

Abschlussbericht zu Teilprojekt 1.2

Teilprojektleiterin:

Prof. Dr. Monika Rhein

Institut für Umweltphysik, Abt. Ozeanographie
Universität Bremen
Tel. 0421 218 2408
Email: mrhein@physik.uni-bremen.de
www.ocean.uni-bremen.de

Wissenschaftlicher Mitarbeiterinnen:

Aus dem Projekt: Achim Roessler
Nicht aus Projekt bezahlt: Dr. Dagmar Kieke, Dr. Christian Mertens

Technische Mitarbeiter:

Nicht aus Projekt bezahlt: Klaus Bulsiewicz, Wolfgang Böke

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

Die Hauptfragestellungen des Teilprojektes sind:

(i) Wie ändern sich die Bildungsraten und Eigenschaften von Labradorseewasser (LSW) und wie hängt dies mit dem Eintrag von Wärme- und Frischwasser-Anomalien über den Mittelatlantischen Rücken (MAR) in den ostatlantischen Subpolarwirbel und nach Süden in den Subtropenwirbel zusammen?

(ii) Welche Rolle spielen Wirbel für Transport- und T/S-Anomalien sowie für die Lage der Subpolarfront beim Einstrom in den Ostatlantik?

(iii) Wie beeinflussen Schwankungen im Einstrom des Nordatlantikstroms (NAC) und in der NAC-Zirkulation im Westbecken die Ausbreitung von Wärme und Frischwasser-Anomalien vom westlichen Rand ins Ostbecken und in den Subtropenwirbel? Gibt es für verschiedene NAC-Zirkulationsmuster verschiedene Ausbreitungspfade für Anomalien?

(iv) Inwiefern hängen Schwankungen im NAC-Transport mit Transportschwankungen im westlichen Randstrom zusammen?

Um diese Fragestellungen zu untersuchen, müssen die erfolgreichen Langzeitmessungen der Hauptkomponenten aus dem Nordatlantik -Projekt optimiert und weiter geführt werden. Nur so können die regionalen Änderungen hinsichtlich Zirkulation, Wassermassen, Ausbreitung von Wärme- und Frischwasseranomalien besser verstanden und in globale Änderungen der meridionalen Umwälzbewegung eingeordnet werden. Diese Messungen umfassen:

(i) die Transportschwankungen, die geographische Ausdehnung des Subpolarwirbels und die Zirkulationspfade der Temperatur- und Salzgehaltsanomalien im Subpolarwirbel beim Eintritt in den Ostatlantik,

(ii) der Export von Tiefenwasser im westlichen Randstrom im Neufundlandbecken bei 47°N,

(iii) die Fortführung der Zeitserie der LSW-Bildungsraten, die von uns seit 1997 betrieben wird.

Um die regionalen Auswirkungen von NAC-Schwankungen auf die Ausbreitung der Anomalien des

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Wärme- und Frischwassertransports besser zu verstehen, werden zusätzlich zu den bereits vorhandenen Messsystemen

(iv) Zeitreihen der NAC-Transporte (Einstrom und Rezirkulation) im Neufundlandbecken benötigt.

Um die nordwärtige und südwärtige Verlagerung von Ausbreitungspfade über dem MAR ebenfalls abzudecken, müssen die Verankerungspositionen am MAR nach Norden und Süden ausgedehnt werden. Für die Interpretation der im Projekt gewonnenen Daten werden neben historischen Daten weitere Beobachtungen (z.B. Argo- Profile und Trajektorien), atmosphärische Reanalyse-Daten, Fernerkundungsprodukte (Altimetrie, SST, Wind) sowie Ergebnisse aus hoch-aufgelösten Ozean-Modellen herangezogen.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.

Die Abt. Ozeanographie der Universität Bremen hat schon viele Forschungsexpeditionen geplant und durchgeführt, und es steht eine ausgezeichnete technische Expertise für Spurenstoffmessungen, hydrographische Arbeiten sowie Verankerungsarbeiten und PIES-Handling (PIES: Bodenecholote mit Drucksensoren) zur Verfügung, genauso wie die Expertise für die Interpretation von ozeanographischen Datensätzen und deren Veröffentlichung. Das Projekt profitiert auch stark von der exzellenten technischen, logistischen, und wissenschaftlichen Kooperation zwischen den beiden Arbeitsgruppen der Projektleiterinnen M. Rhein (Bremen) und Birgit Klein (BSH Hamburg)

Mit den Forschungsschiffen standen uns exzellente Plattformen zur Durchführung der Messungen zur Verfügung. Die Forschungsfahrten mit der MERIAN (MSM-28, MSM-38 und MSM-43) verliefen weitestgehend störungsfrei und lieferten hervorragende Datensätze.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan wurde im Wesentlichen eingehalten. Es wurden in AP 1.2 exzellente Datensätze geschaffen. Erste Analysen, die diese Datensätze benutzen, sind inzwischen veröffentlicht, weitere Arbeiten sind in Vorbereitung.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Antragstellerin und ihre Gruppe verfügt über jahrelange Erfahrung in der Planung und Durchführung von Forschungsfahrten, sowie für Verankerungsarbeiten, für die Behandlung von PIES und die Analyse von ozeanographischen Datensätzen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten im Projekt profitierten besonders durch die enge Zusammenarbeit im Verbund. Die Kooperation mit I. Yashayaev, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, Kanada, betreffs Analysen in der Labradorsee wurde weitergeführt und führte im Projektzeitraum zu einer gemeinsamen Publikation (Kieke und Yashayaev, 2015). Bezüglich der PIES-Auswertung hatten und haben wir enge Kontakte mit C. Meinen (NOAA, Miami).

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

II.1.1 Forschungsfahrten

Tabelle 1 enthält eine Übersicht über die im Projektzeitraum durchgeführten Forschungsfahrten der Bremer Arbeitsgruppe. Die Fahrten wurden zusammen mit MitarbeiterInnen des BSH Hamburg durchgeführt. Die Fahrtleitung auf der MSM-27, MSM-28 und MSM-38 hatte Dr. Dagmar Kieke, und auf der MSM-43 Dr. Christian Mertens (Beide IUP, Uni Bremen).

Schiff	Reise	Datum	Geographischer Schwerpunkt
MERIAN	MSM-27	19.04.-06.05.2013	Randstrom und Flemish Pass
MERIAN	MSM-28	09.05.-20.06.2013	47°N, MAR und Labradorsee
MERIAN	MSM-38	07.05.-05.06.2014	L47°N und MAR
MERIAN	MSM-43	25.05.-27.06.2015	47°N, MAR und Labradorsee

Tab. 1. Zusammenfassung der im Projektzeitraum durchgeführten Forschungsfahrten. MAR: mittelatlantischer Rücken

2013: Fahrten MSM-27 und MSM-28:

Aus logistischen Gründen wurden die RACE Aktivitäten 2013 auf zwei Fahrten aufgeteilt. Die RACE Aktivitäten auf der Fahrt MSM 27 umfassten Messungen im westlichen Randstrom bei 47°N und die Aufnahme und das Wiederauslegen der drei Randstromverankerungen, die 2012 ausgelegt wurden. Leider war eine der RACE Verankerungen nicht mehr vorhanden, so dass nur zwei aufgenommen wurden. Um noch mehr Verluste zu verhindern, wurden 2013 keine Verankerungen im Randstrom ausgelegt. Problematisch im Randstrom sind die sehr großen Geschwindigkeiten die bis zum Boden reichen können. Die Verankerungen tauchen dabei fast 1000m ab, und das Material wird dabei sehr beansprucht. Die Vermutung ist, dass die Edelstahl-Ringe und Schäkel nicht mehr die nötige Qualität haben, die für Tiefseeverankerungen benötigt wird. Man kann an geborgenen Exemplaren eine körnige unregelmäßige Struktur sehen, die wahrscheinlich von Material-Unregelmäßigkeiten herrührt und die zu Korrosion führt.

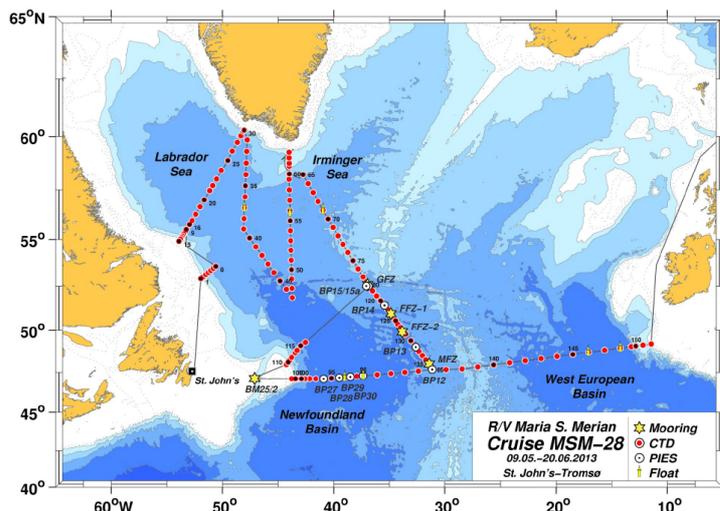


Abb. 1. Fahrtverlauf der Reise MSM-28 mit FS MERIAN. Die Verankerungen MFZ, GFZ und FFZ1, FFZ2 werden im Abschlussbericht von B. Klein, BSH beschrieben, Auf dieser Fahrt wurden insgesamt 152 CTD/LADCP Stationen durchgeführt.

Die anderen relevanten Regionen (Labradorsee, westliches Neufundlandbecken, Ostatlantik) wurden auf der MSM 28 durch CTD/LADCP/SF6 Stationen vermessen und entlang des MAR die PIES-Arbeiten ausgeführt (Abb.1)

2014 Fahrt MSM 38

Die MSM 38 hat zwar wichtige RACE Aktivitäten durchgeführt, die Mittel für die Reisen, Transporte, und teilweise Verbrauch wurden im Rahmen des Exzellenzclusters MARUM eingeworben. Für RACE waren vor allem die PIES und Verankerungsarbeiten wichtig sowie die dazu gehörigen CTD/LADCP Stationen am MAR und entlang 47°N. Um das neue Verankerungsdesign mit teureren Titanschäkeln anstatt Edelstahl zu testen, wurde 2014 nur eine Verankerung im westlichen Randstrom ausgelegt. Die Zahl der verankerten PIES entlang 47°N erhöhte sich jedoch im Vergleich zu 2013 durch Ausdünnen der Geräte entlang des MAR. So kann das Strömungssystem bei 47N besser aufgelöst werden.

2015 Fahrt MSM 43

2014 wurde die Randstromverankerung geborgen, und die Titanschäkel und Ringe waren nicht durch Korrosionsschäden beschädigt. Dieses gute Ergebnis führte dazu, dass 2014 wieder zwei Verankerungen im westlichen Randstrom ausgebracht wurden. Neben den Arbeiten entlang der PIES Linie am MAR und entlang 47°N wurden weitere Messungen mit CTd/LADCP und Tracermessungen durchgeführt.

II.1.2 Daten

II.1.2.1 CTD/LADCP, vm-ADCP

Alle $CTDO_2$ Daten der hier aufgeführten Fahrten wurden bereits auf der Fahrt kalibriert, so dass der endgültige Datensatz bereits nach Ende der Reise zur Verfügung stand. Die Schiffs-ADCP und LADCP-Daten lagen ebenfalls am Ende der Fahrt in endgültiger Form vor.

Spurenstoffmessungen (CFC/SF₆)

Tabelle 2 enthält eine Übersicht über die im Projekt-Zeitraum durchgeführten Spurenstoff-Probenahmen im subpolaren Nordatlantik und den Stand der Auswertung

Jahr	Schiff	Reise	Messung	Probenanzahl	Gemessen	Problem
2013	Maria S. Merian	MSM-27	CFCs, offline	300	x	---
	Maria S. Merian	MSM-28	SF ₆ /CFC-12, direct CFCs, offline	1660 270	x x	---
2014	Maria S. Merian	MSM-38	CFCs, offline	450	x	---
	Maria S. Merian	MSM-39	CFCs, offline	400	x	---
2015	Maria S. Merian	MSM-42	SF ₆ /CFC-12, direct CFCs, offline	680 120	x teilweise	---
	Maria S. Merian	MSM-43	SF ₆ /CFC-12, direct	1170	x	---

II.1.2.2 Bodenecholote mit Drucksensor: PIES

Die Tagesmittelwerte der Laufzeit und des Bodendrucks werden über akustische Telemetrie übertragen. Die 30min-Werte (volle Datenauflösung) können erst beim Bergen des Geräts ausgelesen werden.

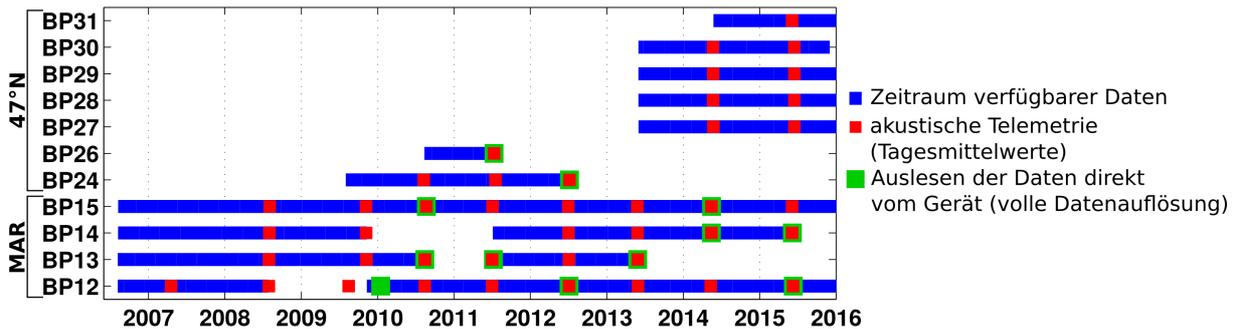


Abb. 2. Datenverfügbarkeit bei den Bremer PIES, 2006-2015. BP12-BP15 liegen entlang des Mittelatlantischen Rückens, BP24 bzw. BP26 entlang 47°N, wobei BP12 zu beiden Arrays gehört. Die Auswertung der PIES bei 47°N ist in Arbeit und ein Manuskript ist in Vorbereitung und soll im Spätsommer eingereicht werden.

II.1.2.3 Randstrom – Verankerungen bei 47°N

Die Randstromverankerungen wurden 2009 kurz vor Beginn des Projekts zum ersten Mal ausgelegt (Tab. 3). Die Daten der geborgenen Instrumente (T/S-Sensoren, Strömungsmesser) aus den Verankerungsperioden bis 2013 liegen kalibriert vor, die Auswertung der späteren Messungen ist in Arbeit.

Verankerung	Geogr. Breite	Geogr. Länge	Wassertiefe	Auslegung	Bergung
BM21-1	47° 06.05' N	43° 25.00' W	1295 m	31 Jul 2009	07 Aug 2010
BM22-1	47° 05.85' N	43° 14.18' W	2980 m	31 Jul 2009	07 Aug 2010
BM23-1	47° 06.00' N	43° 07.19' W	3495 m	31 Jul 2009	07 Aug 2010
BM21-2	47° 06.00' N	43° 24.97' W	1295 m	10 Aug 2010	15 Jul 2011
BM22-2	47° 06.30' N	43° 13.85' W	3000 m	10 Aug 2010	13 Jul 2011
BM23-2	47° 05.86' N	43° 07.17' W	3500 m	10 Aug 2010	lost
BM22-3	47° 05.67' N	43° 13.80' W	3000 m	17 Jul 2011	06 Jul 2012
BM23-3	47° 05.67' N	42° 59.96' W	3570 m	17 Jul 2011	07 Jul 2012
BM24-1	47° 05.85' N	42° 35.55' W	3660 m	17 Jul 2011	06 Jul 2012

BM22-4	47° 06.00' N	43° 13.70' W	3000 m	11 Jul 2012	lost
BM23-4	47° 06.00' N	42° 45.00' W	3600 m	10 Jul 2012	22 Apr 2013
BM24-2	47° 06.00' N	42° 16.50' W	4000 m	10 Jul 2012	22 Apr 2013
BM22-5	47° 06.16' N	43°13.40' W	3050 m	26 May 2014	27 May 2015
BM22-6	47°06.20' N	43°13.30'W	3000 m	17 Jun 2015	23 Apr 2016
BM24-3	47° 06.20' N	42°16.50'W	4000 m	17 Jun 2015	23 Apr 2016

II.1.3 Auswertung

Zur Thematik von AP 1.2 wurden verschiedene Arbeiten veröffentlicht, bzw. sind in Vorbereitung und werden in Kürze eingereicht werden. Die wichtigsten Ergebnisse waren: Die erstmalige Quantifizierung der mittleren Zirkulation im Neufundlandbecken aus Beobachtungen (Mertens et al., 2014) und die Verlängerung der Transportmessungen des NAC beim Übergang in den Ostatlantik, so dass nun eine 22 Jahre kontinuierliche Zeitreihe zur Verfügung steht. Es ist die erste lange Transportzeitreihe des Nordatlantikstroms im offenen Ozean (Roessler et al., 2015).

1.3.1 Zirkulation und Transporte im Neufundlandbecken

Um die grundlegende Zirkulation und die Mechanismen der Variabilität im Neufundlandbecken zu untersuchen wurden für ein Manuskript unsere Beobachtungen bei 47°N zusammen mit Altimetrie Daten und dem Kieler Ozeanmodell VIKING (C. Böning, GEOMAR) mit einer Auflösung von 1/20° kombiniert. **Damit konnte zum ersten Mal aus Beobachtungen die Hauptfade und die mittlere Zirkulation im Neufundlandbecken quantifiziert werden** (Mertens et al., 2014). Die Beobachtungen umfassten unsere Verankerungen im tiefen westlichen Randstrom bei 47°N und 7 CTD/LADCP Schnitte bei 47°N, die alle von unserer Gruppe durchgeführt wurden. Das über 48 Jahre gemittelte Strömungsfeld bei 47°N aus dem VIKING Modell zeigt die gleichen Strukturen wie das aus LADCP Daten gewonnene mittlere Strömungsfeld. Der tiefe westliche Randstrom weist zwei Kerne auf, einer in etwa 1500m am steilen Kontinentalabhang, und ein Kern weiter östlich am Kontinentalsockel in 3500m Tiefe. Direkt östlich des Randstroms befindet sich der nach Norden strömenden Nordatlantikstroms NAC, und weiter östlich die nach Süden setzende Rezirkulation (NBR=Newfoundland Basin Recirculation). Diese beiden Strömungen sind oberflächen-intensiviert, reichen aber bis zum Boden. Der tiefe westliche Randstrom (Abb. 1) hat maximale Geschwindigkeiten und Transporte direkt am Kontinentalabhang in ca. 1500m Tiefe (14 Sv) und einen zweiten Kern weiter östlich in Bodennähe (17 Sv). Der nach Norden setzende NAC liegt in unmittelbarer Nähe des Randstroms und reicht bis zum Boden. Diese räumliche Nähe bewirkt eine intensive Wechselwirkung zwischen dem östlichen Teil des Randstroms und dem NAC, die auch zu einem Austausch von Wassermassen führt. Von den 111 Sv nach Norden gerichtetem NAC-Transport ins Neufundlandbecken sind 65 Sv Tiefenwasser. Östlich vom NAC rezirkulieren lokal 77 Sv (Newfoundland Basin Recirculation NBR) davon sind 45 Sv Tiefenwasser (Abb.3 nach Mertens et al., 2014).

Geostrophische Geschwindigkeiten, abgeleitet aus Altimeterdaten zeigen ebenfalls diese Strömungsmuster. Östlich der NBR nehmen die Geschwindigkeiten ab und zeigen eher ein Wellenmuster. Signale von Osten benötigen etwa 1 Jahr, um von 30°W nach 36°W zu kommen, und die Geschwindigkeit von 1.5 cm/s entspricht der von baroklinen Rossbywellen in dieser

geographischen Breite. Die Variabilität des Randstroms mit Perioden von etwa 20 bis 50 Tagen kann durch diese von Osten propagierenden Wellen verursacht werden (Mertens et al., 2014).

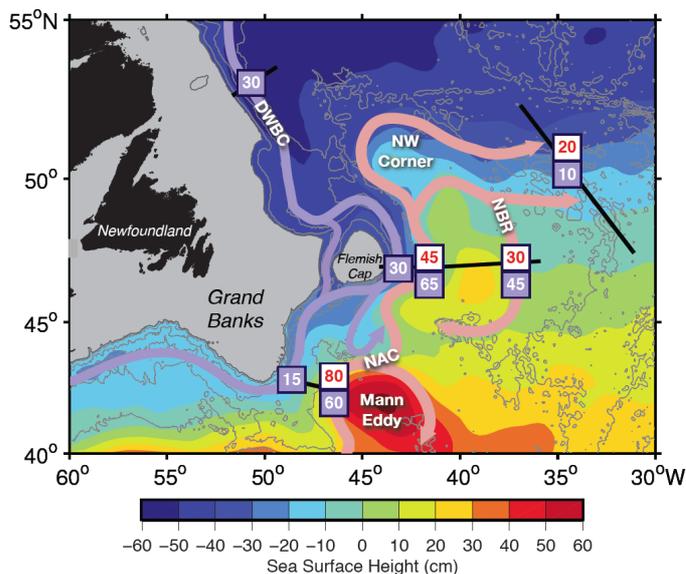


Abb. 3 Mittlere absolute dynamische Topographie von AVISO (farbiger Hintergrund) und Zirkulationsschema im Neufundlandbecken (violett: Tiefer westlicher Randstrom, DWBC; rosa: NAC). Die mittleren Transporte (Sv) aus Beobachtungen sind auf 5er Werte gerundet, rot: Warmwassertransport, violett: Tiefenwasser. Die Bathymetrie ist mit grauen Isolinien gekennzeichnet. Die schwarzen Linien zeigen die Lage der in unserem Teilprojekt durchgeführten Messungen (nach Mertens et al., 2014).

Unter Federführung von J. Fischer (GEOMAR) wurde die Variabilität im tiefen Randstrom an verschiedenen Verankerungspositionen von der Dänemarkstraße bis zu den Grand Banks untersucht. Darunter waren auch die Resultate des ersten Jahres unserer Verankerungen im Randstrom bei 47°N (Fischer et al., 2015).

1.3.2 NAC Transporte am Mittelatlantischen Rücken

Um die NAC-Transporte vom West- in den Ostatlantik und ihre Schwankungen quantifizieren zu können, wurden seit August 2006 vier Bodenecholote (PIES) entlang der Westflanke des Mittelatlantischen Rückens verankert (Rhein et al., 2011). Die Einteilung zwischen der südlichsten Position bei 47°40'N und der nördlichsten bei 52°30'N teilte die Strecke in 3 Segmente, die in etwa die Transporte durch die drei Hauptbruchzonen im MAR repräsentieren (Abb. 2). Die PIES-Verankerungspositionen befinden sich außerdem entlang eines Altimeter-Tracks.

Mit Hilfe der signifikanten Korrelation zwischen den aus den PIES berechneten geostrophischen Transporten und den Oberflächengeschwindigkeiten aus den Altimeterdaten konnte die Transportzeitreihe (Abb.4) auf 22 Jahre (1992 – 2013) ausgedehnt werden (Roessler et al., 2015). Der mittlere NAC-Transport über diesen Zeitraum beträgt 27 ± 5 Sv, wobei 60% aus den Subtropen stammt und 40% subpolaren Ursprungs ist. In der Spektralanalyse zeigen sich dominierende Peaks bei etwa 120 Tagen (Eddies und Mäander) sowie bei 4-9 Jahren, die wahrscheinlich in Beziehung zum NAO-Index stehen (Abb. 4). Die mittleren Transporte zwischen den fünf Jahren mit den höchsten positiven und negativen NAO Indizes differieren um etwa 3 Sv, was 30% der zwischenjährigen Variabilität von 8-9 Sv erklärt. Für den Gesamttransport konnte kein Trend über die 22 Jahre festgestellt werden, aber in den letzten Jahren fokussierte sich der Transport auf das mittlere Segment im Bereich der Faraday-Bruchzone (FFZ, Abb. 4).

In Roessler et al. (2015) wurde angenommen, dass im Referenzniveau von 3400m Tiefe die mittleren Geschwindigkeiten vernachlässigbar klein sind, und somit der barokline Transport den Gesamttransport darstellt. Abb. 5 zeigt den Vergleich mit den Transporten, die aus den direkten

LADCP Geschwindigkeiten berechnet wurden und die auch die ageostrophischen Anteile beinhalten. Innerhalb der Unsicherheiten stimmen die aus den PIES berechneten Transporte damit überein.

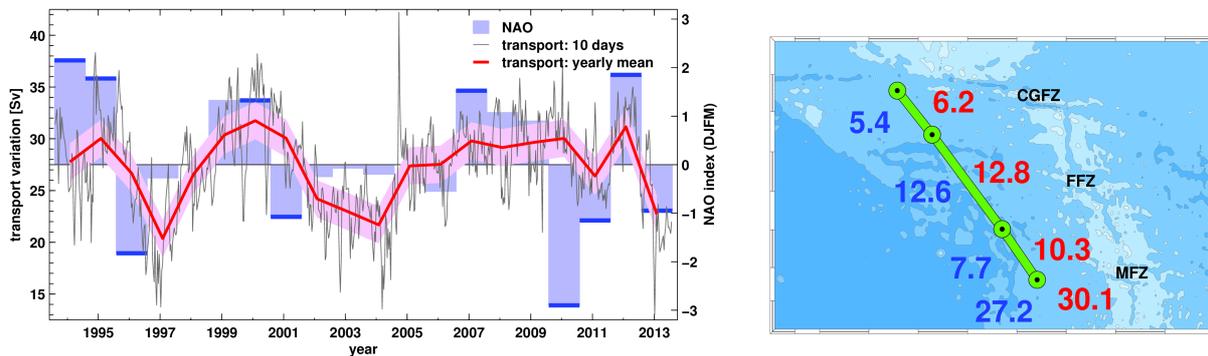


Abb. 4 Links: NAC Transport-Zeitreihe aus PIES und Altimeterdaten (10 Tageswerte: grau, Jahresmittel: rot, rosa Schattierung: Standardabweichung). Dargestellt ist der Transport zwischen Oberfläche und 3400 m Tiefe. Blau: NAO Index. Die dunkelblauen Balken zeigen die fünf höchsten positiven und negativen NAO Indizes in diesem Zeitraum. Rechts: Transporte entlang des Mittelatlantischen Rückens gemittelt für die fünf Jahre mit höchsten positiven NAO Index (rot) und negativem NAO Index (blau). CGFZ: Charlie Gibbs Bruchzone, FFZ; Faraday – und MFZ Maxwell – Bruchzone (aus Roessler et al., 2015)

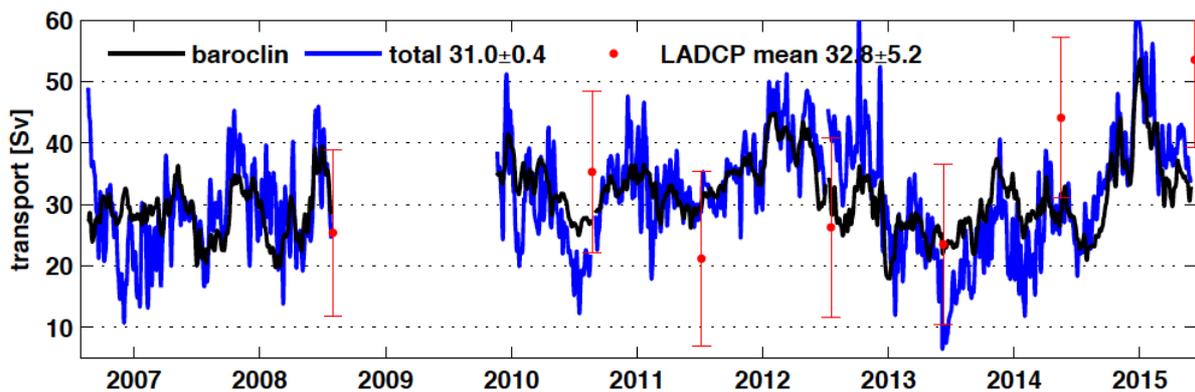


Abb.5 Vergleich der aus den PIES berechneten Transporte (schwarz: bezogen auf das Referenzniveau von 3400 m Tiefe, blau wie schwarz, aber mit den barotropen Schwankungen aus den Bodendruckmessungen) mit den Transporten aus den LADCP Messungen (rote Punkte, mit Unsicherheiten)

1.3.3 NAC Transporte im hochauflösenden Ozeanmodell VIKING 20

Für die Ausdehnung der Analysen auf längere Zeiträume, wurden die Transporte des NAC-Einstroms in den Ostatlantik aus einem hoch auflösenden ($1/20^\circ$) Ozeanmodell bestimmt. Aus dem Modell VIKING 20 (C. Böning, A. Biastoch, GEOMAR) lagen uns 49 Jahre in 5-Tagesauflösung vor. Ermutigend war, dass sich Geschwindigkeitsstruktur und Transporte dieses Modells im Neufundlandbecken bei 47°N weitestgehend gut mit den Beobachtungen vergleichen ließen (Mertens et al., 2014). Abb. 4 zeigt die gemittelten NAC-Transporte im Modell und den Mittelwert aus den Beobachtungen. (Breckenfelder et al., 2015, in Vorbereitung). Südlich des PIES Arrays tendiert der Transport gegen Null, der stärkste Anstieg findet zwischen 48°N und 53°N statt. Die NAC Zirkulation in VIKING 20 ($1/20^\circ$ Auflösung) zeigt andere Pfade in den Ostatlantik als Burkholder und Lozier (2014) im FLAME Modell ($1/12^\circ$ Auflösung) gefunden haben. In FLAME verliefen die Pfade südlicher. Die Analysen werden noch um den Vergleich mit den Beobachtungen entlang der OVIDE Linie

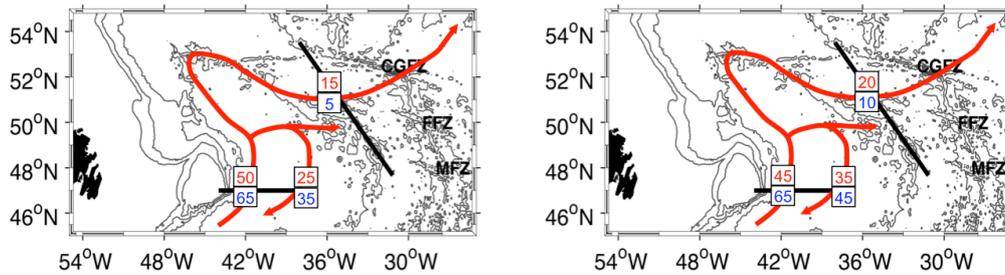


Abb. 6 NAC-Zirkulation im westlichen subpolaren Nordatlantik a) Modelltransporte, gemittelt über den Zeitraum 1992-2008, und b) aus Beobachtungen (LADCP-Schnitte, verankerte PIES-Zeitreihe aus Roessler et al., 2015). Rot: Transporte von Wasser mit Dichten kleiner 27.68, blau Tiefenwasser mit Dichten >27.68. Die Zahlen sind auf 5 gerundet (T. Breckenfelder, Manuskript in Vorbereitung)

(Lherminier et al., 2010; Mercier et al., 2013) erweitert. Auch hier sieht es so aus, also ob die Zirkulation im Modell nach Norden verschoben ist.

1.3.4 LSW Bildung und Ausbreitung:

In den letzten Dekaden haben sich die Bedingungen für die Bildung von LSW stark verändert (Rhein et al., 2011). Um die Auswirkungen auf Alter und Anteil an jungem LSW (jünger als 20 Jahre) im subpolaren Nordatlantik zu untersuchen, wurden zwei 4-Jahresperioden gegenüber gestellt (Abb. 7 aus Rhein et al., 2015). 1996-1999 repräsentiert die Zeit kurz nach der länger andauernden Phase mit intensiver tiefer Konvektion, während 2007-2010 eine Zeit mit eher schwacher Ventilationsfähigkeit ist, wenn man den Winter 2008 mit Konvektionstiefen bis 1800m Tiefe ausnimmt (z.B. Kieke und Yashayev, 2015)).

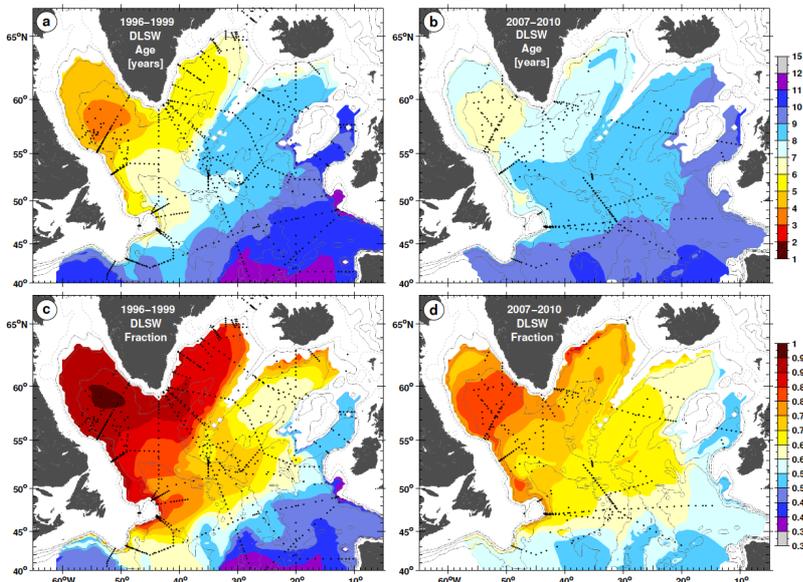


Abb. 7 Alter (a,b) und Anteil von jungem Wasser für das DLSW (dense LSW) (c,d). Linke Spalte: 1996-1999, rechte Spalte: 2007-2010. DLSW wird nur durch intensive, tiefreichende Konvektion gebildet (aus Rhein et al., 2015).

Bemerkenswert ist die Angleichung der Alter des DLSW (dense LSW, Dichten größer als 27.74) zwischen den beiden Zeiträumen in Ost- und Westatlantik. Der Westatlantik wird älter – da kein neues DLSW gebildet wird – und der Ostatlantik jünger, da immer noch junges DLSW nach Osten fließt (Rhein et al., 2015). Die Ausbreitung nach Süden wurde in dem hier zitierten Manuskript ebenfalls

untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass der westliche Randstrom kontinuierlich junges Tiefenwasser befördert und den schnellsten Pfad in die südliche Hemisphäre bildet. Die Wechselwirkung mit dem Ozeaninneren ist regional unterschiedlich und abhängig von der regionalen Zirkulation. Randstromtransporte von jungem Tiefenwasser liegen am Ausgang der Labradorsee bei 14 Sv für LSW und 6 Sv für DSOW, und sie nehmen zwischen 47°N und 42°N um etwa 50% ab, ein weiterer signifikanter Abfall bis 26°N ist nicht zu erkennen (Tab. 4, aus Rhein et al., 2015).

Tabelle 4. LSW and DSOW Transporte aus Verankerungen und den Anteilen an jungem Wasser

Latitude	Distance [km]	Volume Transports* [Sv]		Fraction of young water**		Transport of young water** [Sv]	
		LSW	DSOW	LSW	DSOW	LSW	DSOW
53°N	200	20.0	4.8	0.96±0.02	0.85±0.04	19.2±0.4	4.1±0.2
47°N	1200	14.5	6.1	0.92±0.03	0.81±0.04	13.3±0.4	4.9±0.2
42°N	2000	7.0	3.6	0.84±0.04	0.66±0.06	5.9±0.3	2.4±0.2
39°N	4200	10.0	4.0	0.56±0.03	0.48±0.03	5.6±0.3	2.0±0.1
26°N	5800	11.0	5.0	0.42±0.03	0.30±0.01	4.6±0.3	1.5±0.1

**DWBC Transporte aus Verankerungen: 53°N: Fischer et al. [2010]; 47°N (Flemish Cap): Mertens et al. [2014], 42°N: Schott et al. [2006]; 39°N (Line W): Toole et al. [2011]; 26°N: DWBC Transport 800-4800m: 32 Sv : Meinen et al. [2013]; LSW und DSOW Transports berechnet mit den LSW und DSOW Schichtdicken bei 26°N von van Sebille et al. [2011] und mit der Annahme, dass der Transport über alle Tiefenbereiche gleichmäßig verteilt ist. **Die Unsicherheiten in den Anteilen von jungem Wasser sind die Standardabweichungen aus den einzelnen Realisierungen und die Unsicherheiten in den Transporten sind daraus berechnet. Die Standardabweichungen der Transporte aus den Verankerungen ist hier nicht berücksichtigt worden (aus Rhein et al., 2015).*

Durch die Auswertung von Argo-Daten aus der Labradorsee können seit etwa 2003 saisonal aufgelöste Zeitreihen der Salzgehalts und Temperaturverteilung im LSW Bildungsgebiet hergestellt werden (Abb. 8). Die erneute Abkühlung und geringere Salzgehalte im Winter 2013/14 reichen bis in 1800m Tiefe und deuten auf eine Bildung von dichteren LSW Moden hin als in den vorigen Jahren (Kieke und Yashayaev, 2015).

In Zusammenarbeit mit G. Lohmann und seiner Arbeitsgruppe am AWI wurden in dieser Veröffentlichung die beobachteten Eigenschaften und Bildungsraten von LSW mit denen im finiten Elemente Modell (FESOM) des AWI verglichen (Scholz et al., 2014). Das Modell hat die höchste räumliche Auflösung in der Labradorsee mit 7 km. Das Modell kann die beobachteten Eigenschaften simulieren. Im Modell ist die Hauptursache für die Variabilität in der LSW Bildungsrate und in den LSW Eigenschaften ein atmosphärischer Mode, der große Ähnlichkeit mit der NAO hat.

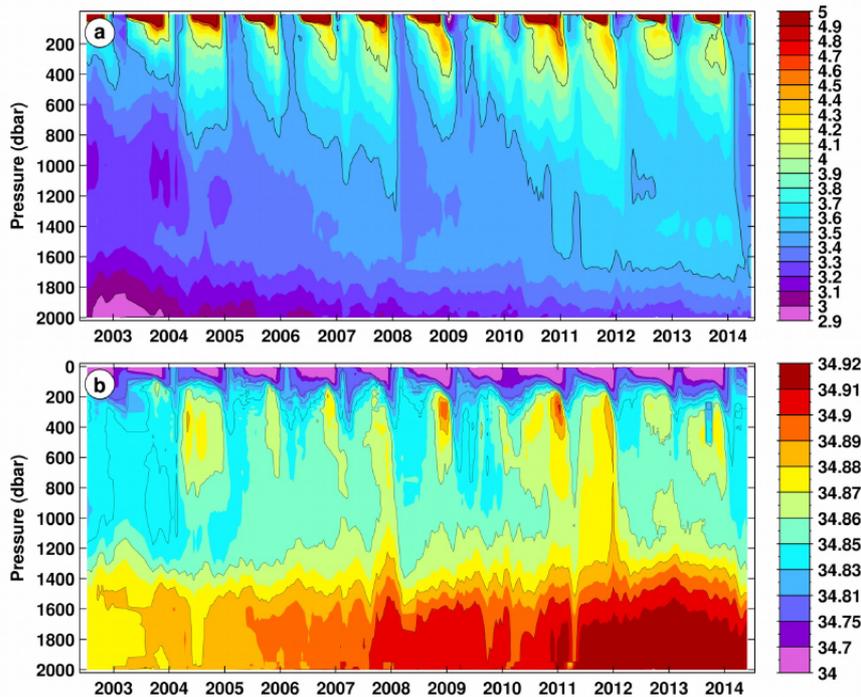


Abb. 8 Temperatur (a) und Salzgehalts-Zeitreihe (b) aus der zentralen Labradorsee aus Argo-Daten (aus Kieke und Yashayaev, 2015).

Weitere Veröffentlichungen mit Daten bzw Ko-Autorenschaft von AP1.2 im Projektzeitraum

Die Tiefenwasserbildung war der Schwerpunkt des Artikels von Bullister et al., (2013) in der neuen Version des WOCE Buchs, und dies ist auch ein RACE Thema.

Kieke (2013) stellte in der Neuauflage des Buches: Warnsignal Klima: Die Polarregionen, den Zusammenhang zwischen Klima und Tiefenwasserbildung her.

Walter und Mertens (2013) veröffentlichten ihre Schlussfolgerungen zur diapyrnischen Vermischung und der Lage der Subpolarfront bzw von Wirbeln, die sie mit Hilfe der in RACE gewonnenen Daten am MAR erzielt haben.

In Stendardo et al., (2014) wurde aus der Variabilität der Sauerstoff-Verteilungen entlang 47°N im Ostbecken der Einfluss der Nordatlantischen Oszillation (NAO) auf die Ventilation und räumliche Verteilung der Wassermassen diskutiert. Die Daten ab 2006 waren Teil der NORDATLANTIK und der RACE Fahrten.

Vorträge, Poster, auf nationalen und internationalen Tagungen und Workshops

Ergebnisse, die sich auf dieses Projekt bzw. auf Daten aus diesem Projekt beziehen, wurden im Projektzeitraum in Form von Posterbeiträgen und zum Teil eingeladenen Vorträgen auf vielen Workshops und Konferenzen vorgestellt. M. Rhein war Convener von Sessions über Themen von RACE (2015 EGU in Wien und 2013 IUGG Tagung in Göteborg). Eine Auflistung der Präsentationen ist auf www.ocean.uni-bremen.de zu finden.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die für Personalausgaben beantragten und bewilligten Mittel wurden wie vorgesehen für die Beschäftigung von Achim Roessler ausgegeben

Die für Investitionen zur Verfügung stehenden Mittel wurden wie bewilligt eingesetzt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit war in vollem Umfang notwendig und den Zielen des Forschungsvorhabens angemessen.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Dies ist ein Projekt der Grundlagenforschung, daher waren keine unmittelbaren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten zu erwarten und haben sich auch nicht unerwartet eröffnet. Allerdings sind die im Projekt gewonnenen Daten wichtig für die Validierung von Modellen und für ein erweitertes Verständnis der Prozesse, die im subpolaren Nordatlantik die klimarelevante Zirkulation beeinflussen.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während des Vorhabens

Innerhalb des Verbundes erfolgte die gegenseitige Information über Fortschritte der einzelnen TP bei entsprechend anberaumten Treffen und zwischenzeitlich per Email.

Wissenschaftliche Fortschritte außerhalb des Verbundes wurden durch laufende Sichtung neuer Veröffentlichungen verfolgt, bzw. auf Workshops und Meetings diskutiert und bei der eigenen Arbeit soweit relevant berücksichtigt. Es wurden aber keine Fortschritte an anderer Stelle bekannt, die das eigene Arbeitsprogramm nennenswert beeinflusst haben oder gar die angestrebten eigenen Ergebnisse vorweggenommen hätten.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen (ab Oktober 2012 – Dez. 2015)

Erfolgte Veröffentlichungen mit Daten / Koautoren RACE / Nordatlantik: (fett: Mitglieder der AG Rhein)

- Bullister, J., **M. Rhein**, and C. Mauritzen (2013), Deep Water Formation. In: *Ocean Circulation and Climate - Observing and Modelling the Global Ocean, second edition*, Hrsg.: G. Siedler, J. Church, J. Gould and S. Griffies, Academic Press.
- Fischer, J., J. Karstensen, R. Zantopp, M. Visbeck, A. Biastoch, E. Behrens, C. Böning, D. Quadfasel, K. Jochumsen, H. Valdimarsson, S. Jonsson, S. Bacon, N. P. Holliday, S. Dye, **M. Rhein**, and **C. Mertens (2015)**, Intra-seasonal variability of the Deep Western Boundary Current in the western subpolar North Atlantic. *Prog. Oceanogr.*, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.002, i
- Kieke, D.**, and I. Yashayaev (2015), Studies of Labrador Sea Water formation and variability in the subpolar North Atlantic in the light of international partnership and collaboration. *Prog. Oceanogr.*, doi:10.1016/j.pocean.2014.12.010
- Kieke, D. (2014)**, Änderungen in der Nordatlantischen Tiefenwasserbildung und ihre Auswirkungen auf das Europäische Klima. In: *Warnsignal Klima: Die Polarregionen*, [J. L. Lozan, H. Graßl, D. Piepenburg, D. Notz (Hrsg.)], Verlag Wissenschaftliche Auswertungen, ISBN 39809668-60.
- Kieke, D. und Ko-Autoren (2014)**, FLEPVAR 2013 (Flemish Pass Variability 2013) - Cruise MSM27 - April 19-May 06, 2013 - St. John's (Canada) - St. John's (Canada). *MARIA S. MERIAN-Berichte MSM27*, 26 pp., DFG-Senatskommission für Ozeanographie, doi:10.2312/cr_msm27.
- Kucera, M., M. Rhein und G. Kohl (2014)**, Oceanography and geodynamics in the NW Atlantic and the Baffin Bay - Cruise No. MSM09 - July 23-October 29, 2008 - Bremen (Germany) - Ponta Delgada (Azores). *MARIA S. MERIAN-Berichte MSM09*, 128 pp., DFG-Senatskommission für Ozeanographie, 10.2312/cr_msm09.
- Mertens, C., M. Rhein, M. Walter, C. W. Böning, E. Behrens, D. Kieke, R. Steinfeldt, and U. Stöber (2014)**, Circulation and transports in the Newfoundland Basin, western subpolar North Atlantic, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2014JC010019
- Rhein, M., et al., (2013)**, Observations: *Ocean*, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Chapter 3, [Stocker, T.F., et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Rhein, M., D. Kieke und R. Steinfeldt (2015)**, Advection of North Atlantic Deep Water from the Labrador Sea to the southern hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 120, 2471-2487, doi:10.1002/2014JC010605.
- Schneider, L., D. Kieke, K. Jochumsen, E. Colbourne, I. Yashayaev, R. Steinfeldt, E. Varotsou, N. Serra und M. Rhein (2015)**, Variability of Labrador Sea Water transported through Flemish Pass during 1993 - 2013, *J. Geophys. Res.*, 120, 5514-5533, doi:10.1002/2015JC010939.
- Scholz, P., **D. Kieke**, G. Lohmann, M. Ionita, und **M. Rhein (2014)**, Evaluation of Labrador Sea Water formation in a global Finite-Element Sea-Ice Ocean Model setup, based on a comparison with observational data *J. Geophys. Res.*, 119, 1644-1667, doi:10.1002/2013JC009232.
- Stendardo, I., D. Kieke, M. Rhein, N. Gruber und R. Steinfeldt (2015)**, Interannual to decadal oxygen variability in the mid-depth water masses of the eastern North Atlantic, *Deep-Sea Res. I*, 95(1), 85-98, doi:10.1016/j.dsr.2014.10.009.
- Walter, M. und C. Mertens, (2013)**, Mid-depth mixing linked to North Atlantic Current variability, *Geophys. Res. Lett.*, 40(18), 4869-4875, doi:10.1002/grl.50936.

Geplant

- Breckenfelder, T., M. Rhein, A. Biastoch, C. Böning, C. Mertens, and A. Roessler**, „Modeled and observed inflow of the North Atlantic Current into the eastern Atlantic“, *manuscript in preparation*).
- Mertens et al.**, Circulation in the Newfoundland Basin from repeat LADCP sections (in preparation)
- Roessler et al.**, Time series of the NAC circulation in the western subpolar North Atlantic from observations (in preparation)
- Kieke et al.**, LSW formation rates 2005 – 2015 from SF₆ and CFC data (in preparation)

Studienarbeiten, Doktor-, Diplom-, Master- und Bachelor-Arbeiten, die sich mit der Thematik und/oder mit Daten aus dem AP2.1 befassen: (ab Okt 2012)

- Rößler, A.**, (2013), Observed subpolar gyre transports at the Mid-Atlantic Ridge. *Dissertation*, Universität Bremen, 121 pgs, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:46-00103001-19>
- Li, Ming Ming** (2013), Diapycnal Mixing in the subpolar North Atlantic. *Dissertation*, Universität Bremen
- Horn, Myriell** (2015), Frontal analysis of the shelf region off the western North Atlantic *Master Thesis*, Universität Oldenburg
- Wolpmann, Tim** (2015), Das meridionale Strömungssystem aus direkten Messungen. *Bachelor*, Universität Bremen
- Denker, Tom**, (2015) Temporal variability of vertical shear variance at the Flemish Cap. *Bachelor*, Universität Bremen
- Gerken, Jan**, (2015) Analyse von Thermosalinographendaten aus dem Nordatlantik. *Bachelor*, Universität Bremen

III. Erfolgskontrollbericht

III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen soweit dies möglich ist

Das Projekt dient einem besseren Verständnis einer der Schlüsselregionen des Ozeans, bei denen Änderungen insbesondere für Westeuropa klimarelevant sind. Es leistet damit im Bereich Meeresforschung einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele von FONA

III.2 Wissenschaftlicher Erfolg, Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Die wesentlichen Ziele des Projekts wurden erreicht. Zum ersten Mal überhaupt konnte die Zirkulation im subpolaren westlichen Atlantik quantifiziert werden. Zum ersten Mal liegt eine 22 jährige kontinuierliche Transportzeitreihe des Nordatlantikstroms vor, die nicht zum Randstrombereich gehört,

sondern in der Mitte des Nordatlantiks entlang des MAR verläuft. Das Nutzen der eigenen Daten mit Argoprofilen und Altimetrie machte es möglich, eine erst seit 2006 direkt gemessene Zeitreihe bis 1993 zu verlängern.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Erfindungen/Schutzrechanmeldungen etc.:

Dies ist ein Projekt der Grundlagenforschung. Patente und dergleichen waren daher nicht zu erwarten und sind auch nicht als Nebenergebnis abgefallen.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten:

Die erzielten Ergebnisse liegen im Bereich der Grundlagenforschung und sind direkt nicht wirtschaftlich verwertbar. Allerdings werden die gewonnenen Erkenntnisse helfen, den subpolaren Nordatlantik als Teil des Klimasystems besser zu verstehen und zukünftige Änderungen eher vorhersagen zu können.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden und werden in international begutachteten Zeitschriften publiziert. Sie stehen dann der Allgemeinheit zur Verfügung und andere Wissenschaftler können darauf aufbauen. Das Projekt dient somit dem wissenschaftlichen Fortschritt.

Die Daten selbst werden nach Abschluss der wissenschaftlichen Auswertung an internationale Datenzentren wie PANGAEA, WDC-MARE und GLODAP übermittelt und sind dort für die Weltöffentlichkeit zugänglich. Mit einem Teil der Daten ist dies bereits geschehen. Die Meta-Daten der hydrographischen Messaufnahmen sind zudem dem DOD gemeldet.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Das neue BMBF Verbundvorhaben *RACE II* fußt auch auf den Ergebnissen, die im Projekt *Nordatlantik* und in *RACE I* gewonnen wurden. An der Frage des Zusammenhangs zwischen Stärke des Subpolarwirbels und den Änderungen an den westeuropäischen Küsten ist auch das BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg) interessiert, das Vorhaben fand und findet daher in enger Zusammenarbeit mit dem BSH statt.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

--

III.5 Präsentationsmöglichkeiten

Waren von der Art des Vorhabens her nicht vorgesehen; somit sind hierzu auch keine Angaben möglich.

III.6 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans

Der Finanzierungs- und Zeitplan wurde im Wesentlichen eingehalten. Die Verlängerung des Projekts bis 31.12.2015 erfolgte kostenneutral.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart: Abschlussbericht		
3a. Titel des Berichts Abschlussbericht des Teilprojektes AP 1.2 im Verbundvorhaben RACE			
3b. Titel der Publikation			
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Rhein, Monika		5. Abschlussdatum des Vorhabens: 31.12.2015	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Bremen Institut für Umweltphysik Abteilung Ozeanographie Otto-Hahn-Allee, Geb. NW1 28359 Bremen		7. Form der Publikation	
		9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
		10. Förderkennzeichen *) 03F0651C	
		11a. Seitenzahl Bericht	
		11b. Seitenzahl Publikation 15	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		12. Literaturangaben	
		14. Tabellen 4	
		15. Abbildungen 8	
		16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)			
18. Kurzfassung Der subpolare Nordatlantik ist eine der ozeanischen Schlüsselregionen, die sehr sensitiv auf Änderungen im atmosphärischen Antrieb reagieren. Die hohe Sensitivität führt dazu, dass natürliche Änderungen im atmosphärischen Antrieb eine hohe natürliche Variabilität im subpolaren Nordatlantik zur Folge haben, und dadurch wird die Identifizierung von anthropogen verursachten Schwankungen erschwert. Obwohl derzeit die natürliche Variabilität den Einfluss der Klimaerwärmung dominiert, werden Untersuchungen von heutigen Zirkulationsschwankungen und Wassermassenänderungen auch zu einem besseren Verständnis der durch die globale Erwärmung zu erwartenden zukünftigen Änderungen beitragen. Kern der Untersuchungen sind die Messung und Analyse der Schwankungen in den Hauptkomponenten der subpolaren Zirkulation (westlicher Randstrom, Einstrom und Rezirkulation von subtropischem Wasser im Westatlantik, Stärke des Subpolarwirbels beim Einstrom in den Ostatlantik) und ihr Zusammenhang mit den Schwankungen der Tiefenwasserbildung in der Labradorsee und der Ausbreitung von Wärme und Frischwasser-Anomalien. Dies geschieht mit Hilfe von Schiffsmessungen (CTD/LADCP, Tracer), verankerten Geräten, Argo- und Altimeterdaten, sowie mit Ergebnissen aus hoch-auflösenden Ozeanmodellen. Die Hauptidee sind die erstmalige Quantifizierung der mittleren klimarelevanten Zirkulation im westlichen subpolaren Atlantik aus Beobachtungen und die Erstellung und Interpretation einer 22 jährigen kontinuierlichen Transportzeitreihe des Nordatlantikstroms im offenen Ozean.			
19. Schlagwörter Physikalische Ozeanographie, Zirkulation, Transport – Zeitreihen, Wassermassen - Transformation			

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.