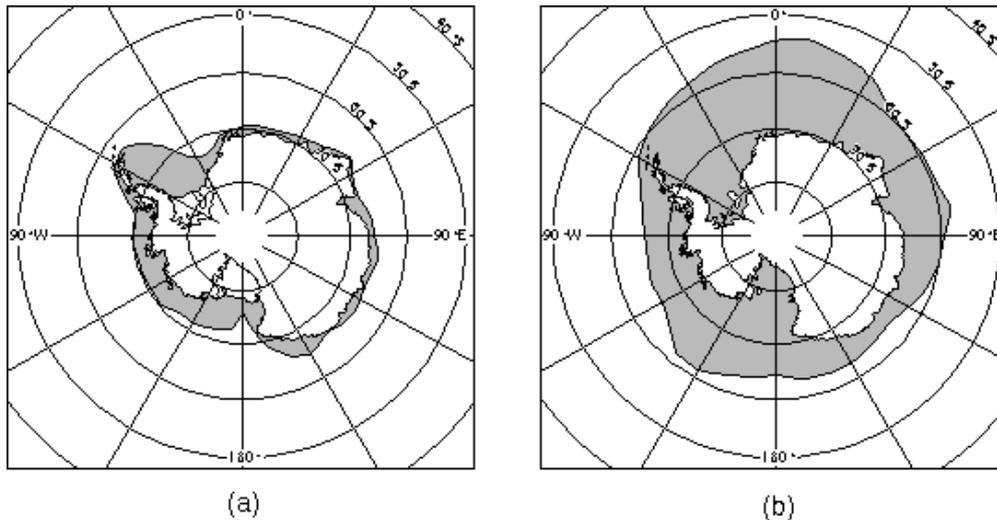


Abb. 3: Mittlere Meereisausdehnung des Südlichen Ozeans der Jahre 1973 – 1993
 a) im Februar; b) im Oktober [Simmonds und Jacka, 1995]

Meereis absorbiert aufgrund seiner hohen Albedo (0,6) erheblich weniger der einfallenden Strahlungsenergie als der offene Ozean, dessen Albedo zwischen 0,04 – 0,15 liegt. Somit steht bei einer geschlossenen Eisdecke, im Vergleich zum offenen Ozean, nur ca. 1/6 der Energie zur Verfügung. Dieser Effekt wird durch aufliegenden Schnee noch verstärkt (Albedo von Schnee: 0,9). Außerdem reduziert eine geschlossene Eisdecke, da sie turbulente Mischung verhindert, den Wärme- und Gasaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre um mehrere Größenordnungen und wirkt somit quasi als "Deckel" des Ozeans. Der für die ozeanische Zirkulation bedeutendste Effekt von Meereis ist aber seine Rolle bei der Tiefen- und Bodenwasserbildung. Der Salzgehalt³ von Meerwasser beträgt im Mittel 34 psu, der des Meereises hingegen nur etwa 5 psu. Beim Gefrierprozess wird also eine beträchtliche Menge Salz an den Ozean abgegeben und dessen Dichte erhöht [Lemke, 1991]. Diese durch den Salzgehalt hervorgerufene Dichtezunahme ist im Südlichen Ozean der dominierende Antrieb der thermohalinen Zirkulation, da Dichteänderungen aufgrund von Temperaturschwankungen in polaren Gebieten gering sind (die Temperatur Oberflächenwassers ist in der Nähe des Gefrierpunktes ca. $-1,9^{\circ}\text{C}$, siehe Kapitel 2.4).

³ Der Salzgehalt wird in der Ozeanographie in "practical salinity units" (psu) angegeben (dimensionslos; 1 psu \approx 1‰).

2.2 Topographie des Weddellmeeres und des Weddell-Beckens

Die Zirkulation und der Austausch des Weddellmeeres mit dem Weltozean hängen wesentlich von den topographischen Gegebenheiten ab. Deshalb werden in diesem Kapitel die Begrenzung und die Bathymetrie des Untersuchungsgebietes beschrieben.

2.2.1 Begrenzung

Geographisch ist das Weddellmeer als das Gebiet definiert, das vom antarktischen Kontinent und der Antarktische Halbinsel und einer Linie zwischen dem Punkt ca. $73,4^{\circ}\text{S}$, $20,0^{\circ}\text{W}$ zur Spitze der Antarktischen Halbinsel (Joinville-Insel, bei ca. 65°S , 55°W), eingeschlossen wird [Fahrbach und Beckmann, 2001]. In dieser Arbeit wird der Ausdruck "Weddellmeer" wie in der ozeanographischen Literatur üblich auf das gesamte Weddell-Becken ausgedehnt. Die östliche Grenze des Weddell-Beckens (zum Enderby-Becken) liegt bei ungefähr 0° . Diese Grenze ist topographisch offen, daher werden beiden Becken häufig als Weddell-Enderby-Becken zusammengefasst. Im Süden und Westen wird das Becken durch den antarktischen Kontinent bzw. die Antarktische Halbinsel begrenzt (siehe Abb. 4). Der eigentlichen Küstenlinie vorgelagert sind Schelfeisgebiete, die durch das Aufschwimmen des Inlandeises auf den Ozean gekennzeichnet sind. Die nördliche Grenze des Weddell-Beckens wird durch zonal verlaufende Rückensysteme (Süd-Scotia-Rücken und Südwest-Indischer-Rücken) bei ca. 60°S definiert. Die Lage dieser Grenze stimmt mit dem Übergang der Wassermassen des Weddellwirbels zu denen des ACC weitgehend überein [Fahrbach und Beckmann, 2001]. Der Süd-Scotia-Rücken besitzt fünf tiefe Passagen [Schodlok, 2001], die für einen Export von tiefen Wassermassen aus dem Weddellmeer in Frage kommen. Die Philip-Passage bei ca. 61°S , 47°W (PP in Abb. 4) mit einer Schwellentiefe von 1900 m, die Orkney-Passage (OP, 62°S , 40°W , 3000 m), die Bruce-Passage (BP, 61°S , 38°W , 2900 m), die Discovery-Passage (DP, 60°S , 33°W , 2800m) sowie die Hoyer-Passage (HP, 60°S , 30°W , 2300 m). Östlich der Süd-Sandwich-Inseln liegt der bis zu 8264 m tiefe Süd-Sandwich-Graben (SSG, $55 - 60^{\circ}\text{S}$, $24 - 32^{\circ}\text{W}$). Dieser Tiefseegraben wurde in der frühen Literatur (bis ca. 1990) als die dominierende Exportroute von tiefen Wassermassen in das Argentinische Becken betrachtet [Locarnini et al., 1993]. Später wurde deutlich, dass die Rolle des SSG weniger bedeutend ist und dass der Export zu einem großem Teil durch die tiefen Passagen des Süd-Scotia-Rückens stattfindet [Locarnini et al., 1993; Gordon et al., 2001].

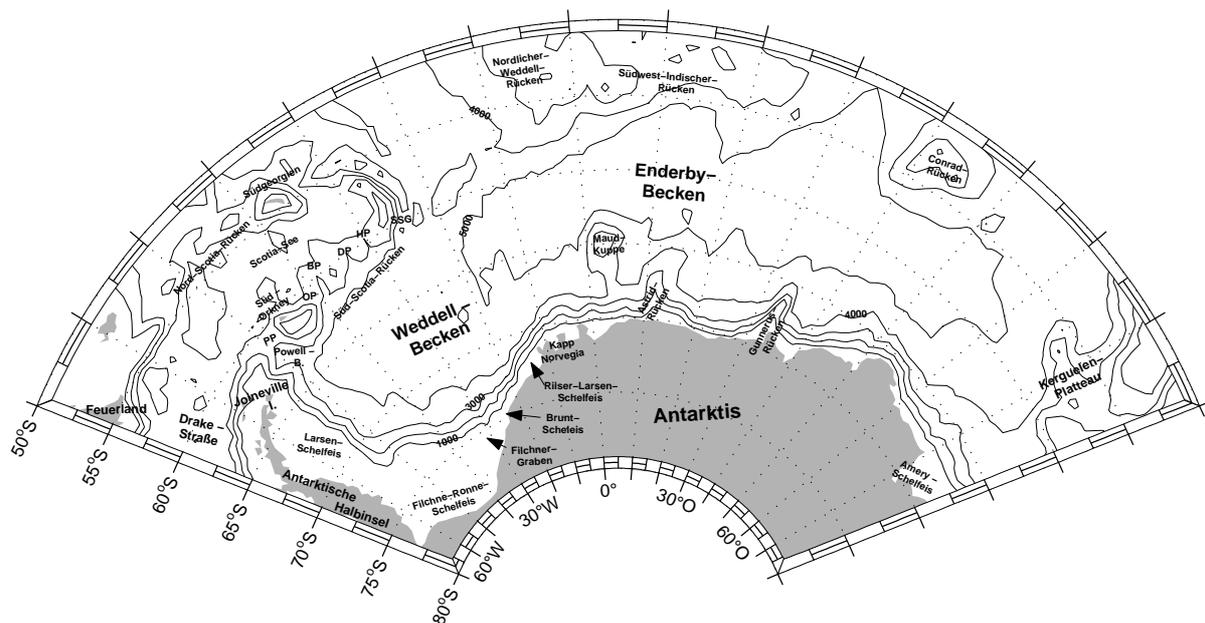


Abb. 4: Topographische Karte des Weddellmeeres mit den Tiefenlinien 1000, 2000, 3000, 4000 und 5000 m. Die Abkürzungen BP, DP, HP, OP, PP und SSG bezeichnen die tiefen Durchlässe des Süd-Scotia-Rückens (Bruce-, Discovery-, Hoyer-, Philip- und Orkney-Passage) sowie den Süd-Sandwich-Graben.

2.2.2 Bathymetrie

An den antarktischen Kontinent schließt sich seawärts ein Schelfgebiet an, dessen Breite im Weddellmeer von Ost nach West von ca. 90 km bis auf 500 km zunimmt. Aufgrund der Last des Festlandeises, das die Erdkruste der Antarktis bis zu 500 m nach unten drückt [Drewry et al., 1982], ist der antarktische Schelf mit mittleren Tiefen von ca. 600 m deutlich tiefer als die übrigen Kontinentalschelfe (mit Ausnahme von Grönland) deren mittlere Tiefe nur ca. 150 m beträgt. In einigen Bereichen, z.B. im südlichen Weddellmeer, nimmt die Schelftiefe bei Annäherung an den Kontinent wieder zu, so dass sich küstenparallele Becken bilden. Des Weiteren schneidet zwischen 30° und 40°W ein über 1000 m tiefer Graben, der Filchner-Graben, in den Kontinentalschelf ein.

Die Grenze zwischen dem Schelf und der Tiefsee bildet der Kontinentalabhang. Das tiefe Weddell-Enderby-Becken hat eine durchschnittliche Tiefe von ca. 4400 m. Topographische Besonderheiten dieser Tiefseeebene stellen die Maud-Kuppe, der Astrid-Rücken und der Gunnerus-Rücken dar. Die Maud-Kuppe ragt bei ca. 3°O, 65°S bis ca. 1600 m unter den Wasserspiegel hervor, der Astrid-Rücken erstreckt sich bei 11°O ca. 250 km in das Weddell-Enderby-Becken, wobei die Wassertiefe ca. 2000 m beträgt, der Gunnerus-

Rücken ragt bei 33°O bis zu 3500 m aus der Tiefseeebene hervor. Diese Erhebungen können die gesamte Strömung in der jeweiligen Region beeinflussen [*Timmermann et al.*, im Druck]

2.3 Die Hauptwassermassen im Weddellmeer

Die typische Deckschicht des zentralen Weddellmeeres besteht aus dem ca. 50 – 100 m mächtigen Winter-Wasser (WW), dessen Dicke zu den Rändern zunimmt [*Fahrbach*, 1993]. Die Temperatur dieser Schicht liegt nahe dem Gefrierpunkt ($T_f \approx -1,9^\circ\text{C}$), der Salzgehalt S zwischen 34,36 psu und 34,52 psu. Im Sommer ist das WW von Antarktischem-Oberflächenwasser (Antarctic Surface Water, AASW) mit höherer Temperatur und niedrigerem Salzgehalt überdeckt. AASW entsteht aufgrund der Erwärmung durch die Sonneneinstrahlung und das Aussüßen infolge der Meereisschmelze.

Unterhalb des kalten WW bis in eine Tiefe von ca. 1500 m liegt das Warme Tiefenwasser (Warm Deep Water, WDW) mit potentiellen Temperaturen θ von 0 – 0,8°C und Salzgehalten zwischen 34,64 psu und 34,72 psu. Bei dieser wärmsten und salzreichsten Wassermasse des Weddellmeeres handelt es sich um unteres Zirkumpolares Tiefenwasser (Lower Circumpolar Deep Water, LCDW), das, nachdem es den ACC verlassen hat und bei ca. 54°S, 30°O in den Weddellwirbel eingetreten ist, WDW genannt wird [*Orsi et al.*, 1999]. Im zentralen Weddellmeer ist WDW als Maximum in Temperatur (in ca. 300 m Tiefe) und im Salzgehalt (bei ca. 500 Tiefe) zu identifizieren [*Gordon et al.*, 1993]. Die Grenzschicht zwischen WW und WDW besitzt starke Temperatur- und Salzgehaltsgradienten. Die dort auftretende Mischung dieser beiden Wassermassen ist im Bereich des Kontinentalschelfs durch ein Maximum der potentiellen Temperatur als eigenständige Wassermasse identifizierbar und wird Modifiziertes Warmes Tiefenwasser (Modified Warm Deep Water, MWDW) genannt [*Carmack*, 1974; *Foldvik et al.*, 1985b; *Whitworth und Nowlin*, 1987]. Unterhalb des WDW befindet sich das Weddellmeer-Tiefenwasser (Weddell Sea Deep Water, WSDW). Gekennzeichnet ist das WSDW durch potentielle Temperaturen zwischen $-0,7^\circ\text{C}$ und 0°C und Salzgehalte im Bereich von 34,64 psu bis 34,68 psu. Im südöstlichen Weddellmeer reicht diese Wassermasse bis zum Meeresboden, während im Westen und im Norden darunter noch das Weddellmeer-Bodenwasser (Weddell Sea Bottom Water, WSBW) zu finden ist. WSBW ist durch potentielle Temperaturen unterhalb von $-0,7^\circ\text{C}$ und Salzgehalte zwischen 34,64 psu und 34,68 psu definiert. Aufgrund dieser Definitionen werden auch die Wassermassen am Hang der Antarktischen Halbinsel unabhängig von der Tiefe als WSDW bzw. WSBW bezeichnet wenn sie die jeweiligen Kriterien erfüllen.

Sowohl WSDW als auch WSBW sind lokale Wassermassen. Von einem globaleren Gesichtspunkt aus werden alle im Südlichen Ozean gebildeten Wassermassen, deren Dichte größer ist als $\sigma_2 \geq 37,16$ bzw. $\sigma_4 \geq 46,05$, (diese Dichten entsprechend dem dichtesten Wasser der Drake-Straße) als Antarktisches Bodenwasser (Antarctic Bottom Water, AABW) bezeichnet [Orsi *et al.*, 1999]. Da WSBW aufgrund seiner großen Dichte schnell unterhalb der Schwellen absinkt, wird das AABW (mit Weddellmeerursprung) fast ausschließlich aus WSDW gebildet.

Auf den Schelfgebieten werden weitere Wassermassen gebildet und gemäß ihrem Ursprung benannt. Wassermassen, die auf dem Brunt- oder Riiser-Larsen-Schelf gebildet werden, heißen Östliches Schelfwasser (Eastern Shelf Water, ESW), Wassermassen vom Filchner-Ronne- oder Larsen-Schelf werden als Westliches Schelfwasser (WSW) bezeichnet. Die Temperaturen beider Wassermassen liegen um den Oberflächengefrierpunkt, das ESW ist aber durch Salzgehalte von 34,28 psu bis 34,44 psu gekennzeichnet, während WSW Salzgehalte über 34,44 psu erreicht [Carmack und Foster, 1975]. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Salzgehalte werden ESW und WSW in der neueren Literatur Salzarmes Schelfwasser (Low Salinity Shelf Water, LSSW) bzw. Salzreiches Schelfwasser (High Salinity Shelf Water, HSSW) genannt. Da diese Namen den Charakter dieser Wassermassen besser beschreiben, werden sie im Folgenden verwendet. Eine weitere Schelf-Wassermasse ist das Schelfeiswasser (Ice Shelf Water, ISW), dabei handelt es sich um unter das Filchner-Ronne-Schelfeis geströmtes HSSW. ISW ist durch Temperaturen unterhalb des Oberflächengefrierpunktes und Salzgehalte zwischen 34,6 psu und 34,7 psu charakterisiert [Carmack und Foster, 1975].

Die oben beschriebenen Hauptwassermassen des Weddellmeeres sind in Tabelle 1 zusammengefasst und in Abb. 5 in einem potentielle-Temperatur-Salzgehalts-Diagramm dargestellt.

Wassermasse	θ [°C]	S [psu]
AASW	$T_f \leq \theta$	$S \leq 34,30$
WW	$T_f \leq \theta \leq -1,75$	$34,36 \leq S \leq 34,52$
WDW	$0,00 \leq \theta \leq 0,80$	$34,64 \leq S \leq 34,72$
LSSW (ESW)	$-1,90 \leq \theta \leq -1,60$	$34,28 \leq S \leq 34,44$
HSSW (WSW)	$T_f \leq \theta \leq -1,60$	$34,70 \leq S \leq 34,90$
ISW	$-2,40 \leq \theta \leq T_f$	$34,60 \leq S \leq 34,70$
WSDW	$-0,70 \leq \theta \leq 0$	$34,64 \leq S \leq 34,68$
WSBW	$\theta \leq -0,70$	$34,64 \leq S \leq 34,68$

Tabelle 1: Wassermassen des Weddellmeeres; T_f ist der Oberflächen-Gefrierpunkt ca. $-1,9^\circ\text{C}$ (nach [Foldvik et al., 1985c])

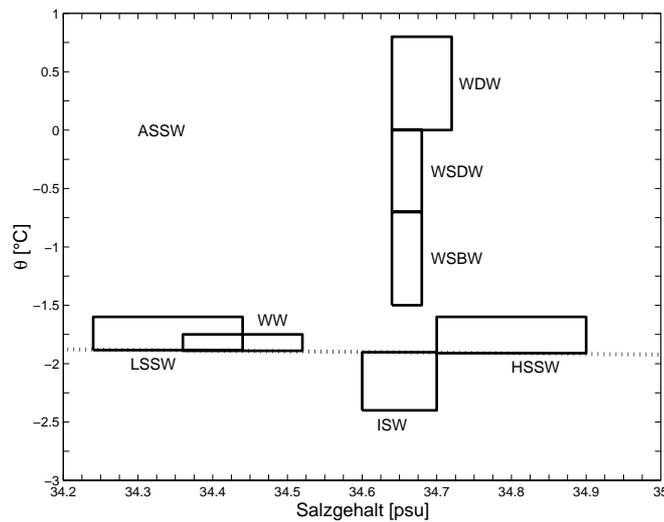


Abb. 5: Schematische Darstellung der Hauptwassermassen des Weddellmeeres im θ -S-Raum, die gestrichelte Linie stellt den Oberflächen-Gefrierpunkt dar (nach [Foldvik et al., 1985c])

2.4 Tiefen- und Bodenwassermassenbildung

Bei der Tiefen- und Bodenwassermassenbildung spielen die Schelfwassermassen eine entscheidende Rolle. Daher wird hier zunächst die Bildung dieser Wassermassen betrachtet und erst im Anschluss daran auf die Bildungsprozesse von Tiefen- und Bodenwasser eingegangen.

2.4.1 Bildung von Schelf-Wassermassen

Ablandige Winde und Gezeiten bewirken, dass vor der Küste und entlang der Schelfeise ein ca. 20 km breiter Meeresstreifen überwiegend eisfrei gehalten wird [Eicken *et al.*, 1988]. Durch den Kontakt der Meeresoberfläche mit der kalten Atmosphäre findet innerhalb dieser sog. Polynjen wesentlich intensivere Meereisbildung statt als im zentralen Weddellmeer, das durch eine Meereisschicht thermisch weitgehend isoliert ist [Kottmeier und Fahrbach, 1989]. Dieses geschieht sowohl auf den östlichen als auch den westlichen Schelfgebieten des Weddellmeeres. Die unterschiedlichen Eigenschaften der dort gebildeten Wassermassen (HSSW und LSSW) werden durch die unterschiedliche Geographie der Schelfgebiete hervorgerufen.

Aufgrund der schmalen Kontinentalschelfe im östlichen Weddellmeer ragen die Schelfeisgebiete und damit auch die Küstenpolynjen über den Kontinentalabhang hinaus. Das bei der Meereisbildung frei werdende Salz wird also über eine relativ große Wassersäule verteilt, so dass dieses nur eine geringe Zunahme des Salzgehaltes bewirkt. Die Lage der östlichen Schelfeisgebiete über der Tiefsee bewirkt außerdem, dass sie durch relativ warmes WDW unterströmt werden, wodurch das Schelfeis von unten abgeschmolzen wird [Fahrbach *et al.*, 1994a]. Der Salzeintrag der Meereisbildung wird vom Frischwassereintrag des Schmelzens überkompensiert. Somit entsteht die relativ salzarme Wassermasse LSSW, die nicht direkt an der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Boden- und Tiefenwasserbildung beteiligt ist [Mensch, 1994].

Im westlichen Weddellmeer dagegen sind die Schelfgebiete erheblich breiter (bis zu 500 km, siehe Kapitel 2.2.2). Dies hat zur Folge, dass die Küstenpolynjen vollständig auf den Schelfgebieten liegen und das frei werdende Salz beim Gefrierprozess nur über eine vergleichsweise kleine Wassersäule gemischt wird. Der Salzgehalt steigt dadurch stärker an als im östlichen Weddellmeer. Außerdem sorgt der Abstand des Schelfeises von der Tiefsee dafür, dass im Vergleich zu den östlichen Schelfen weniger WDW unter das Schelfeis gelangt und somit auch weniger Schelfeis abgeschmolzen wird. Dadurch entsteht die relativ salzreiche Wassermasse HSSW, die direkt an der Boden- und Tiefenwasserbildung teilnimmt [Mensch, 1994].

Ein Teil des in der Polynja vor dem Filchner-Ronne-Schelfeis gebildeten HSSW strömt auf dem Meeresboden in Richtung Süden unter das Schelfeis. Der zunehmende Wasserdruck bewirkt eine Erniedrigung des in situ Gefrierpunktes um 0,75 K pro 1000 dbar [Fofonoff und Millard, 1983]. Im Bereich der Aufsetzlinie (Grounding Line, ab dort schwimmt das Schelfeis vom Meeresboden auf) in ca. 1000 m Tiefe, kommt das HSSW in Kontakt mit dem Schelfeis und beginnt dieses zu schmelzen, bis der in situ Gefrierpunkt erreicht ist.

Durch diesen Prozess wird HSSW in ISW umgewandelt. Das Schmelzwasser bewirkt eine Erniedrigung des Salzgehaltes und damit der Dichte, so dass ISW entlang der Schelfeisunterseite aufzusteigen beginnt, bis der in situ Gefrierpunkt erneut erreicht ist. Dort friert ISW teilweise an der Unterseite des Schelfeises an, wodurch eine bis zu 250 m dicke marine Eisschicht entsteht [Engelhardt und Determann, 1987] und ISW erneut an Dichte gewinnt und wieder abzusinken beginnt. Dieser Vorgang wird Eispumpe genannt.

Das auf Schelfgebieten frisch gebildete Wasser verbleibt dort eine gewisse Zeit, wobei der Austausch mit der Atmosphäre schon vor dem Verlassen des Schelfs unterbrochen ist. Die Ursache hierfür ist der abnehmende Austausch mit zunehmender Tiefe, so dass er für Wasser in Tiefen größer als ungefähr 300 m nahezu verschwindet. Des Weiteren ist Wasser, das das Schelfeis unterströmt, völlig von der Atmosphäre isoliert. Daraus folgt, dass sich das Alter einer Wassermasse aus zwei Anteilen zusammensetzt:

1. der Verweilzeit auf dem Schelf, das heißt die Zeit, die eine Wassermasse ohne Austausch mit der Atmosphäre auf dem Schelf liegt
2. der Advektionszeit, das heißt, die Zeit, in der das Wasser zum Beobachtungsort transportiert wird

Eine erste Abschätzung der Verweilzeit mittels einer groben Massenbilanz der Schelf-Wassermassen des Filchner-Ronne-Schelfes führte zu Verweilzeiten zwischen 3-5 Jahren [Gill, 1973]. Schlosser *et al.* [1991] fanden Verweilzeiten in der Größenordnung von 5 Jahren. Dieses Ergebnis wird durch Berechnungen von Mensch *et al.* [1998a] gestützt, die mittels Tritium- und FCKW- Daten Erneuerungszeiten in der Größenordnung von 5 Jahren für HSSW und 10 Jahren für ISW ermittelten. Diese Arbeiten geben keinen Fehlerbereich an. In der vorliegenden Arbeit wird die Verzögerung mit 5 ± 3 Jahren angesetzt.

Aufgrund der Verweilzeiten auf dem Schelf ist es nicht möglich, aus dem Alter einer Wassermasse und der Entfernung von der Quelle direkt die Transportgeschwindigkeit zu berechnen. Hierzu muss vielmehr die reine Advektionszeit bestimmt werden.

2.4.2 Bildung von Bodenwasser

Für die Bildung von Bodenwasser werden in der Literatur drei unterschiedliche Prozesse diskutiert, der Forster-Carmack-Prozess [Foster und Carmack, 1976], der ISW-Prozess [Foldvik *et al.*, 1985d] sowie die Konvektion im offenen Ozean [Gordon, 1978; Killworth, 1983].

Forster-Carmack-Prozess

Forster und Carmack [1976] erklären die Bildung von Weddellmeer-Bodenwasser (WSBW) auf dem westlichen Schelf in zwei Schritten. Am Rand des Kontinentalabhanges wird von Norden advektiertes WDW mit WW vermischt, wodurch Modifiziertes Warmes Tiefenwassers (MWDW) entsteht (siehe Kapitel 2.3). Diese Wassermasse mischt mit von Süden einströmendem HSSW zu WSBW.

ISW-Prozess

Foldvik et al. [1985a] beschrieben eine weitere Entstehungsmöglichkeit von WSBW durch die Mischung von WDW und ISW. Letzteres wird aus HSSW gebildet, das das Filchner-Ronne-Schelfeis unterströmt und dort auf die Temperaturen des in situ Gefrierpunktes ($T \approx -2.4^\circ\text{C}$) abgekühlt wird (siehe 2.4.1). Dieses Wasser fließt entlang des westlichen Hanges des Filchnergrabens nordwärts und mischt mit WDW zu WSBW.

Konvektion im offenen Ozean

Als ein weiterer Prozess zur Tiefen- und Bodenwasser-Bildung ist die Konvektion im offenen Ozean vorstellbar. Sie wird an sich durch die geringe Stabilität der Wassermassenschichtung im Weddellmeer begünstigt. Wird diese Stabilität gestört, dringt vermehrt WDW in die Deckschicht ein, womit ein Salz- und Wärmefluss in die Deckschicht verbunden ist. Durch Wärmeabgabe an die Atmosphäre entsteht ein dichtes Oberflächenwasser, das in Lage ist, in große Tiefen abzusinken. Zur Kompensation dringt weiteres salzreiches WDW in die Deckschicht ein, wodurch eine vertikale Konvektionszelle (sog. Chimney) gebildet wird, die sich zunächst selbst verstärkt und zur Ventilation der Tiefsee beiträgt [*Gordon*, 1978; *Foldvik et al.*, 1985c]. Allerdings ist im Weddellmeer der Anteil an der Tiefen- und Bodenwasserbildung vernachlässigbar [*Mensch*, 1994]. Nur für die große Weddellpolynja (Anfang der 1970er Jahre) hat *Gordon* [1978] einen signifikanten Betrag zur Tiefenwasserbildung abgeschätzt.

2.4.3 Bildung von Tiefenwasser

Im Weddellmeer selbst wird WSDW zumindest teilweise durch Mischung der unterhalb und oberhalb liegenden Wassermassen (WSBW und WDW) gebildet [*Foster und Carmack*, 1976]. Direkte Bildung von WSDW geschieht durch die erwähnte Konvektion im offenen Ozean [*Gordon*, 1978] oder durch den Forster-Carmack-Prozess (allerdings mit relativ salzarmen HSSW) [*Fahrbach et al.*, 1995, *Weppernig et al.*, 1996]. Außerdem wird mit dem Antarktischen Küstenstrom Wasser ins Weddellmeer transportiert, das formal der Definition von WSDW erfüllt, allerdings außerhalb des Weddellmeeres gebildet wurde (siehe Abschnitt 2.5).

2.5 Zirkulation des tiefen Weddellmeeres

Die Zirkulation der gesamten Wassersäule des Weddellmeeres wird durch den zyklonalen Weddellwirbel dominiert (Abb. 6), der sich von der Antarktischen Halbinsel bis ca. 30°O erstreckt [Jacobs und Georgi, 1977; Deacon, 1979; Whitworth und Nowlin, 1987; Orsi et al., 1993]. Aufgrund der schwer zugänglichen Lage (besonders im Winter) des Weddellmeeres existieren kaum flächendeckende Messungen, mit denen die mittlere Zirkulation gut beschrieben werden könnte. Deshalb ist in Abb. 6 das jährliche Mittel der Stromfunktion eines Modells (BRIOS⁴) dargestellt.

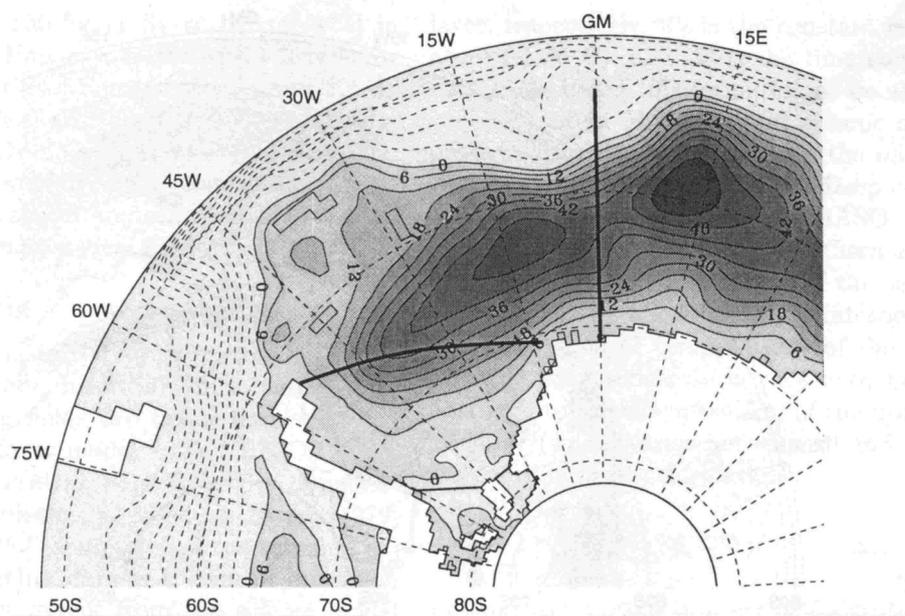


Abb. 6: Modelliertes jährliches Mittel der Stromfunktion des Weddellwirbels. Die Intervalle betragen 6 Sv für positive und 12 Sv für negative Konturlinien; GM = Null-Meridian (Greenwich-Meridian). Die Linien markieren die Lage der in Kapitel 5 beschriebenen Schnitte [Beckmann et al., 1999]

Der Wirbel besteht aus zwei 'Unterwirbeln', wobei das Zentrum des einen im Weddell-Becken lokalisiert ist, während das andere nordöstlich der Maud-Kuppe im östlichen Enderby-Becken liegt [Mosby, 1934; Bagriantsev et al., 1989; Beckmann et al., 1999]. Der gesamte Transport über den Nullgrad-Schnitt wurde von Fahrbach et al. [1994b] mittels geostrophischer Berechnungen, die mit Hilfe von Schiffs-ADCP⁵-Daten angepasst wurden, zu ca. 60 Sv berechnet. Der Transport quer zum Joinville-Insel – Kapp Norvegia-Schnitt

⁴ BRIOS = Bremerhaven Regional Ice Ocean Simulations

⁵ ADCP = Akustischer-Doppler-Profilstrommesser (Acoustic Doppler Current Profiler)

(Weddellmeer-Schnitt, siehe Abb. 6) wurde von *Schröder und Fahrbach* [1999] mittels geostrophischer Berechnungen und verankerter Strömungsmessern zu 30 ± 10 Sv bestimmt.

Nördlich des Weddellwirbels liegt das Strömungsband des ACC. Die Hauptwassermasse dieses Stroms ist das Zirkumpolare Tiefenwasser (Circumpolar Deep Water, CDW). Diese warme und salzreiche Wassermasse dringt bei ungefähr 30°O in den Weddellwirbel ein [*Deacon, 1979; Gouretski und Danilov, 1993*] und wird mit der zyklonalen Zirkulation des Weddellwirbels nach Westen transportiert. Durch Wechselwirkung mit den umliegenden Wassermassen werden Temperatur und Salzgehalt erniedrigt und somit WDW gebildet [*Foster und Carmack, 1976*]. Die im Weddellmeer erzeugte Mischung aus WDW und AASW ist in der Lage, auf die Kontinentalschelfe zu strömen, und wird als MWDW bezeichnet (siehe Kapitel 2.3). Durch Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und dem Schelfeis wird auf den Schelfgebieten Tiefen- und Bodenwasser gebildet (siehe Kapitel 2.4).

Mit dem Antarktischen Küstenstrom wird ein ebenfalls frisch gebildetes Tiefenwasser in das südliche Weddellmeer transportiert [*Meredith et al., 2000; Hoppema et al., 2001; Klatt et al., im Druck*], dessen Quelle vermutlich vor dem Amery-Schelfeis in der Prydz-Bucht liegt [*Jacobs und Georgi, 1977; Nunes-Vaz und Lennon, 1996; Schodlok et al., 2001*]. Nunes-Vaz und Lennon nennen dieses Wasser Prydz-Bucht-Bodenwasser (Prydz-Bay Bottom Water, PBBW), dieser Name wird hier im Weiteren verwendet⁶.

Aus dem südlichen Weddellmeer werden WSDW und WSBW mit dem westlichen Randstrom entlang der Antarktischen Halbinsel in den nordwestlichen Bereich des Weddellwirbels transportiert [*Deacon, 1979; Orsi et al., 1993*]. Von dort strömt der Hauptteil dieser tiefen Wassermassen der Zirkulation folgend nach Osten. Auf diesem Weg haben sie vier Möglichkeiten das Weddell-Enderby-Becken zu verlassen und an der globalen thermohalinen Zirkulation teilzunehmen [*Mantyla und Reid, 1995*]:

1. Durch die tiefen Passagen des Süd-Scotia-Rückens (siehe Abb. 4) in die Scotia-See⁷ [*Gordon, 1966; Locarnini et al., 1993; Gordon et al., 2001*]. Von dort strömt es westwärts in die südliche Drake-Straße [*Gordon, 1966; Nowlin und Zenk, 1988*], rezirkuliert nach Nordosten und gelangt durch die tiefen Passagen östlich von Süd-Georgien in das Argentinische Becken [*Locarnini et al., 1993*]. Dort

⁶ Schodlok et al. [2001] nennen den gleichen Kern Prydz-Bucht-Wasser (Prydz Bay Water, PBW)

⁷ der Name Südatlantiksee hat sich auch in der deutschsprachigen Literatur nicht durchgesetzt und wird hier nicht verwendet

speist es den tiefen westlichen Randstrom und wird mit diesem weiter nach Norden transportiert.

2. Durch den Süd-Sandwich Graben; WSBW und WSDW fließt in den Graben als tiefer östlicher Randstrom des Süd-Sandwich-Bogens. Obwohl es keine topographischen Barrieren gibt, gelangt WSBW nicht weiter als $51,3^{\circ}\text{S}$ [Locarnini et al., 1993]. WSDW dringt zwar weiter nach Norden vor, aber von ein paar kleinen Ausnahmen abgesehen, erreichen nur Komponenten wärmer als $-0,3^{\circ}\text{C}$ das Argentinische Becken. Grund für dieses Verhalten ist der ACC, der in diesem Bereich nach Süden setzt und damit als hydrographische Barriere wirkt [Locarnini et al., 1993].
3. Weiter östlich durch tiefe Passagen im Südwest-Indischen-Rücken in das Agulhas-, das Kap-, das Natal- oder das Mozambique-Becken. In diesen Becken ist das tiefe Wasser allerdings durch die Topographie eingeschlossen, so dass es sich nicht weiter ausbreiten kann [Jacobs und Georgi, 1977; Reid, 1989].
4. Östlich des Weddell-Wirbels durch die Passage zwischen dem Konrad-Rücken und dem Kerguelen-Plateau in das Crozet-Becken [Mantyla und Reid, 1983; Park et al., 1993]. Durch tiefe Passagen kann dieses Wasser dann weiter nach Norden in das Madagaskar-Becken des Indischen Ozeans einfließen [Haine et al., 1998].

Demnach nehmen nur der erste und der vierte Weg an der globalen thermohalinen Zirkulation teil, diese Wege sind in Abb. 7 schematisch dargestellt. Zusätzlich fließt WSDW mit $\theta > -0,3^{\circ}\text{C}$ durch den Süd-Sandwich-Graben nach Norden in das Argentinische Becken.

Ein weiteres Gebiet der Belüftung des Ozeans ist der Grenzbereich zwischen dem ACC und dem Weddellwirbel. In der sog. Weddell-Scotia-Konfluenz-Zone (Weddell-Scotia-Confluence, WSC) treffen die Wassermassen des Weddellwirbels und die der Scotia-See aufeinander. Über dem Süd-Scotia-Rücken wurde eine homogene Wassermasse gefunden, deren Eigenschaften nicht durch isopyknische Mischung der angrenzenden Wassermassen erklärt werden können [Patterson und Sievers, 1980; Whitworth et al., 1994]. Diese Wassermasse scheint durch direktes Einmischen von im nordwestlichen Weddellmeer gebildetem Schelfwassers beeinflusst zu sein [Muench et al., 1990; Whitworth et al., 1994].

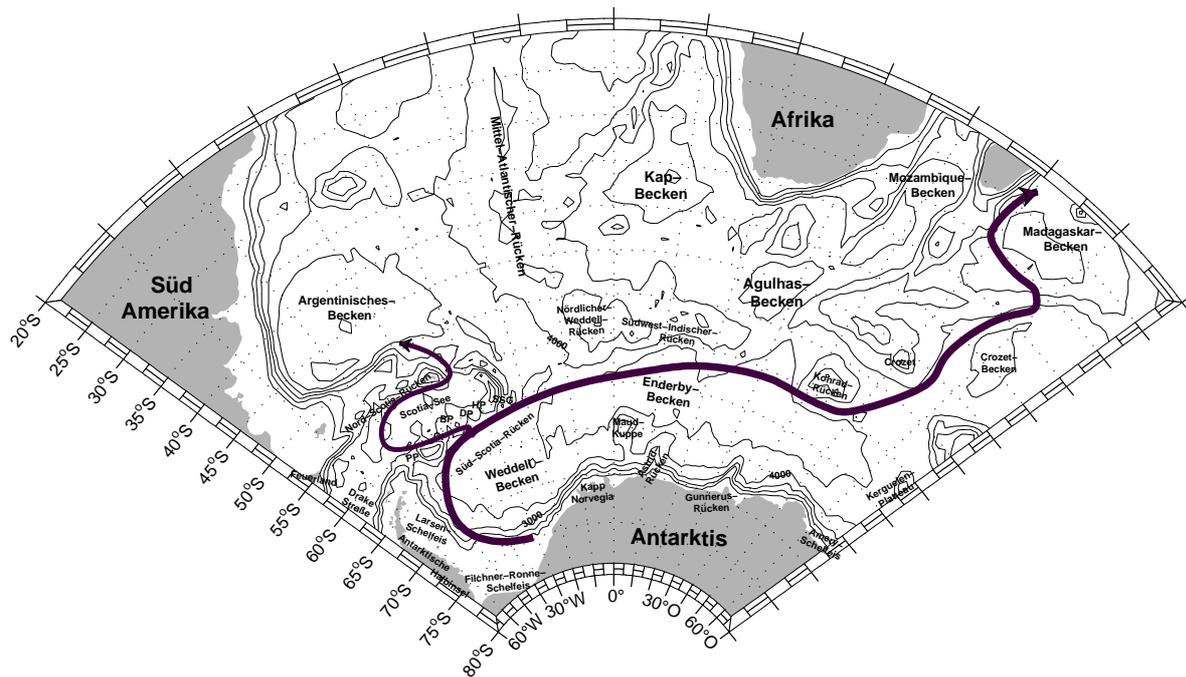


Abb. 7: Schematische Darstellung des Ausstroms von im Weddellmeer gebildeten Tiefen- und Bodenwassers in den Atlantischen und Indischen Ozean; nach [Locarnini et al., 1993; Haine et al., 1998]

3 Tracermethodik

Allgemein werden Spurenstoffe, die im Ozean verfolgbar sind, als Tracer bezeichnet. Transiente Tracer sind dann solche, deren Eintrag zeitlich veränderlich ist. In der Ozeanographie sind Tracermessungen eine wichtige Quellen, um Zeitinformationen über den Transport von Wassermassen zu erlangen. In diesem Kapitel werden die Eigenschaften von transienten Tracern (insbesondere FCKWs) und die daraus folgenden "klassischen Konzepte" der Altersbestimmung, wie Konzentrationsalter und Verhältnisalter, vorgestellt. Anschließend wird eine neue Methode zur Interpretation von wiederholten Tracermessungen entwickelt.

3.1 Fluorkohlenwasserstoffe

Die Chemie organischer Fluorverbindungen wurde Anfang der 1890er Jahre von Frederic Swarts in Belgien begründet. Seit 1908 wird Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4) hergestellt, ursprünglich für die chemische Reinigung, später hauptsächlich als Grundstoff zur Synthese von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKWs). Die ersten FCKWs wurden in den 1920er Jahren in den USA, in einer Kooperation von "Frididaire", "General Motors" und "Du Pont" als ein sichereres Kältemittel zur Verwendung in kommerziellen Kühlschränken entwickelt [Elkins, 1999]. Die ungiftigen und nichtbrennbaren Kältemittel Monofluorchlormethan CCl_3F (FCKW-11 oder kurz F11) und Difluordichlormethan CCl_2F_2 (FCKW-12 oder kurz F12) wurden zuerst von Thomas Midgley, Jr., im Jahr 1928 synthetisiert [Midgley und Henne, 1930]. Die industrielle Produktion dieser FCKWs begann 1930. In den folgenden Jahrzehnten wurden weitere FCKWs, wie zum Beispiel Trichlortrifluorethan $\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$ (FCKW-113 oder kurz F113) entwickelt und industriell hergestellt.

Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften (ungiftig und nicht brennbar) wurden Freone⁸ schnell die bevorzugten Kühlmittel in großen Klimaanlage, mit der Folge dass ihre Konzentration in der Atmosphäre bis Mitte der 1970er Jahre quasi exponentiell anstieg. Die Entdeckung der photokatalytischen Reaktionen des durch die FCKWs in die Stratosphäre gelangten Chlors, das zu einem Abbau der dortigen Ozonschicht führen [Molina und Rowland, 1974], setzte eine Diskussion über die Begrenzung der Produktion von ozonschädigenden Stoffen in Gang. Diese Diskussion führte zum "Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht" (1985) und zum "Montrealer Protokoll zu ozonschädigenden Stoffen" von 1987. Das Ziel beider Abkommen ist der kontrollierte Ausstieg aus Produkti-

⁸ der "Du Pont" Handelsname von FCKWs

on und Verbrauch dieser Stoffe. In der folgenden Zeit verlangsamte sich der Anstieg der atmosphärischen FCKW-Konzentrationen, seit Mitte der 1990er Jahre sinken die F11-Konzentrationen in der Atmosphäre. In Abb. 8 (links) sind die atmosphärischen FCKW- und die CCl_4 -Stoffmengenanteile in der Südhemisphäre gegen die Zeit dargestellt. Seit 1974 werden diese direkt gemessen, die früheren Daten wurden aus den Weltproduktionsraten abgeschätzt [Walker et al., 2000].

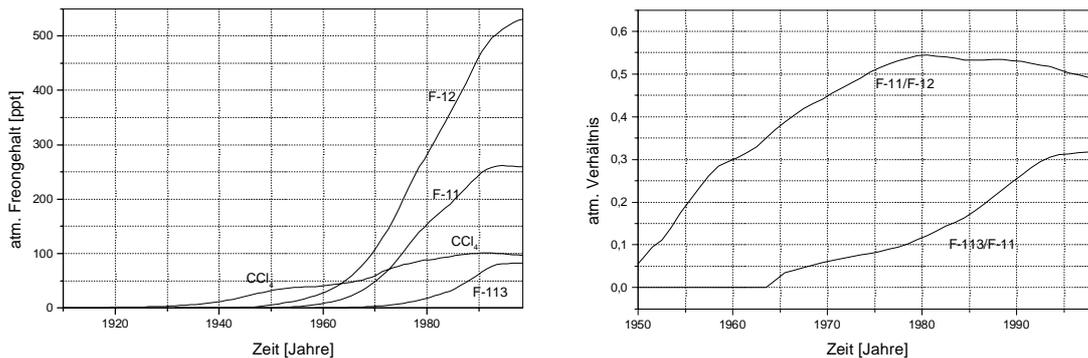


Abb. 8: Zeitliche Entwicklung der FCKW- und CCl_4 – Stoffmengenanteile (links) und der atmosphärischen Verhältnis $F11/F12$ und $F113/F11$ (rechts) der Südhemisphäre; nach [Walker et al., 2000]

Sowohl die Konzentrationen als auch die Verhältnisse der FCKWs werden benutzt um Zeitinformationen über die Zirkulation von Wassermassen zu gewinnen (siehe Kapitel 3.2). CCl_4 wies schon am Anfang des letzten Jahrhunderts messbare Konzentrationen auf. Daher eignet sich CCl_4 als einziger Chlorkohlenwasserstoff für Untersuchungen, die diesen Zeitraum betreffen (siehe z.B. [Klatt und Holfort, 2000]). Der stärkste Anstieg der F11- und F12-Konzentrationen ist zwischen 1960 – 1990, daher sind diese Stoffe für Untersuchungen auf dieser Zeitskala zu benutzen. Für F113 folgt aus den selben Gründen eine Beschränkung auf den Zeitraum von 1970 bis 1990 (siehe hierzu Kapitel 3.2.1). Abb. 8 (rechts) zeigt die zeitliche Entwicklung der atmosphärischen $F11/F12$ - und $F113/F11$ -Verhältnisse. Die Bestimmung von $F11/F12$ ist bis ca. 1960, aufgrund der kleinen Konzentrationen besonders von F11, mit großen Fehlern behaftet. Des Weiteren ist das Verhältnis nur bis 1980 eindeutig. Somit eignet sich $F11/F12$ nur zu Untersuchungen im Zeitfenster von ca. 1960 – 1980. Für das $F113/F11$ -Verhältnis liegt dieses Zeitfenster aus denselben Gründen zwischen den Jahren 1965 – 1995 (siehe hierzu Kapitel 3.2.2).

3.1.1 FCKW-Eintrag in den Ozean

Der FCKW-Eintrag in den Ozean erfolgt durch Gasaustausch mit der Atmosphäre. Der atmosphärische Kontakt des Oberflächenwassers hat zur Folge, dass diesem Wasser im

Idealfall das Lösungsgleichgewicht mit der unteren Troposphäre nach Gl. (1) aufgeprägt wird. Die Sättigungsfunktionen (f) wurden von *Warner und Weiss* [1985] für F11 und F12, von *Bu und Warner* [1995] für F113 und von *Bullister und Wisegraver* [1998] für CCl_4 in Abhängigkeit vom Salzgehalte und der Temperatur experimentell ermittelt.

$$c_{eq}(x, t) = f(T, S) \cdot p_{atm}(t) \quad (1)$$

$c_{eq}(x, t)$	Gleichgewichtskonzentration ⁹ am Ort x zur Zeit t	$[\text{mol kg}^{-1}]$
$f(T, S)$	Sättigungsfunktion in Abhängigkeit von Temperatur und Salzgehalt	$[\text{mol kg}^{-1} \text{Pa}^{-1}]$
$p_{atm}(t)$	atmosphärischer FCKW-Partialdruck	$[\text{Pa}]$

In der Deckschicht sind allerdings erhebliche Abweichungen (meist Untersättigung) von der theoretischen Gleichgewichtskonzentration beobachtet worden, siehe Kapitel 6.2. Die Untersättigungen weisen auf eine Behinderung des Gasaustausches hin. Dieser kommt insbesondere durch eine geschlossene Eisschicht fast völlig zum Erliegen. Außerdem ist selbst bei einem offenen Ozean der Gasaustausch nicht beliebig schnell. Die charakteristische Einstellzeit des Lösungsgleichgewichts von F11 und F12 wurde von *Beining* [1993] zu 4 Wochen abgeschätzt. Bei großen Bildungsraten kann die Verweilzeit eines Wasserpaketes in der Deckschicht geringer sein als diese charakteristische Zeit, so dass Untersättigungen bis zu 50% auftreten (siehe auch Kapitel 6.2). Aufgrund der endlichen Einstellzeit tritt außerdem eine jahreszeitliche Variation der Sättigung durch Temperaturänderungen auf. So führt eine Erwärmung des Ozeans zu einer Verminderung der Löslichkeit [*Warner und Weiss*, 1985] und damit zu einer zeitweiligen Erhöhung der Sättigung. Eine Übersättigung kann eintreten, wenn Gasbläschen (z.B. durch brechende Wellen) in den Ozean eingetragen werden.

Wird die effektive Sättigung als konstant angenommen, bewirkt die zeitliche Änderung des atmosphärischen Gehaltes ein wohldefiniertes zeitabhängiges (transientes) Signal der Deckschicht Gl. (2)

$$c(x_0, t) = \xi \cdot c_{eq}(x_0, t) \quad (2)$$

$c(x_0, t)$	Oberflächenkonzentration zur Zeit t	$[\text{mol l}^{-1}]$
ξ	dimensionslose FCKW-Sättigung	

⁹ eigentlich handelt es sich hierbei um die Molalität, aber in der Ozeanographie hat sich der Ausdruck Konzentration durchgesetzt.

Die hier betrachteten FCKWs verhalten sich im Inneren des Ozeans in guter Nährung konservativ¹⁰, d.h. Konzentrationsänderungen können nur durch Mischung hervorgerufen werden.

3.2 Klassische Konzepte zur Bestimmung des Alters einer Wassermasse mittels FCKW-Verteilungen

Aufgrund des transienten Verhaltens besitzen Tracer, wie die FCKWs, das Potential, Informationen über die Zeitskalen der Belüftung von Wassermassen zu liefern. Dieses wird häufig durch die Angabe eines *Alters* einer Wassermasse ausgedrückt. Dabei ist das Alter eines Wasserpaketes die Zeitspanne seit seinem letzten Kontakt mit der Atmosphäre. Wenn Mischung vernachlässigt werden kann, ist das Alter eine eindeutige Größe. Im Ozean spielen allerdings Mischungsvorgänge eine entscheidende Rolle, somit führen verschiedene Methoden zur Bestimmung des Alters zu verschiedenen Ergebnissen, je nachdem wie die Mischung in der jeweiligen Methode (meist implizit) berücksichtigt wird. Im Folgenden werden die wichtigsten klassischen Konzepte zur Berechnung dieser Alter mittels FCKW-Daten vorgestellt. Für fast alle Tracer-Methoden wird von der Stationarität des Ozeans ausgegangen, d.h. es wird angenommen, dass ein konstantes mittleres Strömungsfeld existiert, das durch die Punktmessungen "hinreichend" beschrieben wird.

3.2.1 Konzentrationsalter

Wird die Mischung völlig vernachlässigt, so bleibt die FCKW-Konzentration eines Wasserpaketes über den gesamten Ausbreitungszeitraum unverändert. Unter der Voraussetzung einer bekannten und konstanten Sättigung ist nach Gl. (2) die gemessene Freonkonzentration ein Abbild der atmosphärischen Bedingungen, die diese Wasser geprägt haben. Somit kann durch Vergleich mit den atmosphärischen Daten auf das Bildungsjahr geschlossen werden. Das Konzentrationsalter ist dann die zeitliche Differenz von Probenahmedatum und Bildungsjahr, siehe Abb. 9.

¹⁰ F11 und F12 haben in der Atmosphäre eine charakteristische Lebenszeit von 74_{-17}^{+31} bzw. 111_{-44}^{+222} Jahren [Cunnold *et al.*, 1994]. Über die Abbauprozesse dieser beiden FCKWs im Ozean ist wenig bekannt, aber auch hier scheint F12 eine größere Lebenszeit zu besitzen. Die beiden anderen Tracer CCl₄ und F113 werden allerdings im Ozean abgebaut [Meredith *et al.*, 1996; Huhn *et al.*, 2001; Roether *et al.*, 2001a]

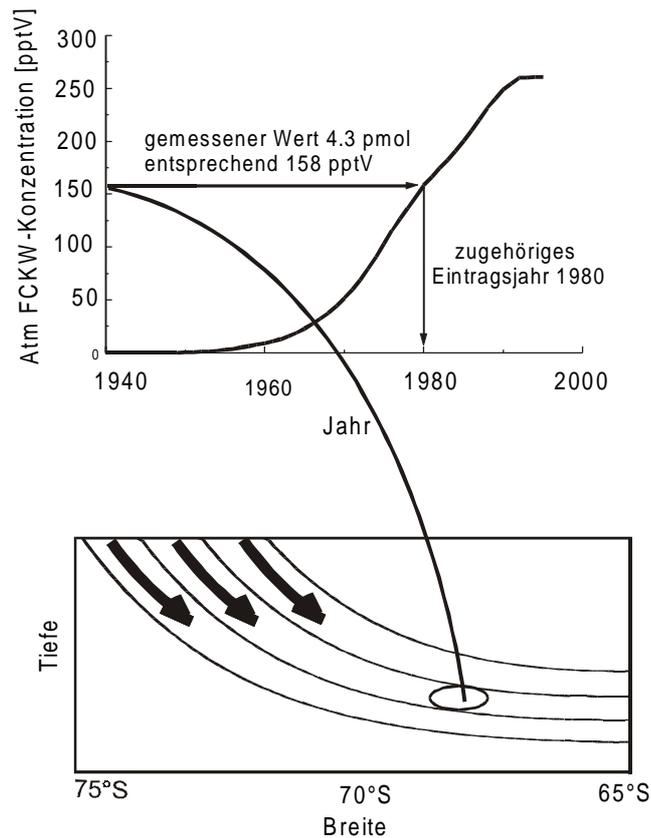


Abb. 9: Ermittlung des Konzentrationsalters. Das obere Bild zeigt die F11 Eintragsfunktion nach [Walker et al., 2000], das untere schematisch die Ausbreitung einer Wassermasse von der Oberfläche in das Innere des Ozeans. Im Jahr 1998 sei eine Probe mit einer F11 Konzentration von 4.3 pmol/kg im Ozean gemessen worden. Nach Gl. (2) entspricht dies einem Partialdruck $p_{am} = 158 \text{ ppt}$ (für $\xi=1$, $T=0^\circ\text{C}$ und $S=35$). Dieser Wert wurde in der Atmosphäre 1980 erreicht, das Konzentrationsalter errechnet sich damit zu 18 Jahren.

Eine solche Bestimmung ist nur dann eindeutig, wenn der atmosphärische Gehalt an FCKW streng monoton ist. Aus Abb. 8 ist zu erkennen, dass der Anstieg der atmosphärischen Gehalte von F11 und F12 seit Anfang der 1990er Jahre sehr gering ist und sie für F11 seit Mitte der 1990er Jahre abnehmen. Daher ist das Konzept des Konzentrationsalters selbst innerhalb der Näherung (keine Mischung) nur für Wassermassen, die vor den 1990er Jahren gebildet wurden, sinnvoll zu gebrauchen. Eine unbekannte Sättigung oder Mischung gestaltet die Interpretation der Konzentrationsalter schwierig, nur im Spezialfall der Mischung von Wassermassen deren FCKW-Konzentration linear mit der Zeit ansteigen, stellt das Konzentrationsalter das mittlere Alter der Mischung dar.

3.2.2 Verhältnialter

Das Konzept des Verhältnialters erlaubt die Einbeziehung von Mischung aus zwei Komponenten, wobei eine Komponente FCKW-tragend, die andere FCKW-frei ist. Bei Mischungen dieser Art verändern sich zwar die Konzentrationen der einzelnen FCKWs, ihre Verhältnisse zueinander bleiben aber konstant. Somit kann analog zum Konzentrationsalter aus dem Verhältnis zweier FCKWs auf den Zeitpunkt t_0 des Verlassens der durchmischten Deckschicht geschlossen werden. Das Verhältnialter ist dann wieder die zeitliche Differenz aus Probennahmedatum und Bildungsjahr. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um das Alter der jungen (FCKW-tragenden) Komponente handelt und nicht um das mittlere Alter der Wasserprobe, das aufgrund der Verdünnung mit altem Wasser erheblich größer sein kann. Der Anteil der jungen Komponente (γ) ergibt sich aus dem Vergleich der gemessenen FCKW-Konzentration und des atmosphärischen FCKW-Gehaltes zum Zeitpunkt der Bildung. Für jedes FCKW gilt:

$$\gamma = \frac{c(x, t_{obs})}{f(T, S) \cdot p_{atm}(t_0)} \quad (3)$$

γ	<i>Anteil der jungen Komponente</i>	
$c(x, t_{obs})$	<i>Konzentration zur Beobachtungszeit</i>	$[mol\ l^{-1}]$
$f(T, S)$	<i>Sättigungsfunktion in Abhängigkeit der Temperatur und des Salzgehalts</i>	$[mol\ l^{-1}\ Pa^{-1}]$
$p_{atm}(t_0)$	<i>atm. FCKW-Partialdruck zum Zeitpunkt Bildung</i>	$[Pa]$

Analog zum Konzentrationsalter ist auch eine solche Bestimmung nur dann eindeutig, wenn die Eintragsfunktion (hier der Quotient von zwei atmosphärischen Gehalten) streng monoton ist. Aus Abb. 8 ist zu erkennen, dass dieses für F11/F12-Verhältnis nur bis ca. 1980 und für F113/F11 bis ca. 1995 der Fall ist. Für FCKW-Verhältnisse besteht zusätzlich die Schwierigkeit, dass, wenn Untersättigungen auftreten, diese unterschiedlich ausgeprägt sein können. Dieses liegt an den unterschiedlichen Transfargeschwindigkeiten der FCKWs, die proportional zu $Sc^{-0.5}$ (Sc = Schmidt-Zahl) sind [Wanninkhof, 1992]. Für das Verhältnis F11/F12 ist das Verhältnis der Schmidt-Zahlen ca. 0,91 (bei 0°C) [Zheng et al., 1998] so dass die Transfargeschwindigkeit von F11 um ca. 5% größer ist als die von F12. Das Sc -Verhältnis von F113/F11 ist 1,47 (bei 0°C), was zu einer um ca. 20% kleineren Transfargeschwindigkeit für F113 führt [Roether et al., 2001a]. Im Allgemeinen hat dies keinen großen Einfluss, da die Verweilzeiten in der Deckschicht lang genug sind, so dass die Sättigungen aller FCKWs gegen 100% gehen. Im Weddellmeer hingegen sind F11 Sättigungen um die 60% beobachtet worden (siehe Kapitel 6.2). Dort resultiert der

langsamere Gasaustausch in einer um ca. 20% geringeren F113-Sättigung im Vergleich zu F11 [Roether et al., 2001a].

Findet Mischung verschiedener FCKW-haltiger Wassermassen statt, so mischen die Verhältnisse nicht linear, sondern die Verhältnisse werden von der Wassermasse mit den höheren FCKW-Konzentrationen (i.A. der jüngeren) dominiert.

3.3 Bestimmung des Alters einer Wassermasse durch Anpassung einer Altersverteilung an FCKW-Konzentrationen wiederholter Schnitte

Die bisher vorgestellten Konzepte setzen ein einheitliches Alter der betrachteten Wasserpakete voraus. Als einzige Erweiterung ist die Zumischung von altem (FCKW-freien) Wasser zugelassen. Die wichtige Rolle der Mischung im Ozean wird in dieser Betrachtungsweise völlig außer Acht gelassen. In diesem Kapitel wird nun eine neue Methode zur Berechnung des Alters und des Anteils der jungen Komponente einer Wassermasse vorgestellt, die auf wiederholten FCKW-Messungen basiert und Mischung explizit berücksichtigt. Auch für diese Methode ist Annahme eines stationären Ozeans dessen mittleres Verhalten durch die vorliegenden Messungen wiedergegeben wird notwendig. Unter dieser Annahme sind Änderungen der Tracer-Konzentrationen allein auf das transiente Verhalten des jeweiligen Tracer zurückzuführen (siehe Abschnitt 6.5).

Zunächst wird das Konzept der Altersverteilung einer Wassermasse eingeführt und dann der Zusammenhang von Altersverteilung, atmosphärischen FCKW-Gehalten und ozeanischen FCKW-Konzentrationen gezeigt. Anschließend wird ein Minimierungsprinzip angewandt um aus dem zeitlichen Verlauf der FCKW-Konzentrationen die Altersverteilung eines Wasserpaketes abzuschätzen.

3.3.1 Altersverteilung

Das Konzept der Altersverteilung ist nicht neu, schon Anfang der 1970er Jahre wurde sie in die Theorie des Flusses von Tracern in natürlichen Reservoiren (insbesondere Grundwasser) durch *Bolin und Rodhe* [1973] sowie *Nir und Lewis* [1975] eingeführt. Später wurde die Idee auf die Verteilung von chemischen Tracern in der Stratosphäre erweitert [Kida, 1983; Hall und Plumb, 1994] und von *Beining und Roether* [1996] auf FCKW-Konzentrationen im Ozean übertragen. *Holzer und Hall* [2000] haben schließlich die Theorie verallgemeinert und den mathematischen Formalismus der Greenschen Funktionen

eingeführt, der von *Khatiwala et al.* [2001] auf Tracerverteilungen im Ozean übertragen wurde. Außerdem wurden Altersverteilungen in verschiedenen Modellen ausgewertet (z.B. [England, 1995; Haine et al., 1998; Khatiwala et al., 2001; Steinfeldt, 2001]).

Die mathematische Herleitung der Altersverteilungen, ausgehend von der Kontinuitätsgleichung (Gl. (4)) wird in Kapitel 3.3.1.1 gegeben. Die grundlegende Idee hierbei ist, dass die Ausbreitung von Wasserteilchen auf Trajektorien stattfindet und sich ein Wasserpaket im Inneren des Ozeans aus Wasserteilchen zusammensetzt, die auf verschiedenen Trajektorien von der Oberfläche zu dem betrachteten Ort gelangt sind (siehe Abb. 10).

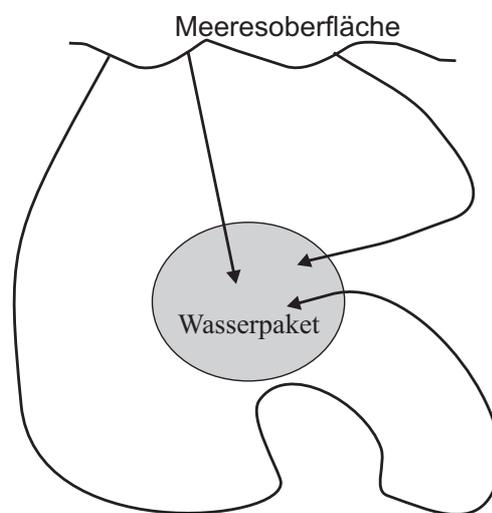


Abb. 10: Schematische Darstellung von Trajektorien von Teilchen, die ein Wasserpaket bilden, nach [Khatiwala et al., 2001].

Jede dieser Trajektorien ist mit einer eigenen Transferzeit und damit einem eigenen Alter t verknüpft. Das Spektrum dieser unterschiedlichen Alter wird Altersverteilung n genannt, wobei $\int dn = 1$ gilt. Das Produkt $n(t) \cdot dt$ gibt dann an, wie groß der Anteil des Wassers mit einem Alter im Intervall $[t, t+dt]$ in einem Wasserpaket ist.

3.3.1.1 Mathematische Beschreibung der Altersverteilung

Im Folgenden wird in Anlehnung an *Khatiwala et al.* [2001] und *Holzer und Hall* [2000] auf den mathematischen Formalismus der Altersverteilung eingegangen.

Die Ausbreitung eines passiven Tracers durch ein Strömungsfeld kann in zwei Teile separiert werden, wobei molekulare Diffusion zu vernachlässigen ist (siehe Anhang 10.2)

- Advektion mit dem mittleren Strömungsfeld
- Diffusion durch Fluktuationen des mittleren Felds

Die Verteilung $c(\mathbf{x},t)$ eines Tracers kann dann mit Hilfe der Kontinuitäts-Gleichung beschrieben werden als:

$$\frac{\partial}{\partial t} c(\mathbf{x},t) + \mathbf{u}(\mathbf{x},t) \nabla c(\mathbf{x},t) - \nabla \cdot \kappa(\mathbf{x},t) \nabla c(\mathbf{x},t) = Q(\mathbf{x},t) \quad (4)$$

\mathbf{u}	<i>Advektionsgeschwindigkeit</i>	$[m\ s^{-1}]$
c	<i>Tracer-Konzentration</i>	$[mol\ kg^{-1}]$
κ	<i>Wirbel-Diffusions-Parameter</i>	$[m^2\ s^{-1}]$
Q	<i>Quellstärke</i>	$[mol\ kg^{-3}\ s^{-1}]$

Mit dem (linearen) Transportoperator \mathfrak{S}

$$\mathfrak{S} = \mathbf{u}(\mathbf{x},t) \cdot \nabla - \nabla \cdot \kappa(\mathbf{x},t) \nabla \quad (5)$$

wird Gl. (4) zu:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathfrak{S}\right) c(\mathbf{x},t) = Q(\mathbf{x},t) \quad (6)$$

Aufgrund der Linearität von Gl. (6) kann Q als Superposition von individuellen Tracer-Pulsen in Raum und Zeit betrachtet werden. Gl. (6) mit dem Q eines dieser Pulse definiert die zugehörige Greensche Funktion G

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathfrak{S}\right) G(\mathbf{x},t; \mathbf{x}',t') = \delta^3(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \delta(t - t') \quad (7)$$

δ *Diracsche Delta-Funktion*

G "transportiert" einen Tracer, der am Ort \mathbf{x}' zur Zeit t' in das System injiziert worden ist, zu dem Punkt (\mathbf{x},t) . Da kein Tracer vorhanden sein kann bevor er injiziert worden ist, muss G der Kausalitätsbedingung $G = 0$ für $t' > t$ genügen. Die Lösungen der Differential-Gleichungen (6) mit beliebigen Randbedingungen mittels Greenscher Funktionen ist in [Morse und Feshbach, 1953] ausführlich diskutiert. In dieser Arbeit wird nur der Fall einer vorgegebenen Konzentration auf dem Rand ∂D eines Gebietes D ($\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}_0$) betrachtet. Dieser Rand kann z.B. die Meeresoberfläche sein. Dieses Randwertproblem wird gelöst durch:

$$\begin{aligned}
 c(\mathbf{x}, t) = & \int_0^t dt' \iiint_D d^3 x' G(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, t') Q(\mathbf{x}_0, t') + \iiint_D d^3 x' c(\mathbf{x}_0, 0) G(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, 0) \\
 & + \int_0^t dt' \iint_{\partial D} d^2 x_0 \{ \kappa(\mathbf{x}_0, t') [G(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, t') \nabla c(\mathbf{x}_0, t') - c(\mathbf{x}_0, t) \nabla G(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, t')] \\
 & \quad - c(\mathbf{x}_0, t') G(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, t') \mathbf{u}(\mathbf{x}_0, t') \} \cdot \hat{\mathbf{n}}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$\hat{\mathbf{n}}$ nach Außen gerichtete Normale des Gebietes D

Der erste Term in Gl. (8) beschreibt die Superposition aller Tracer-Pulse die an Orten \mathbf{x}_0 und Zeiten t' von der Quelle $Q(\mathbf{x}_0, t')$. Der zweite Term repräsentiert die Randbedingungen $c(\mathbf{x}_0, 0)$, während der dritte Term das Integral über den Rand darstellt und alle Beiträge zu c durch die Randbedingungen selbst oder einen Fluss durch den Rand berücksichtigt. Aufgrund der Tatsache, dass sich diese Randbedingungen als eine Summe von δ Funktionen in der Zeit und Orten auf der Oberflächen darstellen lassen, wird ein *Propagator* G' definiert:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathfrak{S} \right) G'(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, t') = 0 \tag{9}$$

mit den Randbedingungen:

$$G'(\mathbf{x}_s, t; \mathbf{x}_0, t') = \delta^2(\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_0) \delta(t - t') \tag{10}$$

wobei \mathbf{x}_s und \mathbf{x}_0 Punkte auf dem Rand (der Meeresoberfläche) sind. Das heißt, G' ist ohne explizite Quellen im Inneren direkt durch die δ -Funktionen der Randbedingungen definiert. Die Lösung von Gl. (6) ohne explizite Quellen vereinfacht sich zu:

$$c(\mathbf{x}, t) = \int_{-\infty}^t dt' \iint_{\partial D} d^2 x_0 G'(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, t') c(\mathbf{x}_0, t') \tag{11}$$

Der Propagator G' beschreibt also die Ausbreitung von konservativen Tracern, die zur Zeit t' am Ort \mathbf{x}_0 (an der Oberfläche) waren in das Innere des Gebiets (des Ozeans). Des Weiteren wird G' normiert durch:

$$\int_{-\infty}^t dt' \iint_{\partial D} d^2 x_0 G'(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, t') = 1 \tag{12}$$

Das Oberflächenintegral:

$$\mathbf{n}(\mathbf{x}, t; t') = \iint_{\partial D} d^2 x_0 G'(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_0, t') \tag{13}$$

ist die gesuchte Altersverteilung [Hall und Plumb, 1994]. Das mittlere Alter τ ist daher gegeben durch:

$$\tau = \int_{-\infty}^t dt' (n(\mathbf{x}, t; t') (t - t')) \quad (14)$$

Nur für den 1-dimensionalen Fall kann eine analytische Lösung der Gl. (13) angegeben werden (siehe z.B. [Luikov, 1968]), diese ist in Gl. (15) dargestellt. Deshalb wird im Folgenden das Altersspektrum mit einer Altersverteilung, die formal einer Tracer-Ausbreitung unter einer 1-dimensionalen Kontinuitäts-Gleichung genügt, angenommen. Dabei stellt u die mittlere Advektionsgeschwindigkeit und κ die scheinbare Diffusion (Wirbel-Diffusion) dar.

$$n(x, t; u) = \frac{x}{\sqrt{4\pi\kappa t^3}} \exp\left(-\frac{(x - ut)^2}{4\kappa t}\right) \quad (15)$$

Diese Lösung beschreibt die Altersverteilung einer Wassermasse, deren Wasserteilchen die Oberfläche in einem bestimmten Raumgebiet mit bestimmten Eigenschaften verlassen haben. Mit $x = u\tau$ und $u^2 = 2\kappa\tau\sigma^{-2}$ kann die Gleichung von den formalen Flussparametern $(x, t; u)$ zu Parametern (t, τ, σ) transformiert werden, wodurch die Eigenschaften der Altersverteilung beschrieben werden. Dabei ist σ die Breite der Altersverteilung und τ das mittlere Alter.

$$n(t, \tau, \sigma) = \sqrt{\frac{\tau^3}{2\pi\sigma^2 t^3}} \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - t)^2 \cdot \tau}{2\sigma^2 t}\right) \quad (16)$$

$n(t, \tau, \sigma)$	<i>Altersverteilung</i>
τ	<i>mittleres Alter</i>
σ	<i>Breite der Verteilung</i>

Diese Parametrisierung ist nun nicht mehr explizit von Ort und Geschwindigkeiten abhängig, d. h. es wird nur noch der Einfluss dieser Größen auf die Altersverteilung betrachtet. Diese Funktion ist für verschiedene σ in Abb. 11 dargestellt. Für kleine σ ist die Verteilung näherungsweise Gauss-förmig, sie wird aber zu größeren σ hin zunehmend unsymmetrischer. Diese Unsymmetrie stellt eine "gewünschte" Eigenschaft der Lösung dar, da die Altersverteilung für kleine Alter beschränkt ist durch ($t' \geq 0$) während für große Alter keine solche Beschränkung existiert.

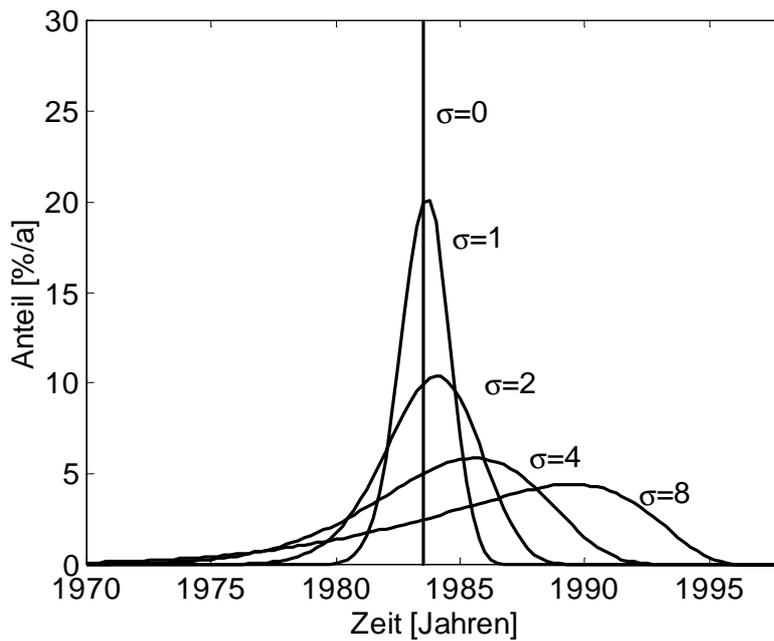


Abb. 11: Altersverteilung für unterschiedliche σ ($\sigma = 0, 1, 2, 4, 8$ Jahre); $t_{obs} = 1998$ und $\tau = 15$ Jahre

3.3.2 Anpassung der Altersverteilung

In Kapitel 3.2.1 wurde die FCKW-Konzentration eines Wasserpaketes, das die Meeresoberfläche zum Zeitpunkt t_0 verlassen hat, beschrieben als:

$$c_0(t_0) = \xi \cdot c_{eq}(t_0) = \xi \cdot f(T, S) \cdot p_{atm}(t_0) \quad (17)$$

Aufgrund von Mischungsprozessen besteht ein Bereich im Inneren des Ozeans im Allgemeinen aus verschiedenen Wassermassen, d.h. aus Wasserpaketeten die an deutlich unterschiedlichen Orten zu unterschiedlichen Zeiten gebildet wurden. Die FCKW-Konzentration eines solchen Bereichs lässt sich daher als Linearkombination von FCKW-tragenden Komponenten schreiben:

$$c(t) = \sum_i \gamma^i \xi^i \cdot f(T^i, S^i) \cdot p_{atm}^i(t_0^i) \quad (18)$$

γ^i Anteil der Wassermasse i mit $\sum \gamma^i = 1$

Der Index i kennzeichnet dabei die jeweilige Wassermasse. In Kapitel (3.3.1) wurde gezeigt, dass auch das Wasser einer Wassermasse aus Wasserteilchen besteht, die auf unterschiedlichen Trajektorien zum betrachteten Ort gelangt sind. Somit ist es besser, statt

des Produktes $f \cdot p_{atm}$ die Faltung¹¹ der Altersverteilung Gl. (16) mit der zeitlichen FCKW-Eintragsfunktion Gl.(17), also einen gewichteten Mittelwert zu betrachten. Unter der Annahme einer stationären Zirkulation des Ozeans ist die Altersverteilung zeitlich konstant und es kann aus der bekannten Altersverteilung die Konzentration eines beliebige transienten Tracers des Wasserpaketes berechnet werden. Mit $t = t_{obs} - t'$ (t = Alter, Jahre) ist diese Beziehung gegeben durch:

$$c(t_{obs}) = \sum_i \gamma^i \xi^i \int_0^{\infty} n(t, \tau^i, \sigma^i) \cdot c_{eq}^i(t_{obs} - t) dt \quad (19)$$

$c(t_{obs})$	FCKW-Konzentration zur Zeit t_{obs}	$[mol\ m^{-3}]$
$n(t, \tau, \sigma)$	Altersverteilungen	$[s^{-1}]$
t	Alter ($t_{obs} - t_0$)	$[Jahre]$
$c_{eq}(t_{obs} - t)$	Gleichgewichtskonzentration zur Zeit $t_{obs} - t$	$[mol\ m^{-3}]$

Die freien Parameter in Gl. (19) sind die mittleren Alter τ^i , die jeweilige Breite der Altersverteilung σ^i und das Produkt aus Sättigung und Anteil der jeweiligen Komponente $\gamma^i \cdot \xi^i$. In diesen Produkten sind die γ^i die ozeanographisch interessanten Anteile der jungen Komponenten. Diese können separiert werden, indem die Sättigung mittels anderer Methoden abgeschätzt wird (in dieser Arbeit wird die Sättigung aus Messungen von Oberflächenkonzentrationen in einem Bildungsgebiet abgeschätzt; siehe Kapitel 6.2). Jeder beliebige Satz dieser Parameter definiert eindeutig eine FCKW-Konzentration für alle t_{obs} .

In der Ozeanographie wird allerdings der umgekehrte Fall angetroffen. Die FCKW-Konzentrationen eines Wasserpaketes sind zu wenigen diskreten Zeitpunkten bekannt und gesucht ist die Altersverteilung, die diese Konzentrationen "erzeugt" um daraus die ozeanographisch relevanten Größen wie das mittlere Alter und den Anteil der jungen Komponente zu bestimmen. Dieses inverse Problem lässt sich nicht analytisch lösen, daher wird hier ein Minimierungsprinzip angewandt. Dazu wird eine Kostenfunktion S definiert und der Parametersatz solange unter der Nebenbedingung $\sum \gamma = 1$ variiert, dass der Wert der Kostenfunktion minimal wird. Allerdings hat ein solches Gleichungssystem $3n-1$ (n Anzahl der Wassermassen) freie Parameter und erfordert mindestens $3n-1$ unabhängige Messungen. Diese können entweder Messungen verschiedener Tracer mit unabhängigen Eintragsfunktionen zu einem Zeitpunkt oder wiederholte Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten sein. Unabhängige Messungen verschiedener Tracer stehen kaum zur Verfügung, da routinemäßig nur die transienten Tracer F11 und F12 gemessen wurden. Für diese ist die Forderung nach linearer Unabhängigkeit seit ca. 1980 nicht erfüllt (siehe Abb. 8).

¹¹ d.h. es wird das Integral des Produkts der beiden Felder über das Raumgebietes des Kerns bestimmt.

Seit Mitte der 1990er Jahre werden zwar auch F113 und CCl₄ gemessen, allerdings ist die Datenqualität für F113 bis 1998 mit einem Fehler von bis zu 10% sehr schlecht [Bulsiewicz, 2000] und außerdem wird sowohl bei F113 [Roether et al., 2001a] als auch bei CCl₄ [Meredith et al., 1996; Huhn et al., 2001] ein Abbau im Ozean bzw. eine Anfangszehrung beobachtet. Auch wiederholte FCKW-Messungen sind bisher selten, außerdem sind die Eintragsfunktionen von F11 und F12 zwischen ungefähr 1975 – 1990 linear, so dass trotz der Faltung mit der Altersverteilung keine "völlig unabhängigen" Messungen zu erwarten sind.

In dieser Arbeit werden wiederholte Messungen verwendet. Der hier verwendete Datensatz aus sechs Wiederholungen stellt einen der umfangreichsten FCKW-Datensätze der Ozeanographie dar. Trotzdem reicht er bei weitem nicht zur vollständigen Anpassung der freien Parameter in Gl. (19) aus. Im Weiteren wird daher nur der Fall der Ausbreitung **einer** Wassermasse und deren Verdünnung mit altem, FCKW-freiem Wasser betrachtet. Hierdurch vereinfacht sich Gl. (19) zu:

$$c(t_{obs}) = \gamma \cdot \xi \int_0^{\infty} n(t, \tau, \sigma) \cdot c_{eq}(t_{obs} - t) dt = \gamma \cdot \xi \int_0^{\infty} \sqrt{\frac{\tau^3}{2\pi\sigma^2 t^3}} \cdot \exp\left[-\frac{(t-\tau)^2 \cdot \tau}{2\sigma^2 t}\right] c_{eq}(t_{obs} - t) dt \quad (20)$$

Diese Gleichung hat nur die drei freien Parameter $\sigma, \gamma \cdot \xi$ und τ , so dass ein least-square Ansatz für die Minimierung der Differenzen zwischen den mit Gl. (20) berechneten und den gemessenen FCKW-Konzentrationen (c_{obs}) durchgeführt werden kann.

$$S \equiv \frac{1}{(N - \nu)} \sum_{j=1}^N \frac{1}{\delta_{obs}(t_{obs}^j)^2} \cdot (c_{obs}(t_{obs}^j) - c(t_{obs}^j))^2 \quad (21)$$

N	Anzahl der Messungen
ν	Anzahl der anzupassenden Parameter
$\delta_{obs}(t_{obs}^j)$	Fehler der gemessenen FCKW-Konzentration
$c(t_{obs}^j)$	berechnete FCKW-Konzentration zur Zeit t_{obs}^j

Die einzelnen Messungen sind mit ihren Unsicherheiten $\delta_{obs}(t_{obs}^j)$ gewichtet. Unter der Annahme, dass diese Unsicherheiten die einzigen Fehler sind, ist S im Minimum in der Größenordnung eins zu erwarten. Ein deutlich größerer Wert des Minimums zeigt daher weitere Fehlerquellen an. Diese können zum Beispiel aus einer unangemessenen Form der verwendeten Altersverteilung, Einmischungen weiterer FCKW-tragender Komponenten oder einer Abweichung von der zeitunabhängigen Zirkulation bestehen.

Bei der Interpretation der so gewonnenen Ergebnisse ist zu beachten, dass die Einordnung in altes und junges Wasser nur aus Gründen der Berechenbarkeit geschieht, während die "wirkliche" Altersverteilung einer Wassermasse eine kontinuierliche Funktion darstellt. Die berechnete Altersverteilung der jungen Komponente strebt daher schneller gegen Null als die wirkliche Altersverteilung der gesamten Wassermasse. Somit sind für große Alter Abweichungen zwischen diesen beiden Altersverteilung zu erwarten. Nur für den Fall, dass diese Abweichungen in den Zeitraum verschwindender FCKW-Konzentrationen fallen, spielen sie keine Rolle. Im allgemeinen Fall ist aber davon auszugehen, dass die Abweichungen in den Anteilen in den Zeitraum nicht verschwindender FCKW-Konzentrationen fallen. Aufgrund der Faltung mit der FCKW-Eintragsfunktion sind die Auswirkungen auf die berechneten FCKW-Konzentrationen dieses Verhaltens für die jüngeren größer als für die älteren Messungen. Die Anpassung der Altersverteilung hat die Tendenz den Anteil der jungen Komponente so zu vergrößern, dass die fehlenden alten Anteile im Mittel ausglich werden. Daher sind die Bestimmungen der alten Messungen eher zu groß und die der neueren eher zu klein.

3.4 Bestimmung des Transports von jungem Wasser senkrecht zu einem Schnitt

In Kapitel 3.3 wurde ein Verfahren eingeführt, das zur Bestimmung der Altersverteilung der jungen Komponente einer Wassermasse führt. In diesem Kapitel werden nun zwei Methoden dargestellt, mit denen unter Verwendung des jungen Anteils (1. Methode) oder der Altersverteilung (2. Methode) sowie dem FCKW- und dem Strömungsfeld der Transport frisch belüfteten Wassers durch einen Schnitt zu bestimmen ist. Beide Methoden stützen sich auf das simultane FCKW- und des Strömungsfelder, nutzen aber unterschiedliche Ansätze.

3.4.1 Regionale Methode

Diese mathematisch weniger aufwändige Methode, die hier als regionale Methode bezeichnet wird, wurde in der Vergangenheit (in ähnlicher Form) von anderen Autoren verwendet, z. B. [*Carmack und Foster, 1975; Haine et al., 1998*]. Dabei werden die beiden Felder (Strömungs- und FCKW-Feld) zunächst getrennt ausgewertet. Aus dem FCKW-Feld wird der Anteil der jungen Komponente und aus dem Strömungsfeld der Gesamttransport im Kern berechnet. Das Produkt dieser Größen ergibt dann den Fluss des jungen Wassers (Gl. (22))

$$T_v = \gamma \cdot T_{\perp} = \gamma \int_{\text{Kern}} u_{\perp} dA \quad (22)$$

T_v	Transport ventilierten Wassers durch den Schnitt	$[m^3/s]$
T_{\perp}	Transport senkrecht zum Schnitt	$[m^3/s]$
γ	Anteil der jungen Komponente	
u_{\perp}	Geschwindigkeit senkrecht zum Schnitt	$[m/s]$

3.4.2 Lokale Methode

Der Ansatz der lokalen Methode besteht darin, den FCKW-Transport durch den Schnitt abzuschätzen und dann die Menge jungen Wassers zu berechnen, die bei bekannter Altersverteilung nötig ist, diesen FCKW-Transport zu erzeugen.

Für die Berechnung des FCKW-Transportes wird zunächst für jeden Punkt des jeweils betrachteten Kerns sowohl die Normalkomponente der Strömungsgeschwindigkeit als auch die FCKW-Konzentration abgeschätzt. Der gesuchte Transport ergibt sich dann aus der Faltung dieser beiden Felder über das Raumgebiet des Kerns (Gl. (23)).

$$F_{FCKW} = \int_{\text{Kern}} u_{\perp}(x, z) \cdot c(x, z) dA \quad (23)$$

F_{FCKW}	FCKW-Fluss durch den Schnitt	$[m^3/s \cdot pmol/kg]$
$u_{\perp}(x, z)$	Geschwindigkeit senkrecht zum Schnitt am Punkt (x, z)	$[m/s]$
$c(x, z)$	FCKW-Konzentration am Punkt (x, z)	$[pmol/kg]$

Um die erforderliche Menge Oberflächenwassers zu berechnen, die diesen FCKW-Fluss zu erzeugen, ist es nötig, dessen FCKW-Konzentration zur Zeit der Bildung $c_0(t_0)$ zu kennen. Bei bekannter Altersverteilung der jungen Komponente kann diese nach Gl. (20) berechnet werden, wobei $t_{\text{obs}} = t_0$ ist¹². Die erforderliche Menge dieser Wassermasse ergibt sich dann aus dem Quotienten aus FCKW-Fluss und FCKW-Konzentration:

$$T_v = \frac{F_{FCKW}}{c_0(t_0)} \quad (24)$$

T_v	Transport ventilierten Wassers durch den Schnitt	$[SV]$
$c_0(t)$	FCKW-Oberflächenkonzentration zum Zeitpunkt der Wassermassenbildung	$[pmol/kg]$

¹² Ist nur das mittlere Alter bekannt, kann die Konzentration immer noch nach Gl. (2) berechnet werden

Der Unterschied zur regionalen Methode ist also, dass hier beide Felder sofort zusammen ausgewertet werden. Die Faltung über den Bereich des Kerns wichtet das Strömungsfeld mit den FCKW-Konzentrationen und berechnet so den FCKW-Fluss im Kern.

3.5 Altersbestimmungen mittels Tritium und Helium

In diesem Kapitel werden der Vollständigkeit halber weitere Methoden zum Abschätzen eines Alters von Wassermassen beschrieben. Diese Methoden basieren auf Tritium und Helium-Messungen. Zunächst wird der Eintrag dieser Stoffe in den Ozean beschrieben und dann auf die aus diesen Größen berechneten Alter eingegangen.

3.5.1 Tritium

Das Wasserstoffisotop der Masse 3 wird Tritium (T) oder überschwerer Wasserstoff (^3H) genannt. Tritium ist radioaktiv und zerfällt durch Betazerfall nach der Reaktion



mit einer Halbwertszeit von $12,32 \pm 0,02$ Jahren zu ^3He [Lucas und Unterweger, 2000]. In der Ozeanographie wird bisher nach einem Vorschlag von Taylor und Roether [1982] einheitlich der ältere Wert 12,43 Jahre verwendet [Unterweger et al., 1980].

Das Tritium im Ozean ist sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprunges. Das natürliche Tritium entsteht vorwiegend durch die Spaltungsreaktionen von ^{14}N und ^{16}O in den oberen Schichten der Atmosphäre. Diese werden durch die Höhenstrahlung, im Wesentlichen Protonen und α -Teilchen, hervorgerufen [Sültenfuß, 1998]. Anthropogenes Tritium wurde hauptsächlich durch Wasserstoffbombentests in den frühen 1960er in die Atmosphäre freigesetzt. Hierdurch wurde das natürliche Inventar um den Faktor 100 erhöht [Weiss und Roether, 1980]. Tritiumkonzentrationen¹³ werden im Ozean als T/H-Verhältnis (TU, Tritium Unit) angegeben, wobei $1\text{ TU} \equiv \frac{[\text{T}]}{[\text{H}]} \cdot 10^{18}$ ist.

Tritium-Eintrag in den Ozean:

Der Tritium-Eintrag in den Ozean unterscheidet sich grundlegend von dem der FCKWs. Tritium nimmt als Wassermolekül HTO am Wasserkreislauf teil [Begemann, 1961], so dass es als Niederschlag oder durch Wasserdampfaustausch in den Ozean gelangt.

¹³ obwohl es sich um ein Verhältnis handelt, hat sich der Begriff Konzentration durchgesetzt

Trotz der relativ kurzen Aufenthaltsdauer von Wasserdampf in der Troposphäre, sie beträgt nur etwa 10 Tage [Rozanski et al., 1991], ist in der Troposphäre immer noch anthropogenes Tritium anzutreffen. Dies liegt daran, dass das durch Kernwaffentest freigesetzte Tritium zum überwiegenden Teil in die Stratosphäre emittiert wurde und diese somit das größte Reservoir des "Bomben-Tritiums" darstellt [Sültenfuß, 1998]. Die mittlere Verweildauer von HTO in der Stratosphäre ist 1-10 Jahre [Mason, 1977]. Demnach ist der Austausch zwischen Troposphäre und Stratosphäre relativ langsam und sorgt somit für einen stetigen HTO Fluss in die Troposphäre. Dieser Austausch findet hauptsächlich in höheren Breiten durch Troposphärenbrüche im Frühjahr (sog. spring-leaks) statt.

In Abb. 12 ist die mittlere Tritiumkonzentration für zwei Messstationen, eine auf der Nord- die andere auf der Südhemisphäre, gegen die Zeit dargestellt.

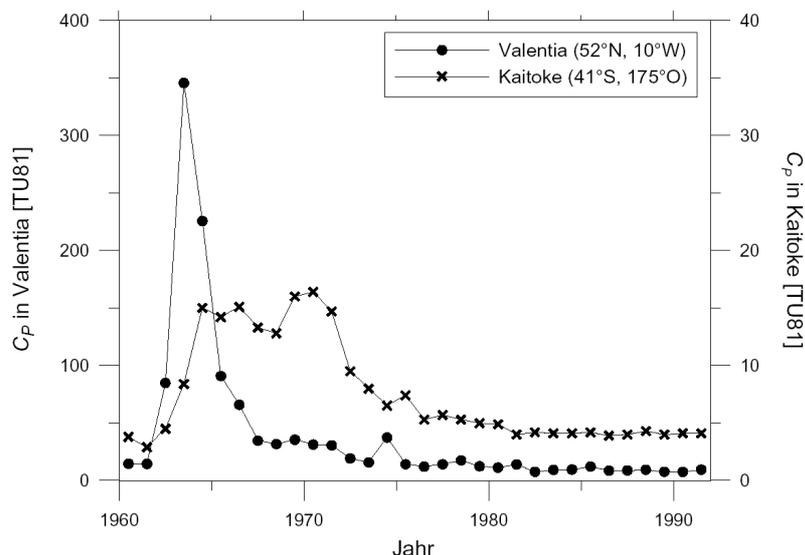


Abb. 12: Tritiumkonzentrationen C_p im Niederschlag von Valentia (Irland) und Kaitoke (Neuseeland). Die Werte sind auf den 1.1.1981 zerfallskorrigiert. Die Ordinate für Kaitoke ist um den Faktor 10 gestreckt. Datenquellen: [IAEA, 1992; IAEA, 1994]; nach [Butzin, 1999].

Die Tritiumkonzentrationen auf der Südhalbkugel waren niedriger als die auf der nördlichen (in Abb. 12 ist die südliche Kurve, Kaitoke, um den Faktor 10 gestreckt), außerdem traten südlich des Äquators die Spitzenwerte später als im Norden auf. Die Ursache hierfür ist, dass bis auf die französischen Versuche in Polynesien alle anderen Wasserstoffbombentests in der nördlichen Hemisphäre stattfanden und die Zeitskala des Luftaustauschs zwischen den beiden Hemisphären in der Stratosphäre in der Größenordnung von 10 Jahren liegt [Sültenfuß, 1998]. Die Tritiumkonzentrationen nehmen, wegen des Eintrages in höheren Breiten und der kurzen Verweildauer in der Troposphäre, innerhalb der

jeweiligen Hemisphäre zu hohen Breiten zu. Innerhalb einer Hemisphäre variieren die Konzentrationen jedoch nicht nur mit der geographischen Breite. So weist der Niederschlag über Landgebieten erheblich höhere Tritiumkonzentrationen auf als der über Küsten- und Inselstationen in derselben Breitenzone. Aufgrund dieser Schwierigkeiten haben Tritiumeintragsfunktionen Fehler in der Größenordnung 30% [Butzin, 1999].

3.5.2 Helium

Das Edelgas Helium hat zwei stabile Isotope, ^3He und ^4He , für die es auf der Erde vier natürliche Quellen gibt. Die Mischungsverhältnisse $R = [^3\text{He}]/[^4\text{He}]$ der Heliumisotope in den verschiedenen Quellen variieren um mehrere Größenordnungen [Rüth, 1998]:

- atmosphärische Komponente: Isotopenverhältnis $R_a = 1.384 \cdot 10^{-6} \pm 0.012$
- radiogene Komponente: $R_r \approx 0.1 R_a$
- primordiale Komponente: $R_p \approx 10 R_a$
- kosmogene Komponente: $R_k \approx 100 R_a$

Zusätzlich wird durch natürliches Tritium und vor allem seit den 1960ern durch anthropogenes Helium als Zerfallsprodukt des durch die Wasserstoffbombentests freiwerdenden Tritiums produziert:

- tritiogene Komponente: $R_t = \infty$ (reines ^3He)

Die einzige Heliumsenke ist der äußere Rand der Atmosphäre. Photoionisiertes Helium entweicht entlang der "offenen" Magnetfeldlinien an den Polen. Zusätzlich bewirkt die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung, dass einige He-Atome genügend kinetische Energie besitzen, die Atmosphäre zu verlassen [Rüth, 1998].

Helium-Eintrag in den Ozean:

Helium gelangt hauptsächlich an der Meeresoberfläche in den Ozean, wo sich im Idealfall ein Lösungsgleichgewicht einstellt. Allerdings wird in oberflächennahen Schichten meist ein Überschuss (im Vergleich zum Gleichgewicht) von ca. 2% festgestellt. Dieses wird durch Einschlag von Luftbläschen hervorgerufen. Andere Mechanismen, die eine Abweichung vom Lösungsgleichgewicht erzeugen, sind Luftdruckschwankungen oder Eisbedeckung.

Im Gegensatz zu den FCKWs hat Helium auch Quellen am Ozeanboden. Ein kleiner Teil des ozeanischen Heliums stammt aus vulkanisch aktiven Gebieten (aus den Mittelozeani-

schen Rückensystemen oder aus sog. Hot Spots), wo primordiales Helium aus dem Erdmantel in den Ozean gelangt. Eine weitere Quelle ist das Ausgasen von Krusten-Helium aus den Sedimenten. Das darüber fließende Bodenwasser wird mit radiogenem Helium versetzt. Jede dieser Quellen macht sich durch eine Änderung des Isotopenverhältnisses bemerkbar [Roether *et al.*, 1998; 2001b; Well *et al.*, 2001]. Eine weitere Heliumquelle sind eingefrorene Luftbläschen in glazialen Eis. Bei Schmelzprozessen an der Unterseite der Schelfeise wird diese Luft im Schmelzwasser gelöst. Diese Quelle verursacht eine bis zu 1400-fache He-Übersättigung [Schlosser, 1986] im Schelfwasser. In der Wassersäule selbst entsteht ^3He aus dem Zerfall von Tritium. Nur diese tritiogene Komponente stellt einen transienten Tracer dar. In Abb. 13 sind diese Quellen zusammengefasst.

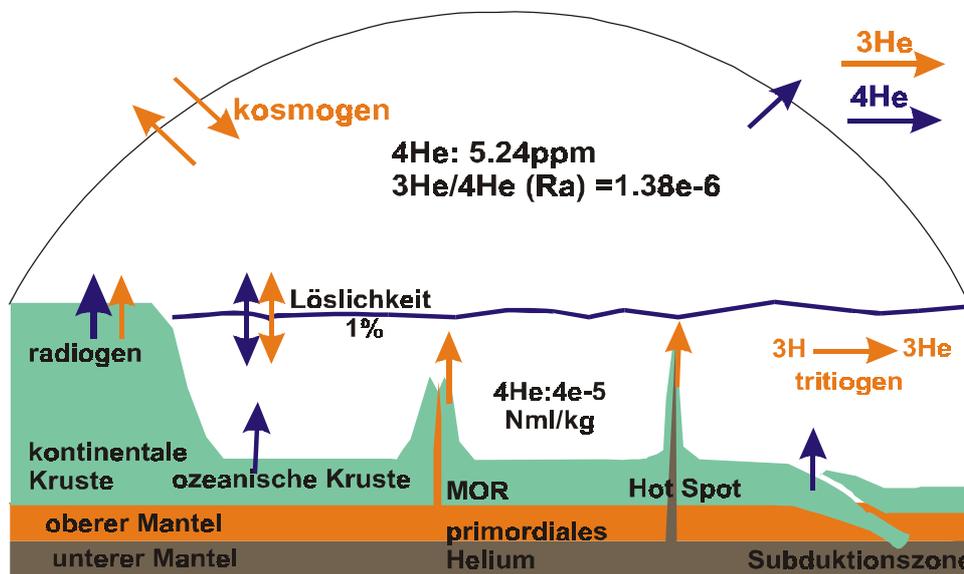


Abb. 13: Heliumquellen und -flüsse der Erde, nach [Rüth, 1998]

Die atmosphärische Quelle erzeugt den (großen) Helium-Hintergrund und damit auch einen in den Heliumverhältnissen. Die von den Quellen am Ozeanboden erzeugten Abweichungen von diesen Verhältnissen erlauben eine räumliche Zuordnung von Wassermassen. Da im Allgemeinen eine Wasserprobe Helium aus verschiedenen Quellen enthält, ist es nötig, diese zu separieren, wodurch die Größe der verschiedenen Anteile bestimmt werden (siehe hierzu [Roether *et al.*, 1998; 2001b]). Dieses Verfahren erfordert allerdings sehr genaue Messungen der Helium-Isotope (Fehler $\leq 5\%$).

3.5.3 Tritium-Helium Alter

Aus den Konzentrationen eines radioaktiven Nuklids und seines stabilen Zerfallsproduktes zu einem beliebigen Zeitpunkt t , lässt sich, bei bekannter Konzentration des Tochternuklids zu einem früheren aber unbekanntem Zeitpunkt t_0 , die Zeitdifferenz zwischen t und t_0 berechnen. Für das Mutter/Tochterpaar Tritium und ^3He berechnet sich diese Differenz nach [Tolstikhin und Kamenskiy, 1969]:

$$\tau = t - t_0 = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left(1 + \frac{[{}^3\text{He}(t)] - [{}^3\text{He}(t_0)]}{[{}^3\text{H}(t)]} \right) \quad (26)$$

τ	Alter [a]
λ	Zerfallskonstante ($\lambda^{-1} = t_{1/2}/\ln 2 = 17,93\text{a}$)
$[{}^3\text{He}]$	Konzentration von tritiogenem ^3He in TU angegeben
$[{}^3\text{H}]$	Tritiumkonzentration [TU]

Im Idealfall verliert eine Wassermasse an der Oberfläche sämtliches tritiogenes Helium. Wird also der Zeitpunkt t_0 als letztmaliger Kontakt des Wasserpaketes mit der Atmosphäre gewählt, beschreibt τ ein Alter (das Tritium-Helium-Alter) der Wassermasse.

Auch das Tritium-Helium-Alter mischt nicht-linear. Da die Absolutkonzentrationen nach dem Maximum in den 1960er Jahren kontinuierlich gesunken sind, wird das Tritium-Helium-Alter von den älteren Komponenten dominiert. Des Weiteren sind die heutigen Tritiumkonzentrationen im Oberflächenwasser des Südlichen Ozeans mit ca. 200 mTU sehr gering, was die Berechnung des tritiogenen Anteils von ^3He erschwert [Roether et al., 1998; 2001b].

3.5.4 Stabiles-Tritium-Alter

Analog zum Konzentrationsalter von FCKWs lässt sich ein Konzentrationsalter aus "stabilem" (oder transienten) Tritium berechnen. Stabiles Tritium ist die Summe an Resttritium und dem tritiogenen Anteil des ^3He . Hierbei treten allerdings folgende Probleme auf:

- die Eintragsfunktion ist sowohl zeit- als auch breitenabhängig,
- die Berechnung des tritiogenen Anteil des ^3He ist nicht trivial,
- besonders auf der Südhemisphäre sind die Konzentrationen inzwischen wieder nahezu auf dem Niveau vor 1950 angekommen,
- Nichteindeutigkeit der Eintragsfunktion in den 1960er und 1970er Jahren.

Aufgrund dieser Schwierigkeiten lässt sich stabiles Tritium im Weddellmeer nur sehr begrenzt als Tracer verwenden.

4 Der FCKW-Datensatz

In dieser Arbeit werden FCKW- und hydrographische Daten sowie Strömungsmessungen verwendet, die im Rahmen internationaler Projekte (SAVE¹⁴, WOCE¹⁵ und DOVTAIL¹⁶) gewonnene wurden. Der Datensatz erstreckt sich über einen Zeitraum von 14 Jahren (1984 – 1998). In diesem Kapitel wird der FCKW-Datensatz dargestellt. Für den Datensatz der Strömungsmessungen wird im Wesentlichen auf die Literaturstellen verwiesen. Der hydrographische Datensatz ist jeweils in den Fahrt-Berichten (siehe Tabelle 2) beschrieben.

Die FCKW-Daten wurden zum überwiegenden Teil von der Bremer Arbeitsgruppe Tracer Ozeanographie¹⁷ erzeugt, nur die Daten der beiden ersten Expeditionen (AJAX und ANT V) stammen von der Scripps Institution of Oceanography (SIO); siehe Tabelle 2). Alle FCKW-Werte wurden gaschromatographisch bestimmt. Die frühen Messungen beruhen im Wesentlichen auf der Entwicklung von *Bullister und Weiss* [1988]. Das Messsystem der drei letzten Expeditionen ist eine Neuentwicklung der Bremer Arbeitsgruppe (siehe [*Bulsiewicz et al.*, 1998]). Die Endauswertung der Bremer Daten ist von P. Beining [1993] (M11), H. Rose [1999] (ANT X, ANT XII und ANTXIII) sowie K. Bulsiewicz (ANT XII und ANT XV) durchgeführt worden.

Expedition	Expeditions-Zeitraum	Schiff	Fahrt-Report
AJAX Leg2	11.1. – 19.2.1984	R/V Knorr	[<i>SIO und TAMU</i> , 1985]
ANT V/2	27.6. – 11.7.1986	PFS Polarstern	[<i>Schnack-Schiel</i> , 1987]
M11/5	23.1. – 9.3.1990	FS Meteor	[<i>Roether et al.</i> , 1990]
ANT X/4	21.5. – 5.8.1992	PFS Polarstern	[<i>Lemke</i> , 1994]
ANT XII/3	5.1. – 19.3.1995	PFS Polarstern	[<i>Jokat und Oerter</i> , 1997]
ANT XIII/4	17.3. – 20.5.1996	PFS Polarstern	[<i>Fahrbach und Gerdes</i> , 1997]
ANT XV/4	28.3. – 23.5.1998	PFS Polarstern	[<i>Fahrbach</i> , 1999]

Tabelle 2: Hydrographischer- und FCKW-Datensatz.

¹⁴ South Atlantic Ventilation Experiment

¹⁵ World Ocean Circulation Experiment

¹⁶ Deep Ocean Ventilation Through Antarctic Intermediate Layers

¹⁷ die Vorgängerin der heutigen Arbeitsgruppe Ozeanographie an der Universität Bremen

4.1 AJAX Leg 2

Der zweite Fahrtabschnitt der AJAX-Expedition fand vom 11.1. – 19.2.1984 mit dem Forschungsschiff *R/V Knorr* statt. Die Fahrtroute verlief von Kapstadt (Rep. Südafrika) entlang des Null-Meridians zum antarktischen Kontinent (Station 60-94, siehe Abb. 14) und weiter zur Antarktischen Halbinsel (Stationen 95-137), wobei hier nur Daten des ersten Teils verwendet werden (siehe Abb. 14). Der Endhafen war Punta Arenas (Chile) [SIO und TAMU, 1985]. Die FCKW-Messungen (F11 und F12) wurden von der Arbeitsgruppe um R.F. Weiss (SIO) durchgeführt und wurden von Weiss *et al.*, [1990] veröffentlicht. Auf der Fahrt wurden außerdem Tritium- und ^3He -Messungen vom W.J. Jenkins (WHOI) durchgeführt.

Die gaschromatographische Trennung erfolgte mittels einer gepackten Porasil C (80/100 mesh). Die Proben wurden mittels Glasspritze aus den Schöpfnern entnommen (siehe Anhang). Der Fehler beider FCKWs (F11 und F12) ist der jeweils größere Wert aus 1% und 5 fmol/kg [Klatt *et al.*, im Druck]. Die Originaldaten waren mit der SIO 1986 Skala kalibriert und wurden für diese Arbeit in die SIO 1993 umgerechnet indem die F11 Konzentrationen durch 1,0251 und die F12 Konzentrationen durch 0,9874 geteilt worden sind. Details bezüglich des verwendeten FCKW-Messsystems sind in [Bullister, 1984; Bullister und Weiss, 1988] beschrieben.

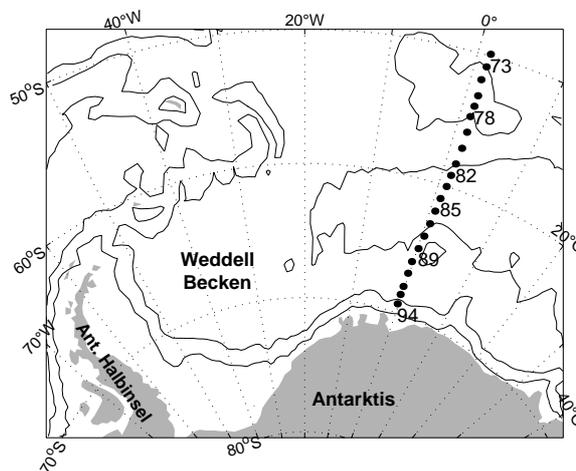


Abb. 14: Positionen der in dieser Arbeit verwendeten Stationen der Ajax-Expedition (1984). Tiefenlinien sind 1000, 3000 und 5000 m.

4.2 ANT V/2

Der zweite Fahrabschnitt der Expedition ANT V/2 wurde im Rahmen des Winter-Weddell-Sea-Project (WWSP '86) mit *PFS Polarstern* durchgeführt. Die Reise begann am 27.6.1986 in Bahia Blanca (Argentinien) und endete 17.9.1986 in Kapstadt [Schlack-Schiel, 1987]. Die FCKW-Messungen (F11 und F12) wurde von R.F. Weiss (SIO) durchgeführt und wurden von *Huber et al.*, [1989] veröffentlicht. Außerdem wurden Helium- und Tritium-Messungen von P. Schlosser und W. Roether (IUP-Heidelberg/Uni Bremen) durchgeführt. Die hier verwendeten Stationspositionen sind in Abb. 15 dargestellt.

Die gaschromatische Apparatur und die Probennahme waren identisch zu der im vorherigen Abschnitt beschriebenen. Die Daten wurden ebenfalls von der SIO 1986 Skala auf die SIO 1993 Skala umgerechnet.

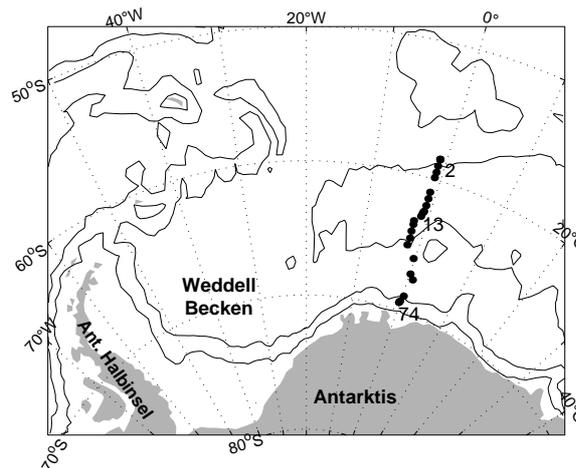


Abb. 15: Positionen der in dieser Arbeit verwendeten Stationen der ANT V/2-Expedition (1986). Tiefenlinien sind 1000, 3000 und 5000 m.

4.3 Meteor 11/5

Der fünfte Abschnitt der Expedition M11 wurde mit FS Meteor im Rahmen von SAVE und WOCE durchgeführt. Der Fahrabschnitt begann am 23.1.1990 in Ushuaia (Argentinien) und endete am 5.3.1990 in Kapstadt [Roether et al., 1990]. Die Positionen der hier verwendeten Daten sind in Abb. 16 dargestellt. Sowohl die FCKW-Messungen als auch die Helium- und Tritium-Messungen wurden von der Bremer Tracergruppe durchgeführt. Die Darstellung des Messsystems (ähnlich dem von *Bullister und Weiss* [1988]) und die

Auswertung der Daten wurde von P. Beining im Rahmen seiner Promotion durchgeführt [Beining, 1993; Roether et al., 1993].

Die Proben wurden mittels Glasspritzen aus den Schöpfnern entnommen. Die gaschromatische Trennung erfolgte durch ein Säulensystem mit einer mit Porasil C und einer mit Porapak T gepackten Säule, das nur die Bestimmung von F11 und F12 zuließ. Der Fehler der FCKW-Messungen ist jeweils der größere Wert von 2% oder 10 fmol/kg. Auch diese Daten wurden von der SIO 1986 Skala auf die SIO 1993 Skala transformiert.

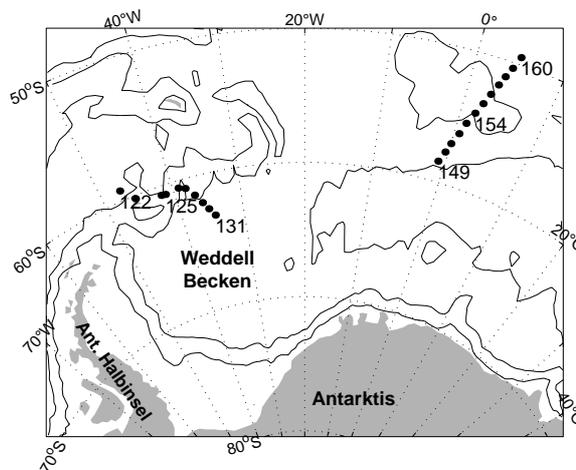


Abb. 16: Positionen der in dieser Arbeit verwendeten Stationen M11/5-Expedition (1990). Tiefenlinien sind 1000, 3000 und 5000 m.

4.4 ANT X/4

Die *PFS Polarstern*-Expedition ANT X/4, von Kapstadt nach Puerto Madryn (Argentinien), fand vom 21.5. bis zum 5.8.1992 statt [Lemke, 1994]. Als Teil des WOCE-Programms konzentrierte sich das ozeanische Programm auf zwei Schnitte (siehe Abb. 17):

- Null-Meridian-Schnitt; zwischen Afrika und dem antarktischen Kontinent überwiegend dem Null-Meridian folgend
- Weddellmeer-Schnitt; die Verbindung von Kapp Norvegia auf dem antarktischen Kontinent mit der Spitze der Antarktischen Halbinsel, der auf dieser Reise allerdings abweichend zu den Süd-Orkneys führte.

Die FCKW-, Helium- und Tritium-Messungen wurden von der Bremer Tracergruppe durchgeführt.

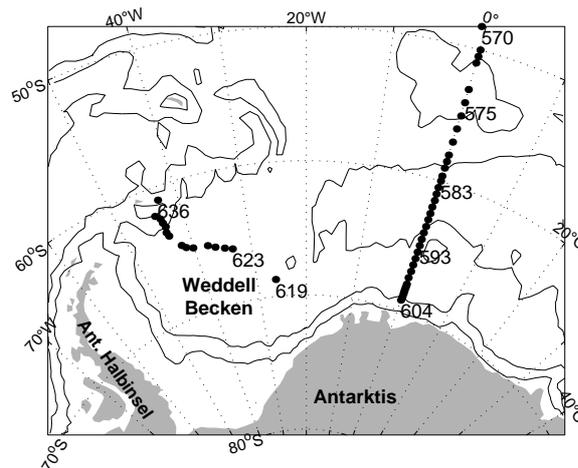


Abb. 17: Positionen der in dieser Arbeit verwendeten Stationen der ANT X/4-Expedition (1992). Tiefenlinien sind 1000, 3000 und 5000 m.

FCKW-Messungen

Insgesamt wurden 1530 FCKW-Proben (1074 auf Null-Meridian-Schnitt und 456 auf Weddellmeer-Schnitt) gemessen. Als Standardgas wurde der selbst hergestellte Standard Bremen1 verwendet¹⁸. Auch diese Daten wurden von der SIO 1986 Skala auf die SIO 1993 Skala transformiert. Alle Proben wurden mittels Glasspritze genommen. Auf den beiden Teilschnitten wurden unterschiedliche Säulen verwendet, so dass die Datengüte der Schnitte separat analysiert wird.

4.4.1 FCKW-Daten des Null-Meridians

Auf diesem Schnitt wurde die Kapillarsäule DB-624 (Länge = 75 m, Innendurchmesser = 0,53 mm) verwendet, die prinzipiell auch die Messung von F113 zulässt. Allerdings wurde im Standardbetrieb nur F11 und F12 gemessen und zusätzlich einige F113-Testmessungen durchgeführt (ca. 2 pro Station). Obwohl bei der Probenentnahme dieser Testmessungen besondere Spritzen (Metallhahn) verwendet worden sind, waren die Oberflächenwerten mit Konzentrationen zwischen 0,8 und 1,2 pmol/kg ca. 30% übersättigt, was an der Koelution einer weiteren Substanz (Methyljodid) zu liegen scheint. Deswegen gingen die F113 Daten weder in den offiziellen Datensatz des Instituts ein (Bremenformat), noch wurden sie an das WOCE-Office übermittelt. Während des Schnittes trat eine zunehmende Kontamination des Analysesystems mit einer unbekanntem

¹⁸ Bezeichnung der Standardgase nach [Rose, 1999] Tab. 3.1

Substanz auf, die die Messung von F12 erheblich beeinträchtigte. Deshalb wurde nach dem Ende des Schnittes das Meßsystem wieder mit einer gepackten Säule bestückt.

Um die Güte einer Messung zu beschreiben, ist es üblich einen sog. Flag zu setzen. Für die Vergabe dieser Flags wurde dem allgemein anerkannten WOCE-Standard gefolgt. Danach bedeutet 2 gut, 3 fragwürdig und 4 schlecht. Der Mittelwert einer Mehrfachmessung wird mit dem Flag 6 bezeichnet.

Flag	2	3	4	6
F11	1005	21	36	12
F12	869	25	165	14

Tabelle 3: Anzahl der Proben mit dem jeweiligen Flag, nach WOCE-Standard auf dem Null-Meridian-Schnitt

Zur Bestimmung des Fehlers existieren zwei unterschiedliche Konzepte. Entweder wird der Fehler aus der mittleren Standardabweichung der Doppelproben bestimmt oder durch Fehlerfortpflanzung der Einzelfehler der FCKW-Messtechnik (siehe [Rose, 1999] oder [Bulsiewicz et al., 1998]).

Die Abweichungen der Werte einer Doppelprobe entstehen aus Fehlern der Wassermessungen, insbesondere durch die manuelle Behandlung der Wasserproben (z.B. Probennahme am Wasserschöpfer und Probenlagerung) [Rose, 1999]. Bei einer genügenden Anzahl von Doppelproben können damit diese zufälligen Fehler abgeschätzt werden. Für den Null-Meridian-Schnitt sind diese Fehler in Tabelle 4 dargestellt.

	mittlere Konzentration [pmol/kg]	mittlere Abweichung	
		[pmol/kg]	[%]
F11	4,99	0,017	0,3
F12	2,38	0,013	0,5

Tabelle 4: Mittlere Standardabweichung der Doppelproben des Null-Meridian-Schnittes

Der Fehler des Messsystems entsteht durch 5 Einzelfehler. Diese sind nach [Rose, 1999]:

1. Reproduzierbarkeit der Standardgasmessungen (dieser Fehler ist für F11 und F12 ca. 0,5%)
2. Reproduzierbarkeit der Kalibrierung (ca. 0,3%)
3. Fehler in der Extraktionseffizienz (<0,1%)
4. Standardabweichung der Null-Wassermessungen (ca. 2 fmol/kg)

5. Fehler des Arbeitsstandards gegen den Primärstandard (ca. 0,3%)

Für den Schnitt auf dem Null-Meridian ist der Fehler des Messsystems in Tabelle 5 dargestellt:

	Fehler für Konzentration > 1pmol/kg	Fehler für Konzentration < 1pmol/kg
F11	1,1%	0,005 pmol/kg
F12	2,8%	0,016 pmol/kg

Tabelle 5: Fehler des Messsystems des Null-Meridian-Schnittes

Der Fehler der Doppelproben ist nicht völlig unabhängig von denen des Messsystems, da in die Auswertung der Doppelproben auch die Fehler des Messsystems einfließen. Auf der anderen Seite werden Doppelproben meist unmittelbar hintereinander gemessen, so dass die Fehler des Messsystems, die zu einem großen Teil aufgrund zeitlicher Schwankungen entstehen, bei Doppelproben gering sind. In dieser Arbeit wird der Gesamtfehler aus der Addition des Fehlers der Doppelproben und dem des Messsystems abgeschätzt. Dabei wird der Fehler des Messsystems für Doppelproben zweimal berücksichtigt, so dass diese Abschätzung eine obere Grenze des mittleren Fehlers darstellt. Für Null-Meridian-Schnitt ist der Gesamtfehler in Tabelle 6 dargestellt.

	Gesamtfehler für Konzentration > 1pmol/kg	Gesamtfehler für Konzentration < 1pmol/kg
F11	1,1%	0,006 pmol/kg
F12	2,8%	0,017 pmol/kg

Tabelle 6: Gesamtfehler des Null-Meridian-Schnittes

4.4.2 FCKW-Schnitt durch das Weddellmeer

Aufgrund der erwähnten Probleme mit den F12 Messungen wurde auf diesem Fahrtabschnitt eine mit Porasil (II) gepackte Säule zur Trennung der Komponenten verwendet und somit waren nur F11- und F12-Messungen möglich, die allerdings in einer besseren Qualität als auf dem Null-Meridian-Schnitt vorliegen. Die Flagverteilung für diesen Schnitt ist in Tabelle 7 dargestellt.

Flag	2	3	4	6
F11	439	4	8	5
F12	435	6	10	5

Tabelle 7: Anzahl der Proben mit dem jeweiligen Flag, nach WOCE-Standard auf dem Weddellmeer-Schnitt

Die mittlere Standardabweichung der Doppelproben und der Fehler des Messsystems, sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellt.

	mittlere Konzentration [pmol/kg]	mittlere Abweichung [pmol/kg] [%]	
F11	5,34	0.013	0,3
F12	2,42	0,004	0,2

Tabelle 8: Mittlere Standardabweichung der Doppelproben des Weddellmeer-Schnittes

	Fehler für Konzentration > 1pmol/kg	Fehler für Konzentration < 1pmol/kg
F11	0,7%	0,003 pmol/kg
F12	0,5%	0,002 pmol/kg

Tabelle 9: Fehler des Messsystems des Weddellmeer-Schnittes

Der Gesamtfehler ist damit:

	Gesamtfehler für Konzentration > 1pmol/kg	Gesamtfehler für Konzentration < 1pmol/kg
F11	0,8%	0,003 pmol/kg
F12	0,5%	0,002 pmol/kg

Tabelle 10: Gesamtfehler des Weddellmeer-Schnittes

4.5 ANT XII/3

Die Fahrtroute der PFS Polarstern-Expedition ANT XII/3 (5.1. – 19.3.1995) verlief von Kapstadt nach Punta Arenas (Chile), wobei das Forschungsprogramm überwiegend in der Küstenpolynja vor dem Filchner-Ronne-Schelfeis stattfand [Jokat und Oerter, 1997]. Auf diesem Fahrtabschnitt wurden auf dem Schiff keine FCKWs gemessen, sondern Wasserproben in Glasampullen zur späteren Messung im Bremer Labor eingeschmolzen (siehe

Anhang). Des Weiteren wurden auf dieser Fahrt Helium- und Tritium-Proben genommen. Die Stationspositionen der in dieser Arbeit verwendeten Proben sind in Abb. 18 dargestellt.

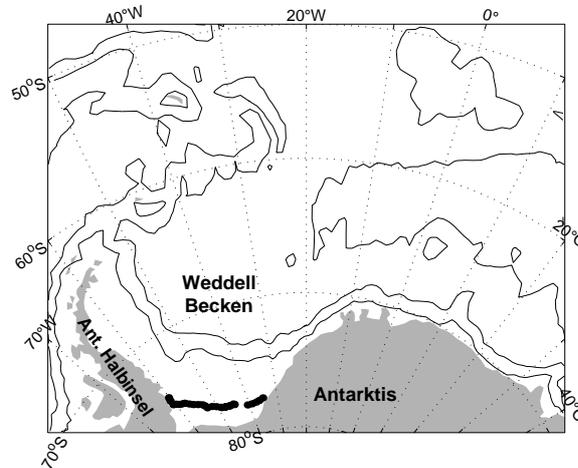


Abb. 18: Positionen der in dieser Arbeit verwendeten Proben der ANT XII/3-Expedition (1995). Tiefenlinien sind 1000, 3000 und 5000 m.

Die FCKW-Messungen

Die FCKW-Probenentnahme aus den Schöpfern erfolgte mittels des Durchflussverfahrens (siehe Anhang). Die Proben wurden zu drei unterschiedlichen Zeiten mit unterschiedlichen Randbedingungen gemessen und ausgewertet.

Der erste Satz von 32 Proben wurde kurz nach der Fahrt (Okt. – Nov. 1995) von O. Klatt im Rahmen seiner Diplomarbeit gemessen und ausgewertet [Klatt, 1997]. Die Auswertung wurde von K. Bulsiewicz im Jahr 2000 überarbeitet. Die gaschromatische Trennung dieser Proben erfolgte mit der DB-VRX Kapillarsäule (Länge = 75 m, Innendurchmesser = 0.45 mm). Prinzipiell war es möglich, mit dieser Säule alle FCKWs und CCl₄ zu trennen. Allerdings gab es mit F113 aufgrund der Koelution von Methyljodid große Probleme und die CCl₄-Daten sind aufgrund der Instabilität dieses Stoffes [Huhn et al., 2001] und der Lagerungszeit von mehreren Monaten nur bedingt für ozeanographische Untersuchungen geeignet. Das verwendete Standardgas in diesem Zeitraum war Bremen1. Diese Daten wurden von der SIO 1986 Skala auf die SIO 1993 Skala kalibriert.

Die beiden anderen Sätze von 37 (172) Proben wurde im Mai (Okt. – Nov) 2000 von K. Bulsiewicz gemessen und mit der SIO 1993 Skala ausgewertet. Für die gaschromatische Trennung wurde eine GS Gaspro Kapillarsäule verwendet (Länge = 30 m, Innendurchmesser = 0,32 mm). Aufgrund der Lagerzeit ca. 5 Jahren und der Instabilität von F113 und CCl₄ (siehe [Roether et al., 2001a] und [Huhn et al., 2001]) sind für diese Proben nur die

F11- und F12-Konzentrationen bestimmt worden. Als Standardgas für den zweiten Satz diente Bremen2, für den dritten Satz Bremen3.

Die Fehler des Messsystems und der Probennahme dieser Proben liegen in der gleichen Größenordnung der in Kapitel 4.4 bestimmten Fehler (ca. 1%). Zusätzlich tritt bei eingeschmolzenen Proben ein Fehler aufgrund des Abschmelzvorgangs und der Lagerung auf. Dieser Fehler wurde durch Vergleichsmessungen zwischen abgeschmolzenen und sofort gemessenen Proben auf mehreren Expeditionen zu 4% für F11 und 3% für F12 bestimmt [Klatt *et al.*, im Druck]. Dieser Fehler ist deutlich größer als die anderen auftretenden Fehler und stellt somit auch den Gesamtfehler dar.

4.6 ANT XIII/4

Die PFS Polarstern-Expedition ANT XIII/4 begann am 17.3.1996 in Kapstadt und endete am 20.5.1996 in Punta Arenas [Fahrbach und Gerdes, 1997]. Das Programm der physikalischen Ozeanographie wurde im Rahmen von WOCE durchgeführt und konzentrierte sich auf die beiden schon erwähnten Schnitte (siehe Abb. 19). Außerdem wurden Untersuchungen im östlichen Weddellmeer (bis 24°O) durchgeführt. Die FCKW-, Helium- und Tritium-Messungen wurden von der Bremer Tracergruppe durchgeführt.

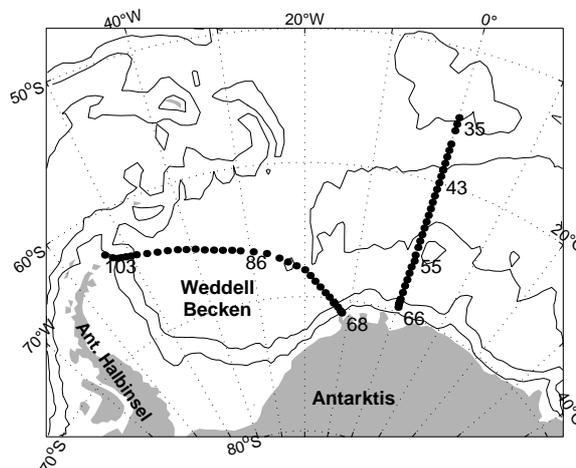


Abb. 19: Positionen der in dieser Arbeit verwendeten Stationen der ANT XIII/4-Expedition (1996). Tiefenlinien sind 1000, 3000 und 5000 m.

Die FCKW Messungen

Auf dieser Expedition wurden auf insgesamt 104 Stationen 2016 FCKW-Wasserproben gemessen. Es konnten zum ersten Mal sowohl F11 und F12 als auch F113 und CCl₄ gemessen werden. Allerdings trat auf der gesamten Reise eine Blasenbildung bei den zur

Messung vorbereiteten aber noch nicht gemessenen Proben auf. Diese Blasenbildung bewirkte ein teilweises Entgasen der Proben vor der Messung. Der Grad der Entgasung hängt primär von der Zeitspanne zwischen Vorbereitung und Messung der Probe ab. Somit wurden Korrekturen zwischen 1 – 3% nach oben vorgenommen. Für CCl₄ wurde außerdem eine 3%ige Korrektur nach oben vorgenommen, da CCl₄ aufgrund seines kleinen Extraktionseffizienten und einer zu klein gewählten Extraktionszeit, nur zu ca. 97% aus der Probe entgast und somit nur dieser Prozentsatz zur Messung gelangte.

Als Standardgas wurde der Bremen2 verwendet, der im Oktober 2000 neu kalibriert worden ist. Danach mussten die Werte für F113 durch 0,9156 und CCl₄ durch 0,9713 dividiert werden um die Messwerte auf dem SIO 1993-Standard zu transformieren. Die Proben wurden mit Durchflussampullen (siehe Anhang) genommen. Sie wurden bis zur Messung in einem Wasserbad unter laufendem Oberflächenwasser gelagert und innerhalb von 12 Stunden gemessen.

Die Flagverteilung (nach WOCE-Standard) für diese Expedition ist in Tabelle 11 dargestellt:

Flag	2	3	4	6
F11	1755	6	12	47
F12	1732	13	27	48
F113	1746	4	21	49
CCl ₄	1747	2	18	53

Tabelle 11: Anzahl der Proben mit dem jeweiligen Flag, nach WOCE-Standard

Die mittlere Standardabweichung der Doppelproben ist in Tabelle 12, der Fehler des Messsystems in Tabelle 13 aufgeführt.

	mittlere Standardabweichung für Konzentrationen > 1 pmol/kg	mittlere Standardabweichung für Konzentrationen < 1pmol/kg
F11	0,4%	0,002 pmol/kg
F12	0,5%	0,001 pmol/kg
F113 ¹⁹	1,0%	0,0001 pmol/kg
CCl ₄	0,8%	0,006 pmol/kg

Tabelle 12: Mittlere Standardabweichung der Doppelproben

¹⁹ Bei F113 ist die Grenze für die Fehlerangabe nicht 1 pmol/kg, sondern 0,05 pmol/kg

	Fehler für Konzentration > 1pmol/kg	Fehler für Konzentration < 1pmol/kg
F11	0,8%	0,004 pmol/kg
F12	0,9%	0,003 pmol/kg
F113 ¹⁹	2,0%	0,0007 pmol/kg
CCl ₄	0,7%	0,004 pmol/kg

Tabelle 13: Fehler des Messsystems

Der daraus resultierende Gesamtfehler ist in Tabelle 14 dargestellt.

	Gesamtfehler für Konzentrationen >1 pmol/kg	Gesamtfehler für Konzentrationen < 1 pmol/kg
F11	0,9%	0,004 pmol/kg
F12	1,0%	0,003 pmol/kg
F113 ¹⁹	2,2%	0,0007 pmol/kg
CCl ₄	1,1%	0,007 pmol/kg

Tabelle 14: Gesamtfehler

4.7 ANT XV/4

Die *PFS Polarstern*-Reise ANT XV/4 begann am 28.3.1998 in Punta Arenas und endete am 23.5.1998 in Kapstadt [Fahrbach, 1999]. Fahrtverlauf und die Positionen der in dieser Arbeit benutzten Stationen sind in Abb. 20 dargestellt. Die Arbeitsgebiete dieser Reise waren das westlichen Weddellmeer, die Weddell-Scotia-Konfluenz und der Null-Meridian zwischen dem antarktischen Kontinent und der Subtropenfront. Die Arbeiten der physikalischen Ozeanographie waren Teil des internationalen DOVETAIL Programms. Die FCKW-, Helium- und Tritium-Messungen wurden von der Bremer Tracergruppe durchgeführt.

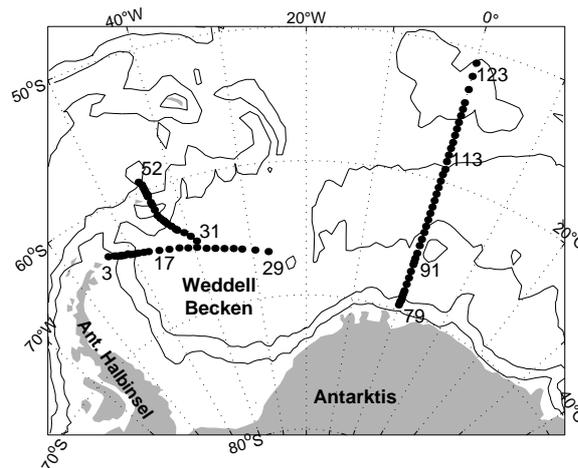


Abb. 20: Positionen der in dieser Arbeit verwendeten Stationen der ANT XV/4-Expedition (1998). Tiefenlinien sind 1000, 3000 und 5000 m.

Die FCKW Messungen

Insgesamt wurden im Verlauf dieser Reise auf 106 Stationen ca. 1600 FCKW-Wasserproben gemessen. Alle Proben wurden mittels Durchflussampullen gewonnen. Diese wurden dann in einem Wasserbad unter laufendem Oberflächenwasser gelagert und innerhalb von 12 Stunden gemessen. Als Standardgas wurde der selbst hergestellte Standard Bremen2 verwendet. Alle Messwerte sind auf den SIO 1993-Standard bezogen.

Während der Expedition (Station 71) kam es zu einem Wassereinbruch in das FCKW-Messsystem, der zur Folge hatte, dass das analytische System umgebaut werden musste. Somit wurde bis einschließlich Station 71 mit einer Säulenkombination bestehend aus zwei Kapillarsäulen (Gs Gaspro, Länge = 30 m, Innendurchmesser = 0.32 mm; DB-VRX, Länge = 30 m, Innendurchmesser = 0.45 mm) gemessen. Dieses System erlaubte die Bestimmung aller FCKWs und CCl₄. Aufgrund des geschilderten Problems wurde ab Station 71 nur noch mit der DB-VRX Kapillarsäule (Länge = 70 m, Innendurchmesser = 0,45 mm) gemessen, die nur noch die Messung von F11 und F12 zuließ.

Die Flagverteilung (nach WOCE-Standard) ist in Tabelle 15 dargestellt.

Flag	2	3	4	6
F11	1456	7	8	33
F12	1455	7	8	34
F113	804	3	1	34
CCl ₄	804	3	1	34

Tabelle 15: Anzahl der Proben mit dem jeweiligen Flag, nach WOCE-Standard

Die mittlere Standardabweichung der Doppelproben und der Fehler des Messsystems sind in Tabelle 16 und Tabelle 17 dargestellt.

	mittlere Standardabweichung für Konzentrationen > 1 pmol/kg	mittlere Standardabweichung für Konzentrationen < 1pmol/kg
F11	0,2%	0,002 pmol/kg
F12	0,3%	0,001 pmol/kg
F113 ²⁰	2,1%	0,0001 pmol/kg
CCl ₄	0,9%	0,006 pmol/kg

Tabelle 16: Mittlere Standardabweichung der Mehrfachproben

	Fehler für Konzentrationen > 1 pmol/kg	Fehler für Konzentrationen < 1pmol/kg
F11	0,8%	0,004 pmol/kg
F12	0,4%	0,003 pmol/kg
F113 ²⁰	1,5%	0,0002 pmol/kg
CCl ₄	2,5%	0,004 pmol/kg

Tabelle 17: Fehler des Messsystems

Der daraus resultierende Gesamtfehler ist in Tabelle 18 dargestellt.

²⁰ Bei F113 ist die Grenze für die Fehlerangabe nicht 1 pmol/kg, sondern 0,05 pmol/kg

	Gesamtfehler für Konzentrationen >1 pmol/kg	Gesamtfehler für Konzentrationen < 1 pmol/kg
F11	0,8%	0,004 pmol/kg
F12	0,5%	0,003 pmol/kg
F113 ²⁰	2,6%	0,0007 pmol/kg
CCl ₄	2,7%	0,007 pmol/kg

Tabelle 18: Gesamtfehler

4.8 Strömungsmessungen

Für die beiden Hauptschnitte (Null-Meridian- und Weddellmeer-Schnitt) wird in der weiteren Arbeit außer den FCKW-Daten auch das jeweilige Strömungsfeld betrachtet. Die Arbeiten hierzu sind von E. Fahrbachs Gruppe am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung durchgeführt worden, so dass hier nur kurz die Datensätze beschrieben werden.

Null-Meridian-Schnitt

Das Geschwindigkeitsfeld senkrecht zum Null-Meridian-Schnitt wurde von *Schröder und Fahrbach*, [1999] veröffentlicht. Dort ist auch eine detaillierte Beschreibung des Datensatzes und der Auswertung zu finden, die hier kurz wiederholt wird.

Die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum Schnitt wurde geostrophisch (relativ zum Boden) aus den CTD-Profilen²¹ der ANT XIII/4 Expedition ermittelt. Das so gewonnene Strömungsfeld wurde an Schiffs-ADCP-Daten im Bereich von 100 bis 200 m Tiefe angepasst. In der zitierten Arbeit wurde keine Fehlerabschätzung durchgeführt, der Fehler soll aber in der gleichen Größenordnung des Fehlers auf dem Weddellmeer-Schnitt liegen [*Fahrbach*, 2001]. Der mittlere Fehler wird daher mit 30% angenommen; andere Autoren rechnen bei ähnlich ermittelten Feldern mit Fehlern bis zu 50% (z.B. [*Bersch*, 1995]).

Weddellmeer-Schnitt

Für den Weddellmeer-Schnitt wurde von [*Fahrbach et al.*, 1994b] ein Strömungsfeld aus Strömungsmesser- und CTD-Daten aus den Jahren 1989-1993 erstellt. Dem mittlerem Feld sind Variationen auf drei Zeitskalen überlagert; jährliche Variationen, mesoskalige Fluktuationen mit Perioden von Tagen und kurzperiodische Schwankungen aufgrund von

²¹ CTD = Conductivity, Temperature, Depth (Leitfähigkeit, Temperatur und Tiefe), wobei die Leitfähigkeit (zusammen mit der Temperatur) in den Salzgehalt umgerechnet wird

Tiden, internen Oszillationen oder kleinen Wirbeln. Der resultierende Fehler des mittleren Feldes beträgt 30% [*Fahrbach et al.*, 1994b].

5 Beobachtungen

In diesem Kapitel werden die FCKW-Verteilungen der verschiedenen Reisen dargestellt. Dabei wird zwischen dem Null-Meridian-Schnitt und dem Weddellmeer-Schnitt unterschieden. Für beide Schnitte wird außerdem jeweils das Strömungsfeld beschrieben. Anschließend werden die Daten im Bereich der Süd-Orkney-Inseln gezeigt. Die Daten der ANT XII/3-Expedition werden im Weiteren nur zur Abschätzung der FCKW-Sättigung in den Wassermassenbildungsgebieten benutzt (siehe Kapitel 6.2) und werden hier nicht vorgestellt.

5.1 Der Null-Meridian-Schnitt

Der Null-Meridian-Schnitt folgt diesem Meridian vom antarktischen Kontinent (ca. 70°S) bis ca. 50°S. In dieser Arbeit werden Daten von insgesamt sechs Wiederholungen dieses Schnittes im Zeitraum 1984 - 1998 verwendet. Damit handelt es sich um die zur Zeit längste FCKW-Zeitreihe des Ozeans. Sie besteht aus den Expeditionen AJAX Leg2 (1984), ANT V/2 (1986), M11/5 (1990), ANT X/4 (1992), ANT XIII/4 (1996) sowie ANTXV/4 (1998); siehe Kapitel 4.

Alle F11-Verteilungen dieses Schnitts sind in Abb. 21 in einer einheitlichen Farbskala dargestellt. Der Nullpunkt der x-Achse (Distanz) liegt bei einheitlich 70°S, 0°W. Obwohl die FCKW-Konzentrationen mit der Zeit deutlich zunehmen, bleibt die generelle Struktur erhalten. Alle Realisationen zeigen eine relativ dünne Schicht AASW und WW, dessen Konzentration von der Atmosphäre aufgeprägt ist. Folglich steigen die Konzentrationen während des betrachteten Zeitraums in dieser Wassermasse um ca. 40% an (siehe Abb. 21). Die Schichtdicke ist in etwa durch die Lage der Isopykne $\sigma_{\theta} = 27,7 \text{ kg/m}^3$ gegeben. Im zentralen Weddellmeer (ca. 59°-64°S) ist die Oberflächenschicht am dünnsten (ca. 200 m), und sie hat ihre größte Ausdehnung an den Rändern des Weddellmeeres (Antarktische Halbinsel und MAR) wo diese Isopykne bis ca. 600 m in die Tiefe reicht. Im zentralen Weddellmeer nehmen die F11-Konzentration unterhalb des WW relativ schnell ab, nur an den Rändern sind unterhalb des WW erhöhte F11-Konzentrationen zu sehen.

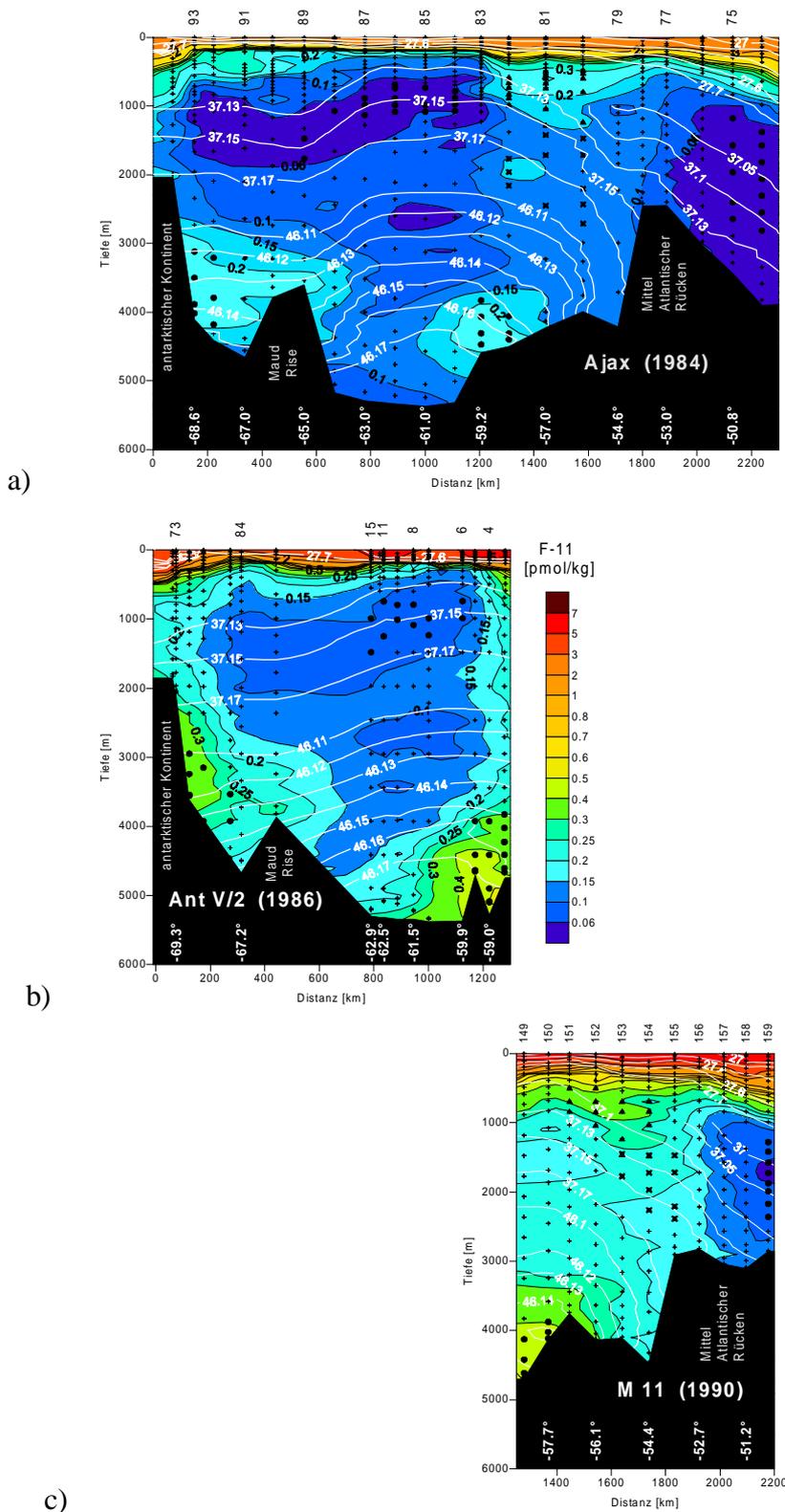
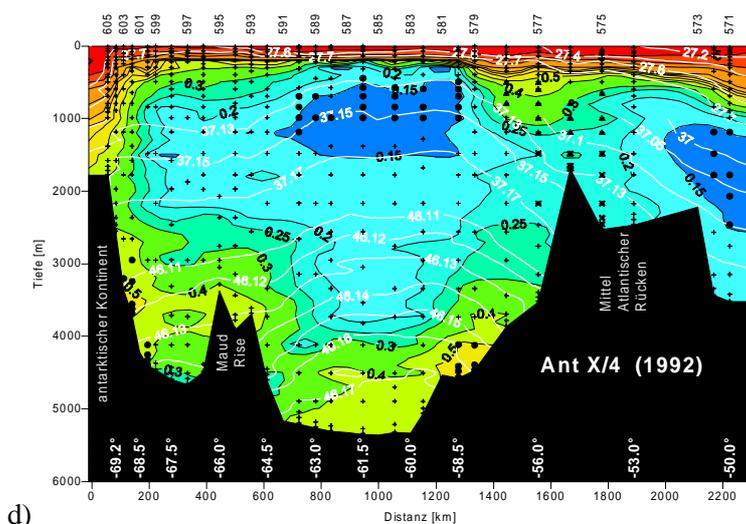
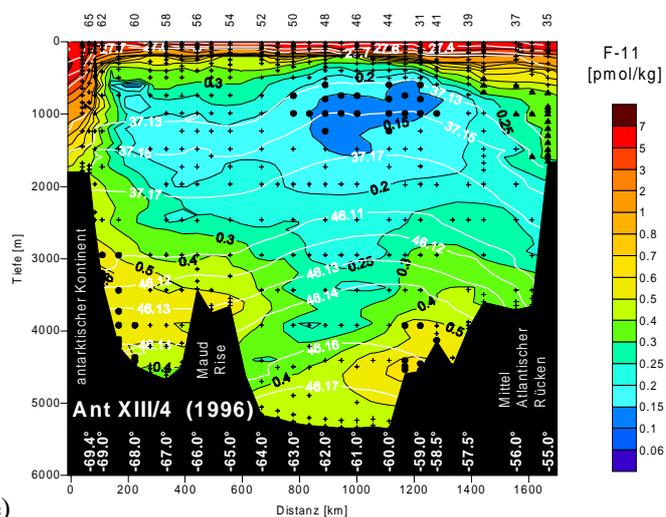


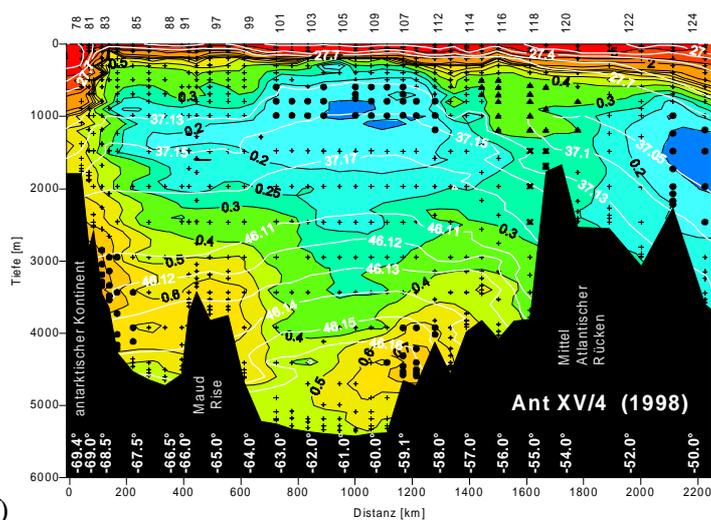
Abb. 21: F11-Verteilungen [pmol/kg] auf dem Null-Meridian, a) AJAX (1984), b) ANT V/2 (1986), c) M11 (1990), d) ANT X/4 (1992), e) ANT XIII/4 (1996) und f) ANT XV/4 (1998); weiße Linien kennzeichnen die Dichten σ_θ , σ_2 und σ_4 . Zahlen oberhalb der Grafik zeigen die Stationsnummer; weiße Zahlen unten die geographische Breite; kleine Kreuze die Tiefen der Probenahme, die



d)



e)



f)

hervorgehobenen Punkte markieren die zur Definition der Kerne extremerer FCKW-Konzentration (siehe Kapitel 6) verwendet Proben. Die Stationspositionen sind in den Abb. 14 – 17 sowie 18 und 19 dargestellt

In mittleren Tiefen sind zwei Bereiche minimaler FCKW-Konzentrationen zu erkennen, das wenig belüftete WDW bzw. CDW. Die Minimum-Schicht des WDW liegt um die Isopykne $\sigma_2 = 37,15 \text{ kg/m}^3$ (ca. 1000 m Tiefe) im zentralen Weddellmeer ($59^\circ\text{-}64^\circ\text{S}$) knapp oberhalb der WDW-WSDW-Grenze ($\sigma_2 = 37,16 \text{ kg/m}^3$ [Orsi *et al.*, 1999]). Außerhalb des Weddellmeeres nördlich von ungefähr 51°S liegt die Minimum-Schicht des CDW bei Dichten um $\sigma_2 = 37,00 \text{ kg/m}^3$ (ca. 1500 m Tiefe). Diese Minima sind durch eine vertikale Säule erhöhter FCKW-Konzentrationen etwas südlich des Mittelatlantischen Rückens bei ungefähr $53^\circ\text{-}59^\circ\text{S}$ getrennt.

Die auffälligsten Merkmale in der Tiefsee sind die beiden Kerne erhöhter FCKW-Konzentrationen am Fuß des antarktischen Kontinentalabhangs (ca. 69°S ; 2200 – 4300 m Tiefe) und am südlichen Hang des MAR (ca. 59°S ; 3500 – 4800 m). Diese beiden Kerne repräsentieren den südlichen Einstrom und den nördlichen Ausstrom von frisch belüftetem Boden- und Tiefenwasser (WSBW und WSDW) des Weddell-Beckens (siehe Kapitel 2.5). Trotz des Anstieges im betrachteten Zeitraum weisen die beiden Kerne über den gesamten Zeitraum ähnliche FCKW-Konzentrationen auf. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Dichten der Kerne. Das FCKW-Maximum des nördlichen Kerns liegt um die Isopykne $\sigma_4 = 46,16 \text{ kg/m}^3$, die des südlichen Kerns zwischen $\sigma_4 = 46,12$ und $\sigma_4 = 46,13 \text{ kg/m}^3$. Der Fahrtverlauf der ANT V/2-Expedition (1986) ist etwas weiter westlich (ca. 3°W , siehe Abb. 15) und die Bodentopographie zeigt größere Tiefen, somit lassen sich die relativ zum Anstieg der FCKW-Konzentrationen überhöhten Werte dieser Expedition erklären (siehe Abb. 21).

Das Dichtefeld unterhalb 3000 m Tiefe zeigt eine moderate Drift (Anstieg um $0,01 \text{ kg/m}^3$ im Zeitraum 1984-1998). Diese Drift erklärt sich durch geringfügige Änderungen in Temperatur und Salzgehalt von WDW und WSBW in dieser Periode [Fahrbach und Gerdes, 1997]. Außer diesen Abweichungen zeigen sowohl die Struktur der FCKW-Verteilungen als auch der Dichtefelder wenig zeitliche Variabilität.

Auf der ANT XIII/4-Expedition (1996) wurden außerdem die Strömungskomponenten senkrecht zum Schnitt (also nahezu in Ost-West-Richtung) aufgenommen (siehe Abb. 22).

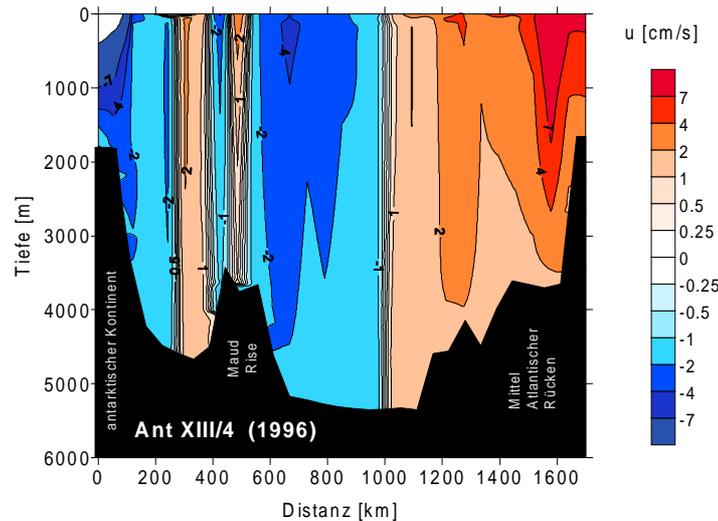


Abb. 22: Strömungsfeld des Null-Meridian-Schnitts aus mit Schiffs-ADCP angepassten CTD-Daten

Es sind zwei große, quasi-barotrope Strömungsregime größerer Geschwindigkeiten erkennbar. Am Mittelatlantischen Rücken bis ca. zu der Distanz 1000 km setzt der Weddellwirbel in Richtung Osten. Im Maximum sind Geschwindigkeiten von über 7 cm/s bis ca. 1500 m Tiefe nachweisbar. An der Küste des antarktischen Kontinentes und nördlich der Maud-Kuppe strömt der zweigeteilte südliche Zweig des Weddellwirbels Richtung Westen. Die Geschwindigkeiten sind hier geringer als im nördlichen Strömungsband, aber auf ein größeres Gebiet verteilt. Der Transport in beiden Regimen ist ca. 60 Sv [Schröder und Fahrbach, 1999]. Über der Maud-Kuppe und nach Süden versetzt ist der Einfluss dieser topographischen Erhebung über die gesamte Wassersäule zu erkennen [Schröder und Fahrbach, 1999]. Im Gegensatz zu den FCKW-Verteilungen (siehe Abb. 21) sind im Strömungsfeld die Kerne frisch belüfteten Wassers nicht zu lokalisieren.

5.2 Der Weddellmeer Schnitt

Der Weddellmeer Schnitt verläuft von der Spitze der Antarktischen Halbinsel (Joinville-Insel) bei ca. 65°S, 55°W bis Kapp Norvegia auf dem antarktischen Kontinent (ca. 72°S, 10°O). In dieser Arbeit werden Daten von drei Wiederholungen dieses Schnittes aus dem Zeitraum 1992 - 1998 verwendet, ANT X/4 (1992), ANT XIII/4 (1996) und ANT XV/4 (1998). Allerdings stellt nur die ANT XIII/4 Expedition eine vollständige Aufnahme dieses Schnittes dar. Die ANT XV/4-Fahrt endet bei 27°W und überdeckt somit nur ca. 2/3 des Schnittes. Die ANT X/4-Expedition verläuft nordöstlicher (Süd Orkney bei ca. 62°S, 43°O, siehe auch Abschnitt 5.3) und endet bereits bei 33,5°W, überdeckt damit den Schnitt nur im östlichen Teil des zentralen Weddell-Beckens (siehe Abb. 17), hat aber eine zusätzlich Station (619) im westlichen Bereich.

Die FCKW-Verteilungen für die Jahre 1992, 1996 und 1998 dieses Schnittes sind in Abb. 23 dargestellt. Hierbei zeigt sich wieder, dass trotz ansteigender Konzentrationen, die detailreiche Struktur der Spurenstoffverteilungen über den Beobachtungszeitraum erhalten bleibt.

Die AASW/WW-Schicht ist wieder anhand erhöhter FCKW-Konzentrationen an der Meeresoberfläche zu erkennen. Das charakteristische Absinken der $\sigma_{\theta} = 27,7 \text{ kg/m}^3$ Isopykne ist auf diesem Schnitt vor Kapp Norvegia deutlicher ausgeprägt als an der Antarktischen Halbinsel. Dort sind zwar auch hohe FCKW-Konzentrationen in Tiefen bis ca. 600 m zu sehen, dieses Wasser ist allerdings durch größere Dichten (bis zu $\sigma_{\theta} = 27,82 \text{ kg/m}^3$) gekennzeichnet.

Unterhalb der Oberflächen-Schicht liegt bis in etwa 1500 m Tiefe, außer im Bereich der Antarktischen Halbinsel, das wenig belüftete und daher mit niedrigen FCKW-Konzentrationen behaftete WDW. Das Minimum befindet sich entlang der Isopykne $\sigma_2 = 37,15 \text{ kg/m}^3$ (in ca. 1000 m Tiefe). Die niedrigsten Konzentrationen sind auf der Westseite ($41^{\circ} - 43^{\circ}\text{W}$) zu erkennen, die Konzentrationen nehmen zu den Rändern hin zu. Im Vergleich zu den Daten auf dem Null-Meridian (Abb. 21) ist das Minimum sowohl in den Konzentrationen als auch in der vertikalen Ausdehnung stärker ausgeprägt. Im zentralen Bereich ($32^{\circ} - 44^{\circ}\text{W}$) sind unterhalb des WDW die Wassermassen WSDW und WSBW mit zum Boden hin ansteigenden FCKW-Konzentrationen zu finden. Dieses Verhalten zeigt das Einmischen frischbelüfteten WSBW von unten. Östlich dieses Bereiches ist in Tiefen unterhalb von 2000 m das Einströmen frisch belüfteten PBBW in das westliche Weddellmeer zu erkennen (siehe Kapitel 2.5). Die laterale Ausdehnung dieses Kerns nimmt während der Beobachtungszeit zu. Im Jahr 1992 (ANT X/4) ist auf $26,3^{\circ}\text{W}$ (Station 619) ein vertikales FCKW-Maximum in diesem Bereich zu erkennen, während dieses Maximum auf 33°W (Station 623) nicht zu erkennen ist. Die Konzentration liegt unter $0,25 \text{ pmol/kg}$. Vier Jahre später (ANT XIII) ist dieses Maximum bis ca. 35°W zu beobachten. Die Konzentrationen liegen am Kontinent über $0,5 \text{ pmol/kg}$ und nehmen in Richtung Westen ab. Im Jahr 1998 füllt dieses Maximum den gesamten Schnitt aus.

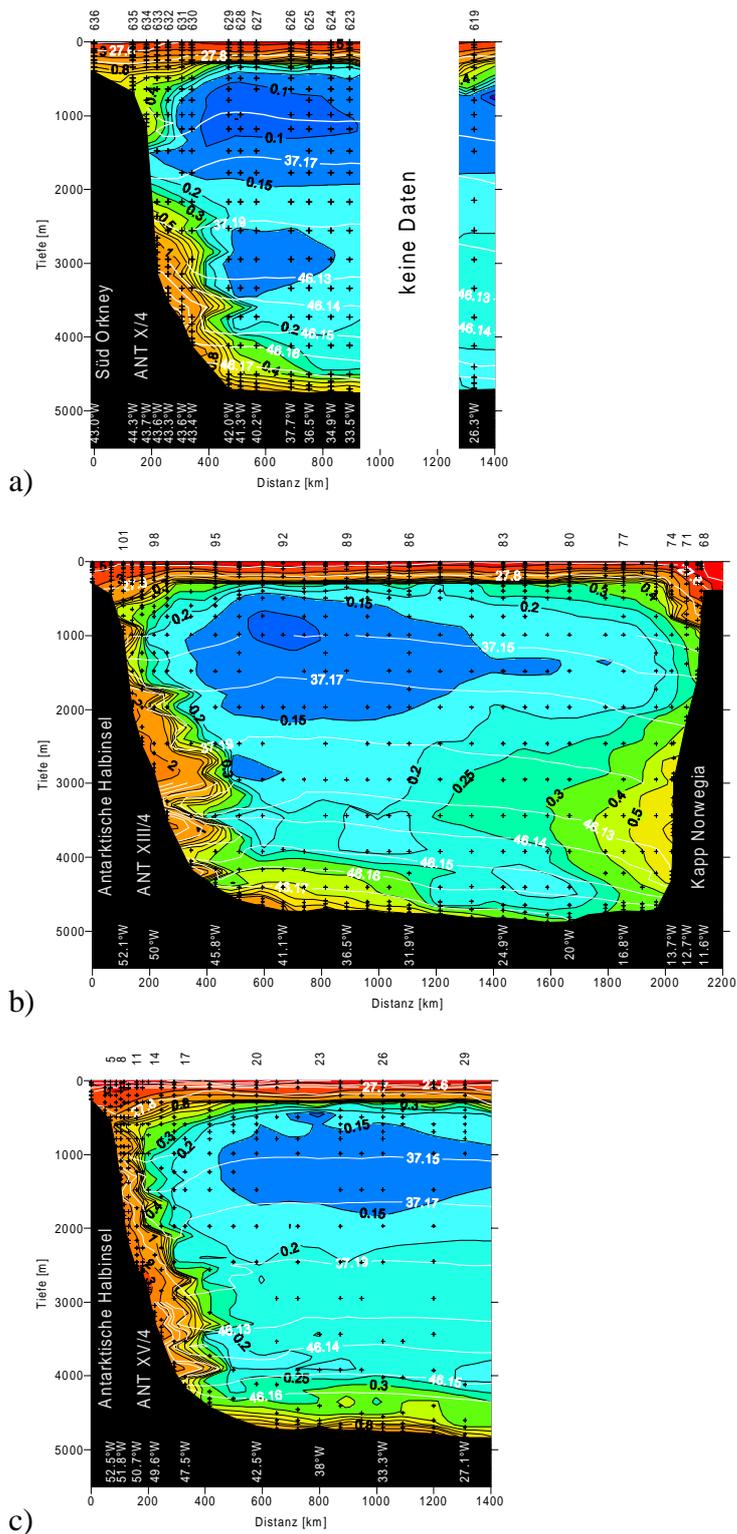


Abb. 23: F-11-Verteilung [pmol/kg] auf dem Weddellmeer Schnitt (1992 –1998), a) ANT X/4 (1992) abweichend zu den Süd-Orkneys, b) ANT XIII/4 (1996) und c) ANT XV/4 (1998); weiße Linien kennzeichnen die Dichten σ_θ , σ_2 und σ_4 ; Zahlen oberhalb der Grafik die Stationsnummer; weiße Zahlen am Boden die geographische Länge; kleine Kreuze kennzeichnen die Tiefen der Probennahme. Die Stationspositionen sind in den Abb. 17, 19 und 20 dargestellt.

An der Antarktischen Halbinsel ist in ca. 600 m Tiefe das Vordringen von MWDW zu erkennen. Die relativ hohen FCKW-Konzentrationen zeigen das Einmischen von Oberflächen-Wasser an, wobei es sich sowohl um WW als auch um lokal gebildetes Schelfwasser handeln kann. Unterhalb dieses Temperatur-Maximums ist bis zum Boden frisch belüftetes WSDW und WSBW anhand hoher FCKW-Konzentrationen (bis zu etwa 50% des Oberflächenwertes) zu erkennen. Innerhalb dieses Bereiches sind zahlreiche Strukturen in den FCKW-Konzentrationen zu erkennen, die aufgrund unterschiedlicher Bildungsorte und unterschiedlicher Vermischung hervorgerufen werden.

In Abb. 24 ist das mittlere Strömungsfeld der Jahre 1989 – 1993 senkrecht zum Schnitt dargestellt [Fahrbach et al., 1994b].

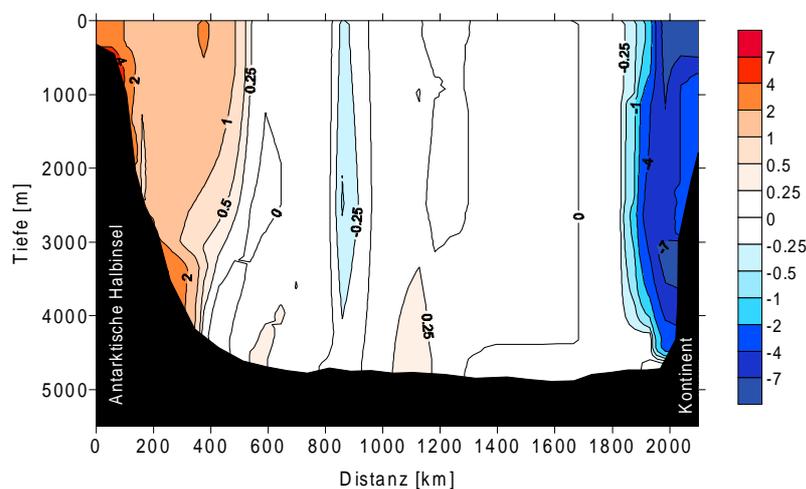


Abb. 24: Strömungsfeld senkrecht zum Weddellmeer Schnitt aus Strömungsmesser- und CTD-Daten aus den Jahren 1989 – 1993, positive Werte kennzeichnen einen Strom in nördliche Richtung; nach [Fahrbach et al., 1994b]

Das Zirkulationsmuster wird durch die starken Randströme an den Kontinentalabhängen der Antarktischen Halbinsel und des antarktischen Kontinents dominiert. Die Strömung ist überwiegend barotrop und quasi parallel zu den bathymetrischen Konturlinien [Fahrbach et al., 1994b]. Im zentralen Weddellmeer sind über die gesamte Wassersäule nur geringe Geschwindigkeiten ($< 0,25$ cm/s) vorzufinden. Am Hang des antarktischen Kontinentes werden auch unterhalb von 3000 m Tiefe Geschwindigkeiten von über 7 cm/s erreicht. Diese Geschwindigkeit nimmt zur Mitte relativ schnell ab. Somit sind bei den Distanzen < 1900 km nur noch Geschwindigkeiten unter 1 cm/s zu beobachten, bei ca. 1700 km dreht sich der Strom um. Für Distanzen kleiner 1700 km ist, außer in einem schmalen Band zwischen 800 und 900 km, ein nördlicher Transport zu erkennen. Das Maximum der Geschwindigkeit liegt direkt am Hang der Antarktischen Halbinsel.

5.3 Bereich um das Süd-Orkney-Plateau

Im Bereich des Süd-Orkney-Plateaus wurden außer dem 1992er Schnitt (ANT X/4; siehe Abb. 23a) zwei weitere Schnitte aufgenommen. Auf der M-11 Expedition der sog. Süd-Orkney-Schnitt vom Weddellmeer über die Süd-Orkney-Passage in die Scotia-See [Roether *et al.*, 1990] und auf der Expedition ANT XV/4 (1998) der sog. 43°W-Schnitt. Letzterer ging vom Weddellmeer über das Süd-Orkney-Plateau durch den Orkney-Trog zur Pirie-Bank [Fahrbach, 1999]. Die FCKW-Verteilungen dieser beiden Schnitte sind in Abb. 25 dargestellt:

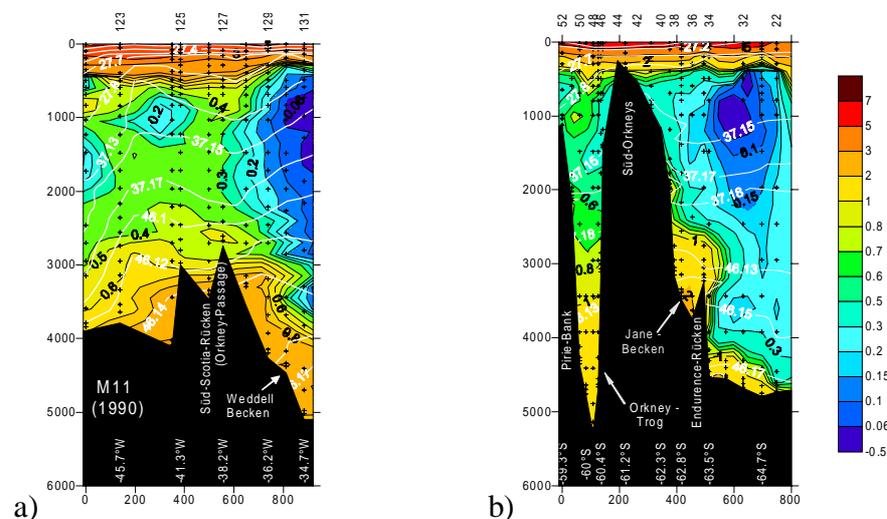


Abb. 25: F-11 Verteilung [pmol/kg] auf a) dem Süd-Orkney-Schnitt (1990) und b) dem 43°W-Schnitt (1998); weiße Linien kennzeichnen die Dichten σ_θ , σ_2 und σ_4 ; Zahlen oberhalb der Grafik die Stationsnummer; weiße Zahlen am Boden die geographische Länge; kleine Kreuze kennzeichnen die Tiefen der Probenahme. Die Stationspositionen sind in den Abb. 16 und 20 dargestellt.

Die Abb. 25a zeigt hohe Konzentrationen am Hang des Süd-Scotia-Rückens sowohl im Weddellmeer selbst als auch in der Süd-Orkney-Passage. Auf der Weddellmeer Seite ist über diesen hohen F11-Konzentrationen des WSBW und WSDW das WDW anhand niedriger Konzentrationen (bis zur Nachweisgrenze) zu erkennen. Über dem Süd-Scotia-Rücken und östlich davon sind höhere F11-Konzentrationen ($> 0,3$ pmol/kg) gemessen worden. In der ostwärtigen Verlängerung der Orkney-Passage, dem Orkney-Trog sind auf dem 43°W Schnitt ebenfalls hohe F11-Konzentrationen (bis zu 1,3 pmol/kg, siehe Abb. 25b) in Tiefen unterhalb 3000 m gemessen worden. Dieser Trog liegt nördlich des Süd-Orkney-Plateaus, also außerhalb des Weddellmeeres.

Der Vergleich der beiden 1998er Schnitte (Abb. 23c und Abb. 25b) zeigt Unterschiede in den F11-Konzentrationen am Hang der Antarktischen Halbinsel und am südlichen Hang

des Süd-Orkney-Plateaus. An der Antarktischen Halbinsel sind hohe FCKW-Konzentrationen über den ganzen Tiefenbereich zu erkennen, während am Süd-Orkney-Plateau hingegen diese Konzentrationen fast um einen Faktor 2 kleiner sind, zwischen 500 und 2500 m Tiefe liegen die F11-Konzentrationen sogar nur um 0,7 pmol/kg, also deutlich geringer als die darunterliegenden (ca. 1,7 pmol/kg). Dieser Befund wird, wenn auch weniger deutlich, weiter stromaufwärts von den 1992er Daten am Süd-Orkney-Plateau gezeigt (siehe Abb. 23a). Auf der Station 633 ist in ca. 1500 m Tiefe direkt am Schelf (Abstand vom Hang ca. 30 km) eine F11-Konzentrationen von nur 0,1 pmol/kg gefunden worden. Diese ist erheblich weniger als die Werte (um 0,5 pmol/kg) die 1996 und 1998 an der Antarktischen Halbinsel gefunden wurden. Auch die Station 632 zeigt diese niedrige Konzentration, sie ist allerdings ca. 80 km vom Hang entfernt, also einer Entfernung in der auch an der Antarktischen Halbinsel nur Konzentrationen von 0,25 pmol/kg gemessen wurden.

6 Auswertung des Null-Meridian-Schnittes

Zur Auswertung werden zunächst die Kerne extremaler FCKW-Konzentration definiert und deren zeitliche Entwicklung beschrieben. Auf diese Kerne werden danach die in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren zur Interpretation von Tracer-Verteilungen angewendet und damit das Alter und der Anteil der jungen Komponente bestimmt. Diese Ergebnisse werden dann zusammen mit dem Strömungsfeld benutzt, um Transportraten von Boden- und Tiefenwasser abzuschätzen.

6.1 Definition der Wassermassen-Kerne auf dem Null-Meridian

Die zeitliche Entwicklung der FCKW-Konzentrationen wird für folgende Kerne²² analysiert:

1. südlicher Kern: Kern erhöhter FCKW-Konzentrationen des tiefen südlichen Einstroms am Kontinentalabhang bei 67 - 70°S in 3000 – 4500 m Tiefe
2. nördlicher Kern: Kern erhöhter FCKW-Konzentrationen des tiefen nördlichen Ausstroms am Hang des Mittelatlantischen Rückens bei 58 – 61°S in 4000 – 4500 m Tiefe
3. ACC-Kern: Kern erhöhter Konzentrationen im südlichen ACC (55 – 59°S) in ca. 1000 m Tiefe
4. Sattelpunkt-Kern: Sattelpunkt in den FCKW-Konzentrationen (horizontales Maximum und vertikales Minimum) unterhalb von Kern 3 bei ca. 54 – 59°S in ca. 2000 m Tiefe
5. Minimum-Kern: Weddellmeer Minimum bei 59° - 69°S in ca. 1500 m Tiefe
6. ACC-Minimum-Kern: Minimum nördlich des ACC, nördlich 52°S in ca. 2000 m Tiefe

Die Auswahl der Proben, die in die Beschreibung der Kerne eingehen, erfordert möglichst objektive Kriterien. Aufgrund der geringen Datendichte ist es unmöglich, die maximale (minimale) FCKW-Konzentration in den Kernen mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Diese Wahl hätte auch den Nachteil, dass das Maximum der größten Variabilität unterworfen ist. Deswegen wird hier ein stabiler Kern um das jeweils gemessene Maximum (Minimum) definiert. Die Bestimmungsvorschriften dieses so genannten "inneren Kerns", die außer den geographischen Parametern auch die Dichte berücksichti-

²² hier und im folgenden wird auch der Sattelpunkt als Kern bezeichnet

gen, sind im Anhang 10.3 aufgeführt. Von kleinen Änderungen für die ersten beiden Expeditionen (AJAX und ANT V/4) abgesehen sind die Kriterien über die gesamte Zeitreihe konstant. Die Messungen, die diese Definitionen erfüllen, sind in Abb. 21 jeweils hervorgehoben. Aus diesen Schöpferproben wurde dann für jede Fahrt separat die mittlere FCKW-Konzentration und der Fehler des Mittelwertes berechnet. Der Fehler des Mittelwertes ist mit 10 – 30 fmol/kg deutlich größer als der eigentliche Messfehler (ca. 6 fmol/kg, siehe Kapitel 4). Somit wird der Gesamtfehler, der sich aus diesen beiden Fehlern zusammensetzt, durch den statistischen Fehler des Mittelwertes dominiert. In Tabelle 19 ist jeweils der Mittelwert und der Gesamtfehler für die verschiedenen Kerne und Jahre angegeben.

Kern	1984	1986	1990	1992	1996	1998
südlicher Kern	0.23±0.01 (7)	0.31±0.03 (9)	n.d.	0.48±0.02 (10)	0.55±0.01 (14)	0.73±0.02 (19)
nördlicher Kern	0.22±0.01 (7)	0.40±0.02 (16)	0.46±0.02 (7)	0.56±0.02 (7)	0.68±0.02 (8)	0.72±0.02 (15)
ACC-Kern	0.21±0.01 (19)	n.d.	0.31±0.02 (15)	0.32±0.01 (18)	0.34±0.01 (20)	0.33±0.01 (22)
Sattelpunkt-Kern	0.14±0.01 (11)	n.d.	0.22±0.01 (10)	0.22±0.01 (10)	0.27±0.02 (8)	0.29±0.01 (6)
Minimum-Kern	0.05±0.01 (18)	0.08±0.01 (12)	n.d.	0.14±0.01 (24)	0.15±0.01 (21)	0.17±0.01 (29)
ACC-Minimum	0.04±0.01 (13)	n.d.	0.07±0.01 (8)	0.13±0.01 (7)	n.d.	0.16±0.01 (12)

Tabelle 19: Mittlere F11 Konzentrationen und der Gesamtfehler [pmol/kg], der sich aus dem Fehler des Mittelwertes und dem Messfehler zusammensetzt, für die betrachteten Kerne; in Klammern die Anzahl der verwendeten Punkte (n.d. = keine Daten)

In Abb. 26 ist die mittlere Konzentration und der Gesamtfehler gegen die Zeit aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Konzentrationsanstieg der Kerne ist überwiegend linear ist, wobei die Steigung der beiden tiefen Kerne größer ist als die der anderen..

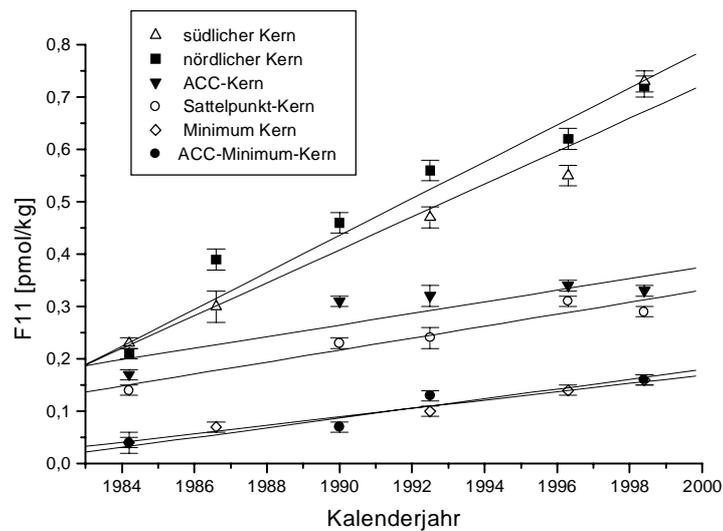


Abb. 26: Konzentration und Gesamtfehler (siehe Text) der sechs betrachteten Kerne gegen die Zeit. Die Ausgleichsgeraden sind linear gefittet.

6.2 Bestimmung der Sättigung der Quellwassermassen

Die FCKW-Konzentrationen des Oberflächen-Wassers folgen dem generellen Trend des atmosphärischen Antriebs, allerdings ist die Sättigung (ξ in Gl. (2)) im Südlichen Ozean unvollständig (siehe Kapitel 3.1). Besonders im Süd-Herbst und -Winter ist, aufgrund des durch Eisbedeckung verminderten Gasaustauschs und gleichzeitigem Einstroms von FCKW-armen WDW, eine deutliche Untersättigung festzustellen.

Die bisher gemessenen Sättigungen variieren zwischen ca. 75% im zentralen Weddellmeer [Schlosser et al., 1994; Meredith et al., 1996; Mensch et al., 1998b; Sülttenfuß, 1998] und ca. 55% in den westlichen Schelfgebieten (südlich von 65°S, 53°W) [Mensch et al., 1998b]. Letztere Daten wurden mit der Weddellmeer Eisstation (Ice Station Weddell, 1992) gewonnen und stellen die bisher einzige Untersuchung in einem Bereich, in dem Bodenwasser gebildet wird, dar. Untersuchungen auf den anderen Schelfgebieten zeigen ebenfalls niedrige Sättigungen. Auf dem östlichen Schelf (74,5°S, zwischen 32-36°W) sind Sättigungen von ca. 70% festgestellt worden [Schlosser et al., 1991], auf dem winterlichen Süd-Orkney-Plateau hat Sülttenfuß [1998] F11-Sättigungen von ca. 60% beobachtet.

In dieser Arbeit werden die FCKW-Sättigungen vor dem Filchner-Ronne-Schelfeis mittels eigener Daten aus dem Spätsommer 1995 neu abgeschätzt. Hierzu wurden die mittleren FCKW-Konzentrationen aller Proben der Schelf-Stationen der ANT XII/3 Expedition von

300 m Tiefe bis zum Boden (ca. 600 m) bestimmt. Die potentielle Temperatur dieser Proben lag am Oberflächengefrierpunkt (-1,9°C), der mittlere Salzgehalt bei 34,6 psu. Somit kann die mittlere Sättigung berechnet werden (siehe Tabelle 20). Die Daten zeigen ein einheitliches Bild, der statistische Fehler des Mittelwertes ist kleiner 1%. Nach dem in Kapitel 4.4 beschriebenen Verfahren zu Bestimmung des Gesamtfehlers muss zusätzlich der Fehler des Messsystems berücksichtigt werden. Dieser ist aufgrund der Probenlagerung in der Größenordnung 4% für F11 und 3% für F12 (siehe Kapitel 4.5).

	Anzahl der Messungen	mittlere Konzentration [pmol/kg]	Sättigung [%]
F11	23	4.82 ± 0.03	61±4
F12	24	2.10 ± 0.01	56±3

Tabelle 20: Mittlere F11 und F12 Konzentrationen (pmol/kg) und die daraus resultierenden Sättigungen der Stationen vor dem Filchner-Ronne-Schelfeis der Reise ANT XII/3; die Proben stammen aus Tiefen von 300 m bis zum Boden; Fehlerangaben beziehen sich auf den jeweiligen Gesamtfehler; Anzahl gibt Zahl der verwendeten Proben an

In Kapitel 3.2.2 wurde eine um 5% höhere F11-Sättigung aufgrund der unterschiedlichen Schmidt-Zahlen diskutiert. Der hier gemessene Sättigungsunterschied liegt bei 10% und damit zumindest in der gleichen Größenordnung dieser Abschätzung.

Frisch gebildetes Bodenwasser ist eine Mischung aus HSSW (ISW), WW und WDW (siehe Kapitel 2.4). Da zwischen dem Verlassen der Oberfläche dieser Wassermassen und der endgültigen Bildung von WSBW eine gewisse Zeit verstreicht, ist die Sättigung letzterer von atmosphärischen Bedingungen zu früheren Zeiten abhängig. Daher ist, falls die atmosphärischen Konzentrationen keinen exponentiellen Verlauf nehmen (oder konstant sind), die Sättigung zeitabhängig. Die hier gezeigten Messungen sind Mitte der 1990er Jahre durchgeführt worden. Dieser Zeitpunkt stellt gerade den Übergang von einem linearen Anstieg zu einer konstanten atmosphärischen F11 Konzentration dar (siehe Abb. 8). Daraus folgt, dass die Sättigung in den 1980er geringer, die in den späten 1990er (mit konstante oder leicht sinkende atmosphärischen F11 Konzentrationen) größer war als die hier bestimmte. Außerdem ist die FCKW-Sättigung von der sehr variablen Größe der Eisbedeckung abhängig. Daher ist zu vermuten, dass sie selbst auch große zwischenjährige Variabilität zeigt. Aufgrund fehlender Daten sind darüber keine genaueren Aussagen zu treffen. Die Variabilität kann nur durch einen größeren Fehler in den Sättigungen berücksichtigt werden.

Im Ganzen wird für den nördlichen Kern eine Sättigung von $60\pm 5\%$ angenommen. Ferner wird aufgrund fehlender Daten vom Amery-Schelf (Quellgebiet des südlichen Kerns) angenommen, dass diese Sättigungen nicht nur charakteristisch für die junge Komponente des nördlichen Kerns, sondern auch für die der Quellwassermasse (PBBW) des südlichen Kerns sowie für den durch diese beiden Wassermassen belüfteten Minimum-Kern ist (siehe auch [Keir *et al.*, 1992]). Die Sättigungen der anderen Kerne sollte etwas höher sein, da diese Wassermassen weiter nördlich gebildet werden und dort höhere Sättigungen gefunden wurden (siehe oben). Allerdings liegen für die Kerns selbst keine gesicherten Erkenntnisse über die Sättigung vor, so dass Annahmen gemacht werden müssen. Die F11-Sättigungen des an der Antarktischen Halbinsel gebildeten Sattelpunkt-Kerns wird mit $65\pm 5\%$, die des im Bereich der WSC gebildeten ACC-Kerns und die des ACC-Minimum-Kerns mit $70\pm 5\%$ angenommen. Für F12 wird jeweils eine um 5% geringere Sättigung angenommen. Diese Sättigungen sind in Tabelle 21 zusammengefasst. Es ist aber zu beachten, dass die Wahl der Sättigung nicht sehr kritisch ist, da die überhaupt in Frage kommenden Werte nur zwischen 55 und 75% (der Spanne zwischen den im zentralen Weddellmeer und den auf den Schelfen gemessenen Werten) liegen können

Kern	F11 Sättigung	F12 Sättigung
südlicher Kern	60 ± 5	55 ± 5
nördlicher Kern	60 ± 5	55 ± 5
ACC-Kern	70 ± 5	65 ± 5
Sattelpunkt-Kern	65 ± 5	60 ± 5
Minimum-Kern	60 ± 5	55 ± 5
ACC-Minimum	70 ± 5	65 ± 5

Tabelle 21: Angenommene Sättigung ξ der betrachteten Kerne mit geschätzten Fehlern

6.3 Berechnung des Alters und des Anteils der jungen Komponente mittels klassischer Konzepte

In diesem Kapitel werden die FCKW-Messungen mit den in Kapitel 3.2 entwickelten Methoden zur Bestimmung der Alters und des Anteils der jungen Komponente am Beispiel des südlichen Kerns ausgewertet.

6.3.1 Konzentrationsalter

Mit dem in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Verfahren zur Berechnung des Konzentrationsalters wird die FCKW-Konzentration direkt in ein Alter umgerechnet (siehe Tabelle 22). In der zweiten Zeile ist dieses Verfahren so angewendet, das mit der mittleren Temperatur (hier $-0,5^{\circ}\text{C}$) und des mittleren Salzgehalts (hier 34,65 psu) ohne Berücksichtigung der Sättigung die atmosphärische Konzentration bestimmt wird. Dies entspricht der üblichen Berechnung des Konzentrationsalters. In der Zeile Spalte ist das Konzentrationsalter unter Berücksichtigung der Sättigung (60%, siehe Tabelle 21) dargestellt.

	$\tau_{\text{Konz}}(1984)$ [Jahre]	$\tau_{\text{Konz}}(1986)$ [Jahre]	$\tau_{\text{Konz}}(1992)$ [Jahre]	$\tau_{\text{Konz}}(1996)$ [Jahre]	$\tau_{\text{Konz}}(1998)$ [Jahre]
τ_{Konz} 100% Sättigung	24.5 (F11) 29 (F12)	25 (F11) 29 (F12)	28.5 (F11) 31 (F12)	31.5 (F11) 34 (F12)	32.5 (F11) 34 (F12)
τ_{Konz} 60% Sättigung	21.5 (F11) 25 (F12)	22 (F11) 24.5 (F12)	25.5 (F11) 27 (F12)	29 (F11) 30 (F12)	29 (F11) 29 (F12)

Tabelle 22: Konzentrationsalter des südlichen Kerns aus F11 und F12 Daten. In der oberen Zeile wurden die FCKW-Konzentrationen direkt in Alter umgerechnet, in der unteren die in Tabelle 21 aufgeführten Sättigungen der Quellwassermasse berücksichtigt. Der formale Fehler ist jeweils kleiner 0,5 Jahre.

Es ist zu erkennen, dass die Alter sehr groß sind (vergl. Kapitel 6.4 sowie [Klatt *et al.*, im Druck]) und innerhalb der 14 Jahre für F11 um ca. 8 Jahre zunehmen. Die hohen Alter resultieren aus der Tatsache, dass die Methode der Konzentrationsalter die Mischung mit tracer-freien Wassermassen nicht berücksichtigt, sondern eine Art mittleres Alter berechnet. Diese Mischung führt zu einer Verringerung der Tracer-Konzentrationen und somit zu größeren Werten der Alter. Die Tracer-Konzentration des Kerns wird also auf einen Zeitpunkt projiziert, der nicht mit dem des Verlassens der Oberfläche der tracerhaltigen Komponente identisch ist und bei wiederholten Messungen überstreicht diese Projektion einen anderen Zeitraum. Eine nicht exponentiell ansteigende Eintragsfunktion führt somit zu unterschiedlichen Konzentrationsaltern. Für die vorliegenden Messungen äußert sich diese in der Form, dass sich die Konzentrationen der Kerne während der 14jährigen Zeitreihe verdreifachen, aber aufgrund der Verdünnung der tracerhaltigen Komponente die Zeitreihe auf die atmosphärische Eintragsfunktion der 1960er Jahre projiziert wird. Dort wird diese Verdreifachung für F11 schon in 6 Jahren erzielt, so dass die Alter um 8 Jahre ansteigen. Prinzipiell wäre es möglich mit wiederholten Messungen auch den Anteil der jungen Komponente zu berechnen, dieses stellt dann aber einen Spezial-Fall der in Kapitel 6.4 eingeführten Methode der Anpassung einer Altersverteilung mit $\sigma = 0$ Jahre dar.

6.3.2 Verhältnialter

Mit dem in Kapitel 3.2.2 vorgestellte Verfahren zur Bestimmung des Verhältnialters wird, im Gegensatz zum Konzentrationsalter, das Alter der jungen Komponente und ihr Anteil der Wassermasse bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 23 dargestellt. Die obere Zeile zeigt die Berechnung dieser Größen ohne Berücksichtigung der in Tabelle 21 dargestellten Sättigungen, in der unteren werden diese berücksichtigt.

		1984	1986	1992	1996	1998
100%	Alter [Jahre]	[5, 12]	[7, 17]	16±4	22±5	23±3
Sättigung	Anteil [%]	[6, 10]	[8, 20]	14±7	19±6	28±6
60%	Alter [Jahre]	10±5	13±6	20±4	25±2	28±3
Sättigung	Anteil [%]	[9, 25]	[12, 51]	36±17	47±15	70±30

Tabelle 23: Verhältnialter und Anteil der jungen Komponente des südlichen Kerns.

Bei stark unsymmetrischen Fehlern wurde das Intervall angegeben.

Auch das Verhältnialter zeigt einen Anstieg der berechneten Alter, außerdem nehmen die Anteile erheblich zu. Die Expeditionen der 1980er Jahren zeigen Ergebnisse, die glaubwürdig erscheinen (siehe Kapitel 6.4 sowie [Klatt *et al.*, im Druck]), diese sind aber mit großen (unsymmetrischen) Fehlern behaftet. Für die 1990er Jahren führt die geringe Dynamik bzw. die Nichteindeutigkeit der Eintragsfunktion zu großen Fehlern.

6.3.3 Zusammenfassung

Beide in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren zur Bestimmung eines Alters zeigen Ergebnisse, die nicht stabil bezüglich wiederholter Messungen sind. Die mit dem Verfahren der Konzentrationsalter berechneten "mittleren" Alter sind prinzipiell größer als das Alter der jungen Komponente, die für Belüftung des Ozeans entscheidende Größe. Die Verhältnisdatering von F11/F12 berücksichtigt zwar die Einmischung von altem Wasser, aber die Mehrdeutigkeit und die geringe Dynamik dieser Eintragsfunktion führt zu unrealistischen Werten und großen Fehlern, besonders für die Fahrten in den 1990er Jahren. Somit sind beide Verfahren nicht geeignet, den FCKW-Datensatz in Bezug auf die Belüftung des Ozeans auszuwerten.

6.4 Berechnung des Alters und des Anteils der jungen Komponente mittels Anpassung einer Altersverteilung

In diesem Kapitel wird das neue Verfahren (siehe Kapitel 3.3) zur Auswertung der FCKW-Daten angewandt. Dabei wird zur Bestimmung des Alters und des Anteils der jungen Komponente eine Altersverteilung an die gemessenen FCKW-Konzentrationen angepasst. Das Verfahren wird explizit am Beispiel des südlichen Kerns durchgeführt, für die anderen Kerne werden nur die Ergebnisse dargestellt.

Für die Auswertung wird ein stationärer Ozean angenommen. Mischung wird nur zwischen einer FCKW-tragenden und einer FCKW-freien Komponente betrachtet. Weiter wird angenommen, dass die Ausbreitung nur von der Entfernung zur Quelle abhängig ist und das Alter der jungen Komponente von einer 1-dimensionalen Altersverteilung Gl. (16) beschrieben wird. Damit berechnet sich die FCKW-Konzentration einer Wassermasse nach Gl. (20) aus der Faltung dieser Altersverteilung und dem atmosphärischen FCKW-Eintrag. Die Kostenfunktion Gl. (21) bestimmt dann den besten Satz der Parameter Breite der Altersverteilung (σ), mittleres Alter (τ) und dem Produkt aus dem Anteil der jungen Komponente und der Sättigung ($\gamma \cdot \xi$). Für alle betrachteten Kerne zeigt sich, dass die gleichzeitige Bestimmung der drei Parameter nicht möglich ist, da die Kostenfunktion kein eindeutiges Minimum besitzt. In Abb. 27 ist das Minimum der Kostenfunktion des südlichen Kerns in Abhängigkeit von σ gezeigt. Für ein beliebiges σ existiert immer eine Altersverteilung, so dass der Wert der Kostenfunktion nicht mehr als 5% vom absoluten Minimum abweicht.

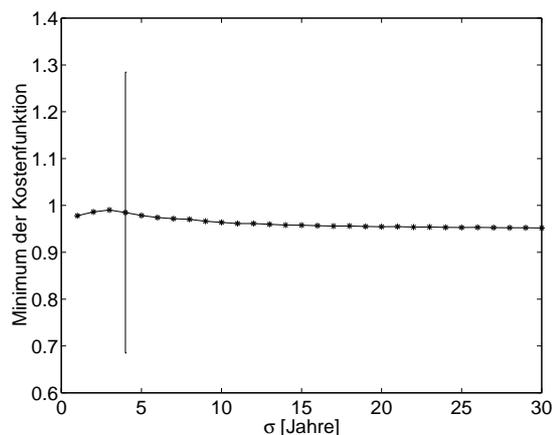


Abb. 27. Minimum der Kostenfunktion für den südlichen Kern in Abhängigkeit der Breite der Altersverteilung (σ); senkrechter Strich bei $\sigma = 4$ Jahre zeigt zum Vergleich die Streuung für ein festes σ an.

Allerdings ändern sich mit zunehmenden σ die beiden anderen Parameter im jeweiligen Minimum. In Abb. 28 sind diese Parameter im Minimum in Abhängigkeit von σ dargestellt.

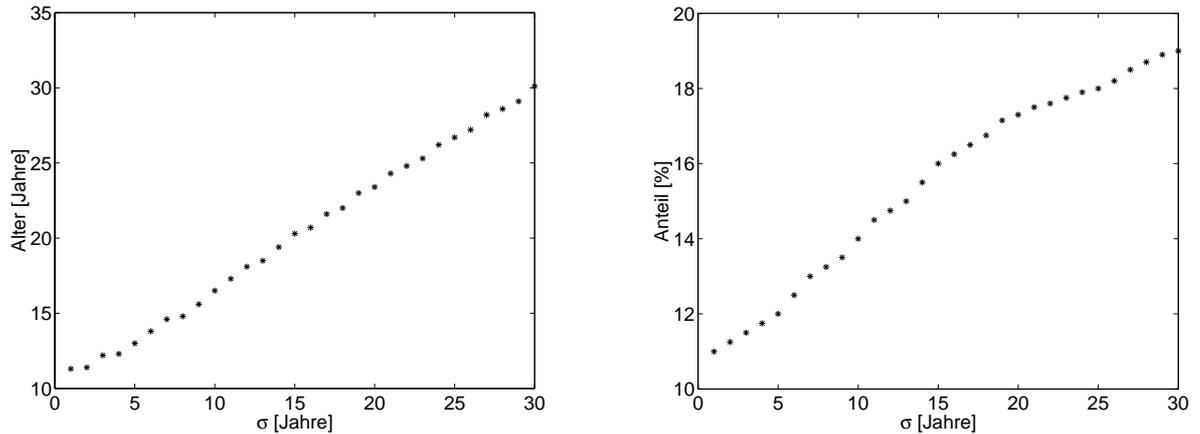


Abb. 28: Alter und FCKW-gesättigter Anteil der jungen Komponente des südlichen Kerns im Minimum in Abhängigkeit von σ

Wird ein Parameter festgehalten, existieren ausgeprägte Minima der Kostenfunktion. Da sowohl der Anteil der jungen Komponente als auch ihr Alter bestimmt werden sollen, muss der Wert für σ durch weitere Überlegungen gesetzt werden. Diese Vorgehensweise stellt zwar eine Einschränkung dieser Methode dar, aber es ist zu beachten, dass in den bisherigen Methoden σ gar nicht betrachtet wurde und somit implizit $\sigma = 0$ angenommen wurde.

Abschätzung eines realistischen Bereichs für σ

Die Breite der Altersverteilung entsteht aufgrund der Ausbreitung von Wasserteilchen einer Wassermasse auf unterschiedlichen Trajektorien, die in der Kontinuitätsgleichung durch den Parameter κ beschrieben wird. Somit ist die Peclet-Zahl (das Verhältnis von Advektion zu Diffusion; $Pe = ul/\kappa = 2(\tau/\sigma)^2$) ein formaler Indikator für die Breite der Altersverteilung. In Abb. 29 ist die Peclet-Zahl im Minimum der Kostenfunktion gegen Sigma dargestellt, wobei bei vorgegebenen Sigma sich die Anzahl der anzupassenden Parameter (ν) in Gl. (21) auf zwei verringert.

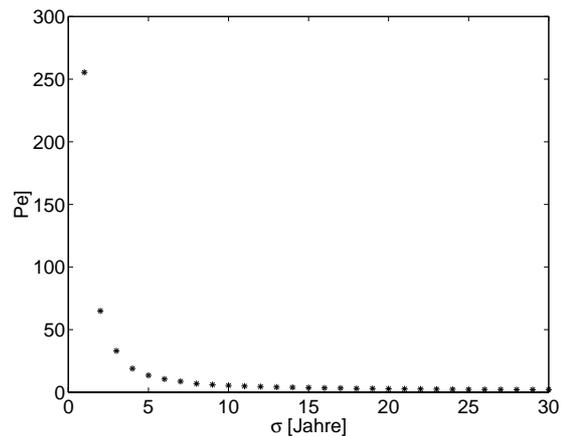


Abb. 29: Peclet-Zahl im Minimum der Kostenfunktion gegen Sigma

Musgrave [1985] hat den Bereich der Peclet-Zahlen mittels Modellrechnungen abgeschätzt, die die Ausbreitung eines Tracers in einem Kern im westlichen Randstrom erlauben. Dazu hat er die Advektions-Diffusions-Gleichung mittels eines Zirkulationsfeldes, das den Eigenschaften eines subtropischen Wirbels genügt (nach [Stommel, 1948]), integriert, und die resultierenden Tracer-Verteilungen für $Pe = 10, 100$ und 1000 für verschiedene Ozeangeometrien ermittelt. Nur für die beiden größeren Zahlen breitete sich der Tracer in einem westlichen Randstrom aus. Somit stellt $\sigma \leq 8$ (Verbunden mit $Pe > 7$) eine konservative Abschätzung des möglichen Bereichs dar.

In Tabelle 19 sind die Parameter und die Peclet-Zahl in den Minima für $\sigma = 1, 2, 4$ und 8 Jahre dargestellt.

σ [Jahre]	τ [Jahre]	$\gamma \cdot \xi$ [%]	Pe
1	11,3	11	255
2	11,4	11,25	65
4	12,3	11,75	19
8	14,8	13,25	7

Tabelle 24: Parameter im Minimum der Kostenfunktion und Peclet-Zahl für feste Sigma

Während die Peclet-Zahlen innerhalb dieser Grenzen von $7 - 255$ variiert, sind die Parameter der Altersverteilung relativ konstant (τ von $11 - 15$ Jahre, $\gamma \cdot \xi$ von $11 - 13\%$). Aus den Extremwerten dieser Reihe werden der Mittelwert und der Fehler aufgrund der Unbestimmtheit der Breite der Altersverteilung abgeschätzt. Diese sind $\tau = 13 \pm 2$ Jahre und $\gamma \cdot \xi = 12 \pm 1$. Diese Werte stimmen ungefähr mit den berechneten Werten für $\sigma = 4$ Jahre überein. Dieser Wert von σ wird im Folgenden als beste Schätzung benutzt.

In Abb. 30 ist die Kostenfunktion für vier verschiedene Werte für Sigma ($\sigma = 1$, $\sigma = 2$, $\sigma = 4$ und $\sigma = 8$ Jahre) als Konturplot dargestellt. Die Kreuze kennzeichnen jeweils die Lage des Minimums. Der von der innersten Linie umschlossene Bereich zeigt Werte kleiner als 130% vom Minimum. Die nächsten Linien umschließen die Bereiche 150%, 200%, 500% und 1000% des Minimums.

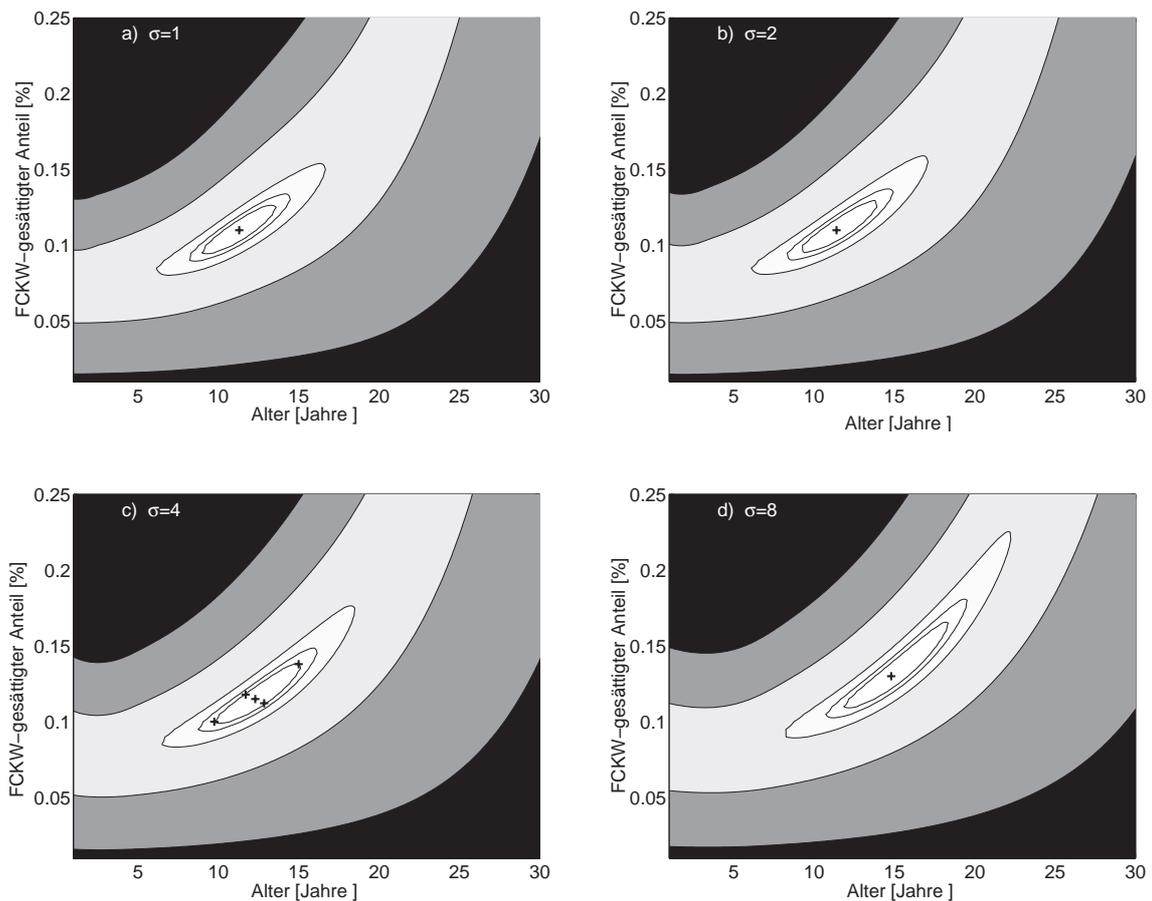


Abb. 30 Konturplot in normierter Darstellung der Abweichung der gemessenen von den berechneten FCKW-Konzentrationen in Abhängigkeit vom mittleren Alter τ und FCKW-gesättigter Anteil $\gamma \cdot \xi$ der jungen Komponente sowie für verschiedene Breiten der Verteilung a) $\sigma=1$; b) $\sigma=2$; c) $\sigma=4$; d) $\sigma=8$. Es ist jeweils das Minimum der Kostenfunktion sowie Konturlinien beim 1,3- 1,5- 2- 5- und 10-fachen Wert des jeweiligen Minimums gezeigt. In c) sind außerdem 4 Punkte auf der inneren Konturlinie dargestellt.

In Abb. 30c ($\sigma = 4$) sind außerdem vier Punkte um das Minimum (Minimum=[12,3; 11,75]) auf der 130%-Konturlinie gezeichnet ([Min(τ)-0,6 Min($\gamma \cdot \xi$)+0,29]; [Min(τ)-2,55 Min($\gamma \cdot \xi$)-1,5]; [Min(τ)+2,6 Min($\gamma \cdot \xi$)+2,3]; [Min(τ)+0,55 Min($\gamma \cdot \xi$)-0,28]). Für jeden dieser Punkte und für das Minimum ist der zeitliche Verlauf der FCKW-Konzentrationen nach Gl. (20) berechnet worden. In Abb. 31 sind diese Konzentrationen gegen die Zeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Einhüllende dieser Kurven die gemessenen Werte

(Sterne in Abb. 31) wiedergibt. Die 130%-Isolinie wird daher in dieser Arbeit als Standardfehler der bestimmten Parameter (FCKW-gesättigter Anteil und mittleres Alter der jungen Komponente) gewählt. Das gerundete Ergebnis für den südlichen Kern mit $\sigma = 4$ Jahre ist damit: $\tau = 12,5 \pm 2,5$ Jahre und $\gamma \cdot \xi = 12 \pm 2$.

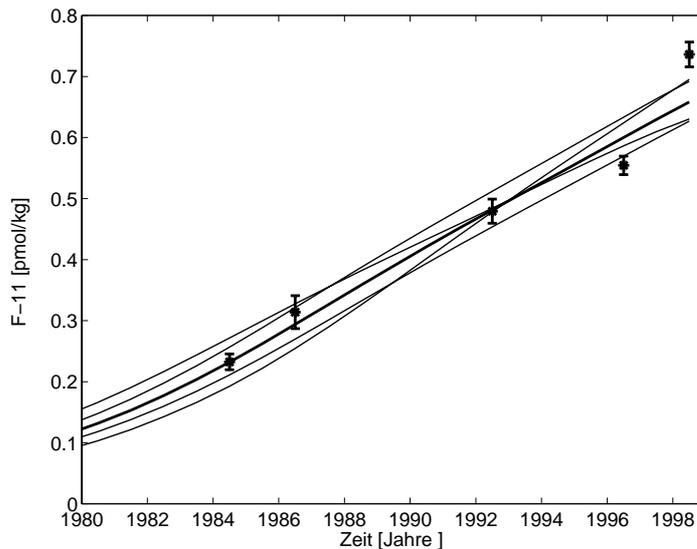


Abb. 31: Berechneter Verlauf der F11 Konzentration des südlichen Kerns. Die dicke Linie zeigt den Verlauf für die Parameter des Minimums bei $\sigma = 4$ Jahre, die dünneren den der Kreuze um das Minimum in Abb. 30. Außerdem sind die gemessenen mittleren Konzentrationen (und Fehler) des südlichen Kerns dargestellt (siehe Tabelle 19)

Damit sind die Fehler aufgrund der Unbestimmtheit der Breite der Altersverteilung und aufgrund der Bestimmung des mittleren Alters und des FCKW-gesättigten Anteils der jungen Komponente abgeschätzt worden. Um eine Abschätzung des Gesamtfehlers zu erhalten, werden diese beiden Fehler nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz addiert. Das gerundete Ergebnis für die junge Komponente des südlichen Kerns lautet daher: **$\tau = 12,5 \pm 3$ Jahre; $\gamma \cdot \xi = 12 \pm 3$ %**. Unter Berücksichtigung der Sättigung $\xi = 60 \pm 5$ % (siehe Tabelle 21) kann letzteres Produkt separiert werden, der Anteil der (ventilierten) jungen Komponente beträgt damit **$\gamma = 20 \pm 6$ %**.

Für die anderen in Kapitel 6.1 definierten Kerne wurden die gleichen Untersuchungen durchgeführt. In Tabelle 25 sind diese Ergebnisse zusammengefasst. Dabei gibt die dritte Spalte das mittlere Alter der jungen Komponente des jeweiligen Kerns an. Dabei fällt auf, dass die jungen Komponenten der beiden Kerne an der nördlichen Grenze des Weddell-

meeres (Kern (3) und (4)) mit 3 und 8 Jahren jung sind im Vergleich mit den mittleren Altern der anderen Kerne, deren Unterschiede mit Altern von 12,5 bis 19 Jahren relativ gering sind. Allerdings variieren hier die Anteile der jungen Komponenten von 4 – 14% unter der Annahme vollständiger Sättigung (Spalte 4) oder 6 – 23% unter Berücksichtigung der in Kapitel 6.2 abgeschätzten Sättigungen (Spalte 8). In der fünften Spalte ist die Breite der Altersverteilung dargestellt. Für die advektiven Kerne (1-4) ist diese mit $\sigma = 4$ Jahren angenommen (siehe oben). Für die Minimum-Kerne (5 und 6) kann aus der Tatsache, dass es sich hierbei nicht um rein advektive Kerne handelt und dem größeren Alter ein größeres σ angenommen werden. Es wurde $\sigma = 8$ Jahre angenommen, wobei zur Abschätzung des Fehlers dieser Wert zwischen 2 und 16 Jahren variiert wurde, so dass der Bereich realistischer Größen abgedeckt ist. Es sei hier schon erwähnt, dass aufgrund von unten geschilderten Problemen mit der Stabilität der berechneten Parameter dieser Kerne, im Weiteren keine ozeanographischen Aussagen aus ihnen gewonnen werden.

Nr.	Kern	mittleres Alter [Jahre]	FCKW- gesättigter Anteil [%]	gesetztes σ [Jahre]	Varianz im Minimum	angenom- mene Sättigung [%]	venti- lierter Anteil [%]
1	südlicher Kern	12.5±3	12±3	4	1.0	60±5	20±5
2	nördlicher Kern	13.5±3	14±3	4	1.0	60±5	23±5
3	ACC- Kern	3±3	5.5±0.5	4	0.3	70±5	8±1
4	Sattelpunkt Kern	8.5±1	4.7±0.5	4	0.3	65±5	7±1
5	Minimum- Kern	17±4	4±1	8	2.0	60±5	7±2
6	ACC- Minimum	19±3	4.5±1	8	0.9	70±5	6±2

Tabelle 25: Mittleres Alter und Anteil der jungen Komponente unter der Annahme vollständiger Sättigung (Spalte 4) und mit nach 6.2 (Spalte 7) abgeschätzter Sättigung (Spalte 8). Außerdem ist der gesetzte Wert der Breite der Altersverteilung (Spalte 5), der Wert der Kostenfunktion im Minimum (Spalte 6) dargestellt.

Um die Abhängigkeit dieser Ergebnisse von zufälligen Fehlern in den aus den Messungen bestimmten mittleren Konzentrationen zu betrachten, wurden Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt. Dazu wurden die mittleren Konzentrationen der Wassermassen mit zufälli-

gen Änderungen in der Größenordnung der Fehler (siehe Tabelle 25) variiert und das Alter und der Anteil der jungen Komponente erneut berechnet. Für die Kerne (1) – (4) lagen die Ergebnisse innerhalb des Fehlers der ursprünglichen Berechnung. Die Kerne (5) und (6) zeigten Abweichungen von bis zu 50%. Dies erklärt sich zum Teil daher, dass der relative Fehler für die Minimum-Kerne bis zu 25% beträgt. Zum anderen werden mittlere Alter von über 20 Jahren erreicht, so dass der Bildungszeitraum (zumindest für die frühen Expeditionen) um 1960 und davor, in einem Bereich niedrigster atmosphärischer FCKW-Konzentrationen liegen (siehe Abb. 8). In diesen Bereichen resultieren aus kleinen Variationen der gemessenen Konzentrationen große Änderungen in den berechneten Parametern.

Im Weiteren liegt das Hauptaugenmerk auf den beiden tiefen Kernen erhöhter FCKW-Konzentrationen. Hierbei handelt es sich um den Einstrom von PBBW in das westliche Weddellmeer (südlicher Kern), sowie um den tiefen Ausstrom von im westlichen Weddellmeer gebildeten Boden- und Tiefenwasser (WSBW und WSDW, siehe Kapitel 2.4). Diese beiden Kerne zeigen, obwohl sie aus völlig unterschiedlichen Quellen stammen, erstaunlicherweise ein ähnliches Verhalten, d.h. sie stimmen innerhalb ihrer Fehlerbereiche sowohl bezüglich des Alters als auch des Anteils der jungen Komponente überein.

6.5 Abschätzung der Auswirkungen von Variabilität auf FCKW-Konzentrationen

Eine grundlegende Annahme der im letzten Kapitel angewendeten Methode ist, dass die FCKW-Messungen das mittlere FCKW-Feld hinreichend beschreiben, und dass der Anstieg der Konzentration überwiegend durch den transienten Charakter der FCKW-Eintragsfunktion und nicht durch Variabilität des Strömungsfeldes zustande kommt. Zeitreihen verankerter Strömungsmesser zeigen allerdings erhebliche Variabilität des Strömungsfeldes auf verschiedenen Zeitskalen (siehe Kapitel 4.8 oder z.B. [Fahrbach *et al.*, 1994b]). In diesem Kapitel soll nun abgeschätzt werden, wie groß der Einfluss solcher Variabilität auf das FCKW-Feld ist. Dazu werden drei Fallstudien durchgeführt (einmalige Störung, periodische Störung und dauerhafte Änderung), die die auftretende Variabilität simplifizieren. Dazu wird in Gl. 19 eine Störungsterm $f(t_{obs} - t)$ eingefügt und deren Auswirkungen auf die FCKW-Konzentrationen ermittelt, siehe Gl. 27.

$$c(t_{obs}) = \sum_i \gamma^i \xi^i \int_0^{\infty} f(t_{obs} - t) \cdot n(t, \tau^i, \sigma^i) \cdot c_{eq}^i(t_{obs} - t) dt \quad (27)$$

f(t_{obs} - t) Störung

Kurz- und mesoskalige Variabilität (<1 Jahr)

Um diese Art von Variabilität zu untersuchen wird der Anteil der Altersverteilung eines beliebigen Kalenderjahres (hier 1980) um 50%, 100% und 200% vergrößert bzw. auf Null reduziert, also $f(t_{obs} - t) = 0; 1,5; 2; 3$ für $t_{obs} - t = 1980$ sonst $f(t_{obs} - t) = 1$ in Gl. (27). Der zeitliche Verlauf der FCKW-Konzentrationen dieser variierten Altersverteilungen ist in Abb. 32 dargestellt.

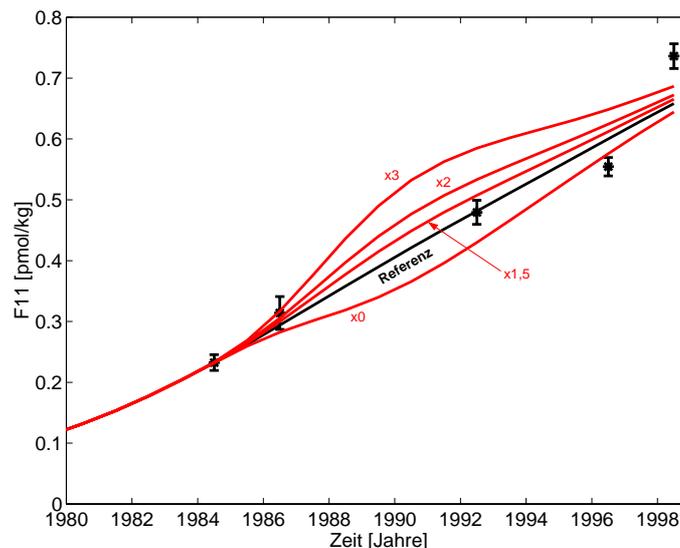


Abb. 32: Berechneter Verlauf der F11 Konzentration des südlichen Kerns. Die schwarze Linie ist mit der Referenz-Altersverteilung (der in Kapitel 6.4 bestimmten) berechnet, für die grauen Linien wurde der Anteil für das Jahr 1980 variiert mit den angegebenen Faktoren variiert..

Es ist zu erkennen, dass die Störung, die in einem Kalenderjahr aufgebracht wurde, sich auf einen relativ großen Bereich (ca. 15 Jahre) verteilt, und somit geringe Änderungen in den FCKW-Konzentrationen der einzelnen Jahre hervorruft. Erst bei Störungen in der Größenordnung von 100% sind die Abweichungen der berechneten FCKW-Konzentrationen so groß, dass sie in den Messungen signifikante Änderungen hervorrufen würden.

Periodische Variabilität auf Zeitskalen > 1 Jahr

Als Ursache von Variabilität auf der Zeitskala von mehreren Jahren wird zurzeit die Antarktische Zirkumpolare Welle (Antarctic Circumpolar Wave, ACW) diskutiert. Hierbei handelt es sich um je zwei atmosphärische Hochdruck- und Tiefdruckanomalien die jeweils in 8 – 10 Jahren den antarktischen Kontinent umrunden, also eine Variabilität einer Periode von ca. 4 – 5 Jahren erzeugen [White und Peterson, 1996]. Diese Luft-

druckanomalien sind mit Wind, Temperatur und Meereisdehnungs-Anomalien verbunden und könnten zu Variabilität in der Tiefen- und Bodenwasserproduktion führen. Um mögliche Auswirkungen diese Phänomene auf die FCKW-Konzentrationen zu untersuchen wurden die Störung in Gl. (27) als eine Sinusfunktion, die mit einer Amplitude 1 um den Mittelwert 1 und einer Periode $T = 4$ Jahre oszilliert, angesetzt, also $f(t_{obs} - t) = 1 + \sin((t_{obs} - t)/T \cdot 2\pi)$. Es ist zu beachten, dass somit Jahre doppelter und ohne Wassermassenproduktion betrachtet werden, was einer unrealistischen großen Störung entspricht. Der Verlauf der berechneten FCKW-Konzentrationen ist trotzdem ununterscheidbar zu dem der Referenz-Altersverteilung (siehe Abb. 33), deshalb wurde zum Vergleich eine weitere Störung der Periode $T = 8$ Jahre aufgebracht, die zwar zu Abweichungen in den FCKW-Konzentrationen führt die aber von der Zeitreihe nicht aufgelöst werden können.

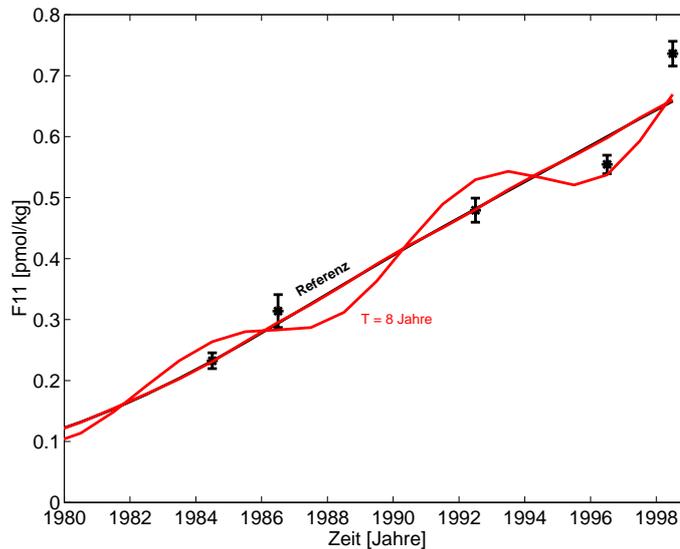


Abb. 33: Berechneter Verlauf der F11 Konzentration des südlichen Kerns. Die schwarze Line ist mit der Referenz-Altersverteilung (in Kapitel 6.4 bestimmten) berechnet, diese ist ununterscheidbar von sinusförmigen Störungen der Periode 4 um den Mittelwert 1. Zum Vergleich sind auch noch die Auswirkungen einer sinusförmigen Störung der Periode 8 dargestellt.

Der fast deckungsgleiche Verlauf der FCKW-Konzentrationen (für $T = 4$ Jahre) erklärt sich daher, dass Störungen die in einem Jahr aufgebracht werden auf ein relativ großes Zeitintervall dispergieren (siehe vorherigen Absatz). Im Gegensatz zu obigem Fall treten hier positive und negative Anomalien periodisch auf, deren Auswirkungen sich mit der Zeit aufheben. Erst bei Perioden, die deutlich größer als die der Breite der Altersverteilung sind, treten Abweichungen in den berechneten FCKW-Konzentrationen auf.

Umschlag der Wassermassenbildung

In diesem Fall sollen die Auswirkungen einer dauerhaften Änderung der Wassermassenbildung untersucht werden. Dazu wurden eine die Störung in Gl.(27) für als konstanter Faktor aufgebracht, also $f(t_{obs} - t) = 0,7; 0,9; 1,1$ und $1,3$ für $t_{obs} - t < 1980$. Die Auswirkungen eines solchen Umschlages der Wassermassenproduktion im Vergleich zur Referenz-Altersverteilung sind in Abb. 34 dargestellt:

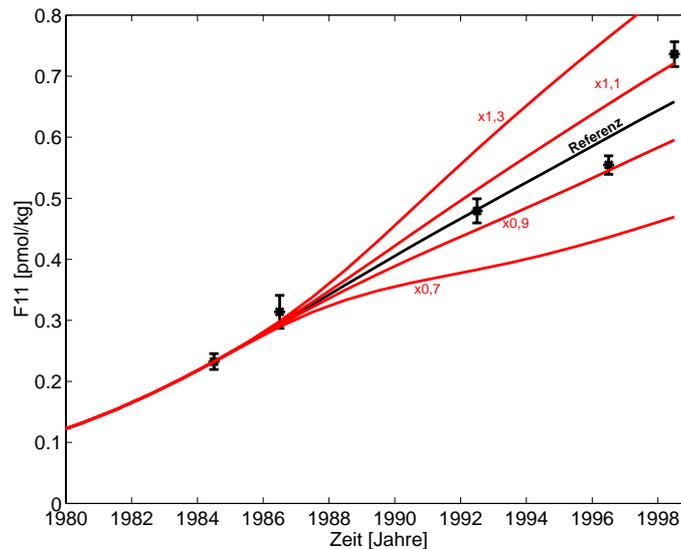


Abb. 34: Berechneter Verlauf der F11 Konzentration des südlichen Kerns. Die schwarze Linie ist mit der Referenz-Altersverteilung (in Kapitel 6.4 bestimmten) berechnet, für die grauen Linien wurden alle Anteile seit 1980 mit den angegebenen Faktoren versehen.

Es ist zu erkennen, dass eine dauerhafte Veränderung der Wassermassenbildung von größer als 10% zu signifikanten Änderungen in den FCKW-Konzentrationen führt. Dieses Verhalten erklärt sich daher, dass sich die einzelnen Anteile der Abweichungen addieren. Die resultierende Veränderung ist in der Größenordnung der aufgebrachten Störung.

Fazit

Die mittels Altersverteilungen ermittelten FCKW-Konzentrationen reagieren sehr träge auf Störungen. Erst bei einmaligen Störungen oder Störungen großer Periode ($T > \sigma$) in der Größenordnung von 100% sind Änderungen im Konzentrationsverlauf signifikant. Dieses Verhalten entspricht den Erwartungen, da die Ausbreitung von Tracer durch Advektion **und** Diffusion bestimmt ist, und sie somit eine integrative Größe darstellen. Aufgrund dieses Befundes sind FCKW-Messung nicht geeignet, Aussagen über die Variabilität des Ozeans zu gewinnen, sie stellen vielmehr ein laufendes Mittel des Eintrages dar. Im Gegensatz dazu, rufen relativ kleine dauerhafte Störungen ($\approx 10\%$) Änderungen in den

FCKW-Konzentrationen hervor. Daraus folgt, dass ein solcher Umschlag der Wassermassenbildung durch FCKW-Messungen zu beobachten gewesen wäre und somit ausgeschlossen werden kann. Daher scheint die Annahme, dass FCKW-Felder jeweils die mittlere Situation darstellen als gerechtfertigt.

6.6 Berechnung des Transportes von jungem Wasser durch den Null-Meridian-Schnitt

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, wurde der gesamte Transport des Weddellwirbels senkrecht zum Null-Meridian-Schnitt zu ca. 60 Sv berechnet [*Schröder und Fahrbach, 1999*]. In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 3.4 entwickelten Methoden auf die in Kapitel 6.4 bestimmten Parameter angewandt, um den Anteil frisch belüfteten Wasser an diesen 60 Sv zu berechnen.

Die Berechnung der Transporte erfolgt für die beiden tiefen Kerne (1) und (2) jeweils in zwei Gebieten. Zunächst nur für die in Kapitel 6.1 definierten "inneren Kerne". Aus dem Strömungsfeld und FCKW-Feld (Abb. 22 und Abb. 21) ist ersichtlich, dass sich die tiefen Kerne nicht auf den relativ schmalen Bereich der höchsten Konzentrationen beschränken, sondern sich über ein größeres Gebiet erstrecken. Daher wird die Berechnung des Transportes anschließend auf diese "gesamten Kerne" ausgedehnt. Diese werden definiert durch die Stromumkehr des Weddellwirbels bei ca. 61°S entsprechend 950 km Distanz (siehe Abb. 22), dem Verlauf der 0,25 pmol/kg F11-Isolinie (siehe Abb. 21), sowie nach oben durch das F11 Minimum am antarktischen Kontinent (südlicher Kern) beziehungsweise am Mittel-Atlantischen-Rücken (nördlicher Kern). Zum Vergleich wird außerdem der Transport im LCDW-Bereich aus der Kombination des ACC-Kerns (3) und Sattelpunkt-Kerns (4) berechnet, obwohl dieser vom Geschwindigkeitsfeld nicht vollständig erfasst ist (siehe Abb. 22 und Abb. 21).

- lokale Methode

Zunächst werden beide Felder (FCKW- und Strömungsfeld) auf dasselbe regelmäßige Gitter mittels einer objektiven Analyse (Kriging) interpoliert (17 km horizontal und 60 m vertikal). Die Integration in Gl. (23) wird dann durch eine Summation über diese Gitter angenähert. Mit dieser Vorgehensweise liefert die lokale Methode (Kapitel 3.4.1) für die inneren Kerne die in Tabelle 26 dargestellten Ergebnisse. In der zweiten Spalte stehen die aus Gl. (23) berechnete FCKW-Transporte. Hierzu wurde das Strömungsfeld der 1996er Daten (Abb. 22) mit den FCKW-Daten desselben Jahres (Abb. 21) gefaltet. In der dritten (fünften) Spalte sind die nach Gl. (20) mit $t_{\text{obs}} = t_0$ berechnete Oberflächenkonzentration zum Bildungszeitpunkt der beobachteten jungen Komponente ohne (mit) Berücksichtigung

der Sättigung dargestellt. Für diese Berechnungen wurden die in Tabelle 25 beschriebenen Parameter der Altersverteilung verwendet, außerdem wurde von einem Salzgehalt von 34,6 psu und einer Temperatur von $-1,9^{\circ}\text{C}$ (Oberflächengefrierpunkt) ausgegangen. Da die Sättigung nur als ein Faktor eingeht, unterscheiden sich die beiden Spalten genau um diesen Prozentsatz. In den Spalten 4 und 6 sind die jeweils resultierenden Transporte T_v frisch ventilierten Wassers nach Gl. (24) beschrieben.

innerer Kern	F_{FCKW} [Sv·pmol/kg]	$c_0(t_0)$ für $\xi=1$ [pmol/kg]	T_v für $\xi=0,6$ [Sv]	$c_0(t_0)$ für $\xi=0,6$ [pmol/kg]	T_v für $\xi=0,6$ [Sv]
südlicher Kern	$-2,2 \pm 0,7$	$5,6 \pm 0,6$	$-0,4 \pm 0,15$	$3,3 \pm 0,3$	$-0,7 \pm 0,2$
nördlicher Kern	$3,1 \pm 1$	$5,3 \pm 0,6$	$0,6 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,4$	$1,0 \pm 0,4$

*Tabelle 26: Transport frisch belüfteten Wassers der **inneren** tiefen Kerne. Fehler wurden nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz bestimmt. Westwärtiger Transport wird negativ gerechnet.*

Es ist zu erkennen, dass der Fehler der Transportberechnungen vom Fehler des Strömungsfeldes bestimmt wird. Dieser ist in der Größenordnung 30%, während die auftretenden Fehler der FCKW-Messungen in der Größenordnung 10% liegen.

Um die lokale Methode auf den "gesamten" Kern anwenden zu können, muss auch die Oberflächenkonzentration der jungen Komponente $c_0(t_0)$ dieses Bereiches abgeschätzt werden. Dazu wird hier angenommen, dass sich im Außenbereich des Kerns zwar der Anteil der jungen Komponente ändert, die Altersverteilung ansonsten aber im Wesentlichen konstant ist. Unter dieser Annahme kann die gesuchte Oberflächenkonzentration mit den gleichen in Tabelle 25 angegebenen Parameter berechnet werden. In Tabelle 27 sind die Ergebnisse analog zu Tabelle 26 dargestellt.

gesamter Kern	F_{FCKW} [Sv·pmol/kg]	$c_0(t_0)$ für $\xi=1$ [pmol/kg]	T_v [Sv]	$c_0(t_0)$ für $\xi=1$ [pmol/kg]	T_v für $\xi \neq 1$ [Sv]
südlicher Kern	-7,6±2,3	-5,6±0,5	-1,4±0,4	-3,3±0,4	-2,3±0,7
nördlicher Kern	8,6±2,6	5,3±0,6	1,6±0,6	3,2±0,4	2,7±0,8
Sattelpunkt + ACC Kern	6,9±2	7,7±0,2	0,9±0,3	5,4±0,1	1,3±0,4

Tabelle 27: Transport frisch belüfteten Wassers der **gesamten** tiefen Kerne sowie der Kombination aus Sattelpunkt- und ACC-Kern.

Da das Strömungsfeld als stationär angenommen wird, können auch die Tracer-Verteilungen der anderen Expeditionen mit dem 1996er Strömungsfeld gefaltet werden. Damit existiert eine Möglichkeit, die obigen Berechnungen mit nahezu unabhängigen Daten zu überprüfen. In Tabelle 28 sind die Transporte ventilierten Wassers (unter Berücksichtigung der Sättigung) für alle vollständigen Schnitte (AJAX, ANT X, ANT XIII und ANT XV) angegeben. Die letzte Spalte gibt den mittleren Transport und den mittleren Fehler an, wobei der nördliche Kern der AJAX-Expedition aufgrund des großen Fehlers nicht verwendet wurde. Dieser Fehler entsteht aufgrund der großen Änderungen der atmosphärischen Gehalte der FCKWs in der Zeit der Wassermassenbildung um 1970.

gesamter Kern	AJAX [SV]	ANT X/4 [SV]	ANT XIII/4 [SV]	ANT XV/4 [SV]	mittlerer Transport [Sv]
südlicher Kern	-2,2±1	-2,3±0,8	-2,3±0,7	-2,7±0,8	-2,4±0,8
nördlicher Kern	3±2	2,6±0,8	2,7±0,8	2,9±0,9	2,7±0,8
Sattelpunkt+ ACC Kern	1,1±0,4	1,3±0,4	1,3±0,4	1,3±0,4	1,3±0,4

Tabelle 28: Transport von ventilertem Wasser innerhalb der **gesamten** Kerne durch den Null-Meridian-Schnitt.

Im Gegensatz zu den Berechnungen des Alters der klassischen Methoden (Kapitel 6.3) stimmen diese Ergebnisse im Rahmen der Fehler sehr gut überein. Dieses kann auch als Hinweis auf die Zuverlässigkeit der Methode betrachtet werden. Allerdings ist für die beiden tiefen Kerne eine leichte Zunahme mit der Zeit in den Transporten zu sehen. Der Grund hierfür, könnte der in Kapitel 3.3.2 beschriebene Fehler bei der Anpassung der

Altersverteilung sein, wonach bei den jüngeren Messungen die Altersverteilung eine zu kleine FCKW-Konzentration wiedergibt. Da bei der Berechnung des Transportes diese Konzentration im Nenner steht geht dieser Effekt zumindest in die richtige Richtung.

-regionale Methode

Die regionale Methode liefert die in Tabelle 29 dargestellten Ergebnisse a) innerer Kern; b) gesamter Kern. In der zweiten Spalte sind die Wassertransporte Gl. (22) des jeweiligen Kerns dargestellt. Mit den in Kapitel 6.4 berechneten Anteilen (Spalte 3 ohne; Spalte 5 mit Berücksichtigung der Sättigung; Tabelle 21) kann der Transport jungen Wassers mit Gl. (22) berechnet werden, in Spalte 4 ohne Berücksichtigung der Sättigung; in Spalte 6 mit Berücksichtigung der Sättigung.

a)

innere Kerne	Wassertransport	Anteil [%]	Transport jungen Wassers für $\xi=1$	Anteil [%]	Transport jungen Wassers für $\xi=0,6$
südlicher Kern	$-4,6 \pm 1,4$ Sv	12 ± 3	$-0,6 \pm 0,2$ Sv	20 ± 5	$-0,9 \pm 0,3$ Sv
nördlicher Kern	$7,1 \pm 2,2$ Sv	14 ± 3	$1,0 \pm 0,3$ Sv	23 ± 5	$1,6 \pm 0,5$ Sv

b)

gesamte Kerne	Wassertransport	Anteil [%]	Transport jungen Wassers für $\xi=1$	Anteil [%]	Transport jungen Wassers für $\xi=0,6$
südlicher Kern	-21 ± 6 Sv	12 ± 3	$-2,5 \pm 0,8$ Sv	20 ± 5	-4 ± 2 Sv
nördlicher Kern	25 ± 8 Sv	14 ± 3	$3,5 \pm 1$ Sv	23 ± 5	6 ± 2 Sv
Sattelpunkt ACC-Kern	23 ± 7 Sv	$4,5 \pm 1$	$1,0 \pm 0,3$ Sv	6 ± 1	$1,4 \pm 0,4$ Sv

Tabelle 29: Transport von ventilertem Wasser im inneren (a) und gesamten (b) Kern durch den Null-Meridian berechnet mit dem regionalen Ansatz.

Auch hier ist zu erkennen, dass der Fehler der Transportberechnungen überwiegend vom Fehler des Strömungsfelds bestimmt wird.

Während in der lokalen Methode bei der Ausdehnung auf den gesamten Kern das Alter als konstant angenommen wurde und die niedrigeren FCKW-Konzentrationen im Außenbereich durch geringere Anteile der jungen Komponente erklärt worden sind, wird hier die

entgegengesetzte Annahme getätigt: Der Anteil der jungen Komponente ist konstant über den gesamten Bereich und die niedrigeren FCKW-Konzentrationen sind das Resultat höherer Alter im Außenbereich.

Vergleich der beiden Methoden

Der Vergleich von Tabelle 26 mit Tabelle 29a zeigt, dass die beiden Methoden für die inneren Kerne innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmen. Obwohl beide Methoden nicht völlig unabhängig sind, kann dieses Ergebnis als Erhärtung dieser Methoden betrachtet werden.

Die Erweiterung der Methoden auf den gesamten Kern ist mit entgegengesetzten Annahmen verbunden. So stellen diese beiden Methoden die Extremfälle der möglichen Erweiterung auf den gesamten Kern dar. Der Vergleich der Ergebnisse Tabelle 28 (lokale Methode) und Tabelle 29b (regionale Methode) zeigt dann auch deutliche Unterschiede. Der Transport des südlichen Kerns ist bei der Verwendung der regionalen Methode um ca. 45%, der des nördlichen sogar 58% größer.

Die Annahme eines konstanten Alters und einer variablen Verdünnung (lokale Methode) erfordert eine Zumischung von altem Wasser, die am Rand größer ist als im Zentrum. Dies entspricht den Erwartungen für die Ausbreitung eines advektiven Kerns. Die Annahmen der regionalen Methode scheinen weniger plausibel. In advektiven Kernen erfordert die Aufrechterhaltung eines starken Altersgradienten eine starke laterale Stromscherung ohne Mischung. Deshalb werden im Weiteren die Ergebnisse der lokalen Methode (Tabelle 28) verwendet.

6.7 Zusammenfassung

Für Expeditionen zwischen 1984 und 1998 wurden in diesem Kapitel zunächst Kerne extremaler FCKW-Konzentration definiert und mittlere FCKW-Konzentrationen berechnet. Für jeden Kern wurde die Entwicklung der Konzentration mit der Zeit betrachtet. Mittels eines Minimierungsprinzips wurde an diese Konzentrationen eine Altersverteilung angepasst, so dass die Abweichungen den Messungen und den aus der Altersverteilung berechneten FCKW-Werten minimal wurden. Aus dieser Anpassung folgten die ozeanographisch interessanten Parameter Alter und Anteil der jungen (FCKW-haltigen) Komponente, die in Tabelle 25 zusammengefasst wurden. Aus diesen Ergebnissen wurde im zweiten Teil der Auswertung in Kombination mit dem Strömungsfeld der Transport ventilierten Wassers durch den Schnitt der tiefen Kerne und des LCDW-Bereichs berechnet. Hierfür wurden zwei ähnliche Methoden vorgestellt, wobei sich die lokale Methode als

die sinnvollere herausstellte. Ihre Ergebnisse sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Die bei der Berechnung des Transportes auftretenden Fehler sind größtenteils durch die Unsicherheiten des Strömungsfelds hervorgerufen.

7 Auswertung des Weddellmeer-Schnittes

Das Hauptaugenmerk dieses Kapitels liegt auf den beiden Kernen erhöhter FCKW-Konzentrationen an den Rändern des Schnittes, dem nördlichen Kern an der Antarktischen Halbinsel sowie dem südlichen Kern am kontinentalen Abhang der Antarktis (siehe Abb. 7). Auf dem Weddellmeer-Schnitt liegt keine ausreichende Zeitreihe für die Anpassung einer Altersverteilung vor, daher wird das mittlere Alter der jungen Komponente auf andere Weise abgeschätzt, wobei diese Abschätzung nur zur Bestimmung der FCKW-Konzentration zur Zeit der Wassermassenbildung dient. Dabei wird keine Altersverteilung verwendet, dieses Vorgehen entspricht aber dem des größten Teils der bisherigen ozeanographischen Tracerauswertung.

7.1 Definition der Wassermassen-Kerne auf dem Weddellmeer-Schnitt

Auf dem Weddellmeer-Schnitt werden wieder der nördliche und der südliche Kern betrachtet und definiert. Da auf diesem Schnitt keine Altersverteilung angepasst werden muss, ist es nicht nötig zwischen dem "inneren" und dem "gesamten" Kern zu unterscheiden.

- nördlicher Kern

Der nördliche Kern wurde 1996 und 1998 beprobt. In beiden Datensätzen herrscht am gesamten Hang der Antarktischen Halbinsel eine Struktur hoher, aber heterogener FCKW-Konzentrationen vor (siehe Abb. 23). Diese Struktur deutet auf verschiedene Quellen oder verschiedene Mischungsprozesse im südwestlichen Weddellmeer hin (siehe Kapitel 5.2). Das MWDW separiert in ca. 600 m Tiefe diese Struktur in einen oberen und einen unteren Bereich. Die oberen 600 m sind auf dem nördlichen Schelf der Antarktischen Halbinsel belüftet worden, der untere Bereich hoher FCKW-Konzentrationen wurde auf dem Larsen- bzw. dem Filchner-Ronne-Schelf gebildet. Da diese beide Quellen WSBW mit ähnlichen Eigenschaften bilden (in den FCKW-Daten sind sie ununterscheidbar), wird der gesamte Bereich unterhalb von 600 m Tiefe zu einem Kern zusammengefasst. Dieser ist durch folgende Eigenschaften begrenzt:

- Distanz von der Spitze der Antarktischen Halbinsel (Beginn des Schnittes bei ca. 63°S, 53°W) < 800 km
- Tiefe > 600 m
- F11 Konzentrationen > 0,25 pmol/kg

- südlicher Kern

Der südliche Kern wurde nur 1996 beprobt. Am Hang des antarktischen Kontinents ist ein Gebiet erhöhter FCKW-Konzentrationen zu erkennen. Dieses Gebiet markiert den südlichen Kern (siehe Abb. 23) und wird definiert durch:

- Distanz von der Spitze der Antarktischen Halbinsel (Beginn des Schnittes bei ca. 63°S, 53°W) > 1200 km
- Tiefe > 2600 m
- F11 Konzentrationen größer 0,25 pmol/kg

7.2 Abschätzung der Alter der jungen Komponenten

Die in Kapitel 6.2 durchgeführte Methode zur Berechnung der Alters und der Anteile der jungen Komponenten ist auf dem Weddellmeer-Schnitt aufgrund des Fehlens einer FCKW-Zeitserie nicht durchführbar. Daher können die Alter nur abgeschätzt werden. Diese Alter gehen nur in die Berechnung der FCKW-Oberflächenkonzentration zur Zeit der Bildung ein. Die jährliche Variation dieser Konzentrationen ist in den letzten 20 Jahren (der in Frage kommende Bereich von Altern) relativ gering (siehe Abb. 8), so dass selbst eine relativ grobe Abschätzung zu akzeptablen Fehlern führt.

7.2.1 Abschätzung des Alters der jungen Komponente des nördlichen Kerns an der Antarktischen Halbinsel

Das Alter einer Wassermasse setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, der Advektionszeit und der Verweilzeit auf dem Schelf. Letztere wurde für das HSSW des Filchner-Ronne-Schelfs mit 5 ± 3 Jahre abgeschätzt (siehe Kapitel 2.4). Die Advektionszeit wurde von *Schodlok* [2002] mittels eines Modells (BRIOS) zu ca. 2,5 Jahre bestimmt. Dieses Ergebnis wird gestützt durch eine Bestimmung der Advektionszeit in der Größenordnung von 2,5 – 3 Jahren mittels F11/Tritium Verhältnisse [*Schlosser et al.*, 1991]. Somit lässt sich das Alter der jungen Komponente an der Spitze der Antarktischen Halbinsel zu $7,5 \pm 3$ Jahren abschätzen. Dieses Ergebnis ist konsistent mit einer Abschätzung mittels FCKW-Tritium-Verhältnissen von 7 ± 2 Jahren [*Mensch et al.*, 1998b]. Für die ANT XIII/4 Expedition (1996) ist der Bildungszeitraum der jungen Komponente daher zwischen 1986 und 1992. Dieser Zeitraum ist mit atmosphärischen FCKW-Gehalten zwischen 210 und 260 ppt [*Walker et al.*, 2000] verbunden, was mit einem Unsicherheitsbereich von ca. $\pm 10\%$ entspricht. Unter Berücksichtigung einer Sättigung von 60% (siehe Kapitel 6.2)

berechnet sich die Konzentration der jungen Komponente zu $4,2 \pm 0,5$ pmol/kg. Für die ANT XV/4 Expedition (1998) ergibt die gleiche Rechnung $4,4 \pm 0,4$ pmol/kg.

7.2.2 Abschätzung des Alters der jungen Komponente des südlichen Kerns

Für die Abschätzung des mittleren Alters der jungen Komponente des südlichen Kerns werden die Ergebnisse für den Null-Meridian extrapoliert. Da die Topographie unterhalb von 2000 m Tiefe im Bereich von 0° - 15° W keine größeren Unregelmäßigkeiten aufweist, ist die Annahme, dass sich der tiefe Kern mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegt, angemessen. Somit kann über die Berechnung der Geschwindigkeit das Alter der jungen Komponente im Kern abgeschätzt werden.

Das Alter der Wassermasse am Null-Meridian ist $12,5 \pm 3$ Jahre. Die Quelle liegt in der Prydz Bucht bei ca. 80° O. Zur Berechnung der Geschwindigkeit ist nicht das Alter, sondern die Transferzeit ausschlaggebend, so dass vom Alter die Verweilzeit auf dem Schelf abgezogen werden muss (siehe Kapitel 2.4). Wird eine Verweilzeit auf dem Schelf von 4 ± 4 Jahren²³ angenommen, ergibt sich die Advektionszeit zu $9,5 \pm 5$ Jahren. Somit berechnet sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu ca. 8,5 Längengrade/Jahr. Die Fehlergrenzen liegen bei 5,5 und 20 Längengrade/Jahr. Da die weitere Ausbreitung nach Westen auf der gleichen Breite erfolgt, kann diese Geschwindigkeit auch weiter im Westen angenommen werden. Die 14 Längengrade zum Schelf vor Kapp Norvegia erfordern daher eine Alterszunahme von $1,5 \pm 1$ Jahre. Somit kann das mittlere Alter der jungen Komponente des südlichen Kerns auf dem Weddellmeer-Schnitt mit $14,0 \pm 3$ Jahren abgeschätzt werden. Unter der Annahme einer Sättigung von 60% (siehe Kapitel 6.2) ist die F11 Konzentration der jungen Komponente dieses Kerns $2,8 \pm 0,5$ pmol/kg.

7.3 Berechnung des Transportes von ventilertem Wasser in den Kernen

In diesem Kapitel wird zunächst eine vorläufige Berechnung des Transportes ventilerten Wassers vorgenommen. Anschließend wird die Einmischung von ventilertem Wasser des südlichen in den nördlichen Kern diskutiert, die eine Neuberechnung des Transportes erfordert.

²³ da der Amery-Schelf deutlich kleiner ist als der Filchner-Ronne-Schelf, wird die Verweilzeit niedriger angesetzt. Zur Sicherheit ist das Fehlerintervall größer angenommen.

7.3.1 Vorläufige Berechnung

Mit den in Kapitel 7.2 bestimmten Ergebnissen sowie der Kombination von Strömungsfeld und FCKW-Feld, lässt sich der Transport jungen Wassers senkrecht zum Schnitt in den Kernen mittels der lokalen Methode (siehe Kapitel 3.4.2) berechnen. Diese sind in Tabelle 30 dargestellt:

Kern	F_{FCKW} [Sv·pmol/kg]	$c_0(t_0)$ für $\xi=0,6$ [pmol/kg]	T_v für $\xi=0,6$ [Sv]
südlicher Kern	-5,2±1,6	3,1±0,5	-1,7±0,6
nördlicher Kern 1996	10,2±3	4,2±0,5	2,5±0,8
nördlicher Kern 1998	9,7±3	4,4±0,4	2,2±0,7

Tabelle 30: Transport frisch belüfteten Wasser in den tiefen Kernen. Westwärtiger Transport wird negativ gerechnet.

Die beiden Berechnungen des nördlichen Transportes stimmen innerhalb der Fehlergrenzen überein. Der Mittelwert dieser Berechnungen ist $2,4 \pm 0,8$ Sv. Als Fehlerabschätzung wird der mittlere Fehler der beiden Bestimmungen verwendet, da sich der Fehler hauptsächlich auf das in beiden Berechnungen identische Strömungsfeldes zurückzuführen lässt.

7.3.2 Verbleib von PBBW im Weddellmeer

Im südlichen Kern strömen ca. 5,2 Sv·pmol/kg FCKW (oder 1,7 Sv ventiliertes PBBW) in das abgeschlossene südwestliche Weddellmeer. Für die Berechnung des Transportes des jungen Wassers des nördlichen Kern ist es nötig zu wissen, ob und wieviel von diesem Wasser eingemischt wird. Um die Einmischung von belüfteten PBBW in den nördlichen Kern abzuschätzen, müssen zwei Effekte berücksichtigt werden:

- Retardation
- Erosion; ventiliertes Wasser aus dem südlichen Kern belüftet das innere Weddellmeer

Die Retardation berücksichtigt die Wegstrecke von Kapp Norvegia zur Spitze der Antarktischen Halbinsel, für die ein Wasserpaket eine gewisse Zeit braucht. D.h. ein Wasserpaket, das sich 1996 an der Spitze der Halbinsel befindet, muss es zu einer früheren Zeiten

Kapp Norvegia passiert haben. Aufgrund des transienten Eintrags besaß es zu diesem Zeitpunkt eine kleinere FCKW-Konzentration und begrenzt somit den effektiv zur Einmischung zur Verfügung stehenden FCKW-Fluss. Als Erosion wird die Belüftung des inneren Weddellmeeres durch PBBW bezeichnet. Auch dieser Effekt führt zu einer Verminderung des zur Verfügung stehenden FCKW-Flusses. Im Folgenden werden diese Effekte abgeschätzt:

Abschätzung der Retardation

Wird die in Kapitel 7.2.2 abgeschätzte Ausbreitungsgeschwindigkeit der südlichen jungen Komponente auch im südwestlichen Weddellmeer verwendet, folgt eine Transportzeit von ca. 4 Jahren von Kap Norvegia zur Spitze der Antarktischen Halbinsel. Nicht berücksichtigt ist hierbei, dass der Küstenstrom einen "Umweg" aufgrund der Topographie des Weddellmeeres macht. Dieser Effekt führt zu einer größeren Transportzeit, so dass die Annahme von 4 Jahren eine untere Grenze darstellt. Somit muss zur Berechnung des Einflusses des PBBW im nördlichen Kern der FCKW-Transport der Jahre 1992 (für die ANT XIII-Daten) und 1994 (für die ANT XV-Daten) abgeschätzt werden.

Der FCKW-Transport zu diesen Zeiten wird anhand der Zeitserie auf dem Null-Meridian abgeschätzt. Aus Abb. 26 ist ersichtlich, dass die mittlere Kernkonzentration auf dem Null-Meridian innerhalb des Zeitraumes 1992 – 1996 um ca. 23% und 1994 – 1996 um ca. 11% gestiegen sind. Für einen stationären Ozean gilt diese Änderungsrate auch für den FCKW-Transport, somit stehen 1992 (1994) maximal 77% (89%) des berechneten FCKW-Flusses von 1996 zur Verfügung. Falls das gesamte PBBW in den nördlichen Kern einmischt, wären dieses 4,0 Sv·pmol/kg (4,6 Sv·pmol/kg).

Abschätzung des FCKW-Flusses zur Belüftung des Weddellmeeres:

FCKW-Messungen vor dem Larsen-Schelfeis [*Mensch et al.*, 1998a] und Silikat Verteilungen [*Hoppema et al.*, 1998], haben gezeigt, dass ein "kleiner" Anteil PBBW in den nördlichen Kern einmischen muss. Auf der anderen Seite wurde von *Hoppema et al.* [2001] anhand von FCKW- und Silikat-Daten eine Belüftung des gesamten tiefen inneren Weddellmeeres durch PBBW postuliert. Diese Belüftung erfordert eine starke Mischung quer zum Küstenstrom, die auch durch den Vergleich des südlichen Kerns am Null-Meridian und vor Kapp Norvegia nahe gelegt wird. Während sich der Kern bei 0° eng an den kontinentalen Hang anschmiegt, die laterale Ausdehnung ist ca. 400 km, verdoppelt sich diese Ausdehnung bis zum Weddellmeer-Schnitt auf ca. 800 km (siehe Abb. 24 und Abb. 23). Für die Belüftung des tiefen westlichen Weddellmeeres spricht außerdem die zunehmende westliche Ausdehnung erhöhter FCKW-Konzentrationen auf dem Weddellmeer-Schnitt (siehe Kapitel 5.2 und [*Hoppema et al.*, 2001]). Um diese Belüftung abzu-

schätzen, werden die FCKW-Konzentrationen in dem Dichtebereich zwischen $\sigma_2 = 37,19 \text{ kg/m}^3$ und $\sigma_4 = 46,13 \text{ kg/m}^3$ im zentralen Weddellmeer ($32 - 46^\circ\text{W}$) betrachtet. In der Zeit von 1996 – 1998 nehmen die Konzentrationen in diesem Bereich von ca. 0,17 pmol/kg auf ca. 0,24 pmol/kg zu (siehe Kapitel 5.2). Es ist plausibel, dass diese Zunahme nicht nur auf dem Schnitt stattfindet, sondern auch nördlich und südlich davon. Wird das Gebiet der Zunahme mit einer Kugelschicht zwischen 53°W und 20°W sowie 62°S und 72°S abgeschätzt, ergibt sich eine Fläche von $1,6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. Die Schichtdicke ist ca. 2000 m, so dass das belüftete Volumen V zu ca. $3,2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ abgeschätzt werden kann. Eine Zunahme Δc von ca. 0,07 pmol/kg innerhalb von 2 Jahren ($t \approx 6 \cdot 10^7 \text{ s}$) in diesem Volumen, benötigt also einen FCKW-Fluss F_{FCKW} von:

$$F_{\text{FCKW}} = \frac{\Delta c \cdot V}{t} \approx 3,7 \text{ Sv} \cdot \text{pmol/kg}$$

Aufgrund diese Abschätzung kann angenommen werden, dass ein großer Teil (ca. 2/3) des im südlichen Kern einströmenden PBBW das zentrale Weddellmeer belüftet und somit nur ca. 1/3 diese Wassers (entsprechend einem FCKW-Fluss von ca. 1,5 Sv·pmol/kg) in den nördlichen Kern einmischt. Wird außerdem die Retardation und die (hier nicht diskutierte) Möglichkeit direkter Rezirkulationen berücksichtigt, die zusammen eine Reduktion des FCKW-Flusses von ca. 20% bewirken, kann der (gerundete) FCKW-Fluss aufgrund der Einmischung von PBBW auf ca. 1 Sv·pmol/kg (für beide Jahre) abgeschätzt werden. Aufgrund der groben Abschätzungen, besonders die der Belüftung des tiefen zentralen Weddellmeeres, kann keine Fehlerberechnung durchgeführt werden, daher wird der Fehler mit $\pm 1 \text{ Sv} \cdot \text{pmol/kg}$ angenommen.

7.3.3 Endgültige Berechnung

In der in Kapitel 7.3.1 durchgeführten Berechnung des Transports jungen Wassers im nördlichen Kern wurde davon ausgegangen, dass der gesamte FCKW-Fluss aufgrund von Quellen im südwestlichen Weddellmeer zurückzuführen ist. Das mittlere Alter dieser Komponente wurde mit ca. 7,5 Jahren abgeschätzt. Aus den Überlegungen aus Kapitel 7.3.2 folgt, dass ca. 1 Sv·pmol/kg aus dem südlichen Kern stammen. Dieser FCKW-Fluss muss bei der Berechnung des im südwestlichen Weddellmeer ventilierten Wassers abgezogen werden. In Tabelle 31 ist die Berechnung des Transports neu durchgeführt worden. Dort ist außerdem der theoretische Transport ventilierten PBBW, der aus den 1 Sv·pmol/kg und einem mittleren Alter von 18 Jahren (13,5 bis zum Null-Meridian + ca. 4 Jahre zur Halbinsel) angegeben.

Kern	F_{FCKW} [Sv·pmol/kg]	$c_0(t_0)$ für $\xi=0,6$ [pmol/kg]	T_v für $\xi=0.6$ [Sv]
südlicher Kern (wie oben)	-5,2±1,6	3,1±0,5	-1,7±0,6
PBBW an der Halbinsel	1±1	2,5	0,4±0,4
nördlicher Kern (1996)	9,2±3,2	4,2±0,5	2,2±0,8
nördlicher Kern (1998)	8,7±3,2	4,4±0,4	2,0±0,7

Tabelle 31: Transport frisch belüfteten Wassers in den tiefen Kernen unter Berücksichtigung des Einmischen von PPWB in den nördlichen Kern. Westwärtiger Transport wird negativ gerechnet.

Der Mittelwert des Transports jungen Wassers im nördlichen Kern ist damit $2,1 \pm 0,8$ Sv. Die Berücksichtigung der Einmischung von PBBW vermindern den Transport des im Weddellmeer gebildeten jungen Wassers um ungefähr 10% (vergleiche mit Tabelle 30). Im Rahmen dieser Abschätzung sind in dem nördlichen Kern $0,4$ Sv PBBW eingemischt, wobei der Fehler 100% beträgt. Für diese Kern sind also, abweichend der in dieser Arbeit sonst üblichen Praxis, zwei junge Komponenten bestimmt worden. Die Addition dieser nordostwärtigen Transporte liefert den mittleren Gesamttransport jungen Wassers im nördlichen Kern: **$2,5 \pm 0,9$ Sv.**

8 Diskussion

In diesem Kapitel wird zunächst aus der gemeinsamen Betrachtung des tiefen südlichen Einstroms und des tiefen nördlichen Ausstroms des Weddellmeeres ein Zirkulations-Schema des jungen Wassers erstellt. Anschließend werden Produktionsraten für die Quellen in der Prydz-Bucht, dem südwestlichen und dem nördlichen Weddellmeer abgeleitet und so weit vorhanden mit Literaturwerten verglichen.

8.1 Tiefer südlicher Einstrom in das westliche Weddellmeer

Der tiefe südliche Einstrom frisch belüfteten Wassers in das westliche Weddellmeer wurde an zwei Stellen bestimmt, auf dem Null-Meridian (Kapitel 6.6) und weiter stromabwärts (ca. 15°W) auf dem Weddellmeer-Schnitt (Kapitel 7). Während der Transport durch den Null-Meridian-Schnitt $2,4 \pm 0,8$ Sv beträgt, ist er auf dem Weddellmeer-Schnitt $1,7 \pm 0,6$ Sv (ca. 75% dieses Wertes) abgesunken. Diese Verhalten entspricht den Erwartungen, da auch der gesamte Weddellwirbel in diesem Bereich ca. 50% seiner Stärke verliert (siehe [Fahrbach et al., 1994b] und [Schröder und Fahrbach, 1999]). Somit kann, obwohl die Fehlerbereiche überlappen, eine Rezirkulation in der Größe von $0,7 \pm 1,0$ Sv abgeschätzt werden. Für den südlichen Kern ergibt sich damit folgendes Strömungsbild:

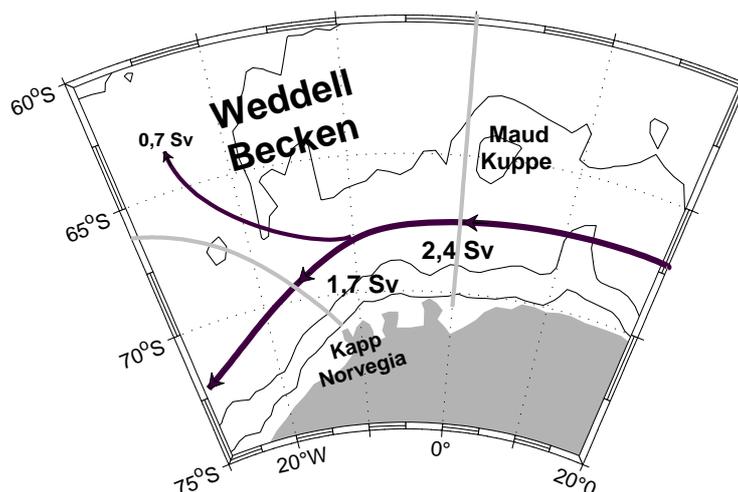


Abb. 35: Strömung des frisch belüfteten Wassers des südlichen Kerns; graue Linien stellen die Schnitte dar, die Pfeile die Strömung des frisch belüfteten Wassers

8.2 Tiefer nördlicher Ausstrom aus dem westlichen Weddellmeer

Im westlichen und südwestlichen Weddellmeer wird an mehreren Stellen auf den Schelfen Boden- und Tiefenwasser gebildet [Gordon, 1998]. Dieses Wasser strömt entlang der Antarktischen Halbinsel nach Norden. An der Spitze der Halbinsel wurde der gemeinsame Transport der jungen Komponenten dieser Quellen mit $2,1 \pm 0,8$ Sv bestimmt (siehe Kapitel 7.3.3). Zusätzlich ist ein Transport von jungem PBBW in der Größenordnung $0,4$ Sv beobachtet worden. Die weitere getrennte Behandlung dieser Wassermassen würde die Verwendung von 2 Altersverteilungen erfordern. Dieses ist aufgrund der beschränkten Datenlage nicht möglich (siehe Kapitel 3.3.2). Im Weiteren wird daher nur die Summe dieser beiden Komponenten ($2,5 \pm 0,8$ Sv) verwendet.

Das weitere Vordringen dieses Wassers nach Norden wird durch den Süd-Scotia-Rücken verhindert, der über fünf tiefe Passagen (siehe Abb. 4) verfügt, durch die im Prinzip Anteile dieses jungen Wassers aus dem Weddellmeer entkommen können. Einen weiteren Pfad zum Verlassen des Weddellmeeres stellt der Süd-Sandwich-Graben dar (siehe Kapitel 2.5). Auf dem Weg zum Null-Meridian besteht zusätzlich die Möglichkeit der Einmischung jungen Wassers aus dem südlichen Kern durch die abgeleitete Rezirkulation (siehe Kapitel 8.1) von $0,7$ Sv. Der resultierende Transport wurde auf dem Null-Meridian mit $2,7 \pm 0,8$ Sv berechnet. Im Folgenden werden das Einmischen aus dem Süden sowie die Ausgänge nach Norden zwischen der Antarktischen Halbinsel und dem Null-Meridian diskutiert.

8.2.1 Einmischen von rezirkuliertem PBBW in den nördlichen Kern

In Kapitel 8.1 wurde eine Rezirkulation von $0,7 \pm 1$ Sv jungen PBBW mit einer Dichte $\sigma_4 \approx 46,12 \text{ kg/m}^3$ nach Norden beschrieben. Im Inneren des Weddellmeeres existieren keine weiteren Messungen, so dass über den Verbleib des Wassers nur spekuliert werden kann.

Hier wird angenommen, dass dieses Wasser in den nördlichen Kern einmischt. Einen Hinweis, dass diese Einmischung tatsächlich stattfindet, kann aus dem Vergleich der FCKW-Konzentrationen des nördlichen Kerns vor Süd-Orkney und am Mittel-Atlantischen-Rücken gewonnen werden. Am Hang des Süd-Orkney-Plateaus ist 1998 oberhalb der Dichtelinie $\sigma_4 = 46,11 \text{ kg/m}^3$ nur auf einer Station (39) eine Konzentration von ca. $0,9 \text{ pmol/kg}$ gefunden wurden. Die nächste Station (38, ca. 15 km südlich) zeigte nur noch Konzentrationen um $0,3 \text{ pmol/kg}$, südlich davon wurden nur noch Konzentrationen kleiner als $0,2 \text{ pmol/kg}$ gefunden (siehe Abb. 23). Zur selben Zeit wiesen die Konzent-

rationen des gleichen Dichtehorizontes in einem Gebiet vom MAR bis ca. 200 km südlich davon, Werte über 0,3 pmol/kg auf. Wird außerdem die Transportzeit von ca. 4 Jahren berücksichtigt, ist es unwahrscheinlich, dass diese Konzentrationen von dem Kern vor Süd-Orkney erzeugt worden ist. Eine mögliche Quelle stellt rezirkuliertes PBBW dar.

8.2.2 Ausgänge

Die erste tiefe Passage des Süd-Scotia-Rückens ist die Philip-Passage (Schwellentiefe 2000 m; Breite ca. 25 km), die den nördlichen Ausgang des Powell Beckens zwischen Joinville-Insel und den Süd-Orkney-Inseln²⁴ bildet. Ältere Strömungsmesseruntersuchungen von *Nowlin und Zenk* [1988] ergaben nordwärts gerichtete Geschwindigkeiten von fast 8 cm/s in einer 120 m dicken Bodenschicht (entsprechend ca. 0,25 Sv) von Wasser mit in-situ Temperaturen $< -0,5^{\circ}\text{C}$. Auch neuere Untersuchungen lassen auf eine nordwärtige Strömung schließen [*von Gyldenfeldt et al.*, eingereicht]. Diese nordwärts gerichtete Strömung wird auch von Modellen wiedergegeben, *Schodlok et al.* [im Druck] zeigen z. B. einen Wassertransport von 2,2 Sv durch die Philip-Passage.

Auch die hier benutzten FCKW-Daten lassen auf einen Transport jungen Wassers durch die Philip-Passage schließen. Während stromaufwärts (Joinville-Insel) über den gesamten Tiefenbereich hohe FCKW-Konzentrationen (um 3 pmol/kg) zu finden sind, weisen im Gegensatz dazu die FCKW-Konzentrationen stromabwärts der Passage (Süd-Orkney) in Tiefen zwischen 500 und 2500 m ein Minimum auf (siehe Kapitel 5.2). Daraus lässt sich schließen, dass junges Wasser in diesem Tiefenbereich auf dem Weg von der Antarktischen Halbinsel zu den Süd-Orkneys den Kern verlässt. Prinzipiell kommt hierfür eine Rezirkulation nach Süden, ein Absinken oder der Ausstrom durch die Passage in Frage. Eine Rezirkulation nach Süden lässt sich ausschließen, da außerhalb des Kerns weder auf dem Weddellmeer-Schnitt noch auf dem 43°W -Schnitt erhöhte FCKW-Konzentrationen gefunden wurden. Das Absinken ist unwahrscheinlich, da nicht davon auszugehen ist, dass der gesamte Tiefenbereich innerhalb von nur ca. 7 Längengraden eine solche abwärts gerichtete Bewegung durchführt. Als einzige Möglichkeit bleibt der Ausstrom durch die Philip-Passage aus dem Weddellmeer in Richtung Norden.

Der nächste tiefe Durchlass des Süd-Scotia-Rückens ist die Orkney-Passage (3000 m). Geostrophische Untersuchungen (Referenztiefe 1500 m²⁵) von *Locarnini et al.* [1993] zeigen einen AABW Transport von 1,5 Sv durch diese Passage. Auch Modellergebnisse

²⁴ eigentlich zwischen Clarence-Insel und Signy (der westlichsten Insel der Süd Orkneys)

²⁵ die Wahl einer Geschwindigkeits-Null-Schicht scheint ungeschickt, da in dieser Region der Fluss nahezu barotrop ist.

zeigen Gesamttransporte von 5 bzw. 4 Sv durch die Passage [Naveira Garabato *et al.*, im Druck; Schodlok *et al.*, im Druck]. Sowohl in der Orkney-Passage (siehe Abb. 25a) als auch in der nordöstlichen Verlängerung der Passage, im Süd-Orkney-Trog (siehe Abb. 25b), wurden hohe FCKW-Konzentrationen gefunden, so dass geschlossen werden kann, dass junges Wasser auch durch die Orkney-Passage strömt.

Für die weiteren Passagen (Bruce-, Discovery- und Hoyer-Passage) sind keine Daten verfügbar. Die oben angesprochenen Modelle zeigen keinen oder nur sehr geringen ($<0,2$ Sv) Transport durch diese Passagen. Da diese Passagen im Vergleich mit der Orkney-Passage flachere Schwelltiefen haben (siehe Abschnitt 2.2.1) erscheinen diese Modellergebnisse einsichtig.

Im Süd-Sandwich-Graben ist WSBW und WSDW als tiefer östlicher Randstrom des Süd-Sandwich-Bogens beobachtet worden [Wüst, 1933; Roether *et al.*, 1990]. Außerdem sind in diesem Bereich erhöhte FCKW-Konzentrationen gefunden worden (siehe [Beining, 1993]). Somit kann geschlossen werden, dass junges Wasser zumindest in diesen Graben einströmt. Allerdings erreicht nur WSDW mit $\theta > -0,3^{\circ}\text{C}$ das Argentinische Becken, siehe Abschnitt 2.5 oder [Locarnini *et al.*, 1993], so dass der größere Teil zurück ins Weddellmeer fließt.

Aus der Addition der Einzeltransporte ist es möglich, den gesamten Ausstrom durch diese Passagen (und den Süd-Sandwich-Graben) abzuschätzen. Der nördliche Kern am Null-Meridian wird gebildet aus dem Zustrom des südwestlichen Weddellmeeres ($2,5 \pm 0,8$ Sv) und aus der Rezirkulation des südlichen Kerns ($0,7 \pm 1$ Sv). Auf dem Null-Meridian ist ein ostwärts gerichteter Transport jungen Wassers von $2,7 \pm 0,8$ Sv gefunden worden. Formal kann somit ein Nettotransport durch die tiefen Durchlässe von $0,5 \pm 1,5$ Sv aus dem Weddellmeer berechnet werden. Aufgrund des großen Fehlers, wegen der Summation mit drei Summanden, ist dieser Transport nicht signifikant; insbesondere können keine Aussagen über den Ausstrom der Passagen im Einzelnen getätigt werden. Allerdings liegt der Gesamtausstrom in der Größenordnung modellierter Transporte jungen Wassers ($0,5 - 1$ Sv) [Schodlok, 2002].

Für eine Gesamtbudgetierung des im Weddellmeer gebildeten jungen Wassers ist zu beachten, dass junges am nördlichen Schelf gebildetes Wasser, das in Tiefen oberhalb von 600 m auf dem Weddellmeer-Schnitt zu sehen ist, nicht betrachtet wurde. Teile dieses Wasser strömen direkt auf dem Schelf der Antarktischen Halbinsel nach Norden, um dann nach Westen die Bransfield Straße oder nach Osten in die WSC zu strömen [Whitworth *et al.*, 1994; Schodlok *et al.*, im Druck].

In Abb. 36 sind die hier diskutierten Transporte junger tiefer Wassermassen in einem Strömungsschema zusammengefasst.

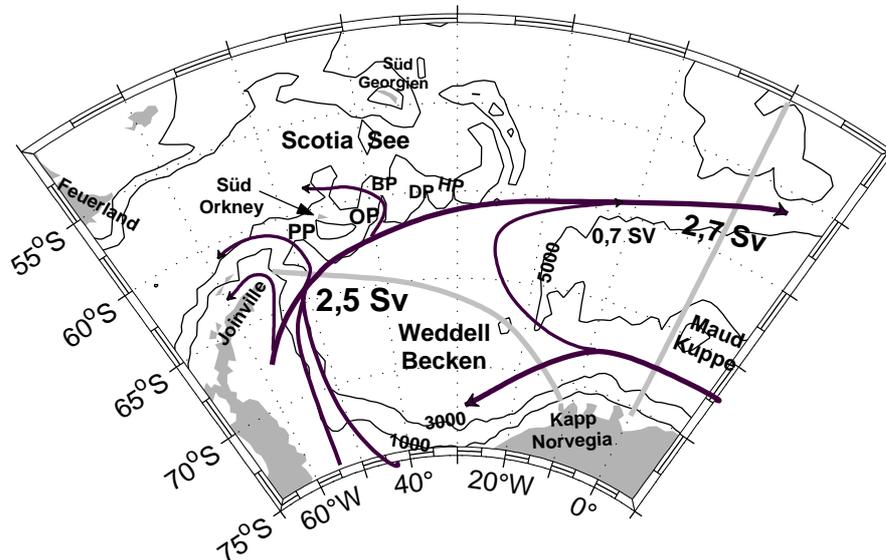


Abb. 36: Strömung des frisch belüfteten Wassers des nördlichen Kerns; graue Linien stellen die Schnitte dar, die Pfeile die Strömung des frisch belüfteten Wassers; PP = Philip-Passage, OP = Orkney-Passage, BP = Bruce-Passage, HP = Hoyer-Passage

8.3 Nördlicher Strom im LCDW Bereich

Besondere Aufmerksamkeit verdient die junge Komponente des in Kapitel 6.6 eingeführten Sattelpunkt + ACC Kerns im LCDW-Bereich. In diesem starken Strömungsband fließen ca. 8% relativ junges Wasser ($\tau \approx 3$ Jahre; siehe Tabelle 25) in Richtung Osten. In Kapitel 6.6 wurde ein Transport jungen Wassers von "nur" 1,6 Sv berechnet, allerdings beinhaltete diese Berechnung, da das Strömungsfeld nur bis ca. 55°S bekannt ist, nicht den gesamten Bereich dieser Wassermasse. Aus den FCKW-Verteilungen (1992 und 1998; Abb. 21) ist zu erkennen, dass der belüftete Kern ungefähr doppelt so groß ist und damit der Gesamttransport dieses jungen Wassers auf das Doppelte abgeschätzt werden kann. Damit würde dieser Kern eine wichtige Quelle für AABW im Weddellmeer darstellen. Da das LCDW in der Drakestraße 1992 noch weitgehend FCKW-frei war [Roether et al., 1993], ist die Quelle östlich der Drake Straße zu suchen. Hier kommen zwei in der Literatur beschriebenen Bildungsmechanismen in Betracht, die wahrscheinlich beide einen Beitrag zur jungen Komponente leisten [Patterson und Sievers, 1980]

- das Einmischen des auf dem nördlichen Schelf der Antarktischen Halbinsel belüfteten jungen Wassers [*Patterson und Sievers, 1980; Whitworth et al., 1994*], siehe vorherigen Abschnitt.
- Konvektion im offenen Ozean in der WSC [*Gordon et al., 1977; Gordon und Nowlin, 1978*] (siehe Kapitel 2.4).

Eine weitere bisher nicht beachtete Möglichkeit ist Konvektion auf dem Süd-Orkney-Schelf. Diese Konvektion wird durch die dort gefundenen niedrigen FCKW-Sättigungen (ca. 60%, siehe Abschnitt 6.2) nahe gelegt, die auf einen schnellen Austausch der Wassermassen auf dem Schelf hindeuten.

8.4 Zusammenhang von Transportraten jungen Wassers und Quellstärken

In dieser Arbeit sind Transporte frisch belüfteter Wassermassen durch zwei Schnitte im Weddellmeer bestimmt worden. Unter der Annahme dass sich diese Wassermassen in Kernen advektiv ausbreiten, stellen sie eine Schätzung der Produktionsraten der verschiedenen Quellen dar. Diese Abschätzung ist umso besser, je näher die Messungen an der jeweiligen Quelle liegen.

Die Interpretation der Transportraten an der Spitze der Antarktischen Halbinsel als Quellstärken stellt keine Schwierigkeit dar, da der Schnitt das südwestliche Weddellmeer vollständig abschließt. Außerdem sind diese Messungen unmittelbar nach der Quelle durchgeführt worden.

Die Messungen desselben Kerns stromabwärts (auf dem Null-Meridian) sind dagegen weniger geeignet die Quellstärke abzuschätzen. Der Kern wird zwar von der Topographie nach Osten geführt, aber aufgrund der Coriolis-Kraft (die auf der Südhemisphäre nach links wirkt) können Teile des Kerns durch die tiefen Durchlässe in der Topographie nach Norden abgegeben werden (siehe Kapitel 8.2.2). Außerdem ist ein Zustrom aus dem Süden diskutiert worden (Kapitel 8.2.1). Daher beschreiben diese Messungen vorwiegend den Ausstrom des Weddell-Beckens in das Enderby-Becken.

Der südliche Kern strömt am antarktischen Kontinent nach Westen, wodurch eine durch Coriolis-Kraft bewirkte Ablenkung nach links ausgeschlossen werden kann. Es ist zwar möglich, dass sich Teile des Kerns auf dem Weg von der Quelle zum Null-Meridian nach Norden an den topographischen Barrieren Gunnerus-Rücken, Astrid Rücken oder Maud Kuppe (siehe Abb. 4) abspalten. Doch solche abgespalteten Kerne sind bisher nicht

beobachtet worden. Das Einmischen ventilierten Wassers aus dem nördlichen Kern erscheint unwahrscheinlich, da die Dichte dieses Kerns deutlich größer ist als die des südlichen Kerns ($\sigma_4 \approx 46,16 \text{ kg/m}^3$ im Norden zu $\sigma_4 \approx 46,12 \text{ kg/m}^3$ im Süden, siehe Abb. 21 und Abb. 23). Somit wird hier der Transport jungen Wassers im südlichen Kern auf dem Null-Meridian als realistische Abschätzung der Bildungsrate des Amery-Schelfes (Prydz-Bucht) interpretiert.

Für das junge Wasser im LCDW-Bereich (Kapitel 8.3) existieren keine topographischen Begrenzungen nach Norden oder Süden. Allerdings zeigen die längeren Schnitte auf dem Null-Meridian (AJAX, ANT X/4 und ANT XV/4, Abb. 21) nördlich und südlich dieses Kerns in den entsprechenden Tiefen- und Dichtehorizonten jeweils die niedrigsten Werte. Somit wird auch hier der Transport als realistische Abschätzung der Quellstärke der Quellen an der Antarktischen Halbinsel bzw. WSC angenommen. Damit können drei Quellstärken abgeschätzt werden, diese sind in Tabelle 32 zusammengefasst:

	Quellstärke in Sv
Weddellmeer	$2,1 \pm 0,8$
Amery Becken	$2,4 \pm 0,8$
Antarktische Halbinsel, WSC	ca. 3

Tabelle 32: Abgeschätzte Quellstärken für das Weddellmeer (ohne den Ausgang in die Bransfield Strait), das Amery Becken (PBBW) und Quellen an der Antarktischen Halbinsel und WSC. Für den letzteren Kern existiert nur das Strömungsfeld nur ca. zur Hälfte beprobt, so dass der Wert verdoppelt wurde. Der geschätzte Fehler ist $\pm 2 \text{ Sv}$.

Der Vergleich der drei Quellstärken in Tabelle 32 die relative Bedeutung des Weddellmeeres in der Belüftung des tiefen Ozeans in Frage. Die Schelfgebiete des südwestlichen Weddellmeeres sind nicht, wie bisher angenommen, die Hauptbildungsgebiete frischen Bodenwassers, ihre Produktion ist vielmehr in der gleichen Größenordnung der Produktion der beiden anderen untersuchten Gebiete. Nur zusammen mit dem im Norden gebildeten Wasser und dem Zustrom aus dem Osten, kann das Weddellmeer seiner Rolle als größter AABW-Produzent gerecht werden.

8.5 Vergleich mit der Literatur und Bewertung

Die bisherigen Untersuchungen zur Bestimmung der Produktionsraten neuen Bodenwassers stammen aus einer Vielzahl direkter und indirekter Methoden. In diesem Kapitel

werden die oben abgeschätzten Quellstärken mit anderen Untersuchungen verglichen, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Weddellmeer liegt.

8.5.1 Weddellmeer

In dieser Arbeit wurden Bildungsraten in Weddellmeer abgeschätzt, wobei prinzipiell nicht zwischen WSBW und WSDW unterschieden wurde. Diese Unterscheidung, die allein durch die potentielle Temperatur von $-0,7^{\circ}\text{C}$ definiert ist, ist für die Berechnung der Belüftungsraten im Weddellmeer nicht sinnvoll, da beide Wassermassen frisch belüftete Anteile enthalten. Allerdings wurde in der bisherigen Literatur überwiegend die Produktionsrate für WSBW betrachtet, so dass der Vergleich den hier vorgestellten Ergebnissen schwierig ist. Trotzdem sind die Ergebnisse dieser verschiedenen Abschätzungen der WSBW-Produktionsraten in Tabelle 33, die von Orsi [1999] übernommen und erweitert wurde, dargestellt.

Foldvik et al. [1985c], *Fahrbach et al.* [1991], *Gordon et al.* [1993], *Fahrbach et al.* [1995], *Muench und Gordon* [1995], *Weppernig et al.* [1996] und *Fahrbach et al.* [2001] verwendeten direkte Strömungsmessungen und Mischungsabschätzungen des Schelfwasser-Anteils. Ihre Ergebnisse liegen zwischen 2 und 5 Sv. In einer späteren Arbeit widerriefen *Fahrbach et al.* [2001] ihre früheren Berechnungen und gaben stattdessen $1,3 \pm 0,4$ Sv als Produktionsrate von Bodenwasser an, davon $0,9 \pm 0,4$ Sv frisch ventiliert. Eine andere Methode, ähnlich der regionalen Methode, basiert auf der Berechnung des jungen Anteils mittels Temperaturänderungen zwischen dem Einstrom und dem Ausstrom aus dem südwestlichen Weddellmeer. Zusammen mit dem berechneten Strömungsfeld konnte der Transport des tiefen westlichen Randstroms (nördlicher Kern) berechnet und somit Bildungsraten von 2 – 5 Sv abgeschätzt werden [*Carmack und Foster*, 1975]. Die Untersuchung von *Foster und Carmack* [1976] beruht auf dem Salzunterschied zwischen WW und HSSW und dem Frischwassertransport nach Norden aufgrund der Eisdrift. Sie geben eine Bildungsrate von 3,6 Sv an. Aufgrund der Unsicherheit im Süßwassertransport ist die Übereinstimmung mit den früheren Ergebnissen [*Carmack und Foster*, 1975], wie sie selbst sagen, größtenteils zufällig und geben eine Variationsbreite der Bodenwasserproduktion von 0,3 – 30 Sv an. *Weiss et al.* [1979] betrachten den Zusammenhang zwischen Schmelzen der Schelfeise und der Bodenwasserproduktion anhand von Tracern. Sie berechneten Bildungsraten von 5 Sv mit Deuterium und ^{18}O sowie 3 Sv mit Tritium.

	Wassermasse	Produktion [Sv]	Bemerkung
[Carmack und Foster, 1975]	WSBW $-1,4^{\circ}\text{C} < \theta < -1,2^{\circ}\text{C}$	2-5	Temperaturdifferenz + Strömungsmesser
[Foster und Carmack, 1976]	WSBW $\theta = -1,3^{\circ}\text{C}$	3,6 [0,3 – 30]	Salzbudget
[Weiss et al., 1979]	WSBW $\theta < -0,9$	5	Deuterium+ ¹⁸ O
		3	Tritium
[Foldvik et al., 1985b]	WSBW $\theta = -0,8^{\circ}\text{C}$	2	Strömungsmesser + Mischung
[Fahrbach et al., 1991]	WSBW $\theta < -0,8$	3-4	Strömungsmesser
[Gordon et al., 1993]	WSBW $\theta < -0,8^{\circ}\text{C}$	3	Abschätzung der Geschwindigkeit
[Muench und Gordon, 1995]	WSBW $\theta < -0,8^{\circ}\text{C}$	5-6	Strömungsmesser
[Fahrbach et al., 1995]	WSBW $\theta < -0,8^{\circ}\text{C}$	2,2	Strömungsmesser
[Mensch et al., 1996]	WSBW $\theta = -1^{\circ}\text{C}$	3,5	Modell mit CFC und Tritium-Daten
[Weppernig et al., 1996]	WSBW $\theta < -0,7$	5	Strömungsmesser + Mischung
[Haine et al., 1998]	ventilierte Komponente	0,8 – 1,6 ²⁶	mit FCKW angepas- tes Modell
[Fahrbach et al., 2001]	ventiliertes WSBW $\theta < -0,7^{\circ}\text{C}$	0,9±0,4	Strömungsmesser
[Naveira Garabato et al., im Druck]	WSBW $\gamma^n > 28,40 \text{ kg/m}^3$	3,2±0,8	Box-Modell Anpas- sung an LADCP
diese Arbeit	junge Komponente des im Weddellmeer gebildeten Wassers	2,1 ±0,8	FCKW+ Altersverteilung+ Strömungsmesser

Tabelle 33: Produktionsraten von WSBW, nach [Orsi 1999], erweitert.

In den letzten Jahren sind außerdem Modelle an gemessene Tracer-Konzentrationen angepasst worden. Mensch et al. [1996] haben mittels eines kinematischen 2-

²⁶ Ausstrom in den tiefen Indischen Ozean

dimensionalen Multi-Box-Modells FCKW- und Tritium-Konzentrationen an beobachtete Daten angepasst und somit eine Bildungsrate von 3,5 Sv bestimmt. *Haine et al.* [1998] haben ein kinematisches Modell an FCKW-Daten verschiedener Schnitte angepasst und somit das Alter und den jungen Anteil des nördlichen Kerns bestimmt. Die dort berechneten Werte (12 ± 4 Jahre; 12-25%) stimmen gut mit den hier vorgestellten Ergebnissen ($\tau = 13,5 \pm 3$ Jahre; $\gamma = 23 \pm 5\%$) überein. Der Transport frisch belüfteten Wassers in den Indischen Ozean wurde mit 0,8 – 1,6 Sv angegeben (siehe Kapitel 3.4.1). *Naveira Garabato et al.* [im Druck] berechneten die Produktionsrate von WSBW mittels der Anpassung eines Box-Modells an LADCP-Daten, zu $3,2 \pm 0,8$ Sv.

Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen der Wassermassen, ist es schwierig, alle diese Ergebnisse zu vergleichen. Trotzdem liegen alle Ergebnisse, mit Ausnahme von [*Fahrbach et al.*, 2001] und [*Haine et al.*, 1998], letzterer hat allerdings auch den Ausstrom in den Indischen Ozean bestimmt, im Bereich von 2 – 6 Sv mit einem Mittelwert von 3,2 Sv (ohne *Haine* [1998] und dieser Untersuchung). Die hier berechneten 2,1 Sv liegen am unteren Ende dieses Bereichs, wobei zusätzlich zu beachten ist, dass in den früheren Arbeiten nur die WSBW-Produktion abgeschätzt wurde, während die Ergebnisse dieser Arbeit auf der gesamten jungen Komponente (WSBW+WSDW) beruhen.

Zusätzlich sind weitere Untersuchungen zur AABW-Produktion (bzw. der Summe von WSBW und WSDW) des Weddellmeeres durchgeführt worden. Diese sind in Tabelle 34 zusammengefasst. Eine Methode basiert auf der groben Abschätzung der Verweildauer von Schelf-Wässern auf dem Schelfen des Weddellmeeres (siehe Kapitel 2.4) [*Mensch et al.*, 1998b]. Die gemeinsame Produktion von WSBW und WSDW ($\theta < 0^\circ\text{C}$) wurde zu 5 Sv abgeschätzt. Auf nahezu denselben Wert (4,9 Sv) kamen *Orsi et al.* [1999] mittels natürlichen und anthropogenen Tracer-Budgets. *Meredith et al.* [2001] haben, ähnlich wie *Haine et al.* [1998], Strömungsgeschwindigkeiten durch die Anpassung an gemessene FCKW-Konzentrationen an verschiedenen Stellen des nördlichen Kerns angepasst und diese in einen Fluss von $3,7 \pm 1,6$ Sv jungen WSBW und WSDW umgerechnet.

Die Produktionsraten von *Orsi et al.* [1999] und *Meredith et al.* [2001] sind eher mit der Summe der Produktionen auf den südlichen Schelfen und im Norden des Weddellmeeres zu vergleichen (5 Sv), da sie größtenteils Daten östlich des Null-Meridian verwenden. Diese Werte stimmen sehr gut überein. Die Übereinstimmung mit *Mensch et al.* [1998b] scheint zufällig, da in dieser Arbeit nur Daten der Weddellmeer Eisstation (also aus dem westlichen Weddellmeer) verwendet wurden.

	Wassermasse	Produktion [Sv]	Bemerkung
[Mensch et al., 1998b]	WSBW + WSDW $\theta < 0^\circ\text{C}$	5	Aufenthaltsdauer + Ein-Box-Modell
[Orsi et al., 1999]	AABW $\gamma^n > 28,27 \text{ kg/m}^3$	4,9	Tracer-Budgets
[Meredith et al., 2001]	WSBW + WSDW $\theta < 0^\circ\text{C}$	3,7±1,6	FCKW+ Modell
diese Arbeit	junge Komponente des im Weddellmeer gebildeten Wassers	5	FCKW+ Altersverteilung+ Strömungsmesser

Tabelle 34: Produktionsraten von AABW (WSBW + WSDW)

8.5.2 Prydz Bucht

Die in dieser Arbeit berechneten Produktionsrate des auf dem Amery-Schelf gebildete Tiefenwasser (PBBW) wurden bereits in [Hoppema et al., 2001] veröffentlicht, allerdings in einem noch nicht ganz fertigem Zustand. Ansonsten existiert nur eine weitere Abschätzung dieser Bildungsrate. Schodlok et al. [2001] modellierten FCKW-Daten, numerische Floats und Alterstracer in einem regionalen Ozeanmodell (BRIOS). Sie ermittelten die schnellste Advektionszeit zu ca. 6 Jahren, wobei die Verweilzeit auf dem Schelf nicht berücksichtigt ist (siehe Kapitel 7.2.2). Diese schnellste Advektionszeit muss mit den jüngsten Komponenten der Altersverteilung ($\tau \approx 12,3 \pm 3$ Jahre) verglichen werden, die Alter von ca. 10 Jahren besitzen. Wenn die Verweilzeit auf dem Schelf mit berücksichtigt wird, stimmen die modellierten mit den berechneten Werten gut überein. Aus modellierten Daten wurde der Transport jungen Wassers zu 2,5 Sv berechnet. Auch dieser Wert stimmt mit den hier ermittelten 2,4 Sv überein.

8.5.3 LCDW-Bereich

Obwohl die frisch belüfteten Anteile in dieser Wassermasse seit [Whitworth et al., 1994] bekannt sind und auf eine schnelle laterale Ventilation des CDW durch frisches im nordwestlich Weddellmeeres gebildetes Wasser geschlossen werden kann (siehe z.B. [Orsi et al., 1999]), sind für diesen Bereich bisher keine Abschätzungen über die Größe dieser Ventilation veröffentlicht worden.

8.6 Bewertung

In der vorliegenden Arbeit konnten neue verbesserte Methoden, sowohl für die Auswertung von FCKW-Verteilungen, als auch für deren Interpretation, entwickelt werden.

In der bisherigen Literatur wurde der junge Anteil häufig durch eine hydrographische Mischungsanalyse ermittelt. Diese Ergebnisse unterscheiden sich grundsätzlich von den Ergebnissen die mittels anthropogener Traceruntersuchungen ermittelt wurden. Erstere sind stark von der analysierten räumlichen Ausdehnung und den angenommenen Mischungskomponenten abhängig [Orsi *et al.*, 1999], im Gegensatz dazu sind diese Größen durch anthropogene Tracer eindeutig definiert.

Die Verwendung einer Altersverteilung zur Berechnung des Alters und des Anteils der jungen Komponente, stellt im Vergleich zu früheren Methoden (Konzentrationsalter oder Verhältnisdatierung) eine realistischere Beschreibung des Verhaltens von Wassermassen dar. Zwar erfordert dieses neue Verfahren einen relativ großen Aufwand zur Probennahme, hat gegenüber den herkömmlichen Verfahren aber folgende Vorteile:

- eine Altersverteilung beinhaltet mehr Informationen als die einfache Berechnung des mittleren Alters und des Anteils der jungen Komponente,
- es erlaubt eine objektive Fehleranalyse,
- die gemeinsame Auswertung großer Daten-Mengen erhöht die Signifikanz der Aussagen,
- Mischung innerhalb einer Wassermasse aufgrund unterschiedlicher Trajektorien der Wasserpakete wird explizit betrachtet,
- kleine Oszillationen des Strömungsfeldes z.B. durch zufällige kleine Wirbel (Eddys) können auch bei identischen geographischen Koordinaten zu unterschiedlichen Wassermassen führen. Durch das Mitteln über große Bereiche innerhalb eines Kernes kann eine repräsentative Kernkonzentration gefunden werden,
- obwohl FCKW-Messungen sowieso eine zeitlich integrative Größe darstellen, wird durch die gemeinsame Auswertung dieser Daten über einen größeren Zeitraum die Variabilität auf dieser Zeitskala weggemittelt.

Die hier eingeführte lokale Methode zur Bestimmung des Flusses frisch ventilierten Wassers (Kapitel 3.4.2) liefert bessere Ergebnisse als früher benutzte Methoden. Insbesondere sind die mit dieser Methode gewonnenen Ergebnisse zeitlich stabil, was einen wesentlichen Fortschritt zu den früher benutzten Methoden darstellt.

Die früheren Traceruntersuchungen (z.B. [Weiss *et al.*, 1979; Mensch *et al.*, 1996; Haine *et al.*, 1998]) zur Berechnung des Transports frisch belüfteter Wassermassen schätzen regional den jungen Anteil ab und kombinieren diesen mit dem Strömungsfeld oder entwickeln ein explizites Strömungsmodell um den Transport jungen Wassers zu bestimmen. Das in dieser Arbeit angewendete Verfahren zur Berechnung des Transports jungen Wassers, die lokale Methode, hingegen gewinnt ihre Ergebnisse aus der Berechnung des FCKW-Flusses, also einer lokalen Kombination des Strömungs- und des FCKW-Feldes. Aus diesem Transport wird im Idealfall der Fluss des jungen Anteils mittels einer Faltung der FCKW-Eintragsfunktion und Altersverteilung der jungen Komponente berechnet. Somit konnte in dieser Arbeit nicht nur Produktionsrate frisch belüfteten Wassers im südwestlichen Weddellmeer abgeschätzt werden, sondern auch für die Belüftung des LCDW-Bereichs und der Prydz-Bucht. Die beiden letzteren Abschätzungen stellen jeweils die erste auf Daten basierte Abschätzung der Produktionsraten dar.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Der methodische Ansatz der vorliegenden Arbeit umfasst die Untersuchung von räumlichen und zeitlichen F11-Verteilungen im Weddellmeer. Mit diesen Untersuchungen wurde primär das Ziel verfolgt, die Produktionsraten der Quellen der im Weddellmeer gefundenen frisch belüfteten Wassermassen zu bestimmen. Die Bearbeitung dieser Fragestellung erforderte zwei vorausgehende Schritte:

1. Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Verarbeitung wiederholter FCKW-Messungen, durch Anpassung einer Altersverteilung.
2. Erstellung eines Tiefenzirkulationsschemas des frisch belüfteten Wassers

Anpassung einer Altersverteilung an FCKW-Daten:

In dieser Arbeit wurden FCKW-Daten des wiederholten Schnittes auf dem Null-Meridian verwendet. Aufgrund des transienten Charakters der FCKWs wurden zeitliche Veränderungen (Zunahmen) der F11-Konzentrationen festgestellt. Unter der in der Ozeanographie häufig benutzten ersten Näherung eines stationären mittleren Strömungsfeldes, konnte der transiente Charakter des FCKW-Eintrages als hauptsächliche Ursache dieser Änderungen angenommen werden. Außerdem wurden die Auswirkungen möglicher Änderungen der Wassermassenproduktion auf die FCKW-Konzentrationen abgeschätzt. Dabei konnte gezeigt werden, dass das FCKW-Feld relativ träge auf einmalige oder periodische Störungen reagiert und somit eine mittlere Situation wiedergeben. Im Gegensatz dazu sind FCKW-Zeitreihen relativ empfindliche Indikatoren für dauerhafte Änderungen der Wassermassenproduktion (siehe Kapitel 6.5), so dass der beobachtete gleichmäßige Anstieg der FCKW-Konzentrationen gegen einen solchen Umschlag spricht. Im Rahmen dieser Näherung ist die Altersverteilung (siehe Kapitel 3.3.1) einer Wassermasse in einem geographischen Gebiet zeitlich konstant, insbesondere müssen alle zu verschiedenen Zeiten gemessenen F11-Konzentrationen in diesem Gebiet mit der gleichen Altersverteilung erklärbar sein. Diese Überlegungen führten zu folgendem Vorgehen:

1. Es wurden Kerne extremaler FCKW-Konzentrationen definiert, da dort die Wassermasseneigenschaften am wenigsten gestört sind (z.B. durch den Einfluss von Mischung).
2. Für jeden Schnitt wurde innerhalb dieser Kerne die mittlere F11-Konzentration bestimmt. Die Mittelung hat den Vorteil, dass die auftretende kleinskalige Fluktuationen verschwinden.
3. Mittels eines Minimierungsprinzips wurde die Altersverteilung einer vorgegebenen Grundstruktur gesucht, die, gefaltet mit der FCKW-Eintragsfunktion, die gefunde-

nen mittleren FCKW-Konzentrationen am besten wiedergibt. Da diese Minimierung im allgemeinen Fall, d.h. in den drei Raumrichtungen und unter der Einbeziehung von Mischung verschiedener Wassermassen, zu viele Parameter hätte, wurden weitere Vereinfachungen durchgeführt:

- Betrachtung des eindimensionalen Falls und Mischung nur als Verdünnung der jungen (FCKW-haltigen) Komponente durch altes (FCKW-freies) Wasser. Dadurch wurde die Anzahl der anzupassenden Parameter auf drei reduziert.
- Annahme der Breite der Altersverteilung. Diese Breite wird hervorgerufen durch unterschiedliche "Laufzeiten" der Trajektorien der Wasserpartikel. Dadurch reduzierte sich die Parameterzahl auf die beiden ozeanographisch bedeutenden Parameter Anteil und Alter der jungen Komponente.

Durch diese Verfahren sind Anteil und Alter der jungen Komponente sowie deren Fehler für sechs verschiedenen Kernen bestimmt worden. Diese Ergebnisse wurden in Tabelle 25 zusammengefasst. Die Stabilität dieser Ergebnisse gegenüber Änderungen der FCKW-Konzentrationen in der Größenordnung der Fehler wurde durch Rechnungen mit zufälligen Variationen der FCKW-Konzentrationen untersucht. Die Ergebnisse der vier überwiegend advektiven Kerne (1 – 4) zeigten Änderungen innerhalb ihres Fehlerbereiches. Aufgrund der großen relativen Fehler der mittleren FCKW-Konzentrationen der Minimum-Kerne (5 und 6) führten die Rechnungen für diese Kerne zu Abweichungen von bis zu 50%. Daher wurden diese Kerne ozeanographisch nicht weiter behandelt.

Das hier vorgestellte Verfahren zur Bestimmung der wichtigen ozeanographischen Größen Anteil und Alter der jungen Komponente stellt eine substantielle Verbesserung im Vergleich zu früheren Verfahren wie Konzentrationsalter oder Verhältnisalter dar. Dieses liegt größtenteils daran, dass aufgrund der gemeinsamen Auswertung mehrerer FCKW-Datensätze mehr Information zur Verfügung steht, als in der Auswertung eines einzigen quasi-synoptischen Datensatzes.

Gemeinsame Interpretation der Messwerte zur Erstellung eines Zirkulationsschemas

Zur Erstellung dieses Schemas wurde der Transport der jungen Komponente des südlichen und des nördlichen Kerns jeweils auf beiden Schnitten bestimmt. Diese Bestimmung verlief in drei Schritten:

1. Es wurde jeweils die FCKW-Konzentration der jungen Komponente zum Zeitpunkt ihrer Bildung ermittelt. Für die Kerne auf dem Null-Meridian könnte diese Kon-

zentration direkt aus der Faltung der vorher ermittelten Altersverteilung mit der atmosphärischen FCKW-Eintragsfunktion unter Berücksichtigung der mittels der ANT XII/3-Daten und Literatur-Werten angenommenen Sättigung abgeschätzt werden. Für den Weddellmeer-Schnitt konnten aufgrund der fehlenden FCKW-Zeitreihe keine Altersverteilungen bestimmt werden, somit musste zunächst das mittlere Alter der jungen Komponenten beider Kerne abgeschätzt bzw. angenommen werden. Für den südlichen Kern konnten die Ergebnisse des Null-Meridians extrapoliert werden, für den nördlichen konnte diese mittels Literatur-Angaben über die Verweilzeit auf dem Schelf und der Transportzeit durchgeführt werden. Damit war es auch auf diesem Schnitt möglich, unter Berücksichtigung der Sättigung die FCKW-Konzentrationen der jungen Komponenten zur Zeit der Bildung zu berechnen.

2. Bestimmung des FCKW-Flusses normal zu den Schnitten, dieser ergab sich jeweils durch die Faltung der Normalkomponente des Strömungsfeldes mit dem FCKW-Feld über dem Kern.
3. Berechnung des Transportes der jungen Komponente durch Quotienten-Bildung aus FCKW-Fluss und Konzentration der jungen Komponente zur Zeit der Bildung.

Diese Methode, in der vorliegenden Arbeit als lokale Methode bezeichnet, stellte sich im Vergleich zu den bisher benutzten Mischungsanalysen (ähnlich der regionalen Methode) als zuverlässiger heraus. Obwohl diese Berechnungen für die beiden tiefen Kerne mit Fehlern bis zu 40% behaftet sind, konnte durch einen Vergleich der Transportraten auf den beiden Schnitten zum ersten Mal ein Zirkulationsschema dieser Wassermassen im Weddellmeer abgeleitet werden. Dabei konnte eine Rezirkulation von $0,7 \pm 1$ Sv des jungen Wassers des südlichen Kerns in ca. 3000 m Tiefe und ein Ausströmen des jungen Wassers (unterhalb von 600 m) nach Norden durch die tiefen Passagen des Süd-Scotia-Rückens und den Süd-Sandwich-Graben von insgesamt $0,5 \pm 1,5$ Sv postuliert werden. Beide Angaben stellen jeweils die erste Abschätzung dieses Transportes dar.

Quellstärken

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde der Transport jungen Wassers des nördlichen Kerns auf dem Weddellmeer-Schnitt sowie die des südlichen Kerns und des LCDW-Bereichs auf dem Null-Meridian, als Abschätzung der Bildungsraten der Quellen im südwestlichen Weddellmeer, auf dem Amery-Schelf und im nordwestlichen Weddellmeer interpretiert. Für letztere konnte nur eine grobe Abschätzung durchgeführt werden, da das Strömungsfeld für nur ca. die Hälfte des Kerns vorlag. In der bisherigen Literatur gibt es nur Abschätzungen der Quellen im südwestlichen Weddellmeer. Die in dieser Arbeit ermittelten $2,1 \pm 0,8$ Sv liegen am unteren Ende des Bereichs der bisherigen Abschätzungen (2 – 6 Sv),

insbesondere da sich diese oft nur auf WSBW beziehen, während hier die jungen Komponenten von WSBW zusammen mit WSDW untersucht worden ist. Die beiden anderen Abschätzungen $2,4 \pm 0,8$ Sv auf dem Amery-Schelf und ca. 3 Sv im nordwestlichen Weddellmeer stellen jeweils die ersten Abschätzungen aus Beobachtungen dar, wobei die Werte des Amery-Schelfes zumindest mit denen des regionalen Ozeanmodells BRIOS gut übereinstimmen (2,5 Sv).

Bisher wurde weitgehend davon ausgegangen, dass das südwestliche Weddellmeer die Hauptquelle frisch belüfteten Wassers und damit von AABW ist. In dieser Arbeit konnte nun gezeigt werden, dass die Produktionsraten der anderen betrachteten Quellen (vor dem Amery-Schelf und im nordwestlichen Weddellmeer) in der gleichen Größenordnung liegen. Dieses Ergebnis ist die größte Überraschung der vorliegenden Arbeit.

Ausblick

Die hier vorgestellte Methode der Anpassung einer Altersverteilung an wiederholte FCKW-Daten ist keinesfalls auf Anwendungen im Weddellmeer beschränkt. Somit kann sie auch auf FCKW-Datensätze anderer Meeresgebiete angewandt werden. Hierbei wären die FCKW-Zeitreihen im Nordatlantik oder im europäischen Mittelmeer denkbare Möglichkeiten.

Die Fortsetzung der hier vorgestellten Zeitreihe auf dem Null-Meridian wäre wünschenswert, da das Potential dieser Methode, aufgrund des annähernd linearen Anstieges der FCKW-Konzentrationen im beobachteten Zeitraum, bisher nicht vollständig ausgeschöpft werden konnte. In den nächsten Jahren wird aber vermehrt Wasser, das in den 1990er Jahren gebildet wurde, den Null-Meridian erreichen. Aufgrund der konstanten oder gar abnehmenden F11-Eintragsfunktion sind dann irgendwann stagnierende Konzentrationen der Kerne zu erwarten, da diese Verhalten vergleichbar ist mit dem in Kapitel 6.5 untersuchten Umschlag der Wassermassenproduktion. Die Beobachtung dieses Übergangs wäre wünschenswert in Hinblick auf eine Verbesserung der Ergebnisse der vorgestellten Methode. Ein weiterer Grund für die Fortsetzung der FCKW-Zeitreihe auf dem Null-Meridian ist, dass das Bremer FCKW-Labor seit 1998 in der Lage ist, auch F113 und CCl_4 in guter Qualität zu messen. Auf der 1998er Reise, wurde die Bestimmung der beiden Stoffe durch einen Störfall in der ersten Hälfte der Reise verhindert. Durch die Messung dieser Stoffe würden weitere unabhängige Informationen aufgrund der unterschiedlichen atmosphärischen Eintragsfunktionen gewonnen.

Mit Hilfe einer weiter ausgedehnten FCKW-Zeitreihe und weiterer Tracer sollte es dann möglich sein außer dem Anteil und das Alter der jungen Komponente auch die Breite der Verteilung der (eindimensionalen) Altersverteilung simultan zu bestimmen. Sowohl der Zugewinn an Information als auch die Bestimmung des dritten Parameter (σ) könnten den auftretenden Fehler spürbar verringern. Allerdings wäre die Einarbeitung dieser Daten mit Problemen verbunden:

- Sinkende atmosphärische FCKW-Konzentrationen führen zu einer größeren Sättigung der Ozeanoberfläche. Somit wäre für die Abschätzung der jeweiligen Sättigung ein explizites Modell der Tracer-Sättigung bei der Wassermassenbildung notwendig.
- F113 und CCl₄ sind im Ozean nicht stabil. Zwar gibt es erste Ansätze, diese Instabilität zu beschreiben [Huhn et al., 2001; Roether et al., 2001a], doch ist die Verwendung dieser beiden Stoffe mit größeren Fehlern verbunden.

Eine weitere Methode, die Aussagen der Anpassung der Altersverteilung zu verbessern könnte die zusätzliche Anpassung der bereits vorhandenen Tritium-Daten sein, da die Eintragscharakteristik von Tritium grundsätzlich anders ist als die der FCKWs. Aufgrund der beschriebenen Problemen bei der Verwendung von stabilen Tritium (siehe Abschnitt 3.5.4) und der damit verbundenen Fehlern ist es allerdings fraglich ob dadurch wirklich ein Fortschritt zu erzielen wäre.

Wie sich aus den Kapiteln 6 und 7 ergibt, müssten in erster Linie die Fehler der mittleren Strömungsfelder verringert werden um den Fehler in der Berechnung des Transportes jungen Wassers zu verringern. Die in dieser Arbeit verwendeten Strömungsfelder wurden vom *Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung* zu dem Zweck durchgeführt, die gesamte Strömung des Weddellwirbels möglichst gut wiederzugeben. Somit ist zu hoffen, dass durch eine speziellere Auswertung der Strömungsmesserdaten in den betrachteten Kernen (soweit vorhanden) sich der Fehler der mittleren Strömungsfelder im Bereich der Kerne deutlich verringern lässt. Auf jeden Fall sollte das Strömungsfeld des Null-Meridians aber den gesamten Kern des LCDW-Bereichs einschließen, also bis ca. 53°S nach Norden erweitert werden. Erst, wenn eine Reduktion des Fehlers des Strömungsfeldes erreicht wurde, ist eine weitere Verbesserung der Ergebnisse des FCKW-Datensatzes auch mit einer spürbaren Reduktion des Gesamtfehlers der Transportes der jungen Komponente verbunden.

Des Weiteren könnten die Aussagen der hier vorgestellten Methoden möglicherweise durch die Verankerung sog. Aqua-Monitore in den Kernen verbessert werden. Ein Aqua-

Monitor ist ein Gerät, das es erlaubt, während der Verankerungszeit von ca. 1 Jahr bis zu 52 Wasserproben zu gewinnen. Zurzeit laufen in der Bremer Arbeitsgruppe Ozeanographie die ersten Vorbereitungen, dieses System für die FCKW-Probennahme umzurüsten. Die Verankerung eines solchen Monitors in einem Kern würde also eine wöchentliche Beprobung des Kerns zulassen. Damit könnten Fluktuationen des mittleren FCKW-Feldes genauer untersucht werden. Außerdem könnten bei gleichzeitiger Verankerung eines Strömungsmessers diese beiden Felder auf der Skala von einer Woche kombiniert werden, wodurch die Annahmen über das mittlere FCKW-Feld dieser Arbeit verifiziert werden könnten

Die aus Differenzen abgeschätzten Transporte (Rezirkulation und Ausgänge nach Norden) sind mit großen Fehlern behaftet. Aufgrund der geringen Abmessungen der Passagen ist ihr Durchstrom mit kleinskaligen Prozessen und einer relativ großen Variabilität verbunden. Diese Variabilität erschwert die Anwendung der in Kapitel 3 vorgestellten Methoden, da diese bekannte mittlere FCKW- und Strömungsfelder voraussetzen. In diesen Passagen wäre der gleichzeitigen Einsatz von Aqua-Monitoren und Strömungsmessern besonders hilfreich um direkte Aussagen über die Variabilität und damit über den Durchstrom jungen Wassers zu gewinnen. Diese Vorgehensweise würde die Differenzenbildung vermeiden und somit sollten die auftretenden Fehler dann auch in der Größenordnung von 30% (oder geringer) liegen. Durch diese Reduktion des Fehlers könnten signifikante Export-Raten angegeben werden.

Abschließend kann gesagt werden, dass durch diese Arbeit die in der Einleitung gestellten Fragen ("Wo wird wieviel Boden- und Tiefenwasser produziert?", "Wie groß ist die Bedeutung des Weddellmeeres im Vergleich zu den anderen Gebieten der Boden- und Tiefenwasserproduktion?" und "Auf welchem Weg verlässt das frische belüftete Wasser das Weddellmeer?") natürlich nicht endgültig beantwortet wurden. Durch die Angabe der Produktionsraten von drei verschiedenen Quellen ist aber ein Fortschritt zur Klärung der beiden ersten Fragen getätigt. Für die letzte Frage konnte immerhin eine qualitative Antwort gegeben werden. Außerdem wurden Fortschritte in der Methode der FCKW-Daten-Auswertung erzielt.

10 Anhang

10.1 FCKW-Messapparatur

Um FCKWs als ozeanische Tracer zu verwenden zu können ist es nötig, ihre Konzentration an verschiedenen Orten und Tiefen des Ozeans zu bestimmen. Dafür ist ein Verfahren nötig, dass innerhalb der begrenzten Messzeit (ca. 15 min pro Probe) die FCKW Konzentration einer Wasserprobe mit hinreichender Genauigkeit ermittelt kann. Außerdem sind für F11 und F12 Fehler kleiner als 1% oder 7 fmol/kg anzustreben. Bullister und Weiskonstruierten [1988] das erste seegängige Analysesystem, das diesen Anforderungen gerecht wurde. Das Grundprinzip beruht auf dem Herauslösen der FCKWs aus einer Wasserprobe mittels hochreiner Trägergase und der Konzentration der Komponenten auf einer Kühlfalle ("purge and trap" Verfahren genannt). Die von der Kühlfalle eluierten FCKWs werden mittels eines gaschromatischen Systems getrennt und anschließend mit einem Elektronen Einfang Detektor (Electron Capture Detector, ECD) detektiert. FCKW-Messungen im Ozean werden weltweit immer noch nach diesem Grundprinzip durchgeführt, allerdings sind inzwischen zahlreiche Verbesserungen entwickelt worden [Bulsiewicz, 1991; Rose, 1993; Klatt, 1997; Bulsiewicz et al., 1998; Rose, 1999]. Die Hauptunterschiede der aktuellen FCKW-Messanlage der Bremer Arbeitsgruppe zu der früheren ist die Automatisierung, elektronische Druckkontrolle, Verwendung einer neuentwickelten Kühlfalle sowie einer Kapillarsäule. Das aktuelle Messsystem wurde in [Klatt, 1997; Bulsiewicz et al., 1998] ausführlich beschrieben, so dass hier nur das Prinzip erläutert wird. Die Endauswertung der Datensätze ist in [Rose, 1999] dargestellt.

10.1.1 Das Messverfahren

Die Konzentration der im Ozean gelösten FCKWs (F11, F12, F113) und CCl_4 werden durch ein vollautomatisches gaschromatographisches Meßsystem bestimmt. In dem Standardverfahren werden die Proben direkt an Bord des Forschungsschiffs gemessen

Probennahme:

Vor 1996 wurde 100 ml Glasspritzen benutzt, um das Probenwasser aus dem Schöpfer in das Messsystem zu injizieren. Dieses Verfahren ist fehleranfällig und die Probennahme ist mit einem großen Zeitaufwand verbunden. Daher wird seit 1996 die Probennahme mit Hilfe von 90 ml-Glasampullen durchgeführt, die im Überlaufverfahren befüllt werden [Klatt, 1997]. Dabei wird die Ampulle mit einem Adapter direkt an der Rosette befestigt und über ein Steigrohr von unten befüllt. Um die Kontaminationsgefahr zu verringern,

wird ca. das doppelte Ampullenvolumen durch den oberen Ausgang durch die Ampulle gespült, bevor sie vom Schöpfer entfernt wird. Zur Messung der Proben können bis zu sieben Ampullen gleichzeitig an das Messsystem angeschlossen werden, die dann nacheinander vollautomatisch gemessen werden. In der Zeit bis zur Messung trat in der Anfangszeit (bis 1998) Blasenbildung in den Ampullen aufgrund der Erwärmung des Wassers und der damit verbundenen kleineren Löslichkeit der Gase auf. Inzwischen konnte dieses Problem behoben werden, indem in den Ampullen am Messsystem sofort ein Überdruck von ca. $1 \cdot 10^4$ Pa erzeugt wird. Des Weiteren bietet das Verfahren der Durchflussampullen die Möglichkeit, Proben in der Ampulle luftdicht und nahezu kontaminationsfrei einzuschmelzen, um diese zu einem späteren Zeitpunkt im Labor zu messen. Dieses sog. Off-Line-Verfahren hat den Vorteil, dass auch an Orten Proben genommen werden können, an denen sich der Einsatz des gesamten Messsystems nicht lohnt oder aus logistischen Gründen nicht möglich ist [Klatt, 1997].

Messung:

Um Kontaminationen zu verhindern, wird ein Teil der Probe zum Spülen der Wasserwege eingesetzt, und schließlich werden ca. 30 ml Probenwasser in ein kalibriertes Volumen eingelassen. Dieses Wasser wird in eine Extraktionsbürette überführt. Mittels eines Trägergases (hier hochreiner Stickstoff) werden dort alle Gase (mit Ausnahme von Stickstoff) aus der Probe extrahiert. Die freiwerdenden gasförmigen Stoffe werden zu einer Sammelfalle geleitet, die in der Lage ist die ankommenden FCKWs für mindestens 5 min zu binden. Durch Temperaturerhöhung der Sammelfalle (von ca. -65°C beim Sammeln auf ca. 100°C beim Freigeben) werden die FCKWs von der Falle in das eigentliche gaschromatische System injiziert. In der Trennsäule des Gaschromatographen werden die einzelnen Bestandteile des Probengemisches je nach Stoffeigenschaften unterschiedlich schnell transportiert und daher zu verschiedenen Zeiten eluiert. Die stoffmengenabhängige Detektion erfolgt mittels eines ECDs.

10.2 Die Annahme eines stationären Ozeans

Die Ausbreitung eines passiven Tracers durch ein Strömungsfeld kann in zwei Teile separiert werden:

- Ausbreitung mit dem Strömungsfeld: $\mathbf{F}_1 = \mathbf{u}\rho q$
- Ausbreitung durch molekulare Diffusion: $\mathbf{F}_2 = -D\rho \nabla q$

Für turbulente Systeme, wie z.B. den Ozean, ist es sinnvoll das Strömungsfeld in ein zeitlich mittleres Feld (advektiver Transport) und Fluktuationen davon zu zerlegen, die sog. Reynolds-Mittlung (siehe z. B. [Pond und Pickard, 1983]). Damit folgt:

$$\mathbf{F}_1 = \rho (\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}') (\bar{q} + q') = \rho (\bar{\mathbf{u}}\bar{q} + \bar{\mathbf{u}}q' + \mathbf{u}'\bar{q} + \mathbf{u}'q') \quad (28)$$

mit \mathbf{F}_1 und \mathbf{F}_2 = Tracer Fluss [m/s pmol/kg], \mathbf{u} = Geschwindigkeit [m/s], ρ = Dichte [kg/m³], q = Konzentration des Tracers²⁷ [pmol/m³] und D = molekulare Diffusions-Konstante [m²/s]. Der mittlere Fluss ist dann:

$$\bar{\mathbf{F}}_1 = \rho (\bar{\mathbf{u}}\bar{q} + \overline{\mathbf{u}'q'}) \quad (29)$$

da die Mittelwerte über \mathbf{u}' und q' verschwinden. Die Terme der rechten Seite beschreiben den advektiven und turbulenten Transport. Der turbulente Flussvektor wird häufig durch analog des molekularen Flusses parametrisiert (siehe z.B. [Gill, 1982]), so dass gilt:

$$\bar{\mathbf{F}}_1 = \rho (\bar{\mathbf{u}}\bar{q} - \kappa \nabla \bar{q}) \quad (30)$$

κ = Wirbel-Diffusionsparameter [m²/s]

In fast allen ozeanographischen Anwendungen kann die außerdem auftretende molekulare Diffusion gegenüber den beiden anderen Transportprozessen vernachlässigt werden (siehe z. B. [Rodhe, 1992]).

²⁷ q Stoffmengenkonzentration (Molarität), die Molalität ergibt sich durch ρq (vergl. mit Fußnote 9)

10.3 Bestimmungsgrößen der Kerndefinition

Im Wesentlichen wurden für alle Reisen dieselben Definitionen verwendet, diese sind in Tabelle 35a dargestellt. Für die Reisen AJAX und ANT V/4 gab es einige Abweichungen diese sind in Tabelle 35b und Tabelle 35c aufgeführt.

a)

Kern	Distanz [km]		Dichte [kg/m ³]		Tiefe [m]	
	von	bis	von	bis	von	bis
1	0	225	$\sigma_4=46,105$	$\sigma_4=46,14$	k. K.	
2	1100 ²⁸	1400	$\sigma_4=46,15$	$\sigma_4=46,17$	k. K.	
3	1400	1800	$\sigma_\Theta=27,77$	$\sigma_2=37,13$	450	1700
4	1550	1850	$\sigma_2=37,05$	$\sigma_2=37,17$	1400	2500
5	700	1300	$\sigma_2=37,13$	$\sigma_2=37,16$	k. K.	
6	2100	2250	$\sigma_\Theta=27,71$	$\sigma_2=37,10$	900 –	2500

Änderungen für AJAX

b)

Kern	Distanz [km]		Dichte [kg/m ³]		Tiefe [m]
	von	bis			
1			$\sigma_4=46,11$	$\sigma_4=46,15$	
3	1220	1650		$\sigma_2=37,15$	1450
4	1220	1650		$\sigma_2=37,20$	
5	500	1150	$\sigma_2=37,14$		
6					3000

Änderungen für ANT V/4

²⁸ Für ANT XIII Distanz=1125 km

c)

Kern	Distanz [km]		Dichte [kg/m ³]		Tiefe [m]	
	von	bis	von	bis	von	bis
1		300	$\sigma_4=46,10$			
2				$\sigma_4=46,18$		
5	600	1150	$\sigma_2=37,135$			

Tabelle 35: Kriterien der Kern – Definition; a) allgemeine Definitionen b) Änderungen für die AJAX –Fahrt c) Änderungen für die ANT V/4 Fahrt; k. K. Kein Kriterium

10.4 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung der Thermohalinen Zirkulation des Ozeans	2
Abb. 2: Die Ausbreitung des Antarktischen Bodenwassers am Boden.	3
Abb. 3: Mittlere Meereisausdehnung des Südlichen Ozeans der Jahre 1973 – 1993	8
Abb. 4: Topographische Karte des Weddellmeeres.....	10
Abb. 5: Schematische Darstellung der Hauptwassermassen des Weddellmeeres.....	13
Abb. 6: Modelliertes jährliches Mittel der Stromfunktion des Weddellwirbels	17
Abb. 7: Schematische Darstellung der Zirkulation.....	20
Abb. 8: Zeitliche Entwicklung der FCKW- und CCl ₄ – Stoffmengenanteile	22
Abb. 9: Ermittlung des Konzentrationsalters..	25
Abb. 10: Schematische Darstellung von Trajektorien.	28
Abb. 11: Altersverteilung für unterschiedliche σ	32
Abb. 12: Tritiumkonzentrationen C _P im Niederschlag.	38
Abb. 13: Heliumquellen und –flüsse der Erde	40
Abb. 14: Stationspositionen der Ajax-Expedition (1984).....	44
Abb. 15: Stationspositionen der ANT V/2-Expedition (1986).....	45
Abb. 16: Stationspositionen M11/5-Expedition (1990).....	46
Abb. 17: Stationspositionen der ANT X/4-Expedition (1992).....	47
Abb. 18: Stationspositionen der ANT XII/3-Expedition (1995).....	51
Abb. 19: Stationspositionen der ANT XIII/4-Expedition (1996).....	52
Abb. 20: Stationspositionen der ANT XV/4-Expedition (1998).	55
Abb. 21: F11-Verteilungen auf dem Null-Meridian.....	60
Abb. 22: Strömungsfeld des Null-Meridian-Schnitts	63
Abb. 23: F-11-Verteilung auf dem Weddellmeer Schnitt.	65
Abb. 24: Strömungsfeld senkrecht zum Weddellmeer Schnitt	66
Abb. 25: F-11 Verteilung auf a) dem Süd-Orkney-Schnitt und b) dem 43°W-Schnitt.	67
Abb. 26: Konzentration und Gesamtfehler.....	71
Abb. 27. Minimum der Kostenfunktion für den südlichen Kern.....	76
Abb. 28: Alter und Anteil der jungen Komponente des südlichen Kerns.....	77
Abb. 29: Peclet-Zahl im Minimum der Kostenfunktion gegen Sigma	78
Abb. 30 Konturplot der Abweichung der gemessenen von den berechneten FCKW- Konzentrationen	79
Abb. 31: Berechneter Verlauf der F11 Konzentration des südlichen Kerns.....	80
Abb. 32: Verlauf der F11 Konzentration des südlichen Kerns mit ein-jähriger Störung.. ..	83
Abb. 33: Verlauf der F11 Konzentration des südlichen Kern mit periodischer Störung	84
Abb. 34: Verlauf der F11 Konzentration des südlichen Kerns mit konstanter Störung.	85
Abb. 35: Strömung des frisch belüfteten Wassers des südlichen Kerns.....	101

Abb. 36: Strömung des frisch belüfteten Wassers des nördlichen Kerns..... 105

10.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wassermassen des Weddellmeeres	13
Tabelle 2: Hydrographischer- und FCKW-Datensatz.....	43
Tabelle 3: Anzahl der Proben mit dem jeweiligen Flag.....	48
Tabelle 4: Mittlere Standardabweichung der Doppelproben des Null-Meridian-Schnittes.	48
Tabelle 5: Fehler des Messsystems des Null-Meridian-Schnittes	49
Tabelle 6: Gesamtfehler des Null-Meridian-Schnittes	49
Tabelle 7: Anzahl der Proben mit dem jeweiligen Flag.....	50
Tabelle 8: Mittlere Standardabweichung der Doppelproben des Weddellmeer-Schnittes ..	50
Tabelle 9: Fehler des Messsystems des Weddellmeer-Schnittes.....	50
Tabelle 10: Gesamtfehler des Weddellmeer-Schnittes	50
Tabelle 11: Anzahl der Proben mit dem jeweiligen Flag.....	53
Tabelle 12: Mittlere Standardabweichung der Doppelproben.....	53
Tabelle 13: Fehler des Messsystems.....	54
Tabelle 14: Gesamtfehler	54
Tabelle 15: Anzahl der Proben mit dem jeweiligen Flag.....	56
Tabelle 16: Mittlere Standardabweichung der Mehrfachproben.....	56
Tabelle 17: Fehler des Messsystems.....	56
Tabelle 18: Gesamtfehler	57
Tabelle 19: Mittlere F11 Konzentrationen und der Gesamtfehler.....	70
Tabelle 20: Mittlere F11 und F12 Konzentrationen der Reise ANT XII/3.....	72
Tabelle 21: Sättigungen der betrachteten Kerne.....	73
Tabelle 22: Konzentrationsalter des südlichen Kerns aus.....	74
Tabelle 23: Verhältnialter und Anteil der jungen Komponente des südlichen Kerns.....	75
Tabelle 24: Parameter im Minimum der Kostenfunktion und Peclet-Zahl.....	78
Tabelle 25: Mittleres Alter und Anteil der jungen Komponente.....	81
Tabelle 26: Transport frisch belüfteten Wassers der inneren tiefen Kerne.....	87
Tabelle 27:Transport frisch belüfteten Wassers der gesamten tiefen Kerne.....	88
Tabelle 28: Transport von ventilertem Wasser innerhalb der gesamten Kerne.	88
Tabelle 29: Transport von ventilerten Wasser im inneren (a) und gesamten (b) Kern.....	89
Tabelle 30:Transport frisch belüfteten Wasser in den tiefen Kernen	96
Tabelle 31: Transport frisch belüfteten Wassers in den tiefen Kernen.....	99
Tabelle 32:Abgeschätzte Quellstärken für das Weddellmeer.	107
Tabelle 33: Produktionsraten von WSBW.	109
Tabelle 34: Produktionsraten von AABW	111
Tabelle 35: Kriterien der Kern – Definition.....	127

10.6 Verwendete Größen

γ	Anteil der jungen Komponente
σ	Breite der Altersverteilung
σ_0	Dichte(anomalie) $\sigma(S, \theta, p=0) = \rho(S, \theta, p=0) - 1000 \text{ kg/m}^3$
σ_1	Dichte(anomalie) des Wasserpaketes unter einer adiabatischen Druckänderung auf 1000 dbar (entspricht ca. 1000 m)
σ_2	Dichte(anomalie) des Wasserpaketes unter einer adiabatischen Druckänderung auf 2000 dbar (entspricht ca. 2000 m)
σ_4	Dichte(anomalie) des Wasserpaketes unter einer adiabatischen Druckänderung auf 4000 dbar (entspricht ca. 4000 m)
ξ	dimensionslose FCKW-Sättigung
δ	Diracsche Delta-Funktion
τ	mittleres Alter
κ	Wirbel-Diffusions-Parameter
λ	Zerfallskonstante
τ_{Konz}	Konzentrationsalter
δ_{obs}	Fehler der gemessenen Freonkonzentration
θ	potentielle Temperatur
c_0	FCKW-Oberflächenkonzentration
c_{eq}	Gleichgewichtskonzentration
$f(T, S)$	Sättigungsfunktion
F_{FCKW}	FCKW-Fluss durch den Schnitt
G	Greensche Funktion
G'	Propagator
$\tilde{\mathfrak{D}}$	Transportoperator
n	Altersverteilung
p_{atm}	atmosphärischer FCKW-Partialdruck
p_{atm}	atm. FCKW-Partialdruck
Pe	Peclet-Zahl
Q	Quellstärke
R_a	He-Isotopenverhältnis der atmosphärische Komponente:
R_k	He-Isotopenverhältnis der kosmogene Komponente
R_p	He-Isotopenverhältnis der primordiale Komponente
R_r	He-Isotopenverhältnis der radiogene Komponente
R_t	He-Isotopenverhältnis der tritiogene Komponente

Kapitel 10

S	Salzgehalt
Sc	Schmidt-Zahl
Sv	Sverdrup
t	Alter
T_{\perp}	Transport senkrecht zum Schnitt
T_f	Gefrierpunkt
t_{obs}	Beobachtungszeitpunkt
TU	Tritium Unit
T_v	Transport ventilierten Wassers
u	Advektionsgeschwindigkeit
u_{\perp}	Geschwindigkeit senkrecht zum Schnitt

10.7 Abkürzungsverzeichnis

AABW	Antarktisches Bodenwasser (Antarctic Bottom Water)
ACC	Antarktischer Zirkumpolarstrom (Antarctic Circumpolar Current)
ACW	Antarktische Zirkumpolare Welle (Antarctic Circumpolar Wave)
ADCP	Akustischer-Doppler-Profilstrommesser (Acoustic Doppler Current Profiler)
ASW	Antarktische Oberflächenwasser (Antarctic Surface Water)
BP	Bruce-Passage
BRIOS	Bremerhaven Regional Ice Ocean Simulations
CCl ₄	Tetrachlorkohlenwasserstoff
CDW	Zirkumpolares Tiefenwasser (Circumpolar Deep Water)
CTD	Leitfähigkeit, Temperatur und Tiefe (Conductivity, Temperature, Depth)
DOVETAIL	Deep Ocean Ventilation Through Antarctic Intermediate Layers
DP	Discovery-Passage
ESW	Östliches Schelfwasser (Eastern Shelf Water)
F11	FCKW-11 (CCl ₃ F)
F113	FCKW-113 (CCl ₂ FCClF ₂)
F-12	FCKW-12 (CCl ₂ F ₂)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffen
HP	Hoyer-Passage
HSSW	Salzreiches Schelfwasser (High Salinity Shelf Water)
ISW	Schelfeiswasser (Ice Shelf Water)
LCDW	Unteres Zirkumpolares Tiefenwasser (Lower Circumpolar Deep Water)
LSSW	Salzarmes Schelfwasser (Low Salinity Shelf Water)
MAR	Mittel-Atlantischer-Rücken
MWDW	Modifiziertes-Warmes-Tiefenwasser (Modified Warm Deep Water)
OP	Orkney-Passage
PBBW	Prydz Bucht Bodenwasser (Prydz Bay Bottom Water)
PP	Philip-Passage
SAVE	South Atlantic Ventilation Experiment
SIO	Scripps Institution of Oceanography
SSG	Süd-Sandwich-Graben
WDW	Warmes Tiefen Wasser (Warm Deep Water)
WOCE	World Ocean Circulation Experiment
WSC	Weddell-Scotia-Konfluenz (Weddell-Scotia-Confluence)
WSDW	Weddellmeer-Tiefenwasser
WSW	Westliches Schelfwasser (Western Shelf Water)
WW	Winter-Wasser (Winter Water)
WWSP	Winter-Weddell-Sea-Project

11 Literatur

- Bagriantsev, N.V., A.L. Gordon und B.A. Huber, Weddell Gyre: Temperature maximum stratum, *Journal of Geophysical Research*, *94*, 8331-8334, 1989.
- Beckmann, A., H.H. Hellmer und R. Timmermann, A numerical model of the Weddell Sea: Large-scale circulation and water mass distribution, *Journal of Geophysical Research*, *C104*, 23375-23391, 1999.
- Begemann, F., Der "natürliche" Tritiumhaushalt der Erde und die Frage seiner zeitlichen Variation, *Chimia*, *16*, 1 - 15, 1961.
- Beining, P., Darstellung und Interpretation ozeanischer FCKW-Verteilungen, Dissertation, Universität Bremen, Bremen, 1993.
- Beining, P. und W. Roether, Temporal evolution of CFC 11 and CFC 12 concentrations in the ocean interior, *Journal of Geophysical Research*, *101*, 16.455-16.464, 1996.
- Bersch, M., On the circulation of the northeastern North Atlantic, *Deep Sea Research I*, *42* (9), 1583-1607, 1995.
- Bolin, B. und H. Rodhe, A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs, *Tellus*, *25*, 58-62, 1973.
- Brennecke, W., Die ozeanischen Arbeiten der Deutschen Antarktischen Expedition 1991-1912, *Aus dem Archiv der Deutschen Seewarte*, *39*, 1-214, 1921.
- Broecker, W., The Atlantic thermohaline Circulation:
http://www.clivar.org/publications/other_pubs/clivar_transp/pdf_files/av_d3_992.pdf, 2001.
- Bu, X. und M.J. Warner, Solubility of chlorofluorocarbon 113 in water and seawater, *Deep Sea Research*, *42* (7), 1151 - 1161, 1995.
- Bullister, J.L., Atmospheric Chlorofluoromethanes as Tracer of Ocean Circulation and Mixing: Measurement and Calibration Techniques and Studies in the Greenland and Norwegian Seas, PhD thesis, University of California, San Diego, 1984.
- Bullister, J.L. und R.F. Weiss, Anthropogenic Chlorofluoromethane in the Greenland and Norwegian Seas, *Science* (221), 265-268, 1983.
- Bullister, J.L. und R.F. Weiss, Determination of CCl₃F and CCl₂F₂ in seawater and air, *Deep-Sea Research*, *35* (5), 839-853, 1988.
- Bullister, J.L. und D.P. Wisegraver, The solubility of carbon tetrachloride in water and seawater, *Deep-Sea Research I*, *45*, 1285-1302, 1998.
- Bulsiewicz, personal communication, 2000.
- Bulsiewicz, K., Aufbau und Test einer seegängigen Freonmeßapparatur, Diplomarbeit, Institut für Umweltphysik, Universität Bremen, 1991.

- Bulsiewicz, K., H. Rose, O. Klatt, A. Putzka und W. Roether, A capillary-column chromatographic system for efficient chlorofluorocarbon measurement in ocean waters, *Journal of Geophysical Research*, 103 (C8), 15959-15970, 1998.
- Butzin, M., Bestimmung von Verweilzeiten und Transportraten in der Warmwassersphäre des Südatlantiks aus Tracerdaten, Dissertation thesis, Bremen, 1999.
- Carmack, E.D., A quantitative characterization of water masses in the Weddell Sea during summer, *Deep Sea Research*, 21, 431-443, 1974.
- Carmack, E.D., Water characteristic of the Southern Ocean south of the Polar front, in *A voyage of Discovery (suppl. to DSR)*, editiert von M. Angel; 15-43, Pergamon Press, Institute of Oceanographic Science, Wormley Godalming GB, 1977.
- Carmack, E.D. und T.D. Foster, On the flow of water out of the Weddell Sea, *Deep-Sea Research*, 22, 711-724, 1975.
- Cunnold, D.M., P.J. Fraser, R.F. Weiss, R.G. Prinn, P.G. Simmonds, B.R. Miller, F.N. Alyea und A.J. Crawford, Global trends and annual releases of CCl₃F and CCl₂F₂ estimated from ALE/GAGE and other measurements from July 1978 to June 1991, *Journal of Geophysical Research*, 99 (D1), 1107-1126, 1994.
- Deacon, G.E.R., *The hydrology of the Southern Ocean*, 124 pp., Cambridge University Press, Cambridge, 1937.
- Deacon, G.E.R., The Weddell Gyre, *Deep-Sea Research*, 26A, 981-995, 1979.
- Doney, S.C. und J.L. Bullister, A chlorofluorocarbon section in the eastern North Atlantic, *Deep-Sea Research*, 39, 1857-1881, 1992.
- Drewry, D.J., S.R. Jordan und E. Jankowski, Measured Properties of the Antarctic Ice Sheet: Surface Configuration, Ice Thickness, Volume and Bedrock Characteristics, *Annals of Glaciology*, 3, 83-91, 1982.
- Eicken, H., M. Lange und C. Kottmeier, Meereisbildung in Küstenpolynyen - Ein Beitrag zum Eishaushalt des Weddellmeeres?, in *15. Internationale Polartagung Heidelberg*; 93-94, Deutsche Gesellschaft für Polarforschung, 1988.
- Elkins, J.W., Chlorofluorocarbons (CFCs), in *The Chapman & Hall Encyclopedia of Environmental Science*, editiert von D.E. Alexander und R.W. Fairbridge, pp. 78-80, Kluwer Academic, Boston, 1999.
- Emery, W.J. und J. Meincke, Global water masses: Summary and review, *Oceanologica Acta*, 9 (4), 383-391, 1986.
- Engelhardt, H. und J. Determann, Borehole evidence for a thick layer of basal ice in the central Ronne Ice Shelf, *Nature*, 327, 318-319, 1987.
- England, M.H., The Age of Water and Ventilation Timescales in a Global Ocean Model, *Journal of Physical Oceanography*, 25, 2756-2777, 1995.
- Fahrbach, E., Zirkulation und Wassermassenbildung im Weddellmeer, *Die Geowissenschaften*, 11 (7), 246-253, 1993.

- Fahrbach, E., Die Polarmeere - ein Überblick, in *Biologie der Polarmeere*, editiert von I. Hempel und G. Hempel; 24-44, Gustav Fischer Verlag, Jena, 1995.
- Fahrbach, E., Die Expedition ANTARKTIS XV/4 des Forschungsschiffes "Polarstern" 1998 / The Expedition ANTARKTIS XV/4 of the Research Vessel "Polarstern" in 1998, in *Berichte zur Polarforschung / Reports on Polar Research*, pp. 109, Alfred - Wegener - Institut für Polarforschung, Bremerhaven, 1999.
- Fahrbach, E., persönliche Mitteilung, 2001.
- Fahrbach, E. und A. Beckmann, Weddell Sea Circulation, in *Encyclopedia of ocean sciences*, editiert von J.H. Steele und K.K. Turellian; 3201-3208, Academic Press, 2001.
- Fahrbach, E. und D. Gerdes, Die Expedition ANTARKTIS XIII/4-5 des Forschungsschiffes "Polarstern" 1996 / The Expedition ANTARKTIS XIII/4-5 of the Research Vessel "Polarstern" in 1996, in *Berichte zur Polarforschung / Reports on Polar Research*, pp. 106, Alfred - Wegener - Institut für Polarforschung, Bremerhaven, 1997.
- Fahrbach, E., S. Harms, G. Rohardt, M. Schröder und R.A. Woodgate, The flow of bottom water in the northwestern Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, 106 (C2), 2761-2778, 2001.
- Fahrbach, E., M. Knoche und G. Rohardt, An estimate of water mass transformation in the southern Weddell Sea, *Marine Chemistry*, 35, 25-44, 1991.
- Fahrbach, E., R.G. Peterson, G. Rohardt, P. Schlosser und R. Bayer, Suppression of bottom water formation in the southeastern Weddell Sea, *Deep Sea Research I*, 41, 389-411, 1994a.
- Fahrbach, E., G. Rohardt, N. Scheele, M. Schröder, V. Strass und A. Wisotzki, Formation and discharge of deep and bottom water in the northwestern Weddell Sea, *Journal of Marine Research*, 53, 515-538, 1995.
- Fahrbach, E., G. Rohardt, M. Schröder und V. Strass, Transport and structure of the Weddell Gyre, *Annales Geophysicae*, 12, 840-855, 1994b.
- Fofonoff, P. und R.C.J. Millard, Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, *UNESCO Technical Papers in Marine Science*, 44, 53, 1983.
- Foldvik, A. und T. Gammelsrød, Notes on Southern Ocean Hydrography, Sea-ice and Bottom Water Formation, *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 67, 3-17, 1988.
- Foldvik, A., T. Gammelsrød, N. Slotsvik und T. Tørrensen, Oceanographic conditions on the Weddell Sea Shelf during the German Antarctic Expedition 1979/80, *Polar Research*, 3, 209-226, 1985a.
- Foldvik, A., T. Gammelsrød und T. Tørrensen, Circulation and water masses on the southern Weddell Sea Shelf, in *Oceanology of the Antarctic Continental Shelf*, edi-

- tiert von S.S. Jacobs, pp. 5 - 20, American Geophysical Union, Washington DC, 1985b.
- Foldvik, A., T. Gammelsrød und T. Tørrensen, Hydrographic observations from the Weddell Sea during the Norwegian Antarctic Research Expedition 1976/77, *Polar Research*, 3, 177-193, 1985c.
- Foldvik, A., T. Gammelsrød und T. Tørrensen, Physical oceanography studies in the Weddell Sea during the Norwegian Antarctic Research Expedition 1978/79, *Polar Research*, 3, 195-207, 1985d.
- Foster, T.D. und E.D. Carmack, Frontal zone mixing and Antarctic Bottom Water formation in the southern Weddell Sea, *Deep-Sea Research*, 23, 301 - 317, 1976.
- Gill, A.E., Circulation and bottom water production in the Weddell Sea, *Deep Sea Research*, 20, 111-140, 1973.
- Gill, A.E., *Atmosphere-Ocean Dynamics*, 662 pp., Academic Press, San Diego, 1982.
- Gordon, A.L., Potential temperature, oxygen and circulation of bottom water in the Southern Ocean, *Deep Sea Research*, 13, 1125-1138, 1966.
- Gordon, A.L., Deep Antarctic Convection West of Maud Rise, *Journal of Physical Oceanography*, 8, 600-612, 1978.
- Gordon, A.L., Western Weddell Sea Thermohaline Stratification, in *Antarctic Research Series*, editiert von S.S. Jacobs und R.F. Weiss, pp. 215-240, AGU, 1998.
- Gordon, A.L., D.T. Georgi und H.W. Taylor, Antarctic Polar Front Zone in the Western Scotia Sea - Summer 1975, *Journ. Phys. Oceano.*, 7 (3), 309 - 328, 1977.
- Gordon, A.L., B.A. Huber, H.H. Hellmer und A. Ffield, Deep and bottom water of the Weddell Sea's western rim, *Science*, 262, 95 - 97, 1993.
- Gordon, A.L. und W.D. Nowlin Jr, The Basin Water of the Bransfield Strait, *Journal of Physical Oceanography*, 8, 258 - 264, 1978.
- Gordon, A.L., M. Visbeck und B. Huber, Export of Weddell Sea Deep and Bottom Water, *Journal of Geophysical Research*, 106 (C5), 9005-9017, 2001.
- Gouretski, V.V. und A.I. Danilov, Weddell Gyre: structure of the eastern boundary, *Deep-Sea Research I*, 40 (3), 561-582, 1993.
- Haine, T.W.N., A.J. Watson, M.I. Liddicoat und R.R. Dickson, The flow of Antarctic bottom water to the southwest Indian Ocean estimated using CFCs, *Journal of Geophysical Research*, 103 (C12), 27637-27653, 1998.
- Hall, T.M. und R.A. Plumb, Age as a diagnostic of stratospheric transport, *Journal of Geophysical Research*, 99, 1059-1070, 1994.
- Holzer, M. und T.M. Hall, Transit-time and tracer-age distributions in geophysical flows, *Journal of the Atmospheric Science*, 57, 3539-3558, 2000.

- Hoppema, M., E. Fahrbach, K.-U. Richter, H.J.W. de Baar und G. Kattner, Enrichment of silicate and CO₂ and circulation of the bottom water in the Weddell Sea, *Deep-Sea Research I*, 45 (11), 1793-1813, 1998.
- Hoppema, M., O. Klatt, W. Roether, E. Fahrbach, K. Bulsiewicz, C. Rodehacke und G. Rohardt, Prominent renewal of Weddell Sea Deep Water from a remote source, *Journal of Marine Research*, 59, 257-279, 2001.
- Huber, B.A., P.A. Mele, W.E. Haines, A.L. Gordon, J.C. Jennings, L.I. Gordon, R.F. Weiss, F.A.V. Woy und P.K. Salameh, CTD and hydrographic data from cruise ANT V / 2 of R / V Polarstern; LDGO - 89 - 3, pp. , Lamont - Doherty Geological Observatory, Palisades, New York, 1989.
- Huhn, O., W. Roether, P. Beining und H. Rose, Validity of carbon tetrachloride as an ocean tracer, *Deep Sea Research*, 48 (9), 2025-2049, 2001.
- IAEA, Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation; 331, pp. , International Atomic Energy Agency, Wien, 1992.
- IAEA, Environmental isotope data No. 10: World survey of isotope concentration in precipitation (1988-1991); 371, pp. , International Atomic Energy Agency, Wien, 1994.
- Jacobs, S.S. und D.T. Georgi, Observations on the southwest Indian/Antarctic Ocean, in *Voyage of Discovery*, editiert von M. Angel; 43-85, Pergamon, New York, 1977.
- Jokat, W. und H. Oerter, Die Expedition ANTARKTIS-XII mit FS "Polarstern" 1995; Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XII/3 / The Expedition ANTARKTIS-XII of RV "Polarstern" in 1995; Report of Leg ANT-XII/3, in *Berichte zur Polarforschung*, pp. 188, Alfred-Wegener-Institut für Polarforschung, Bremerhaven, 1997.
- Keir, R.S., R.L. Michel und R.F. Weiss, Ocean mixing versus gas exchange in Antarctic shelf waters near 150° E, *Deep-Sea Research*, 39, 97-119, 1992.
- Khatiwala, S., M. Visbeck und P. Schlosser, Age tracers in an ocean GCM, *Deep-Sea Research I*, 48, 1423-1441, 2001.
- Kida, H., General circulation of air parcels and transport characteristics derived from a hemispheric GMC, Part 2. Very long-term motions of air parcels in the troposphere and stratosphere., *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 61, 510-522, 1983.
- Killworth, P.D., Deep convection in the world ocean, *Rev. Geoph. Space Phys.*, 21, 1-26, 1983.
- Klatt, O., Entwicklungen am gaschromatographischen FCKW-Meßsystem, Diplomarbeit, Universität Bremen, Bremen, 1997.
- Klatt, O. und J. Holfort, Bottom water circulation in the western equatorial Pacific as inferred from carbon tetrachloride observations, *Geophysical Research Letters*, 27 (4), 545-548, 2000.

- Klatt, O., W. Roether, M. Hoppema, K. Bulsiewicz, U. Fleischmann, C. Rodehacke, E. Fahrbach, R.F. Weiss und L.L. Bullister, Repeated CFC sections at the Greenwich Meridian in the Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, im Druck.
- Kottmeier, C. und E. Fahrbach, Wechselwirkung zwischen Wasser, Eis und Luft in der antarktischen Küstenzone, *Promet*, 112 189, 15-22, 1989.
- Lemke, P., *Meereis und Schelfeis, Vorlesungsskript WS 1991/92*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1991.
- Lemke, P., Die Expedition ANTARKTIS X/4 des FS "Polarstern" 1992 / The Expedition ANTARKTIS X/4 of the RV "Polarstern" in 1992, in *Berichte zur Polarforschung / Reports on Polar Research*, Alfred - Wegener - Institut für Polarforschung, Bremerhaven, 1994.
- Locarnini, R.A., T. Whitworth III und W.D. Nowlin Jr., The importance of the Scotia Sea on the outflow of Weddell Sea Deep Water, *Journal of Marine Research*, 51, 135 - 153, 1993.
- Lucas, L.L. und M.P. Unterweger, Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 105, 541-549, 2000.
- Luikov, A.V., *Analytical Heat Diffusion Theory*, Academic Press, New York, 1968.
- Mantyla, A.W. und J.L. Reid, Abyssal characteristics of the world ocean waters, *Deep-Sea Research*, 30, 805-833, 1983.
- Mantyla, A.W. und J.L. Reid, On the origins of deep and bottom waters of the Indian Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 100 (C2), 2417-2439, 1995.
- Marshall, J. und F. Schott, Open-ocean convection: Observations, theory, and models, *Review of Geophysics*, 37 (1), 1-64, 1999.
- Mason, A.S., Atmospheric HT and HTO. 4. Estimation of Atmospheric Hydrogen Residence Time From Interhemispheric Tritium Gas Transport, *Journal of Geophysical Research*, 82 (37), 5913 - 5916, 1977.
- Mensch, M., *Tracerozeanographische Untersuchungen zur Tiefen- und Bodenwasserbildung in der Weddell-See*, Universität Heidelberg, Heidelberg, 1994.
- Mensch, M., R. Bayer, J.L. Bullister, P. Schlosser und R.F. Weiss, The Distribution of Tritium and CFCs in the Weddell Sea during the mid-1980s, *Progress in Oceanography*, 38, 377-415, 1996.
- Mensch, M., A. Simon und R. Bayer, Tritium and CFC Input Functions for the Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, 103 (C8), 15923-15937, 1998a.
- Mensch, M., W.M. Smethie, P. Schlosser, R. Weppering und R. Bayer, Transient tracer observations from the western Weddell Sea during the drift and recover of Ice Station Weddell, in *Ocean, ice, and atmosphere*, editiert von S.S. Jacobs und R.F. Weiss; The Antarctic Research Series, 75, pp. 241-256, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1998b.

- Meredith, M.P., A.J. Watson, K.A. Van Scoy und T.W.N. Haine, Chlorofluorocarbon-derived formation rates of the deep and bottom waters of the Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, 106 (C2), 2899-2919, 2001.
- Meredith, M.P., K.A. van Scoy, A. Watson und R.A. Locarnini, On the use of carbon tetrachloride as a transient tracer of Weddell Sea deep and bottom waters, *Geophysical Research Letters*, 23 (21), 2943-2946, 1996.
- Midgley, T. und A. Henne, Organic fluorides as refrigerants, *Industrial and Engineering Chemistry*, 22, 542-547, 1930.
- Molina, M.J. und F.S. Rowland, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalysed destruction of ozone, *Nature*, 249, 810-814, 1974.
- Morse, P.M. und H. Feshbach, *Methods of Theoretical Physics*, 997 pp., McGraw-Hill, 1953.
- Mosby, H., *The water of the Atlantic Ocean. Scientific Results of the Norwegian Antarctic Expedition 1927-1928*, 131 pp., Oslo, 1934.
- Muench, R.D. und A.L. Gordon, Circulation and transport of water along the western Weddell Sea margin, *Journal of Geophysical Research*, 100 (C9), 18503 -18515, 1995.
- Muench, R.D., J.T. Gunn und D.M. Husby, The Weddell-Scotia Confluence in midwinter, *Journal of Geophysical Research*, C95, 18177-18190, 1990.
- Musgrave, D.L., A Numerical Study of the Roles of Subgyre-Scale Mixing and the Western Boundary Current on Homogenization of a Passive Tracer, *Journal of Geophysical Research*, 90 (C4), 7037-7043, 1985.
- Naveira Garabato, A.C., E.L. McDonagh, D.P. Stevens, K.J. Heywood und R.J. Sanders, On the export of Antarctic Bottom Water from the Weddell Sea, *Deep Sea Research II*, im Druck.
- Nir, A. und S. Lewis, On the tracer theory in geophysical systems in the steady and non-steady state. Part I, *Tellus*, 27, 372-383, 1975.
- Nowlin Jr., W.D. und J.M. Klinck, The Physics of the Antarctic Circumpolar Current, *Review of Geophysics*, 24 (3), 469-491, 1986.
- Nowlin Jr., W.D. und W. Zenk, Westward bottom currents along the margin of the south Shetland Island Arc, *Deep-Sea Research*, 35, 269-301, 1988.
- Nunes-Vaz, R.A. und G.W. Lennon, Physical oceanography of the Prydz Bay region of Antarctic waters, *Deep-Sea Research I*, 43 (5), 603-641, 1996.
- Orsi, A.H., G.C. Johnson und J.L. Bullister, Circulation, mixing and production of Antarctic Bottom Water, *Progress in Oceanography*, 43, 55-109, 1999.
- Orsi, A.H., W.D. Nowlin Jr. und T. Whitworth III, On the circulation and stratification of the Weddell Gyre, *Deep Sea Research*, 40 (1), 169 - 203, 1993.
- Park, Y.-H., L. Gamberoni und E. Charriaud, Frontal structure, water masses, and circulation in the Crozet Basin, *Journal of Geophysical Research*, 98, 12361-12385, 1993.

- Patterson, S.L. und H.A. Sievers, The Weddell-Scotia Confluence, *Journal of Physical Oceanographie*, 10, 1584 - 1610, 1980.
- Pond, S. und G.L. Pickard, *Introductory Dynamical Oceanography*, 329 pp., Pergamon Press, Oxford, 1983.
- Reid, J.L., On the total geostrophic circulation of the South Atlantic Ocean: Flow patterns, tracers, and transport, *Progress in Oceanography*, 22, 149-244, 1989.
- Reid, J.L. und R.J. Lynn, On the influence of the Norwegian-Greenland and Weddell seas upon the bottom waters of the Indian and Pacific oceans, *Deep-Sea Research*, 18, 1063-1088, 1971.
- Rhein, M., Ventilation rates of the Greenland and Norwegian Seas derived from distributions of the chlorofluoromethanes F11 and F12, *Deep-Sea Research*, 38, 485-503, 1991.
- Rodhe, H., Modeling Biogeochemical Cycles, in *Global Biogeochemical Cycles*, editiert von S.S. Butcher; 55-72, Academic Press, 1992.
- Roether, W., B. Klein und K. Bulsiewicz, Apparent loss of CFC-113 in the upper ocean, *Journal of Geophysical Research*, 106 (C2), 2679-2688, 2001a.
- Roether, W., M. Sarnthein, T.J. Müller, W. Nellen und D. Sahrhage, Südatlantik - Zirkumpolarstrom, Reise Nr. 11, 3. Oktober 1989 - 11. März 1990; Meteor Berichte 90-2, pp. 169, Institut für Meereskunde Hamburg, Hamburg, 1990.
- Roether, W., R. Schlitzer, A. Putzka, P. Beining, K. Bulsiewicz, G. Rohardt und F. Delahoyde, A Chlorofluoromethane and Hydrographic Section Across Drake Passage: Deep Water Ventilation and Meridional Transport, *Journal of Geophysical Research*, 98 (C8), 14423-14435, 1993.
- Roether, W., R. Well, A. Putzka und C. Rüth, Component separation of oceanic helium, *Journal of Geophysical Research*, 103 (C12), 27931-27946, 1998.
- Roether, W., R. Well, A. Putzka und C. Rüth, Corrections to "Component separation of oceanic helium" by Wolfgang Roether, Roland Well, Alfred Putzka, and Christine Rüth, *Journal of Geophysical Research*, 106 (C3), 4679, 2001b.
- Rose, H., Gaschromatographische Messung von halogenisierten Kohlenwasserstoffen mittels Kapillarsäulenteknik, Diplomarbeit, Universität Bremen, Bremen, 1993.
- Rose, H., Untersuchung der Zirkulation und der Erneuerung des Antarktischen Zwischenwassers im Südatlantik aus FCKW-Daten, Dissertation, Universität Bremen, Bremen, 1999.
- Rozanski, K., R. Gonfiantini und L. Araguas-Araguas, Tritium in the Global Atmosphere: Distribution Patterns and Recent Trends, *Journal of Physics G: Nuclear Particle Physics*, 17, S523 - S536, 1991.
- Rüth, C., Heliumisotopen- und Neon-Messungen im Südatlantik: ozeanographische und geochemische Anwendungen, Dissertation, Universität Bremen, Bremen, 1998.

- Schlosser, P., Helium: a new tracer in Antarctic oceanography, *Nature*, 321, 233-235, 1986.
- Schlosser, P., J.L. Bullister und R. Bayer, Studies of deep water formation and circulation in the Weddell Sea using natural and anthropogenic tracers, *Marine Chemistry*, 35, 97 - 122, 1991.
- Schlosser, P., B. Kromer, R. Weppering, H.H. Loosli, R. Bayer, G. Bonani und M. Suter, The distribution of ^{14}C and ^{39}Ar in the Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, 99 (C5), 10275 -10287, 1994.
- Schnack-Schiel, S., Die Winter - Expedition mit FS "Polarstern" in die Antarktis (ANT V /1 - 3) / The winter - expedition of RV "Polarstern" to the Antarctic (ANT V / 1 - 3), in *Berichte zur Polarforschung / Reports on Polar Research*, pp. 259, Alfred - Wegener - Institut für Polarforschung, Bremerhaven, 1987.
- Schodlok, M.P., persönliche Mitteilung, 2001.
- Schodlok, M.P., Über die Tiefenwasserausbreitung im Weddellmeer und in der Scotia-See, Dissertation, Universität Bremen, Bremen, 2002.
- Schodlok, M.P., H.H. Hellmer und A. Beckmann, On the transport, variability and origin of dense water masses crossing the South Scotia Ridge, *Deep Sea Research*, im Druck.
- Schodlok, M.P., C.B. Rodehacke, H.H. Hellmer und A. Beckmann, On the origin of the deep CFC maximum in the eastern Weddell Sea - numerical model results, *Geophysical Research Letters*, 28 (14), 2858-2862, 2001.
- Schröder, M. und E. Fahrbach, On the structure and the transport of the eastern Weddell Gyre, *Deep-Sea Research II*, 46, 501-527, 1999.
- Simmonds, I. und T.H. Jacka, Relationships between the variability of Antarctic sea ice and the Southern Oscillation, *Journal of Climate*, 8 (3), 637-648, 1995.
- SIO und TAMU, Physical, Chemical and in-situ CTD Data from the AJAX expedition in the South Atlantic; SIO Ref 85-24, TAMU Ref 85-4, pp. 275, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, 1985.
- Spindler, M., A comparison of Arctic and Antarctic sea ice and the effects of different properties on sea ice biota, in *Geological history of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*, editiert von U. Bleil und J. Thiede; NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, 308, pp. 173-186, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990.
- Steinfeldt, R., Realistische Modellierung der tiefreichenden Zirkulation des Mittelmeers durch Simulation von Tracerverteilungen, Dissertation thesis, Universität Bremen, Bremen, 2001.
- Stommel, H., The westward intensification of wind-driven ocean currents, *EOS Transactions, AGU*, 29, 202-206, 1948.

- Sültenfuß, J., Das Radionuklid Tritium im Ozean: Meßverfahren und Verteilung von Tritium im Südatlantik und im Weddellmeer; 256, pp. , Alfred - Wegener - Institut für Polar-und Meeresforschung, Bremerhaven, 1998.
- Talley, L.D., Some aspects of ocean heat transport by the shallow, intermediate and deep overturning circulations, in *Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales*, editiert von P.U. Clark, R.S. Webb und L.D. Keigwin; Geophysical Monograph series, 112, pp. 1-22, AGU, 1999.
- Taylor, C.B. und W. Roether, A Uniform Scale for Reporting Low-Level Tritium Measurements in Water, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 33, 377 - 382, 1982.
- Timmermann, R., H.H. Hellmer und A. Beckmann, Simulations of ice-ocean dynamics in the Weddell Sea. Part II: Interannual variability 1985 --- 1993, *Journal of Geophysical Research.*, im Druck.
- Tolstikhin, I.N. und I.L. Kamenskiy, Determination of ground-water ages by the T-³He method, *Geochem. Int.*, 8, 810 - 811, 1969.
- Unterweger, M.P., B.M. Coursey, F.J. Schima und W.B. Mann, Preparation and Calibration of the 1978 National Bureau of Standards Tritiated-water Standards, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 31, 611-614, 1980.
- von Gyldenfeldt, A.-B., E. Fahrbach, M. Gracia und M. Schröder, Flow variability at the tip of the Antarctic Peninsula, *Deep-Sea Research*, eingereicht.
- Walker, S.J., R.F. Weiss und P.K. Salameh, Reconstructed histories of annual mean atmospheric mole fraction for the halocarbons CFC-11, CFC-12, CFC-113 and carbon tetrachloride, *Journal of Geophysical Research*, 105 (C6), 14285-14296, 2000.
- Wanninkhof, R., Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, *Journal of Geophysical Research*, 97 (C5), 7373-7382, 1992.
- Warner, M.J. und R.F. Weiss, Solubilities of chlorofluorocarbons 11 and 12 in water and seawater, *Deep-Sea Research*, 32, 1485-1497, 1985.
- Weiss, R.F., J.L. Bullister, R.H. Gammon und M.J. Warner, Atmospheric chlorofluoromethanes in the deep equatorial Atlantic, *Nature*, 314, 608-610, 1985.
- Weiss, R.F., J.L. Bullister, M.J. Warner, F.A.V. Woy und P.K. Salameh, AJAX Expedition Chlorofluorocarbon Measurements; SIO Ref. 90-6, pp. 190, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, 1990.
- Weiss, R.F., H.G. Östlund und H. Craig, Geochemical studies of the Weddell Sea, *Deep - Sea Research*, 26 (10A), 1093 - 1120, 1979.
- Weiss, W. und W. Roether, The rates of tritium input to the world oceans, *Earth and Planetary Science Letters*, 49, 435-446, 1980.
- Well, R., J. Lupton und W. Roether, Crustal helium in deep Pacific waters, *Journal of Geophysical Research*, 106 (C7), 14165-14178, 2001.

-
- Weppernig, R., P. Schlosser, S. Khatiwala und R.G. Fairbanks, Isotope data from Ice Station Weddell: Implications for deep water formation in the Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, C101, 25723-25739, 1996.
- White, B.W. und R.G. Peterson, An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent, *Nature*, 380, 1996.
- Whitworth III, T. und D.W. Nowlin Jr., Water masses and currents of the Southern Ocean at the Greenwich Meridian, *Journal of Geophysical Research*, C92, 6462-6476, 1987.
- Whitworth III, T., W.D. Nowlin Jr., A.H. Orsi, R.A. Locarnini und S.G. Smith, Weddell Sea Shelf Water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia Confluence, *Deep-Sea Research*, 41 (4), 629-641, 1994.
- Wüst, G., Das Bodenwasser und die Gliederung der Atlantischen Tiefsee, *Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition auf dem Forschungs- und Vermessungsschiff "Meteor"*, 6, 107, 1933.
- Wüst, G., Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans. Das Bodenwasser und die Stratosphäre., *Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Atlantikexpedition "Meteor" 1925-1927*, 6, 1-288, 1935.
- Wüst, G., Bodentemperatur und Bodenstrom in der atlantischen, indischen und pazifischen Tiefsee, *Beiträge zur Geophysik*, 54, 1-8, 1939.
- Zheng, M., W.J. De Bruyn und E.S. Saltzman, Measurements of the diffusion coefficients of CFC-11 and CFC-12 in pure water and seawater, *Journal of Geophysical Research*, 103 (C1), 1375-1379, 1998.