

2.3 Konvektion und Frischwasserflüsse im Nordatlantik

JENS MEINCKE & DETLEF QUADFASEL

***Convection and freshwater fluxes in the North Atlantic:** The formation of deep water in the sub-polar and polar North Atlantic is one of the driving forces for the meridional overturning circulation. There are three main components in this system: the overflows of dense waters across the Greenland-Scotland Ridge, the entrainment of ambient waters into the sinking plumes, and the convection in the Labrador Sea. Convection, and thus the deep water production itself, depends critically on the distribution of freshwater in the water column which has been observed to change in response to atmospheric variability such as global warming and the North Atlantic Oscillation.*

Die großräumige Nordatlantische Umwälzzirkulation

Die Sonne erwärmt die Erde in den Tropen mehr als die polaren Regionen, aber die daraus resultierenden Extrema der Temperaturen werden durch Wärmetransporte in der Atmosphäre und Ozean gemildert. Die Atmosphäre trägt den überwiegenden Teil dieser Wärme Flüsse, hauptsächlich durch die Verfrachtung von Wasserdampf, der bei der Kondensation seine latente Wärme frei setzt und so zu dem milden Europäischen Klima beiträgt. Den nächst größeren Beitrag liefert der Ozean durch seine große Speicherkapazität für Wärme; diese wird im Sommer aufgenommen und im Winter wieder an die Luft abgegeben. Der Ozean transportiert aber auch selbst warmes Wasser, über den Golfstrom und den Nordatlantikstrom breitet es sich weit in den nördlichen Nordatlantik aus. Durch seine Abkühlung auf dem Weg nach Norden wird das Wasser schwerer, es sinkt ab und vermischt sich in immer größere Tiefen. Von dort strömt es in der Tiefe nach Süden zurück. Eine weitere Rolle des Ozeans liegt in dem Rücktransport des Süßwassers in die tropischen Verdunstungsgebiete. Dies geschieht teilweise in der beschriebenen Tiefenströmung, aber auch durch den Export von Eis und oberflächennahem, salzarmen Wasser in den östlichen Randströmen, wie dem Ostgrönlandstrom.

Die großskalige »vertikale Umwälzzirkulation« wird durch den Dichteunterschied zwischen Norden und Süden angetrieben und damit können Prozesse, die die Dichte an den beiden Enden der Zirkulationsschleife verändern, ihre Stärke beeinflussen. Außer von der Temperatur wird die Dichte auch durch den Salzgehalt bestimmt, der damit einen Einfluss auf die Zirkulation hat. Eine Konsequenz der globalen Erwärmung ist die Verstärkung des atmosphärischen Wasserkreislaufs, die zu einem erhöhten Eintrag von Süßwasser in den Sub-polaren und den Polaren Atlantik führt: durch verstärkte Zufuhr von Flusswasser und durch verstärkte Niederschläge. Daneben trägt auch noch das Abschmelzen des grönländischen Festlandeises zur Salzgehaltsabnahme bei. Globale Zirkulationsmodelle prognostizieren eine Abschwächung der Umwälzzirkulation unter diesen Bedingungen (IPCC 2001), verbunden mit einer

E-Mail-Adressen: meincke@ifm.uni-hamburg.de • quadfasel@ifm.uni-hamburg.de

Temperaturabnahme über Nordeuropa von bis zu 4° C.

Im folgenden betrachten wir ausgewählte Beobachtungsergebnisse zu Veränderungen im Süßwasserhaushalt von Arktis und nördlichem Nordatlantik sowie zu Veränderungen der Konvektion und der südwärtigen tiefen Rückströmungen samt ihrer Auswirkungen auf die Umwälzzirkulation.

Zirkulation und Wassermassentransporte

Die Struktur der ozeanischen Zirkulation im Nordatlantik wird entscheidend durch die Topographie des Meeresbodens bestimmt, insbesondere durch den im Mittel nur 400 m tiefen Grönland-Schottland Rücken, der das tiefe Nordpolarmeer vom ebenfalls tiefen subpolaren Nordatlantik trennt und damit den Austausch der Wassermassen zwischen beiden Meeresgebieten einschränkt. Angetrieben werden die Meeresströmungen zum einen durch das Windfeld, zum anderen durch Dichtegradienten, die durch Auftriebsflüsse in der Wechselwirkung des Ozeans mit dem Eis, der Atmosphäre und durch Flusswasserzufuhr vom Land entstehen.

Das Hochdruckgebiet über den Azoren, das Islandtief und das Grönlandhoch bestimmen die atmosphärische Zirkulation, die durch eine zyklonale Rotation charakterisiert ist. Diese führt sowohl im Nordpolarmeer als auch im subpolaren Nordatlantik jeweils zu einer zyklonalen ozeanischen Zirkulationszelle. An den Kontinentalrändern wird sie durch dichtegetriebene Küstenströme verstärkt, die aus der Zufuhr von Frischwasser aus Flüssen und Fjorden resultieren. Der Austausch über den Grönland-Schottland Rücken selbst wird dagegen überwiegend durch die thermohaline Anregung getrieben. Das im Nordpolarmeer absinkende kalte Wasser fließt in den tiefen Passagen des Rückens nach Süden und wird, ebenso wie der salzarme Ausstrom im Osten vor Grönland, durch den nordwärtigen oberflächennahen Einstrom warmen Atlantikwassers ersetzt.

Die mit den einzelnen Zirkulationszweigen verbundenen Volumentransporte unterliegen teilweise starken saisonalen als auch mehrjährigen Schwankungen, die durch die variable Windanregung hervorgerufen wird. Nur für

wenige dieser Zweige liegen allerdings längere direkte Strömungsmessungen vor, die eine Quantifizierung der Variabilität erlauben. Am besten vermessen ist wohl der Austausch über den Grönland-Schottland Rücken, wo für einzelne Passagen Transportzeitserien von bis zu 10 Jahren Länge vorliegen. Dieser Austausch zeigt eine bemerkenswerte Stabilität: der Atlantische Einstrom mit seinen drei Zweigen im Färöer-Shetland Kanal, über den Island-Färöer Rücken und durch die Dänemarkstrasse hat einen mittleren Volumentransport von 8,5 Sv (1 Sv = $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) wobei kein statistisch signifikanter Trend oder saisonale Schwankungen festgestellt werden konnten (ØSTERHUS et al. 2005). Der tiefe Ausstrom kalten Wassers, der im Wesentlichen durch den Färöer-Bank Kanal und die Dänemarkstrasse fließt, liegt im Mittel bei ca. 6 Sv. Hier wurde zwar länger periodische Schwankungen in der Größenordnung von 20% beobachtet, es ist aber nicht klar, ob diese Variabilität nicht durch das Überströmen der flachen Teile des Rückensystems kompensiert werden.

Für den flachen salzarmen Export im Ostgrönlandstrom liegen bisher keine verlässlichen direkten Messungen vor, da die verankerten Messgeräte oft durch driftende Eisberge zerstört wurden. Der Transport konnte bisher nur aus Budgetbetrachtungen abgeschätzt werden und liegt bei 2–3 Sv.

Die vertikale Umverteilung

Im Nordatlantik treten unterschiedliche Arten der Konvektion und damit der Tiefenwasserbildung auf. Starke vertikale Vermischung und Vertiefung der Deckschicht bis in mittlere Tiefen (500–1000 m) durch Abkühlung an der Meeresoberfläche findet sich in Gebieten, in denen die vertikale Schichtung überwiegend durch die Temperatur-

abnahme mit der Tiefe bestimmt wird, wie z.B. südlich des Grönland-Schottland Rückens (Abb. 2.3-1). In diesen Regionen sind die horizontalen Strömungen schwach und die vertikale Stromscherung ist nicht ausreichend, um durch Nachfuhr von warmen Wasser im oberen Teil der Wassersäule wieder eine Schichtung aufzubauen.

Tiefreichende Konvektion im offenen Ozean findet überwiegend in Regionen starker zyklonaler Zirkulation statt (Abb. 2.3-1), wie der Grönlandsee, der Islandsee und der Labradorsee (MARSHALL & SCHOTT 1999). Hier liegt durch das Aufwölben der tiefen Isopyknen bereits eine insgesamt schwache Schichtung der Wassersäule vor. Erhöht sich jetzt die Dichte des Oberflächenwassers durch Abkühlung und Salzeintrag bei Eisbildung, können kleinskalige (~1 km) Absinkschlote tief in die Wassersäule eindringen und so zu einer tiefreichenden Vermischung führen. Es entstehen Gebiete homogenen Wassers (~30–50 km), deren Ränder zyklonal zirkulieren. Lassen jetzt die Wärmefflüsse an die Atmosphäre nach, werden diese Strömungen instabil und es bilden sich Wirbel (~3–10 km), die das konvektiv erzeugte Wasser horizontal verteilen und in die Randströme exportieren.

Vorwiegend im Nordpolarmeer ist Schelfabhangkonvektion von Bedeutung. Auf den flachen Schelfen wird das Wasser schnell bis auf den Gefrierpunkt abgekühlt und die einsetzende Eisbildung führt zu einem Eintrag von Salz in die Wassersäule. Wird das Eis von den Meeresströmungen oder durch ablandige Winde vertrieben, kann neues Eis gebildet und so die Dichte des Wassers stark erhöht werden. Dieses kalte und salzreiche Bodenwasser fließt dann über topographische Rinnen Richtung Kontinentalabhang und sinkt dort in die tiefen Becken ab. Durch Mischung mit Umgebungswasser vergrößert sich nicht nur der Volumenfluss der absinkenden Kaskaden, sondern es ändern sich auch seine Eigenschaften. So sind die Tiefenwasser der arktischen Becken durch die Einmischung von Atlantischem Wasser in mittleren Tiefen mit $-0,5$ bis $-0,8^\circ \text{C}$ deutlich wärmer als die Tiefenwasser des Nordmeeres.

Einmischung von ambientem Wasser liefert auch bei den absinkenden Kaskaden südlich des Grönland-Schottland Rückens einen bedeutenden Beitrag zur Tiefenwasserbildung des Nordatlantiks. Nachdem das kalte Wasser aus dem Nordmeer die engen Passagen der Dänemarkstrasse und des Färöer-Bank Kanals verlassen hat und in die tiefen Becken absinkt, wird auch hier ambientes Wasser eingemischt. Dies geschieht zunächst durch kleinskalige Prozesse an der Grenzfläche der kalten Abhangströmungen mit dem Umgebungswasser, wie z.B. Kelvin-Helmholtz Instabilitäten. Zusätzlich findet aber auch horizontale Einmischung statt. Durch das Absinken des kalten Wassers am Hang wird die Wassersäule gestreckt und wegen der Erhaltung des Drehimpuls kommt es zur Ausbildung von meso-skaligen Wirbeln, die dann lateral Umgebungswasser

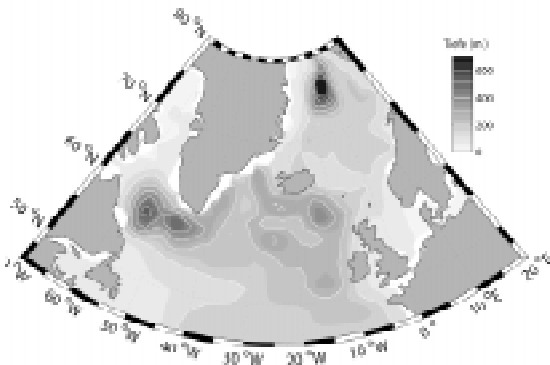


Abb. 2.3-1: Maximale Tiefe der vertikal durchmischten Schichten im Nordatlantik im Winter im hydrographischen Datensatz von DE BOYER MONTÉGUT et al. (2004). Die Gebiete tiefreichender Vertikalkonvektion liegen in der Grönlandsee und der Labradorsee, südlich des Grönland-Schottland Rückens reicht die Deckschicht bis in mittlere Tiefen.

in die Abhangströmung einbringen. Dieser Effekt ist deutlich größer als derjenige der vertikalen Mischung und führt schon innerhalb von wenigen hundert Kilometern Entfernung von den Schwellen zu einer Verdoppelung der Volumentransporte. Ein großer Teil des eingemischten Wassers stammt, insbesondere im Bereich des Färöer-Bank Kanals, aus der ventilerten Deckschicht, und damit bildet dieser Prozess den kürzesten Weg um die Eigenschaften des Oberflächenwassers in die Tiefe zu transportieren.

Die drei Komponenten der vertikalen Umwälzung und damit die Quellen für das Nordatlantische Tiefenwasser sind also (1) Ventilation im Nordmeer und Nordpolarmeer als Quelle des Überströmens über den Grönland-Schottland Rücken, (2) Einmischung von ambienten (Deckschicht) Wasser südlich des Rückens, und (3) Ventilation in der Labradorsee (Abb. 4.12-2).

Die Rolle des Süßwassers

Da die Menge der Salze im Ozean konstant ist, sind Veränderungen im Salzgehalt das Ergebnis der Zufuhr bzw. der Entfernung von Süßwasseranteilen der jeweiligen Wasserkörper. Im Nordpolarmeer und im nördlichen Nordatlantik führen insbesondere die Festlandsabflüsse, die Niederschläge, das Schmelzen von Meereis und grönländischem Festlandeis sowie das Gefrieren von Meerwasser und Vermischungsprozesse zu starken Schwankungen von Süßwasseranteilen. Unsere heutige Kenntnis von den mittleren Süßwassertransporten im System Nordpolarmeer/nördlicher Nordatlantik ist in Abb. 2.3-3 dargestellt (DICKSON et al. 2005). Das Nordpolarmeer bildet das Reservoir, das über Niederschläge, den Eintrag der sibirischen und nordamerikanischen Flüsse sowie den Einstrom von salzarmem Pazifikwasser durch die Beringstraße insgesamt 0,183 Sv erhält¹. Der Ausstrom in Form von salzarmem

Wasser und Eis in den Atlantik erfolgt östlich von Grönland durch die Framstraße, das Nordmeer und die Dänemarkstraße sowie westlich durch die Strassen des kanadischen Archipels. Beide Zweige vereinen sich in der Labradorsee im nordwestlichen Nordatlantik.

Driftende Salzgehaltsanomalien

Aus den seit ca. 1900 vorliegenden hydrographischen Messungen sind signifikante Salzgehaltveränderungen im Nordmeer und im nördlichen Nordatlantik bekannt geworden. Gut dokumentiert ist die sog. große Salzgehaltsanomalie der 1970er Jahre (DICKSON et al. 1988).

Verursacht durch eine windbedingte Verschiebung des Zirkulationssystems des Nordpolarmeers (PROSHUTINSKY et al. 2002) wurde von 1965–1966 ca. 60% mehr Meereis als normal durch die Framstraße in das Nordmeer transportiert. Die sich daraus entwickelnde Schmelzwasserlinse driftete mit dem subpolaren Strömungssystem durch die

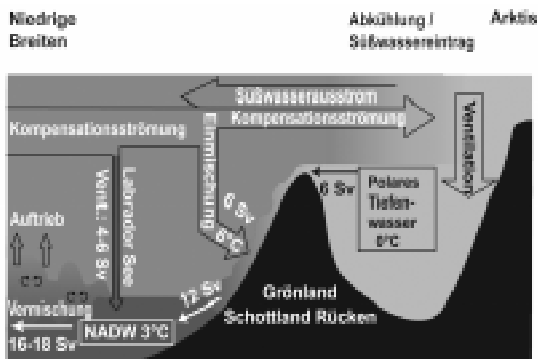


Abb. 2.3-2: Der Austausch von Wasser über den Grönland-Schottland Rücken ist neben der Ventilation der Labradorsee von fundamentaler Bedeutung für die meridionale Umwälzzirkulation. Die schematische Darstellung zeigt die wesentlichen Flüsse (Transporte in Sv) sowie die mittleren Temperatur der beteiligten Wassermassen, die zu Bildung des Nordatlantischen Tiefenwassers (NADW) beitragen.

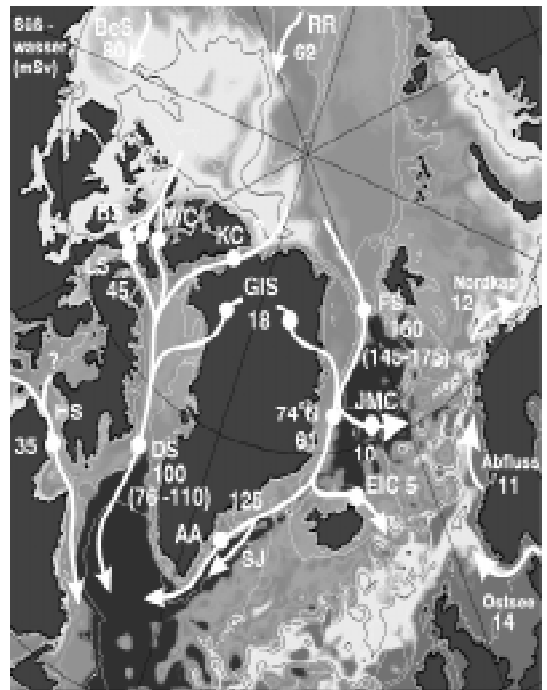


Abb. 2.3-3: Süßwassertransporte in der Arktis, im Europäischen Nordmeer und in den Strassen des kanadischen Archipels. Referenzsalzgehalt 34,8 psu (s. Fußnote im Text), Werte in mSv ($10^3 \text{ m}^3/\text{s}$). BeS – Beringstraße, RR – Festlandsabfluss, P-E – Niederschlag minus Verdunstung, FS – Framstraße, GIS – Grönland Inlandeis, JMC – Jan Mayenstrom, EIC – Ostislandstrom, DS – Davis Straße, AA – Angmagssalik Schnitt. Die Hintergrundkarte stellt eine modellierte Meeresoberflächenhöhe dar (W. Maslowski, pers.com). Deutlich wird die Zusammenführung der Ausbreitungspfade östlich und westlich von Grönland in der Labradorsee [aus DICKSON et al. (2005)].

Abb. 2.3-4: Entwicklung des Salzgehaltes in der zentralen Labradorsee in den letzten 50 Jahren, der die langfristige Ausbuchtung der Wassersäule seit den 1970er Jahren zeigt. Überlagert sind Schwankungen mit dekadischer Zeitskala. Hingewiesen wird auf die Unterbrechung der Konvektion in den Jahren 1971–74, auf die extrem tieferreichende Konvektion um 1994 und auf das Ende der langjährigen Ausbuchtung im Jahr 2000 (YASHAYAEV, pers. Mitt.).

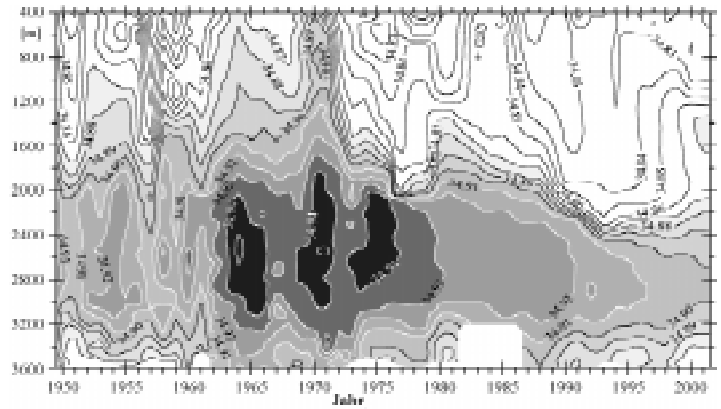
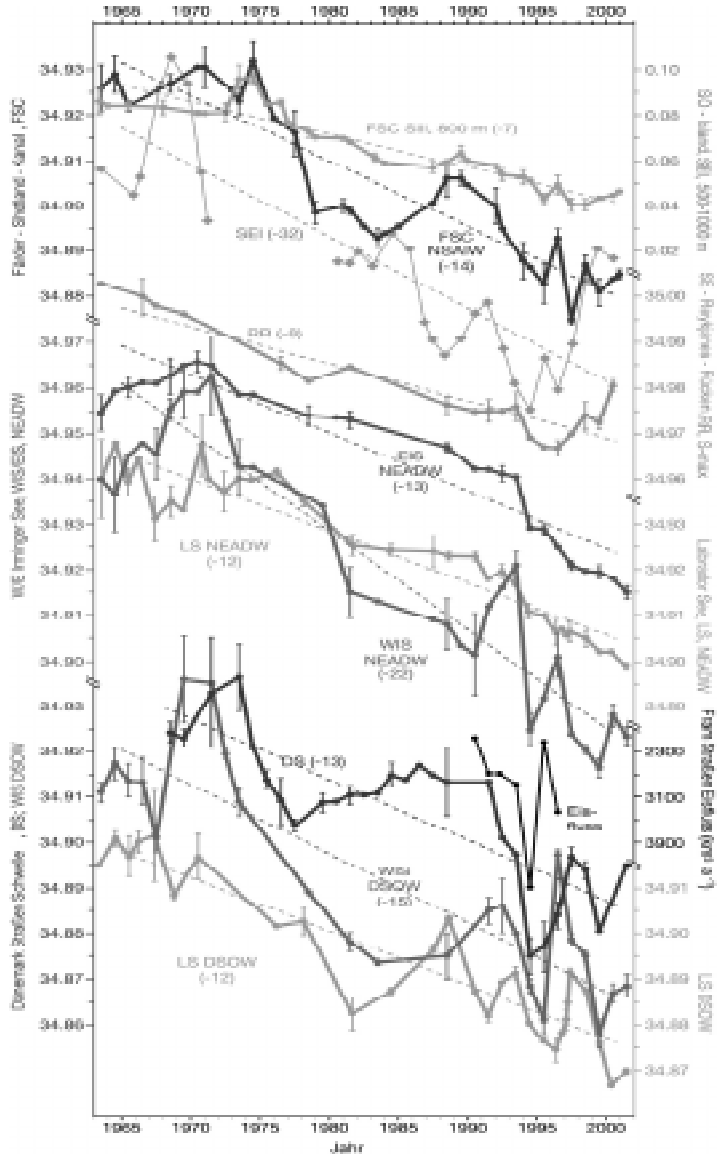


Abb. 2.3-5: Salzgehaltsveränderungen 1963–2001 in den Regionen Island–Schottland–Schwelle, Reykjanes-Rücken südlich von Island, Dänemark Straße, Südostgrönland und Labradorsee (s. Randbeschriftung). Die Zahlen in Klammern geben die Raten der Salzgehaltsabnahmen in ppm/Jahrzehnt für den Zeitraum 1965–2000 an (aus DICKSON et al. 2002).



Dänemarkstraße, rund um die Südspitze Grönlands und um die Labradorsee quer über den Nordatlantik in den Färøer-Shetland-Kanal und entlang der norwegischen Küste zurück in das nördliche Nordmeer. Modellrechnungen von HAAK et al. (2003) entsprechen den Beobachtungen weitgehend. Der für den Atlantik bedeutendste Effekt war die Unterbrechung der winterlichen Konvektion in der Labradorsee von 1971–1974 (Abb. 2.3-4) und damit einhergehend eine Abkühlung der Oberfläche der Labradorsee und eine Salzgehalts- und Temperaturerhöhung des von der fehlenden Konvektion nicht erneuerten tiefen Zweiges der atlantischen Umwälzzirkulation. Beobachtungen über eine Intensitätsänderung der Umwälzzirkulation liegen für diesen Fall nicht vor, und werden auch durch die o.g. Modellrechnungen nicht gezeigt. Das gilt auch für weitere Salzgehaltsanomalien, die bei BELKIN et al. (1998) beschrieben sind.

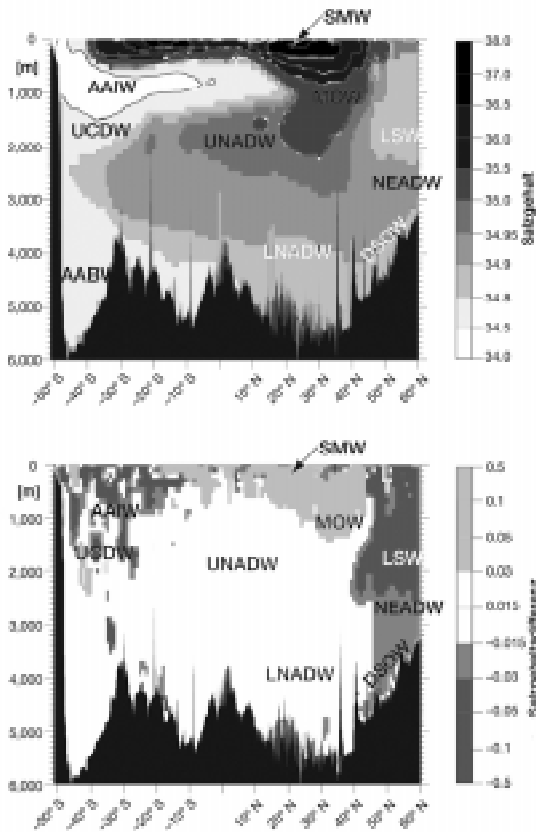


Abb. 2.3-6: Oben: Mittlerer Salzgehalt der Jahre 1985–99 entlang eines Meridionalschnittes durch den westlichen Atlantik. Unten: Salzgehaltsschicht (1985–99 minus 1955–69) auf diesem Schnitt. Deutlich ist die Salzgehaltsabnahme in den polaren Breiten gegenüber der Zunahme in den oberen Schichten der Tropen und Subtropen zu erkennen (modifiziert nach CURRY et al. 2003).

Erläuterung der Wassermassenbezeichnungen:

- SMW:** Subtropisches Modewasser;
- AAIW:** Antarktisches Zwischenwasser;
- MOW:** Mittelmeerwasser;
- UCDW:** Oberes Zirkumpolares Tiefenwasser;
- UNADW:** Oberes Nordatlantisches Tiefenwasser;
- LSW:** Labradorseewasser;
- NEADW:** Nordostatlantisches Tiefenwasser;
- DSOW:** Dänemarkstrassen Overflow Wasser;
- LNADW:** Unteres Nordatlantisches Tiefenwasser;
- AABW:** Antarktisches Bodenwasser.

Der hydrologische Zyklus und die Umwälzzirkulation

Wenn Ereignisse wie Salzgehaltsanomalien zwar regional die Konvektion für einige Jahre aussetzen lassen, daraus aber keine Transportschwankungen der Umwälzzirkulation erwachsen, tritt die Frage nach wirksameren Veränderungen der Salzgehalte auf. DICKSON et al. (2002) beschrieben

eine seit den 1960er Jahren laufende Salzgehaltsabnahme mit einer Rate von ca. 0,01 pro Jahrzehnt in den Konvektionsregionen und entlang der Ausbreitungspfade des tiefen Zweiges der Umwälzzirkulation im nordwestlichen Nordatlantik. Eine Unterbrechung dieses stärksten je beobachteten Signals im Nordatlantik deutet sich nach ca. 30 Jahren an. Sie beginnt im Nordmeer und erreicht ca. 2000 die Labradorsee (Abb. 2.3-5).

Es liegt nahe, die dekadische Ausstüßung im nördlichen Nordatlantik in Zusammenhang zu sehen mit der Langzeitabnahme des Süßwasservolumens des Nordpolarmeeis (einschl. des Meereisvolumens) um den Betrag von ca. 0,016 Sv sowie mit der regionalen Erhöhung der Abschmelzrate des grönländischen Eisschildes um einen vergleichbaren Betrag. CURRY et al. (2003) haben anhand von Salzgehaltsschnitten durch den gesamten westlichen Atlantik gezeigt, dass die dekadische Salzgehaltsabnahme im nördlichen Nordatlantik sowie parallel im südlichen Südatlantik einer Salzgehaltszunahme in den oberen 500 m der Subtropen und Tropen entspricht (Abb. 2.3-6). Dieses weist auf die effektive Einbindung des nördlichen Nordatlantiks, des Nordmeeres und der Arktis in den globalen Süßwasserkreislauf hin. Da Daten über Niederschlag und Verdunstung über dem Ozean weiterhin problematisch sind, verbleiben als Methode für die nähere Zukunft hochwertige und wiederholte Messungen der ozeanischen Salzgehaltsschwankungen und der Süßwassertransporte, wenn wir beim Verständnis der quantitativen Rolle des hydrologischen Zyklus für die thermohaline Umwälzzirkulation Fortschritte erreichen wollen.

Solche unmittelbare Konsequenzen für die Umwälzzirkulation sind zumindest aus den direkten Langzeitmessungen in der Ausstromregion des Nordmeeres und im tiefen Ausstrom am Südausgang der Labradorsee (noch) nicht ersichtlich. Auch zeigen datenbasierte Zirkulationsmodelle bisher keine einheitlichen Trends in der Entwicklung der Umwälzzirkulation, wie sie bei einer Verstärkung des Wasserkreislaufs für die nächsten hundert Jahre zu erwarten sind (IPCC 2001). Dagegen haben BRYDEN et al. (2005) aus beckenweiten hydrographischen Messungen bei 26° N für den Zeitraum 1958–2004 eine 30%ige Abnahme der Transporte im tiefen Zweig des Nordatlantischen Tiefenwassers beobachtet. Obwohl diese Abschätzung mit großen Fehlermargen behaftet ist, zeigt sie doch, dass die Überwachung der großskaligen Umwälzzirkulation, die für unser Klima eine herausragende Bedeutung hat, zu den vorrangigsten Aufgaben der Meeresforschung in den nächsten Dekaden gehört ♦

¹ Bei den angegebenen Zahlen handelt es sich um die benötigte Menge an Süßwasser, um das Meerwasser von einem Referenzsalzgehalt ausgehend (hier 34,8 psu.) so zu verdünnen, dass die beobachteten Salzgehalte erreicht werden. Die genannte Zuflussrate entspricht der Wasserführung des Amazonas.