

Abschlussbericht zum Teilprojekt

# Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

Im Ozean/CLIVAR-Programm für die Programmkomponente B1  
*Dekadische Klimavariabilität im atlantischen und südlichen Ozean*

Förderkennzeichen: 03F0377C

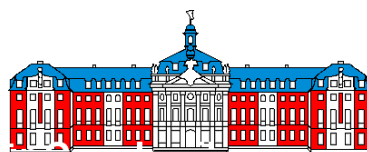
Objektnummer: 9120066

Ausführende Stelle: Institut für Geophysik  
Westfälische Wilhelms-Universität Münster  
Corrensstraße 24  
48149 Münster

Projektleiter: Prof. Dr. Manfred A. Lange  
Dr. Klaus Grosfeld (Universität Bremen/Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung)

Mitarbeiter: Dr. Malte Thoma  
Dipl. Phys. Chris-Oliver Mohrholz

Berichtszeitraum: 01. 06. 2002 (01. 01. 2003) bis 31. 08. 2005



**Institut für Geophysik**  
Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Münster im April 2006

**Abschlußbericht zum Teilprojekt**  
*Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres*

---

Verbundprojekt

**CLIVAR marin**

Untersuchung der Rolle des Ozeans bei Klimaschwankungen

Teilvorhaben:

**Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres**

**Förderkennzeichen: 03F0377C**

(Institut für Geophysik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster,  
Corrensstraße 24, 48149 Münster;  
Fachbereich Physik, Universität Bremen, 28359 Bremen)

Münster, April 2006

**Kurzbericht zum Abschlußbericht**

Im Zentrum der Arbeiten des Projektes standen Untersuchungen zur Quantifizierung der Wechselwirkungen zwischen Ozean und Schelfeisen im Weddell-Sektor der Antarktis. Wesentliche methodische Ansätze umfassen die numerische Modellierung der Ozeanzirkulation vor und unter dem Schelfeis, die Quantifizierung der Schelfeisdynamik sowie die Kopplung der beiden Modellkomponenten in einem Modellsystem. Neben der Erfassung der wechselseitigen Abhängigkeiten von ozeanischen und eisdynamischen Prozessen nahm die Untersuchung der Folgen globaler Klimaveränderungen auf die betrachteten Prozesse einen wichtigen Raum ein. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Schelfeise im östlichen Weddellmeer (*Eastern Weddell Ice Shelves, EWIS*), auf die angrenzenden Meeresbereichen sowie auf das gesamte Weddellmeer. So konnte die Dynamik des Riiser-Larsenisen sowie des Brunt Schelfeises mit Hilfe eines numerischen 3D-Schelfeismodells erstmals quantitativ beschrieben werden. Dabei wurde auf eine eigens entwickelte Parametrisierung der Bewegungsabläufe entlang von Bruch- und Spannungszonen zurückgegriffen. Für das östliche Weddellmeer konnte anhand des numerischen Ozeanmodells gezeigt werden, dass Schmelzvorgänge an der Schelfeisbasis durch eine ausgeprägte Saisonalität gekennzeichnet sind. Werden bestimmte, die Folgen globalen Klimawandels stark vereinfachend wiedergebende Randbedingungen für die EWIS vorausgesetzt, so lassen sich mit unseren Modellen die Auswirkungen für veränderte Salz- und Temperaturverhältnisse im gesamten Weddellmeer abschätzen. Die Annahme von erhöhten Niederschlags- bzw. Akkumulationsraten auf der einen und von Erwärmungen der Wassersäule auf der anderen Seite, die auf Ergebnissen des 2. IPCC-Sachstandsberichts (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) beruhen führen in gekoppelten Modellen, die idealisierte Geometrien von Schelfeis und Bathymetrie voraussetzen, zu deutlichen Veränderungen der Wassermasseneigenschaften und der Schelfeismassenbilanz. Die hier durchgeführten Arbeiten behandeln Fragestellungen, die angesichts der immer deutlicher sich anzeichnenden Klimaveränderungen und der Rolle, die dabei von den Polargebieten eingenommen werden höchste Aktualität aufweisen. Die dabei erzielten Ergebnisse werden international anerkannt und beachtet.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

### Inhalt

<b>1. Abschlussbericht – Teil I</b>	<b>4</b>
1.1 Aufgabenstellung des Teilprojektes	4
<b>1.2 Voraussetzungen</b>	<b>4</b>
1.2.1 Modellkomponenten	4
1.2.2 Glaziologische und ozeanographische Datenbasis	5
1.2.3 Vorkenntnisse und Erfahrungen	5
1.2.4 Technische Ausstattung	5
<b>1.3 Planung und Ablauf des Teilprojektes</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Wissenschaftlich-technischer Kenntnisstand zu Beginn des Projektes</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b>	<b>7</b>
<b>2. Abschlussbericht - Teil II</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Wesentliche Ergebnisse des Teilprojektes</b>	<b>8</b>
2.1.1 Arbeiten an den numerischen Modellen	8
2.1.2 Modellierung des Riiser-Larsenisen und des Brunt Schelfeises	10
2.1.3 Ozeanmodellierung im östlichen Weddellmeergebiet	13
2.1.4 Klimasensitivität des östlichen Weddellmeergebiets	15
2.1.5 Ozeanmodelle des Weddellmeeres	18
2.1.6 Gekoppelte Modelle des Schelfeis-/Ozeansystems	20
<b>2.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse</b>	<b>22</b>
2.2.1 Wirtschaftlicher Nutzen	22
2.2.2 Wissenschaftlicher Nutzen	22
<b>2.3 Entwicklung des Kenntnisstands während der Projektlaufzeit an anderen Stellen</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Erfolgte und geplante Publikationen</b>	<b>24</b>
2.4.1 Publikationen	24
2.4.2 Präsentationen	24
<b>2.5 Literaturhinweise</b>	<b>26</b>
<b>3. Abschlussbericht – Teil III</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Erfolgskontrollbericht</b>	<b>29</b>
3.1.1 Beitrag zu förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	29
3.1.2 Wissenschaftlicher und technischer Erfolg des Projektes	29
3.1.3 Zeit- und Finanzplan	29
3.1.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse	29
3.1.5 Erfindungen, Schutzrechteanmeldungen und erteilte Schutzrechte	30
3.1.6 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	30

# 1. ABSCHLUSSBERICHT – TEIL I

## 1.1 AUFGABENSTELLUNG DES TEILPROJEKTES

Die Wechselwirkung zwischen antarktischen Schelfeisen und dem Ozean steht im Zentrum des hier behandelten Teilprojektes. Diese Wechselwirkung hat sowohl im Hinblick auf die Dynamik und den Massenhaushalt der Schelfeise als auch für die Modifikation der Schelfwassermassen und die daraus folgende Bildung von Antarktischen Tiefen- und Bodenwasser erhebliche Bedeutung. Schmelzprozesse an der Schelfeisbasis beeinflussen sowohl die Dynamik der Eismassen als auch die Ablation (den Massenverlust) der Schelfeise. Neben dem an der Eisfront stattfindenden Eisbergkalben bilden Schmelzvorgänge an der Schelfeisbasis den wesentlichen Teil der Ablation, die mit der Akkumulation (Niederschlag/Schneefall) und dem Eiszutrag aus dem Inlandeis im Gleichgewicht steht. Bei sich ändernden ozeanischen Bedingungen, wird dieser Gleichgewichtszustand erheblich gestört. Dies zeigt sich sowohl in veränderten Schmelzraten an der Schelfeisbasis als auch in Änderungen des gesamten eisdynamischen Systems. Die dynamische Antwort des Schelfeisystems wirkt über die Übergangszone (*grounding line/grounding zone*) bis in das Inlandeis hinein.

Mittels hochauflösender Modellrechnungen mit einem Schelfeismodell und einem Ozeanmodell sollten im Rahmen dieses Teilprojektes die gegenwärtigen basalen Schmelzraten quantifiziert und der Süßwasserexport aus den Schelfeisgebieten des Weddellmeeres analysiert werden. Insbesondere der in bisherigen Studien nur unzulänglich berücksichtigte Bereich der östlichen Schelfeisgebiete (*Eastern Weddell Ice Shelves, EWIS*) des Weddellmeeres spielt hier eine besondere Rolle. Obgleich flächen- und volumenmäßig sehr viel kleiner als etwa das Filchner-Ronne Schelfeis (*Filchner-Ronne Ice Shelf; FRIS*), zeigen unsere Arbeiten, dass die EWIS einen erheblichen Beitrag für die Modifikation der in das Weddellmeer einströmenden Wassermassen leisten.

Ein zentrales Ziel zeitabhängiger Studien ist die Simulation der Ozean-Schelfeis-Systeme im Hinblick auf die in den 90er Jahren beobachtete Temperaturzunahme dieser Wassermassen. Die Untersuchungen zielten darauf ab, eine genauere Kenntnis über die Auswirkungen derartiger Veränderungen auf die Schelfeisgebiete zu erlangen, um daraus die Bedeutung der Schelfeisgebiete für großskalige Untersuchungen in der Klimaforschung abzuschätzen. Dem wurde in dem vorliegenden Projekt umfassend nachgegangen.

## 1.2 VORAUSSETZUNGEN

### 1.2.1 Modellkomponenten

Aufbauend auf die erste Projektphase CLIVAR/marin-1 standen für die geplanten Modellrechnungen zu Projektbeginn die entsprechenden Modellkomponenten **Ozean-Zirkulationsmodell** und **dynamisches Schelfeismodell** zur Verfügung. Darüber hinaus wurde ein hierfür eigens entwickeltes Verbindungsmodul bereitgestellt, mit dem die zuvor genannten Modellkomponenten zu einem gekoppelten Modellsystem zusammengeführt werden konnten.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

#### 1.2.2 *Glaziologische und ozeanographische Datenbasis*

Aus den beiden Untersuchungsgebieten Filchner-Ronne Schelfeis und Larsen Schelfeis sind umfangreiche Primärdatensätze verfügbar, z. B. Eisoberflächenhöhen-, Eismächtigkeits- und Bathymetriedaten, wie auch Hydrographie und Einzelpunktmessungen eisdynamischer und massenhaushaltsrelevanter Größen. Dies ist jedoch für die östlichen Schelfeisgebiete des Weddellmeeres nur in sehr viel beschränkterem Umfang gegeben. Deshalb mussten im Rahmen dieses Projektes zunächst detaillierte digitale geometrische Modelle der EWIS erarbeitet werden. Hierbei konnte auf unterschiedliche Basisdatensätze des BEDMAP-Konsortiums sowie andere veröffentlichte Datensätze zurückgegriffen werden (s. u.).

#### 1.2.3 *Vorkenntnisse und Erfahrungen*

Aufgrund der verspäteten Bewilligungszusage dieses Projektes konnten die bisherigen Mitarbeiter und einer der Antragsteller nicht an der Universität Münster weiterbeschäftigt werden. Dies hatte für das Projekt eine deutlich veränderte Personalsituation zur Folge, die nicht ohne Einfluss auf den Arbeitsablauf blieb. Erst zum 01. 01. 2003 konnte ein Nachwuchswissenschaftler (Dr. Malte Thoma) und zum 01. 04. 2003 ein Doktorand (Dipl. Phys. Chris-Oliver Mohrholz) für das Projekt gewonnen werden. Beide Personen mussten neu in die Projekthinhalte und die zu bearbeitenden Modellkomponenten eingearbeitet werden. Dies ist einer der Gründe dafür, dass im Laufe des Projektes der Schwerpunkt der Arbeiten auf das östliche Weddellmeer verlagert wurde. Ein weiterer Grund liegt darin, dass die eisdynamische Modellierung der Bruch- und Spaltdynamik, wie sie in den EWIS anzutreffen ist, erhebliches wissenschaftliches Innovationspotential bietet. Allerdings haben sich die darauf gerichteten Arbeiten als besonders zeitaufwändig herausgestellt, sodass die genannten Fragestellungen durch den im Projekt beschäftigten Doktoranden (Dipl. Phys. Chris-Oliver Mohrholz) nicht in vollem Umfang zu bearbeiten waren.

#### 1.2.4 *Technische Ausstattung*

Für die Bearbeitung des Projektes wurden aus Projektmitteln ein Doppelprozessorrechner (Intel® Xeon™, CPU 2.4 GHz) sowie zwei Hochleistungsrechner (Intel® Pentium®, 4 CPU 2.8 GHz; Intel® Pentium®, 4 CPU 3.0 GHz) angeschafft und eingesetzt. Der Doppelprozessorrechner wurde dabei als zentrale Datenserver genutzt.

### 1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES TEILPROJEKTES

Aufgrund der oben bereits angesprochenen personellen Umstrukturierung am Beginn des Projekts konnte, nicht wie ursprünglich beantragt, auf die Expertise der bisher im (Vorgänger-) Projekt beschäftigten Mitarbeiter zurückgegriffen werden. Die neuen Mitarbeiter mussten in die Arbeitswerkzeuge (Ozean- und Schelfeismodell) eingearbeitet werden. Insbesondere die im Projekt geplante Nachwuchswissenschaftler-Stelle für den Bereich der Eismodellierung wurde nun durch einen Doktoranden ausgefüllt. Hierdurch hat sich der Schwerpunkt unserer Arbeiten, wie ebenfalls bereits kurz angesprochen, deutlich verlagert. Dies hatte jedoch zur Folge, dass andere wichtige Aspekte der Wechselwirkung Eis-Ozean stärker herausgebildet und bearbeitet wurden, was für den Projektverlauf und die erzielten Ergebnisse insgesamt positive Konsequenzen hat.

Die so vorgenommene Neuorientierung des Projekts führte zu den folgenden drei, den Förderjahren angepasste Phasen/Arbeitsschwerpunkte:

- a) Einarbeitung der neuen Mitarbeiter in die Modellkomponenten: Beide der neuen Mitarbeiter haben einen anderen wissenschaftlichen Hintergrund der nur teilweise für das hier vorliegende Projekt nutzbar war. Daher war das erste Projektjahr durch eine intensive

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

Einarbeitung der Mitarbeiter in die glaziologischen Fragestellungen und deren Umsetzung in die genannten Modellkomponenten gekennzeichnet. Der von im Vergleich zu den zuvor beschäftigten Mitarbeitern unterschiedliche Erfahrungshorizont der neuen Mitarbeiter hatte allerdings auch zur Folge, dass die vorhandenen Modelle gründlich überarbeitet und zum Teil gänzlich neu gestaltet wurden. Hierfür wurde das nicht-kommerzielle, frei verfügbare *Concurrent Versions System (cvs)* als *Version Control System* eingeführt. Dieses dient einerseits als Archivierungsinstrument sowie für die Qualitäts- und Fehlerkontrolle, andererseits aber wird erst durch den Einsatz des cvs die effektive Zusammenarbeit mehrerer Mitarbeiter an einem gemeinsamen Softwareprojekt ermöglicht.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt des ersten Projektjahrs bildete die Erarbeitung der für das östliche Weddellmeer notwendigen geometrischen Eingabe-, Rand- und Antriebsdatensätze. Insbesondere in schelfeisbedeckten Gebieten ist die Geometrie des Untersuchungsgebietes von größter Bedeutung, da sowohl das ozeanische Strömungsregime in den Schelfeiskavernen (dies ist der wassergefüllten Zwischenraum zwischen der Schelfeisbasis und dem Meeresboden) als auch die Dynamik des Schelfeises selbst stark von dessen Geometrie geprägt sind.

- b) Erarbeitung der grundlegenden Zirkulations- und Fließregime der das östliche Weddellmeer säumenden Schelfeisgebiete: Im Zentrum des zweiten Projektjahrs standen zum einen Sensitivitätsstudien zum Einfluss klimainduzierter Änderungen der Ozeanwassermassen auf die Schelfeisregion. Zum anderen wurden umfangreiche Arbeiten zur Verbesserung der Parametrisierung system-immanenter Prozesse durchgeführt. Hierzu zählen verbesserte Mischungsschemata in der Wassersäule sowie die Parametrisierung von eisdynamischen Prozessen in Bruch- und Spaltenzonen von Schelfeisen.
- c) Optimierung der numerischen Modelle auf der Grundlage der Validation der erhaltenen Modellergebnisse im Vergleich zu Beobachtungsdaten: Das dritte Projektjahr beinhaltete umfangreiche Arbeiten zur Abschätzung des Süßwasser-exports aus den östlichen Schelfgebieten (EWIS) als Folge von Schmelzprozessen an der Schelfeisbasis. Daraus konnten Rückschlüsse auf den Einfluss dieser Schmelzwasserflüsse auf die Wassermassenbildung im Weddellmeer gezogen werden. Des Weiteren erfolgten umfassende Stabilitätsuntersuchungen zur Dynamik der Auslassgletscher und der Eisströme im EWIS sowie die Ableitung massenhaushaltsrelevanter Basisgrößen mit Hilfe des Eismodells.

Die hier umrissene Gliederung der Projektphasen umfasst die wesentlichen Punkte des im Projektantrag genannten Arbeitsplans. Die zunächst vorgesehene Ausdehnung der Modellierungstätigkeit auf die gesamten das Weddellmeer säumenden Schelfeisgebiete war unter den gegebenen Umständen nicht erreichbar.

Hinsichtlich der Ozeanmodellierung wurde während der Laufzeit des vorliegenden Projekts mit der Simulation der Prozesse im gesamten Weddellmeer und seinen angrenzenden Schelfgebieten begonnen. Erste Ergebnisse sind viel versprechend, konnten jedoch nicht vollständig zum Abschluss gebracht werden. Dies ist auch eine Folge des um vier Monate verspäteten Projektbeginns, der zu einer entsprechenden Verkürzung der Projektlaufzeit geführt hat.

Die gekoppelte Simulation der Schelfeis-Ozean-Systeme konnte in begrenztem Umfang auf die östlichen Schelfgebiete angewendet werden. Die überaus komplexen eisdynamischen Verhältnisse des EWIS haben jedoch eine abschließende konvergente Lösung bisher verhindert. Hierfür sind noch weiterführende Untersuchungen der Schelfeisdynamik erforderlich, die erst mit Abschluss der Doktorarbeit von Herrn Mohrholz erwartet werden.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

Eine umfassende Publikation zur gekoppelten Modellierung von idealisierten Schelfeis-Ozean-Systemen konnte jedoch während des Projektzeitraums von den Projektmitarbeitern abgeschlossen werden (2004). Diese stellt die erste Arbeit auf diesem Gebiet dar und bildet die Grundlage für weitere Modellstudien auf dem Gebiet gekoppelter Schelfeis-Ozean-Systeme.

#### 1.4 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER KENNNTNISSTAND ZU BEGINN DES PROJEKTES

Siehe hierzu frühere Arbeitsberichte des vorliegenden Projekts.

#### 1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Im Verlauf des Projektes wurde die Zusammenarbeit mit unterschiedlichen, auf dem Gebiet der Schelfeis-Ozean-Wechselwirkungen arbeitenden Gruppen gesucht. Die Zusammenarbeit umfasste je nach Themenbereich die intensive Diskussion von Modellergebnissen mit Dr. H. H. Hellmer, (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, AWI) und Dr. A. Jenkins (*British Antarctic Survey*) sowie den Datenaustausch im Rahmen spezieller Fragestellungen mit Dr. M. Schodlok (AWI), für das Larsen Schelfeis. Im Bereich der Modellentwicklung hat ein intensiver Austausch mit Dr. H. Sandhäger (AWI), der das ursprünglich verwendete Eismodell entwickelt hat, mit Dr. R. Gerdes (AWI) im Rahmen der Erweiterung des Ozeanmodells mit Hilfe des FCT-Schemas, sowie mit Dr. R. Timmermann (AWI) zu Fragen der Mischungsparametrisierung stattgefunden. Eine intensive Zusammenarbeit ergab sich auch mit Frau Dr. A., Humbert, Technische Universität Darmstadt, in deren Dissertation insbesondere Fragen der Schelfeisdynamik, die auch für unsere Arbeiten von Bedeutung sind, behandelt wurden.

## 2. ABSCHLUSSBERICHT - TEIL II

### 2.1 WESENTLICHE ERGEBNISSE DES TEILPROJEKTES

#### 2.1.1 Arbeiten an den numerischen Modellen

**Ozeanmodell:** Aufgrund der komplexen Bathymetrie sowie der Geometrie des Schelfeises im östlichen Weddellmeer (Abbildung 2-1) wurden größere Änderungen an dem bisher verwendeten Ozeanmodell notwendig. Um eine variable Schelfeisfront modellieren zu können war es erforderlich, alle Felder gleichzeitig im Arbeitsspeicher des Rechners vorhalten zu können. Dazu musste das bisher verwendete sog. *slab*-Speichermodell ersetzt werden. Dies gewährleistet zugleich, dass andere Erweiterungen des numerischen Modells wesentlich vereinfacht werden konnten. Erste Ergebnisse (Thoma et al., 2005) zeigen, dass das im Programmcode implementierte Mischungsschema an steilen, vom Schelfeis überdeckten Kontinentalschelfabhängen nur unzureichende Ergebnisse erbringt.

Daraufhin wurden verbesserte

Mischungsschemata höherer Ordnung implementiert<sup>1</sup>, die sich als wesentliche Verbesserung erwiesen. Hierdurch konnte eine stärkere Separierung der Strömungssysteme im Bereich des Schelfs sowie der Tiefsee erreicht werden. Dies hatte positive Auswirkungen auf die Simulation der Zirkulation in den Schelfeiskavernen. In Kombination mit neu entwickelten variablen Filteroperatoren für die Geometrie des Untersuchungsgebiets wurde so eine deutlich verbesserte Anpassung von Modellergebnissen an die Beobachtungsdaten erzielt. Die Ergebnisse der hierfür erforderlichen Parameterstudien sind in Thoma et al. (submitted-a) dokumentiert.

Die Entwicklung eines graphischen Auswertewerkzeugs, basierend auf den *Generic Mapping Tools* (Wessel and Smith, 1998) ermöglicht eine schnelle und umfassende Auswertung der generierten Modellergebnisse. Das gesamte ozeanische Modellpaket steht nun unter dem Namen **ROMBAX** (**R**evisited **O**cean **M**odel based on **B**ryan **A**nd **C**o**X**) als modulares Programmpaket für die Forschung und mögliche Weiterentwicklungen zur Verfügung.

**Schelfeismodell:** Da das ursprünglich verwendete Computermodell (Sandhäger, 2000) den Anforderungen eines gekoppelten Schelfeis-Ozean-Modellsystems nicht gewachsen war, waren

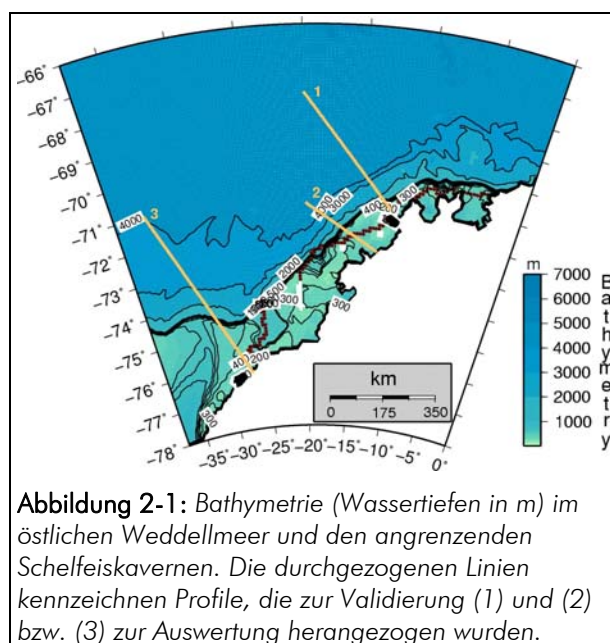


Abbildung 2-1: Bathymetrie (Wassertiefen in m) im östlichen Weddellmeer und den angrenzenden Schelfeiskavernen. Die durchgezogenen Linien kennzeichnen Profile, die zur Validierung (1) und (2) bzw. (3) zur Auswertung herangezogen wurden.

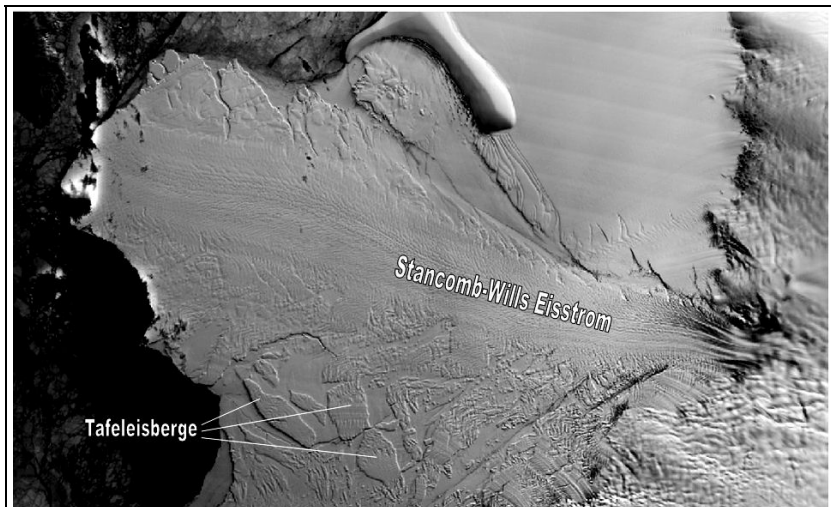
<sup>1</sup> Für die Impulsdiffusion wurden für die horizontale bzw. vertikale Vermischung ein Smagorinsky- (Griffies, 2004; Haidvogel and Beckmann, 1999; Smagorinsky, 1963) bzw. ein Richardson-Zahl-abhängiges Schema (Pacanowski and Philander, 1981) implementiert; für die Vermischung der konservativen Größen Temperatur und Salz wurde ein *flux-corrected transport* (FCT) Algorithmus von Gerdes (1993) übernommen.



## Abschlußbericht zum Teilprojekt

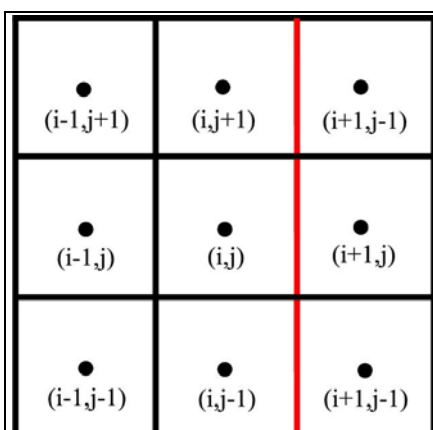
### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

umfassende Erweiterungen bzw. Neuprogrammierungen des vorliegenden Modells erforderlich. Diese Erweiterungen wurden zunächst an idealisierten Schelfeisgeometrien erprobt und verfeinert, um anschließend in der Gebietsmodellierung des Riiser-Larsenisen und Brunt Schelfeises Verwendung zu finden. Bei den Erweiterungen handelt es sich um die Neuformulierung des iterativen numerischen Verfahrens zur Lösung der



**Abbildung 2-2:** Ausschnitt eines Satellitenbildes des Stancomb-Wills Eisstroms im Brunt Schelfeis (detail aus Serreze et al., 2003).

Bewegungsgleichungen des Schelfeises (MacAyeal et al., 1986). Daneben wurden Randbedingungen überarbeitet und verfeinert und auf diese Weise die Verwendung der Randbedingungen eines freien Schelfeisrandes nach (Mayer, 1996) realisiert.



**Abbildung 2-3:** Schematische Darstellung des Modellgitters für das Finite Differenzen Schema unserer Modelle; die rote Grenzlinie kennzeichnet den Verlauf der Bruchzone im Modellgebiet.

Damit lassen sich mit dem Modell Schelfeiskörper behandeln, die im Extremfall vollständig mit freiem Wasser umgeben sind, d.h., es können mit unseren Modellansätzen Tafeleisberge behandelt werden. Dies ist deshalb erforderlich, weil die besonderen Bedingungen im Brunt Schelfeis auch großflächige Tafeleisberge beinhalten, die allerdings von Meereis umgeben und in den Schelfeiskörper integriert sind (Abbildung 2-2). Unsere Modellierungen unter Verwendung idealisierter Geometrien bestätigen im Detail numerische Experimente an realen Tafeleisberggeometrien von Jansen et al. (2005).

Eine weitere wichtige Modellmodifikation stellt die Berücksichtigung von ausgedehnten Scherzonen im Schelfeiskörper dar. Scherzonen werden vor allem im Übergangsbereich zwischen schnell fließenden Schelfeisregionen, etwa im Einflussbereich der Eisströme und langsam fließendem oder gegründetem Eis ausgebildet. Im Falle von Eisströmen können sich so Scherränder ausbilden,

die im Laufe der Entwicklung des Schelfeiskörpers ausgeprägte Bruchzonen formen die durch ausgeprägte eigene Fließregime gekennzeichnet sind. Eine solche Separationen oder Entkopplung von Teilen des Schelfeises lässt sich mit kontinuumsmechanischen Ansätzen nicht mehr beschreiben. Es werden daher neue Randbedingungen eingeführt, mit deren Hilfe die Gültigkeit der Modellgleichungen gewährleistet bleibt. MacAyeal et al. (1986) haben hierfür rheologische Randbedingungen formuliert, mit denen sich die Fließdynamik im Bereich von Eishöckern und Eiskuppeln im Ross Schelfeis beschreiben lassen. Das vollständige Fehlen von Mess- und Felddaten, etwa über die Tiefe der Bruchzonen und genauere Bewegungsabläufe im Bereich des Stancomb-Wills-Eisstromes, sowie die Schwierigkeit, exaktere Abschätzungen hierzu vorzunehmen, führte zu einer parametrisierten Formulierung der Randbedingungen. Diese baut auf zwei Annahmen auf:

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

1. Der Massenfluss senkrecht zu einem solchen Bruchverlauf ist gleich Null.
2. Die Änderungen der Geschwindigkeit parallel zum Bruchverlauf errechnen sich jeweils nur aus den auf einer Seite des Bruchs liegenden Punkten des Spannungsfeldes.

In Abbildung 2-3 ist ein solcher Bruchverlauf für ein hypothetisches Modellgitter schematisch wiedergegeben. Die Punkte links bzw. rechts der roten Linie stellen jeweils die Punkte separierter Fließregime dar. Die Randbedingungen selbst sind auf den Kanten der Gitterzellen definiert.

#### 2.1.2 Modellierung des Riiser-Larsenisen und des Brunt Schelfeises

Die diagnostischen Simulationen der Eisdynamik und des Massenhaushalts des Riiser-Larsenisen (auch Riiser-Larsen Schelfeis) und des Brunt Schelfeises wurden mit dem im Rahmen dieses Projekts erstellten numerischen Schelfeismodell CISIP durchgeführt. Abbildung 2-4 gibt einen Eindruck von der Morphologie der EWIS und zeigt die wichtigsten der hier genannten geographischen Einheiten.

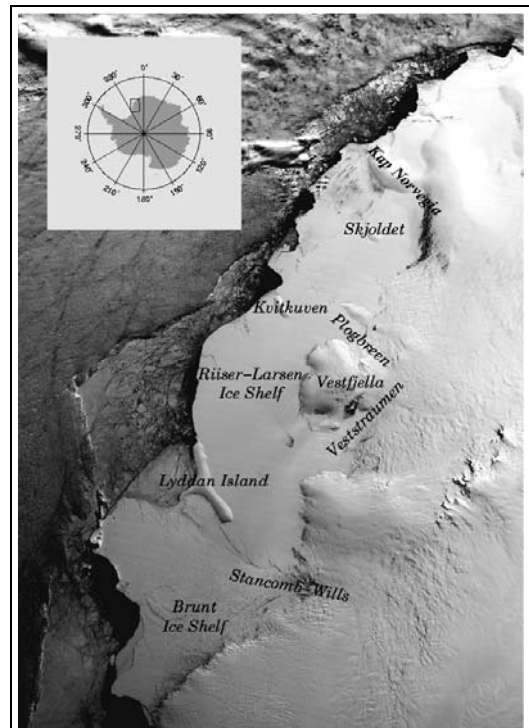


Abbildung 2-4: Satellitenbild der EWIS mit den wichtigsten geographischen Namen (Serreze et al., 2003).

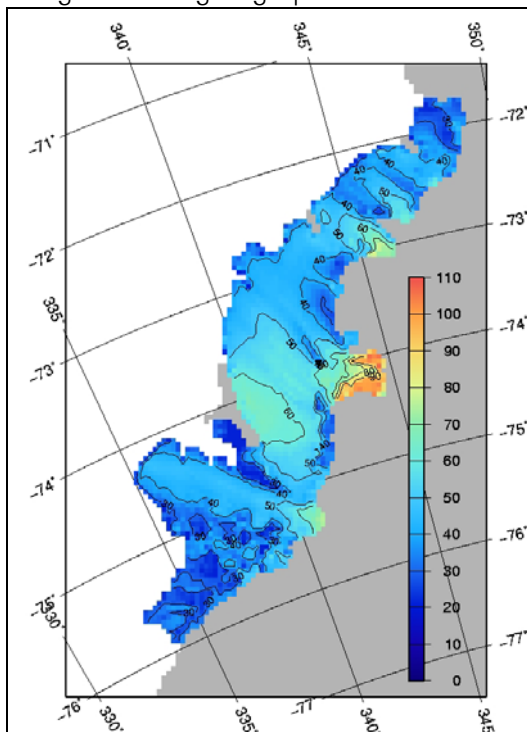


Abbildung 2-5: Aus dem RAMP-Datensatz (Arnell et al., 2001) abgeleitete Geländehöhen der EWIS in m über NN.

Als geometrische Grundlage des Modells dient die RAMP - Oberflächentopographie von Liu et al. (2001, Abbildung 2-5). Da dieser Datensatz mit den BEDMAP-Eismächtigkeiten (Lythe et al., 2000; Lythe et al., 2001) in weiten Bereich Diskrepanzen aufweist, insgesamt aber als vertrauenswürdiger eingeschätzt wird, werden die Eismächtigkeiten aus den Oberflächenhöhen bestimmt. Dabei wird ein hydrostatischer Ansatz genutzt, der von der Annahme ausgeht, dass sich der Eiskörper im Schwimgleichgewicht befindet.

Die Grenze zwischen Schelfeis und Eisschild bzw. zwischen gegründeten und aufschwimmenden Bereichen, die sog. Aufsetzlinie oder -zone (*grounding line, grounding zone*) wird unter Verwendung des ADD-Datensatzes festgelegt (BAS et al., 1998). Einzig im Bereich des Veststrømmen (Abbildung 2-4) wird die Aufsetzlinie aufgrund ihrer nicht eindeutig festlegbaren Lage im Höhendatensatz weiter in das Schelfeisgebiet hinein verschoben als es aus dem ADD-Datensatz ableitbar ist.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

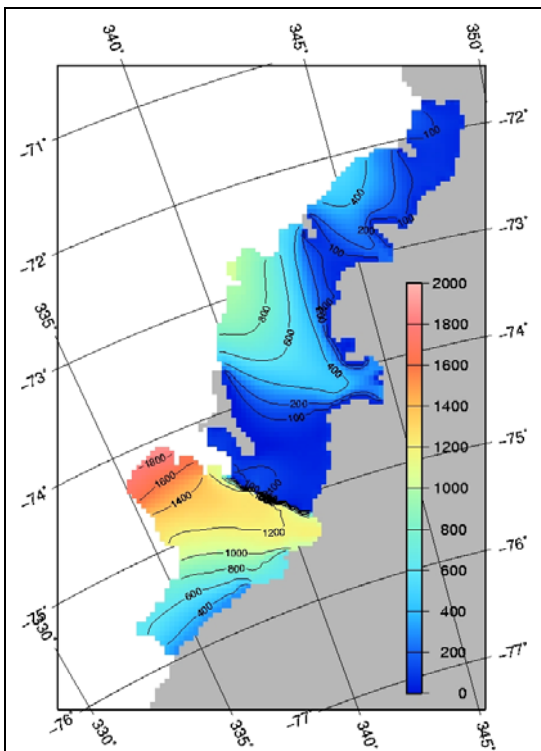


Abbildung 2-6: Betrag der berechneten horizontalen Oberflächengeschwindigkeiten (in  $\text{m a}^{-1}$ ).

Die diagnostischen Simulationen wurden auf der Basis eines äquidistantem Modellgitters mit  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  Auflösung durchgeführt. Die Ergebnisse für das Riiser-Larsenisen und das Brunt Schelfeis werden hier zwar gemeinsam dargestellt, da sie in einer Modellsimulation gewonnen wurden. Sie werden aber aufgrund der deutlich unterschiedlichen Fließregime beider Schelfeise gesondert diskutiert.

Das Bewegungsregime des **Riiser-Larsenisen** kann in drei Bereiche unterteilt werden, die jedoch durch keine starren Grenzen voneinander getrennt sind. Der kleinste Bereich liegt zwischen der Eiskuppel (ice rise) *Skjoldet* und *Kap Norvegia* (Abbildung 2-4). Aufgrund der direkten Nähe zur Eiskuppel bzw. zum Inland-Eisschild sind hier die Geschwindigkeiten relativ gering (Abbildung 2-6). Eine Validierung ist aufgrund fehlender Mess- und Beobachtungsdaten derzeit nicht möglich. Der zweite Bereich liegt zwischen den Eiskuppeln *Skjoldet* und *Kvitkuven* (Abbildung 2-4). Der Massenzutrag in diesen Bereich erfolgt hauptsächlich durch den *Plogbreen-Eisstrom*. Nach (Hedfors, 2004) fließt dieser mit einer Geschwindigkeit von etwa  $100 \text{ m a}^{-1}$  in das Schelfeis. Das modellierte Geschwindigkeitsfeld deckt sich weitestgehend mit Felduntersuchungen,

die zwischen 1974 und 1979 durchgeführt wurden (Gjessing and B.Wold, 1986; Orheim, 1986). So ermittelte Orheim (1986) 40 km östlich vom *Kvitkuven* minimale Geschwindigkeiten entlang der Eisfront von  $350$  bis  $400 \text{ m a}^{-1}$ , die im Modell ebenfalls erreicht werden. Der dritte und letzte Bereich zwischen *Kvitkuven* und *Lyddan Island* (Abbildung 2-4) wurde lediglich teilweise in unseren Modellen abgedeckt (Region westlich der Eiskuppel). Feldmessungen zeigen ein um  $50 \text{ m a}^{-1}$  bis  $100 \text{ m a}^{-1}$  stärkeres Anwachsen der Geschwindigkeit entlang der Eisfront als unsere Modellergebnisse. Weitere Untersuchungen in diesem Bereich des Riiser-Larsenisen liegen nur nahe der Aufsetzlinie des *Veststraumen* vor. So mündet dieser Eisstrom nach Holmlund et al. (2003) mit einer Geschwindigkeit von  $100$  bis  $150 \text{ m a}^{-1}$  in das Schelfeis ein. Im Modell wird für das entsprechende Gebiet eine Geschwindigkeit von  $200 \text{ m a}^{-1}$  simuliert. Dies ist dadurch begründet, dass unser Modellgebiet erst jenseits der Aufsetzlinie, bereits innerhalb des Riiser Larsenisen, beginnt. Dort liegen erfahrungsgemäß die Eisgeschwindigkeiten bereits oberhalb der Geschwindigkeiten an der Aufsetzlinie.

Im **Brunt Schelfeis** ist die zu lösende Problemstellung wesentlich komplexer als im Riiser-Larsenisen. Der

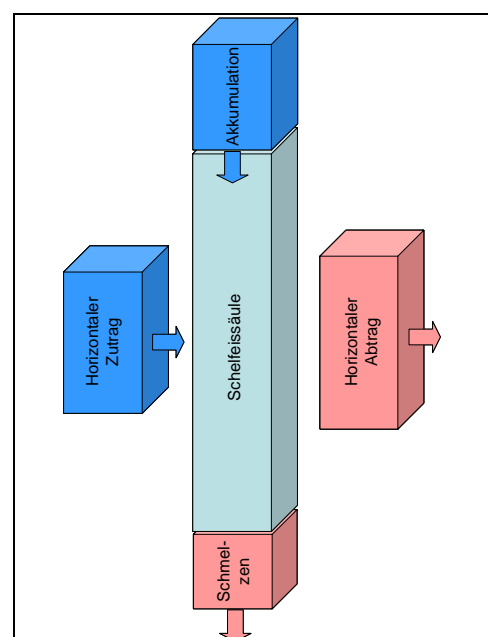


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Massenhaushaltsgrößen einer im stationären Zustand befindlichen Eissäule.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

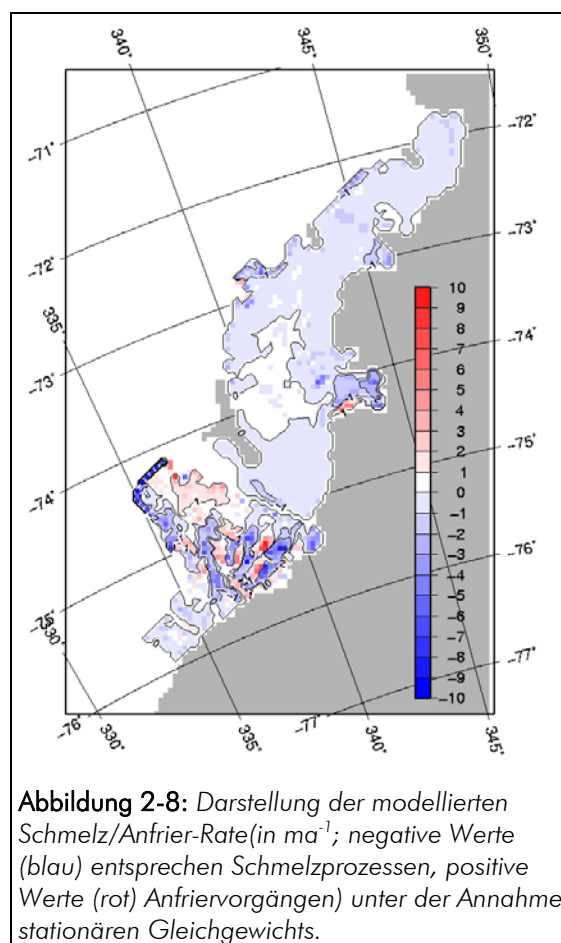
Stancomb-Wills Eisstrom (Abbildung 2-2 und 2-4), mit einer Geschwindigkeit von  $1000 \text{ m a}^{-1}$  (Lucchitta, 2001) bereits an der Aufsetzlinie und seiner ausgedehnten Scherzone an der Grenze zum Riiser-Larsenisen, stellt große Anforderungen an das numerische Modell. Diesen kann das Modell auch mit der in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Verbesserung der numerischen Methodiken nur zum Teil gerecht werden. Allerdings erweist sich die oben beschriebene Trennung der einzelnen Fließregime als wichtiges Werkzeug, mit dem die hohen Geschwindigkeitsgradienten (Baldwin et al., 2001) im Bereich der Scherzone näherungsweise reproduziert werden.

Im Bereich des Stancomb-Wills Eisstroms entspricht das modellierte Geschwindigkeitsfeld bis auf kleinere Abweichungen den Ergebnissen der Untersuchungen von Gray (2001) und Hulbe et al. (2005). Die Abweichungen lassen sich auf eine im vorliegenden Modell nicht lösbare Problemstellung am südlichen Rand des Stancomb-Wills Eisstromes zurückführen, die oben bereits angesprochen wurde. Die hier anzutreffenden, von Meereis eingeschlossenen Tafelberge, die in den Schelfeiskörper integriert sind (Abbildung 2-2), können von unserem Modell nur unzureichend aufgelöst und behandelt werden. Eine hierfür geeignete Modellformulierung/ Parametrisierung ist Gegenstand der Dissertation von C.-O. Mohrholz.

Im Vorfeld einer möglichen gekoppelten Schelfeis-/Ozeanmodellierung sollten bereits in diesem Stadium Abschätzungen zur basalen Massenbilanz, d.h., zu Schmelz- und Anfrierprozessen an der Schelfeisbasis vorgenommen werden. Geht man dabei von der Annahme aus, dass sich der Schelfeiskörper in einem stationären Zustand befindet (hierbei sind die zeitlichen Ableitungen der dynamischen- und der Zustandsgrößen gleich Null), kann aus Akkumulationsrate und der Größe des aus den Eisgeschwindigkeiten ableitbaren horizontalen Massetransports für jeden Punkt des Schelfeises eine Schmelz- bzw. Anfrierrate bestimmt werden. Diese lassen sich für jede Modellgittersäule als Differenz aus horizontalem Zu- und Abtrag sowie dem durch die Akkumulation bedingten Massenzutrag bestimmen (Abbildung 2-7).

Zur Festlegung der Akkumulationsrate wird ein Datensatz nach Vaughan et al. (1999) verwendet, der Massetransport lässt sich aus den im Modell berechneten Geschwindigkeitsfeldern ermitteln. Die Modellierung liefert eine mittlere Schmelzrate von  $0,645 \text{ m a}^{-1}$  über die gesamte Schelfeisbasis (Abbildung 2-8). Im Riiser-Larsenisen liegt das Modellergebnis in einer Größenordnung, die auch in den Untersuchungen von Gjessing und Wold (1986) angegeben werden.

Im Brunt Schelfeis kann die basale Massenbilanz in dieser vereinfachten Weise nicht bestimmt werden. Dies verhindern die komplizierten Eisbedingungen im zentralen Teil des Schelfeises (Abbildung 2-8). Für die vom Meereis eingeschlossenen Tafelberge lässt sich ein Gleichgewicht von Massenzu- und -abtrag nicht mehr annehmen. Daneben wird das Gleichgewicht durch erhöhte horizontale Massetransporte verfälscht.



**Abbildung 2-8:** Darstellung der modellierten Schmelz-/Anfrier-Rate (in  $\text{m a}^{-1}$ ; negative Werte (blau) entsprechen Schmelzprozessen, positive Werte (rot) Anfrievorgängen) unter der Annahme stationären Gleichgewichts.

#### 2.1.3 Ozeanmodellierung im östlichen Weddellmeergebiet

Das östliche Weddellmeer ist in vielfacher Hinsicht für die Betrachtung von Schelfeis-Ozean-Wechselwirkungsprozessen von besonderem Interesse, da hier diejenigen Wassermassen in das Weddellmeer einströmen, die weiter südwestlich zur Bildung des *Antarktischen Tiefen- und Bodenwassers* beitragen. Die Ergebnisse unserer Modelle für die Temperatur- und Salzverteilung im Wasserkörper stimmen mit den wenigen vorhandenen Messungen weitgehend überein. Dies lässt uns darauf vertrauen, dass die aus den Modellen abgeleiteten Konsequenzen unterschiedlicher Szenarien eines globalen Klimawandels als realistisch betrachtet werden können. Mit diesen Szenariostudien soll ein Beitrag zum besseren Verständnis der Klimasensitivität der Weddellmeerregion geleistet werden.

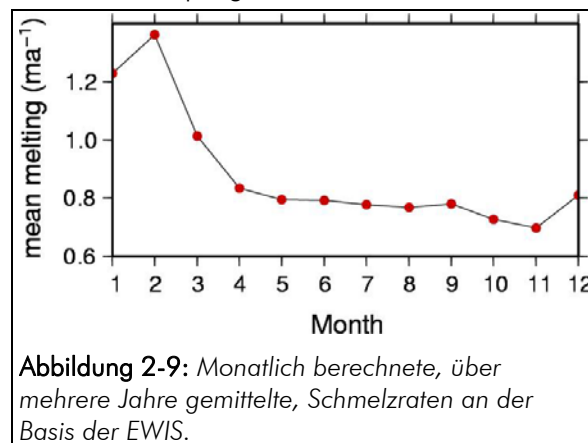


Abbildung 2-9: Monatlich berechnete, über mehrere Jahre gemittelte, Schmelzraten an der Basis der EWIS.

Hierzu sollen zunächst Schmelz- und Gefrierprozesse an der Basis der EWIS abgeschätzt werden, wobei der Süßwassereintrag in den Ozean von besonderem Interesse ist. Unser Referenzmodell liefert eine mittlere Nettoschmelzrate (Abbildung 2-9) von  $0,88 \text{ ma}^{-1}$  ( $2.1 \text{ mSv}$ ). Dieser Wert, der für beide Schelfeise (Riiser-Larsenisen und Brunt Schelfeis) bestimmt wurde, stimmt gut mit der aus dem Schelfeismodell abgeleiteten, nur für das Riiser-Larsenisen und Teile des Brunt Schelfeises ermittelten Schmelzrate von  $0,645 \text{ ma}^{-1}$  überein (s. o.). Von besonderer Bedeutung ist die zu beobachtende saisonale Variation der Schmelzrate, die im wesentlichen auf Schwankung der wärmeren sommerlichen Oberflächenwassermassen in der Nähe der Schelfeiskante zurückzuführen ist. Um die Robustheit der ermittelten Werte gegenüber veränderten Randbedingungen zu überprüfen, wurde eine Reihe von Sensitivitätsstudien durchgeführt. Diese erbrachten die folgenden Ergebnisse:

1. Eine Erhöhung des Einstroms von kalten, salzarmen Wassermassen entlang des Nullmeridians resultiert in einer Verminderung der mittleren Schmelzrate um 3 %.
2. Eine Verringerung des Oberflächensalzgehaltes (welche eine verminderte Meereisbildung widerspiegelt) führt zu einem 10 %igem Anstieg der Schmelzrate. Dieses Resultat ist konsistent mit den Ergebnissen von *Smedsrud et al. (2006)*.
3. Eine Verlängerung des Südsommers im Modell von drei auf vier Monate führt zu einer Schmelzratenerhöhung um 20 %.

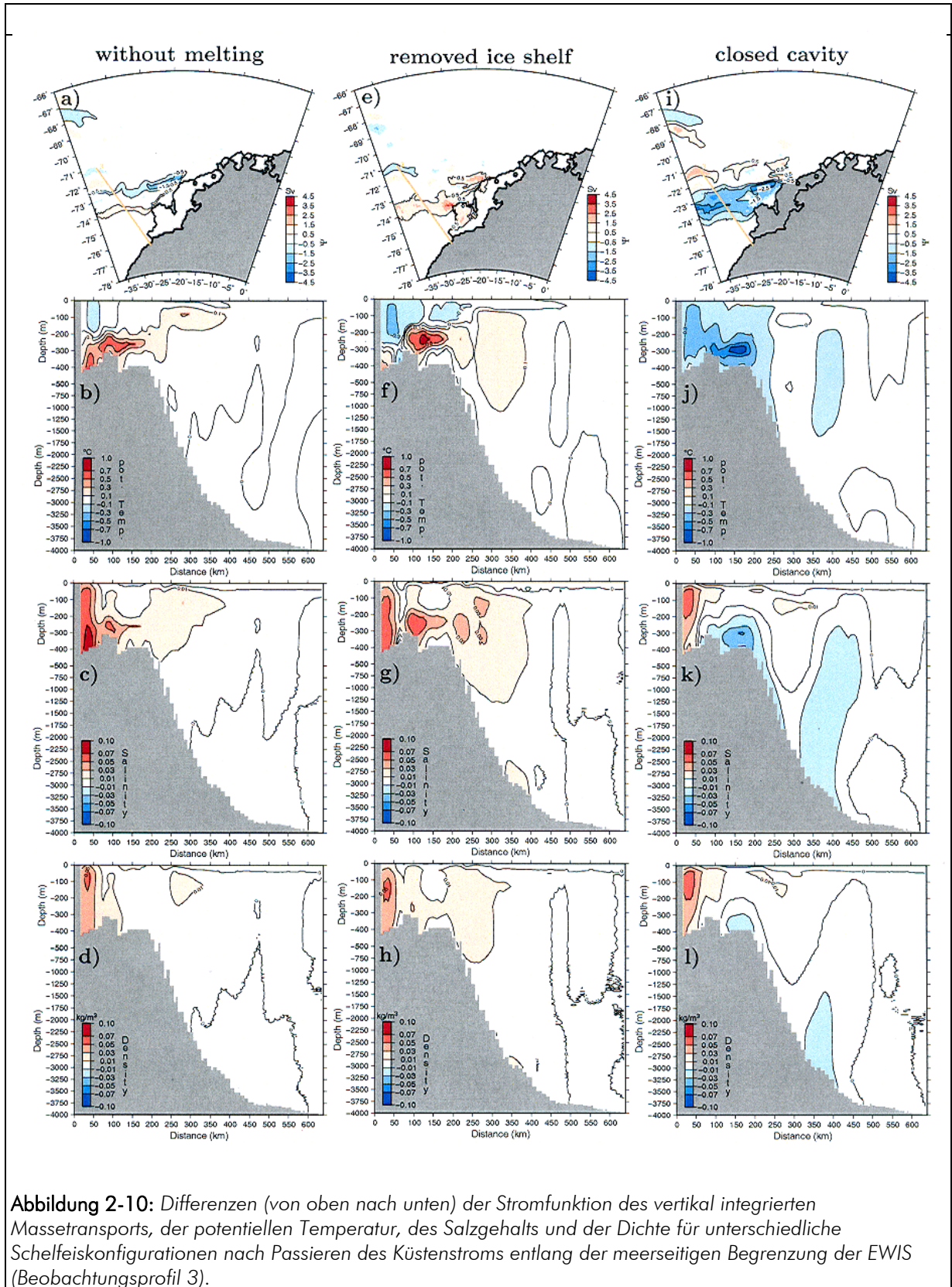
Kombiniert man die Resultate aller durchgeführter Parameterstudien, so ergibt sich eine Schmelzrate (bzw. eine Massenbilanz sowie eine Frischwasserproduktion) von  $0,67\text{-}1,65 \text{ ma}^{-1}$  (entsprechend  $1,60\text{-}3,91 \text{ mSv}$  oder  $48\text{-}123 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$ ).

Im Folgenden werden drei ebenfalls durchgeführte Szenariostudien diskutiert, in denen durch tief greifende Modifikationen des Geometriemodells der Einfluss der EWIS auf die weiter nach Süden fließenden Wassermassen aufgezeigt wird.

1. Im Rahmen des ersten Szenarios wurde die Wechselwirkung des Ozeans mit der Schelfeisbasis unterdrückt, wodurch keine Schmelzwasserbildung mehr stattfindet. Im Gegensatz zu den beiden folgenden Szenarien wurde die Geometrie des Modells jedoch unverändert gelassen.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres



**Abbildung 2-10:** Differenzen (von oben nach unten) der Stromfunktion des vertikal integrierten Massetransports, der potentiellen Temperatur, des Salzgehalts und der Dichte für unterschiedliche Schelfeiskonfigurationen nach Passieren des Küstenstroms entlang der meerseitigen Begrenzung der EWIS (Beobachtungsprofil 3).

2. Im zweiten Szenario wurde das Schelfeis künstlich vollständig entfernt. Dieses Szenario könnte etwa dann eintreten, wenn das EWIS aufgrund einer klimatischen Erwärmung

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

vollständig kollabiert, wie es ähnlich im Jahr 2002 mit Teilen des Larsen Schelfeises geschehen ist.

3. Das dritte Szenario simuliert eine geschlossene Kaverne, wie sie auch in einer größerskaligen Modellstudie von *Jacobs et al.* (1996) angenommen wurde und eher glazialen Klimabedingungen entspricht.

Untersucht wurde jeweils, wie sich der vertikal integrierte Massetransport (die Stromfunktion), die Temperatur, der Salzgehalt und die Dichte im Verhältnis zum Referenzmodell verhalten. Die Ergebnisse sind graphisch in Abbildung 2-10 dargestellt und in *Thoma et al.* (submitted-b) ausführlich diskutiert. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Wassertemperaturen im Weddellmeer südlich der EWIS je nach Szenario um bis zu  $\pm 0,7^\circ\text{C}$  vom Referenzmodell abweichen. Das Fehlen von Süßwassereinträgen führt zu wärmeren und salzhaltigeren Wassermassen in der ozeanischen Deckschicht und dadurch zu einer Destabilisierung der Wassersäule. Dies wiederum hat Einfluss auf den Wärmetransport und damit die Meereisbedeckung. Die gegenwärtige anzutreffende Schelfeis-Ozean-Konfiguration zeigt die stabilste Schichtung aller Szenarien, und begründet somit die von *Fahrbach et al.* (1994) beobachtete Unterdrückung der Tiefenwasserbildung in dieser Region.

#### 2.1.4 Klimasensitivität des östlichen Weddellmeergebiets

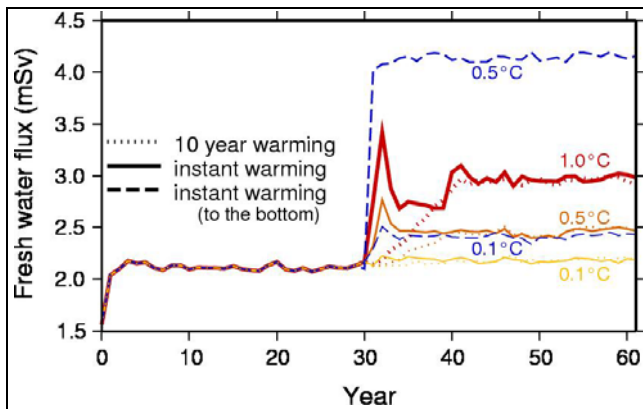
Aufbauend auf den in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Ergebnissen wurden Modellstudien zur Klimasensitivität des östlichen Bereichs des Weddellmeeres durchgeführt. Nachdem das Referenzmodell nach dreißig Jahren einen quasi-stationären Zustand erreicht hatte, wurde der Modelllauf mit den ursprünglichen sowie in acht weiteren Modellen mit jeweils unterschiedlichen Randbedingungen fortgesetzt. Jede dieser Randbedingungen repräsentiert ein bestimmtes Erwärmungsszenario, bei dem die Wassertemperaturen entlang des Null-Meridians um einen festen Betrag erhöht wurden. Die Temperaturänderung erfolgte entweder instantan (d.h., sich sofort auswirkend) oder aber über einen Zeitraum von 10 Jahren hinweg. Der geographische Null-Meridian bildet zugleich die östliche Grenze unseres Modellgitters, an der die Ozeanströmung in das Untersuchungsgebiet mündet.

Szenario	Temperaturanstieg			Süßwasser- eintrag
	Betrag	Rate	Tiefe	
$S_{0,1}^{\text{inst}}$	0,1°C	instantan	≤ 1 000 m	+4%
$S_{0,1}^{10y}$	0,1°C	10 Jahre	≤ 1 000 m	+4%
$S_{0,5}^{\text{inst}}$	0,5°C	instantan	≤ 1 000 m	+17%
$S_{0,5}^{10y}$	0,5°C	10 Jahre	≤ 1 000 m	+17%
$S_{1,0}^{\text{inst}}$	1,0°C	instantan	≤ 1 000 m	+41%
$S_{1,0}^{10y}$	1,0°C	10 Jahre	≤ 1 000 m	+41%
$^b S_{0,1}^{\text{inst}}$	0,1°C	instantan	bis in Tiefsee	+15%
$^b S_{0,5}^{\text{inst}}$	0,5°C	instantan	bis in Tiefsee	+97%

**Tabelle 2-1:** Bedingungen und Ergebnisse unterschiedlicher Erwärmungsszenarien (im Text beschrieben). In der letzten Spalte ist der Anstieg der Süßwasserbildungsrate gegenüber dem Referenzmodell aufgezeigt (*Thoma et al.*, submitted-b).

## Abschlussbericht zum Teilprojekt

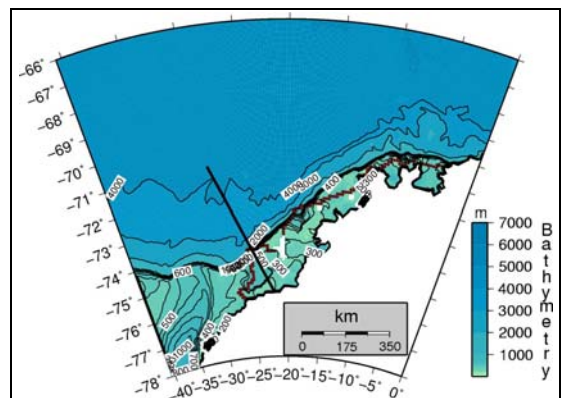
### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres



**Abbildung 2-11:** Mittlere jährliche Süßwasserbildungsrate. Nach 30 Modelljahren wird die angezeigte Temperaturerhöhung mit der gezeigten Erwärmungsrate aufgeprägt; bei zwei Modellen erfolgt die Erwärmung über die gesamte Wassersäule.

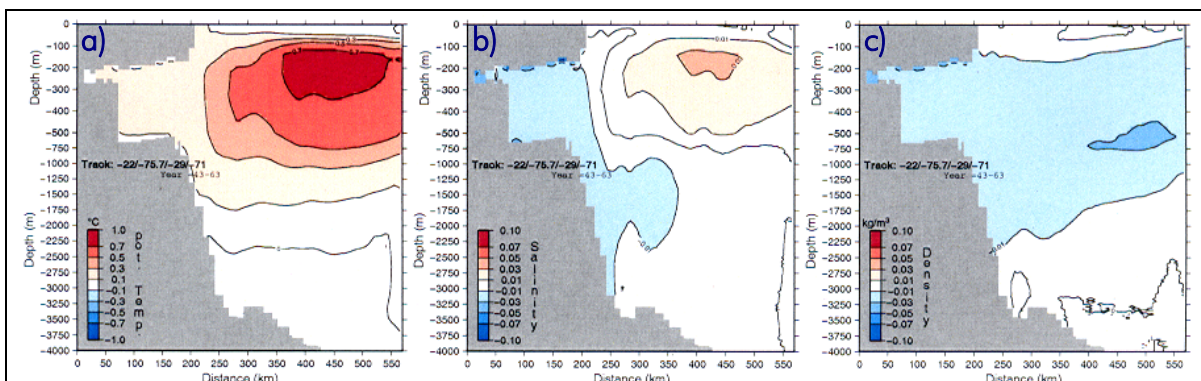
Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die hier behandelten Szenarien. Dabei bezeichnet das Symbol  $S_{0,1}^{inst}$  ein Szenario, bei dem die Temperaturen der oberen 1000 m instantan um  $0.1^\circ\text{C}$  erhöht werden. Andere Szenarien beschreiben einen höheren Temperaturanstieg (um  $0.5^\circ\text{C}$  oder  $1.0^\circ\text{C}$ ) und/oder einen gleichmäßig auf 10 Jahre verteilten Temperaturanstieg ( $S_{0,1}^{10y}$ ). Die Szenarien  $S_{0,1}^{inst}$  und  $S_{0,5}^{inst}$  beschreiben einen instantanen Temperaturanstieg, der nicht auf die oberen 1000 m begrenzt ist, sondern über die gesamte Wassersäule bis in die Tiefsee reicht. Abbildung 2-11 zeigt den Einfluss der jeweiligen Erwärmung auf den an der

Schelfeisbasis resultierenden Schmelzwasser- bzw. Süßwassereintrag. Der Unterschied zwischen einer instantanen Erwärmung gegenüber einer langsamen sich über 10 Jahre hinziehenden Temperaturänderung kann vernachlässigt werden, sobald die im Modell sich ergebende Einschwingphase (bei instantaner Erwärmung) abgeschlossen ist. Die im Folgenden präsentierten Modellresultate spiegeln langjährige Mittelwerte aus den Modelljahren 43 bis 63 wider. Die rechte Spalte in Tabelle 2-1 gibt den gegenüber dem Referenzmodell sich ergebenden zusätzlichen Süßwassereintrag der einzelnen Modelle an.



**Abbildung 2-12:** Bathymetrie der Modellregion und Schelfeiskante (in rot); die schwarze Gerade gibt ein Beobachtungsprofil wieder, für das im Folgenden Modellresultate vorgestellt werden.

Entlang des in Abbildung 2-12 gezeigten Beobachtungsprofils wird nun der Einfluss der Erwärmungsszenarien auf die berechneten Temperatur-, Salinitäts- und Dichteverteilungen im Vergleich zu den im Referenzmodell gefundenen Werten analysiert (Thoma et al., submitted-b). Es



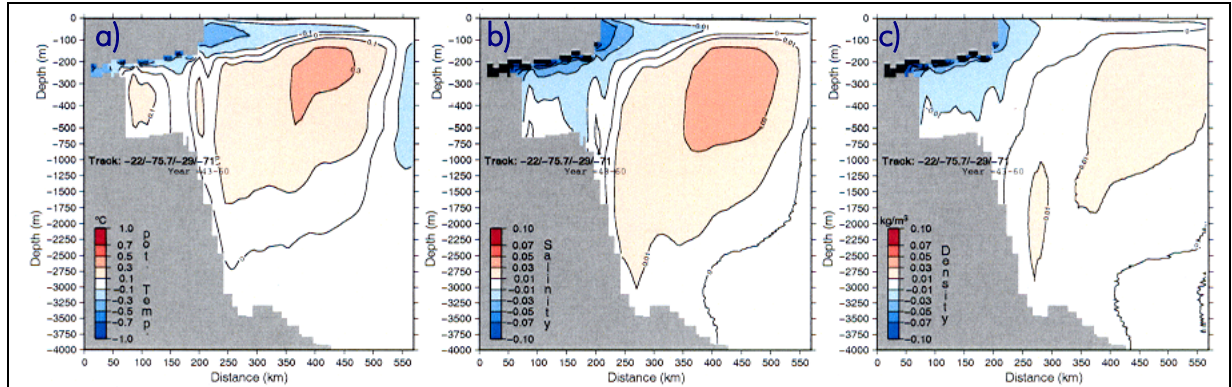
**Abbildung 2-13:** Differenzen in a) Temperatur, b) Salzgehalt und c) Dichte zwischen dem Referenzmodell (Mittelwert der Modelljahre 11 bis 30) und dem Erwärmungsszenario  $S_{1,0}^{inst}$  (Mittelwert der Jahre 43 bis 63).



## Abschlußbericht zum Teilprojekt

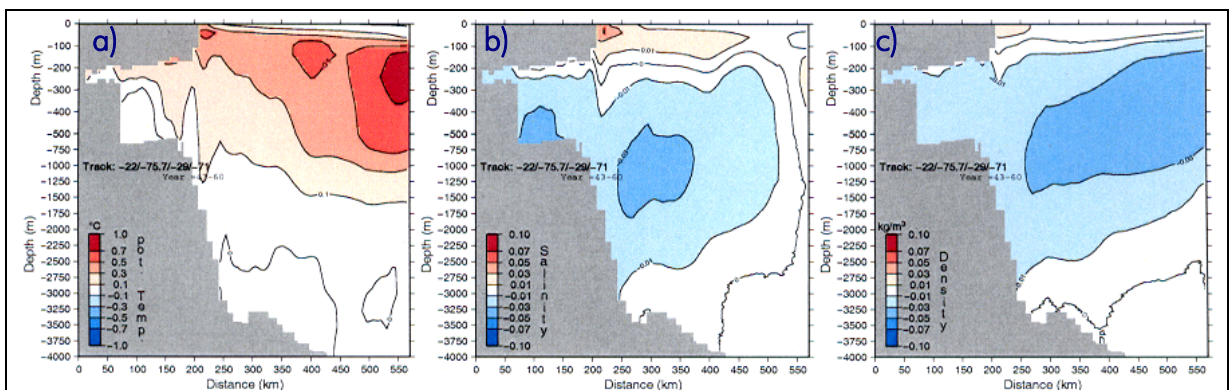
### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

zeigt sich, dass sich die am Ostrand des Modellgebietes (Null-Meridian) erwärmte Meereströmung im Kern des Weddellmeer Tiefenwassers (Weddell Deep Water; WDW) konzentriert und auch noch 1000 km südöstlich im Zentrum des Weddellmeeres nachgewiesen werden kann.



**Abbildung 2-14:** Differenzen in a) Temperatur, b) Salzgehalt und c) Dichte zwischen den Ergebnissen nach Szenario  $S_{1,0}^{inst}$  und  $\hat{S}_{1,0}^{inst}$ . Erkennbar wird der allein durch die Ozeanerwärmung hervorgerufene erhöhte Schmelzwassereintrag.

Abbildung 2-13 illustriert ein entsprechendes Beispiel für das Szenario  $S_{1,0}^{inst}$ . Für Szenarien mit geringerer Erwärmung ( $S_{0,1}^{inst}$  und  $S_{0,5}^{inst}$ ) ergeben sich hierzu keine prinzipiellen Unterschiede. Es zeigt sich lediglich dass die Magnitude der Erwärmung des WDW Kerns entsprechend geringer ausfällt. Eine allmähliche Erwärmung (Szenarien  $S_{0,1}^{10y}$ ,  $S_{0,5}^{10y}$  und  $S_{1,0}^{10y}$ ) zeigt im Temperatur- und Salzgehaltsprofil keinerlei Unterschiede zu den entsprechenden instantanen Erwärmungsszenarien. Neben dem Anstieg der Temperatur (Abbildung 2-13 a) kann auch ein Anstieg der Salinität (Abbildung 2-13 b) beobachtet werden, der jedoch nicht ausreicht, um den Effekt der wärmeren Wassermassen auf die Dichte zu kompensieren. Insgesamt resultiert aus der Erwärmung eine Destabilisierung der Wassersäule (Abbildung 2-13 c).



**Abbildung 2-15:** Differenzen in a) Temperatur, b) Salzgehalt und c) Dichte zwischen den Ergebnissen des Referenzmodells ohne Schelfeis-Ozean-Wechselwirkung nach Thoma et al. (submitted-b) und Szenario  $\hat{S}_{1,0}^{inst}$ . Die Ergebnisse spiegeln den isolierten Einfluss der Ozeanerwärmung ohne die Wirkung von erhöhten Schmelzwassereinträgen auf die Eigenschaften der Wassersäule wider.

Um die Auswirkung von Erwärmung und zusätzlichem Schmelzwassereintrag auf die Wassermasseneigenschaften voneinander zu trennen, wurden zusätzliche Modellexperimente basierend auf Szenario  $\hat{S}_{1,0}^{inst}$  durchgeführt. Dieses unterscheidet sich von  $S_{1,0}^{inst}$  dadurch, dass die

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

Eis-Ozean-Wechselwirkung unterdrückt wurde und daher keine Schmelzwasserproduktion stattfindet. Vergleicht man nun die Wassermassen der Szenarien  $S_{1,0}^{inst}$  und  $\hat{S}_{1,0}^{inst}$  (Abbildung 2-14), so erkennt man, welchen Einfluss das erwärmungsbedingte erhöhte Schmelzen auf die Temperatur, den Salzgehalt und die Dichte hat. Anzumerken ist hier, dass Wassermassen verglichen werden, die jeweils um  $1,0^\circ\text{C}$  gegenüber dem Referenzmodell erwärmt wurden. Dies erlaubt die Isolation des Schmelzwassereffekts auf die Wassermassenmodifikation.

Das an der Schelfeisbasis gebildete kalte Frischwasser breitet sich horizontal bis etwa 300 km Entfernung vom Schelfeis aus und erhöht damit den Gradienten der *Antarctic Slope Front*.

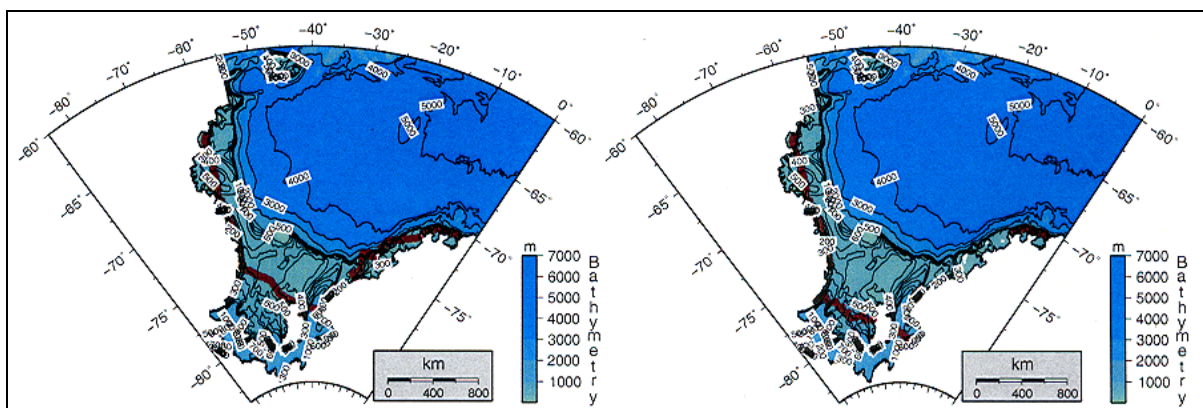
In Abbildung 2-15 wird die alleinige Auswirkung der Erwärmung des Ozeans betrachtet. Hierzu wird Szenario  $\hat{S}_{1,0}^{inst}$  mit einem Referenzmodell ohne Ozeanerwärmung und ohne Eis-Ozean-Wechselwirkung aus Thoma et al. (submitted-b) verglichen.

Ogleich eine gleichmäßige Erwärmung der oberen 1000 m am Ostrand des Modellgebietes gefunden wird zeigt sich, dass diese 1000 km weiter südöstlich auf den WDW Kern konzentriert ist. Dadurch fällt die Erwärmung der küstennahen Gebiete weitaus geringer aus als zu erwarten gewesen wäre. Durch die geringere Dichte des eingetragenen Wassers, welches sich in den oberen 1000 m des Weddellmeeres verteilt, wird die Antarktische Front an den Schelfgebieten schwächer. Damit einhergehend reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit und der Weddellwirbel verlagert sich aus dynamischen Gründen in Bereiche jenseits der Schelfgebiete. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Reduzierung des Salzgehalts im betrachteten Untersuchungsgebiet. Die beiden in den Abbildungen 2-14 und 2-15 dargestellten gegensätzlichen Effekte resultieren in den in Abbildung 2-13 gezeigten Wassermasseneigenschaften.

### 2.1.5 Ozeanmodelle des Weddellmeeres

Eine Simulation der Ozeanzirkulation im gesamten Weddellmeer konnten aus Zeitgründen nur anhand eines stark vereinfachten Oberflächenantriebs für das Modell durchgeführt werden. Die resultierenden Ergebnisse des Referenzmodells stimmen nur qualitativ mit Beobachtungsdaten überein. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die hier ermittelten Modellergebnisse, welche die Reaktion des Systems auf z. T. drastische Änderungen in den Randbedingungen als Folge veränderter Klimabedingungen wiedergeben, als weitgehend korrekt angesehen werden können.

Neben einem Referenzlauf **W**, dessen Modellgeometrie in Abbildung 2-16 dargestellt ist, wurden



**Abbildung 2-16:** Bathymetrie und Schelfeisgeometrie für das Referenzmodell **W** (links) und die Bedingungen für das Modell **W<sup>EF</sup>** (rechts), in dem die EWIS vollständig entfernt und das FRIS in seiner Ausdehnung eingeschränkt wurde.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

drei weitere Studien durchgeführt. In der ersten Studie  $W^E$  wurden die EWIS entfernt. Dadurch fehlt zum einen der Süßwassereintrag in die Wassermassen des Küstenstroms, bevor diese das FRIS erreichen. Zum anderen ermöglicht die zusätzliche offene Meeresoberfläche einen verstärkten Salzeintrag durch die erhöhte, hier lediglich parametrisierte Meereisbildung. In der zweiten Studie  $W_{0,5}^E$  wurden zusätzlich die Wassermassen in den oberen 1000 Meter entlang des Null-Meridians um  $0,5^\circ\text{C}$  erwärmt (vergleichbar zum Erwärmungsszenario in Abschnitt 2.1.4). In Szenario  $W^{EF}$  wurde neben den entfernten EWIS auch ein flächenmäßig deutlich verkleinertes FRIS eingeführt (Abbildung 2-16); eine Erwärmung der Wassermassen wurde nicht eingeführt.

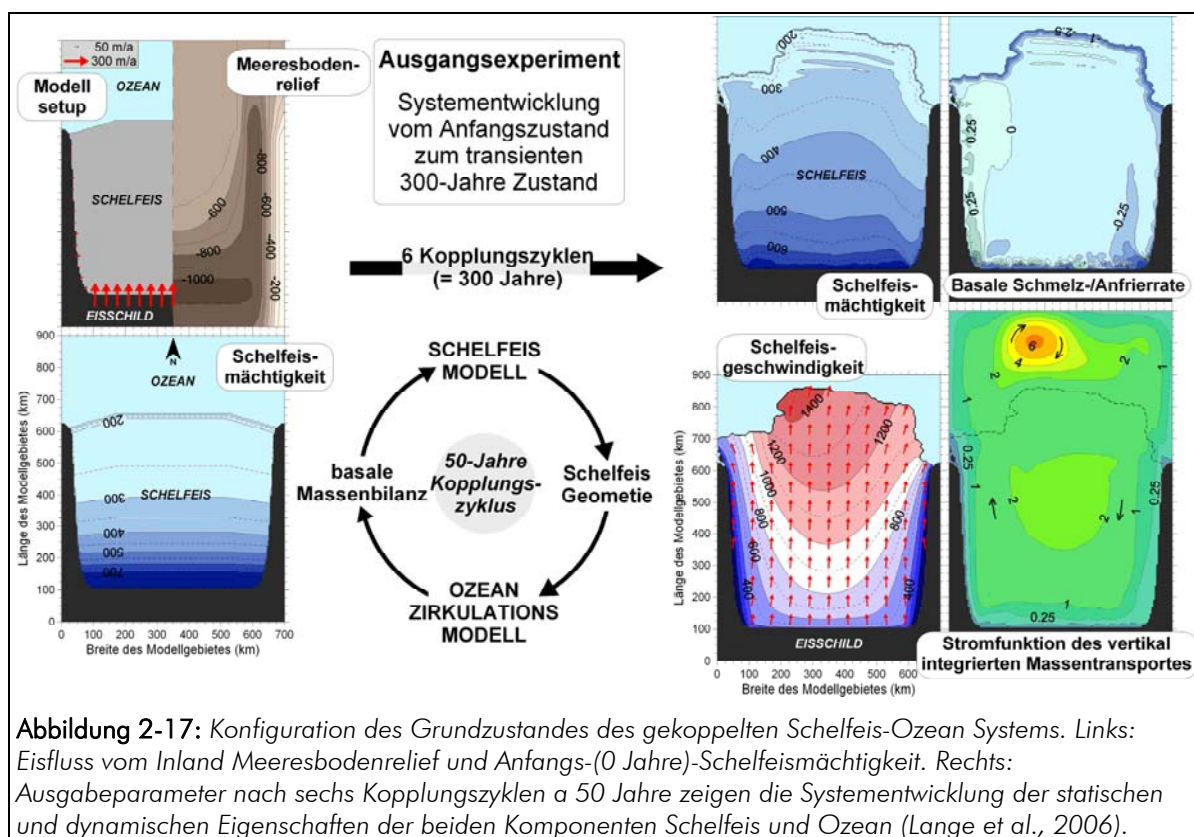
Im Referenzlauf des Weddellmeermodells ist die basale Schmelzrate der EWIS etwa 23% höher als in der regionalen Studie aus Abschnitt 2.1.3, die sich auf den östlichen Teil des Weddellmeeres beschränkt. Ursache hierfür kann die durch die offenen Randbedingungen an den Modellgrenzen eingeschränkten Freiheitsgrade des Modells für die Entwicklung des Weddellwirbels genannt werden. Zum anderen resultiert der Oberflächenantrieb in einem veränderten Transport im zentralen Weddellmeer, was zu einer Modifizierung der die EWIS entlang strömenden Wassermassen führt. Um die Ursachen dieser Diskrepanz zu klären bedarf es weitere Untersuchungen. Als mögliche Ursache wäre es denkbar, dass die auf dem Filchner Schelf produzierten Wassermassen einen blockierenden Einfluss auf die wärmeren Wassermassen im Bereich der EWIS haben. Diese hätten hierdurch eine verlängerte Verweildauer und dadurch ein erhöhtes Schmelzpotential. Die Massenbilanzen des FRIS sind für den Referenzlauf und die drei nachfolgenden Studien in Tabelle 2-2 wiedergegeben. Anzumerken ist, dass der fehlende Süßwassereintrag ( $W^E$ ) ebenso wie die Erwärmung (Szenario  $W_{0,5}^E$ ) zu einem Anstieg des Schmelzens der Schelfeisbasis des FRIS führt. Die Erwärmung um  $0,5^\circ\text{C}$  erhöht die Schmelzrate jedoch in geringerem Umfang als im regional stärker eingeschränkten EWIS-Modell, in dem eine Erwärmung um den selben Betrag zu einer Erhöhung der Schmelzwasserrate um 17% führte (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2-1 und *Thoma et al.*, submitted-b). Die Reduktion der Ausdehnung des FRIS jedoch (Szenario  $W^{EF}$ ) führt zu einem dramatischen Anstieg der Schmelzrate. Dieser positive Rückkopplungseffekt ist von entscheidender Bedeutung für den Fall, in dem das FRIS durch großflächige Kalbungsereignisse in seiner nordseitigen Ausdehnung stark reduziert wird. Dies könnte durch verstärktes Schmelzen aufgrund des globalen Klimawandels oder aber durch massives Eisbergkalben aufgrund eisdynamischer Destabilisierung bewirkt werden.

	Einheit	W	$W^E$	$W_{0,5}^E$	$W^{EF}$
Basale Massenbilanz	[km <sup>3</sup> ]	-105,9	-112,6	-116,0	-220,8
Süßwassereintrag	[mSv]	-3,35	-3,57	-3,67	-7,00
Mittlere Schmelzrate	[m/a]	-0,249	-0,265	-0,273	-0,826
prozentualer Anstieg der mittleren Schmelzrate	[%]	---	6	10	108 (232)

**Tabelle 2-2:** Basale Massenbilanz, Süßwassereintrag und mittlere Schmelzrate für das Referenzszenario W und die drei modifizierten Szenarien; der prozentuale Anstieg der mittleren Schmelzraten relativ zum Referenzmodell ist für das Szenario  $W_{0,5}^E$  aufgrund der reduzierten Schelfeisausdehnung höher als der Anstieg des Süßwassereintrags.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres



**Abbildung 2-17:** Konfiguration des Grundzustandes des gekoppelten Schelfeis-Ozean Systems. Links: Eisfluss vom Inland Meereshodenrelief und Anfangs-(0 Jahre)-Schelfeismächtigkeit. Rechts: Ausgabeparameter nach sechs Kopplungszyklen a 50 Jahre zeigen die Systementwicklung der statischen und dynamischen Eigenschaften der beiden Komponenten Schelfeis und Ozean (Lange et al., 2006).

### 2.1.6 Gekoppelte Modelle des Schelfeis-/Ozeansystems

Während des Projektzeitraums konnten Untersuchungen zur gekoppelten Anwendung des Schelfeis- und Ozeanmodells auf der Basis synthetischer Modellgeometrien abgeschlossen werden (Grosfeld and Sandhäger, 2004). Einige wenige Ergebnisse sollen hier nur exemplarisch dargestellt werden. Eine Beschreibung der methodischen Grundlagen und weitere Ergebnisse sind in z. B. Lange et al. (2006) und (in press) wiedergegeben und schematisch in Abbildung 2-17 dargestellt.

Um den Einfluss veränderter Klimabedingungen auf das System Schelfeis-Ozean zu untersuchen, wurden unterschiedliche Szenarien der Niederschlagsraten und Ozeanerwärmung als Randbedingungen für die Modellläufe verwendet. Diese Szenarien sind dem Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entnommen (Leggett et al., 1992) und weisen bei Verdopplung bzw. Vervierfachung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration Anstiege der Ozeantemperaturen in 250-750 m Tiefe von 1°C bis 2,5°C auf (Manabe and Stouffer, 1994; O'Farrell et al., 1997). Wassermassen, welche die flachen Schelfgebiete des südlichen Weddellmeeres überströmen, werden zusätzlich durch eine veränderte Meereisbildungsrate beeinflusst. Auf der anderen Seite wird der durch den Anstieg der Lufttemperatur bedingte erhöhte Feuchtegehalt der Luft zu einer Zunahme der Niederschlagsraten über der Antarktis führen. Die Erhöhung der Niederschlagsraten kann nach Manabe and Stouffer (1994) sowie O'Farrell et al. (1997) zwischen 10% und 100% betragen.

Basierend auf diesen Schlussfolgerungen werden in unseren Modelluntersuchungen neben einem Referenzmodell I, das zum Vergleich weitergeführt wurde, drei weitere Szenarien eingeführt, mit denen die Konsequenzen einer globalen Erwärmung simuliert werden sollten:

- II. Verdopplung der Niederschlagsrate,
- III. moderate Ozeanerwärmung um 02 °C und



## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

In den Szenarien liegen die ozeanischen Temperaturerhöhungen unter den im IPCC-Bericht angegebenen Werten (s. o.), da in unseren Modelluntersuchungen die Erwärmung über die gesamte Wassersäule angesetzt wurde.

Abbildung 2-18 zeigt die Ergebnisse der Modellstudien für Szenario (IV) nach 1.000 Jahren Integration. Die Verteilung der Schmelz- und Anfrierrate weist einen Anstieg der Schmelzrate im Einstrombereich der Schelfeiskaverne und eine Ausdehnung der Schmelzzone auf. Die Netto-Massenbilanz (Schmelzen minus Anfriern) steigt von ca. 59 Gt/a auf ca. 102 Gt/a im Vergleich zum Referenzmodell an. Dies führt zu einem rapiden Ausdünnen des Schelfeises und einer stärker ausgeprägten Asymmetrie in der Eismächtigkeitsverteilung. Der erhöhte Süßwassereintrag in den Ozean bewirkt einen deutlichen Wechsel in der Wassermassenzusammensetzung auf dem Kontinentalschelf und eine signifikant ausgeprägte Schichtung der Wassersäule. Die gesamte Wassermasse wird durch die Zumischung von glazialen Schmelzwasser leichter, was für die Tiefen- und Bodenwasserbildung bei der Überströmung am Kontinentalabhang weit reichende Folgen erwarten lässt.

## 2.2 NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

### 2.2.1 Wirtschaftlicher Nutzen

Ein wirtschaftlicher Nutzen oder eine wirtschaftliche/kommerzielle Verwertbarkeit der Ergebnisse ist zumindest mittelfristig nicht erkennbar.

### 2.2.2 Wissenschaftlicher Nutzen

Der wissenschaftliche Nutzen lässt sich an einer Reihe von Punkten aufzeigen:

- (i) Methodische Weiterentwicklungen: hier hat sich während des Projektverlaufs eine Vielzahl von positiven Entwicklungen ergeben. Diese umfassen sowohl die Ozean- als auch die Schelfeiskomponenten unseres Modellsystems. Im einzelnen lassen sich nennen:
  - a. Weiterentwicklung und grundlegende Neuformulierung weiter Teile des ursprünglich genutzten Modells zur Beschreibung der Ozeanzirkulation vor und unter einem Schelfeis. Dadurch wurde vor allem eine übersichtlichere und auf andere Systeme portablere Programmversion geschaffen.
  - b. Weiterentwicklung und grundlegende Neuformulierung weiter Teile des ursprünglich genutzten Modells zur Quantifizierung der Schelfeisdynamik (Sandhäger, 2000). Auch diese Entwicklungen haben zu größerer Übersichtlichkeit der Einzelkomponenten des Programmpakets und zu einer einfacheren Übertragbarkeit auf andere Systeme geführt.
- (ii) Neue wissenschaftliche Erkenntnisse: aufgrund der hier durchgeführten Arbeiten haben sich grundlegend neue Erkenntnisse ergeben, die unser Verständnis des gekoppelten Systems Schelfeis-Ozean deutlich verbessert haben. Damit wurden jedoch auch Erkenntnisse gewonnen, die für andere Projekte im CLIVAR-Ozean Projektverbund verwertbar sind. Dies betrifft insbesondere die Abschätzungen der Beiträge zur Wassermassenbildung im Weddellmeer aus unseren Modellen, die sich durch den Süßwassereintrag durch Schmelzen an der Schelfeisbasis ableiten lassen. Besonders wichtige Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

### Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

- a. Das Verständnis über und die numerische Modellierung von Bruch- und Scherzonen in Schelfeisen wurde deutlich verbessert. Zwar gibt es diesbezüglich nach wie vor Wissenslücken, unser Ansatz (Kapitel 2.1.1) hat sich jedoch bisher bewährt.
- b. Erstmals ist es gelungen, für die EWIS eisdynamische Modelle vorzulegen, die weitgehend mit den –wenn auch nur spärlich- vorliegenden Daten übereinstimmen. Lücken bestehen nach wie vor in der Behandlung der komplexen Eisverhältnisse im Brunt Schelfeis (eingeschlossene Tafeleisberge).
- c. Die von uns betriebene dreidimensionale Simulation der Strömungsprozesse vor und unter Schelfeisen hat ein hohes Niveau erreicht. Dies ermöglicht uns, regionale Prozesse, etwa im östlichen Weddellmeer detailliert zu behandeln. Die Ergebnisse geben Aufschluss über den Einfluss unterschiedlicher Erwärmungsszenarien auf Schmelzvorgänge an der Schelfeisbasis und die Modifikation der angrenzenden Wassermassen.
- d. Die gemeinsame Modellierung von Schelfeis-/Ozean Wechselwirkungen, obgleich derzeit noch beschränkt auf idealisierte Geometrien erlaubt erste Rückschlüsse auf die Reaktion des gekoppelten Systems Eis-Ozean unter variablen Klimabedingungen.

## 2.3 ENTWICKLUNG DES KENNTNISSTANDS WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT AN ANDEREN STELLEN

Generell kann gesagt werden, dass Fragen zu Eis-Ozean Wechselwirkungen während der Projektlaufzeit kontinuierlich an Bedeutung gewonnen haben. Dementsprechend ist auch die Anzahl von Kollegen, die sich mit diesen Fragestellungen beschäftigen stetig gewachsen. Der relativ frühe Zeitpunkt, zu dem von unserer Seite diese Fragen aufgegriffen haben, hat uns aber dazu verholfen, bis heute eine führende Stellung bei deren wissenschaftlicher Behandlung innezuhaben.

Hier wie auch in anderen Bereichen der physikalischen Glaziologie gibt es je nach Herkunftsland der einzelnen Gruppen bestimmte regionale Schwerpunkte, die jedoch nicht in strengem Sinne Ausschlusskriterien für andere Untersuchungsgebiete darstellen. Während wir uns, ebenso wie unsere Kollegen vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (A. Beckmann, P. Gerdes, H. Hellmer, P. Timmermann) jedoch primär auf die Schelfeise im Weddell-Sektor der Antarktis konzentrieren, haben sich unsere Kollegen vom *British Antarctic Survey* (C. S. M. Doake, A. Jenkins, K. W. Nicholls, L. Padman) auf die Schelfeise der *Bellingshausen See* und das *Ronne Schelfeis* konzentriert. Der Schwerpunkt amerikanischer Arbeiten zu diesem Themenkomplex (D. M. Holland, C. Hulbe, S. S. Jacobs, D. MacAyeal) liegt auf dem *Ross Schelfeis* aber auch auf dem *Brunt Schelfeis*, das der australischen Wissenschaftler (A. C. Warner, M. J. M. Williams) auf dem *Amery Schelfeis*.

Angesichts der immer deutlicher erkennbaren globalen Klimaänderungen und deren Folgen für die Polargebiete sind Schelfeise im Allgemeinen und das Thema der Wechselwirkungen von Schelfeisen und sich erwärmendem Ozean heute noch aktueller als zuvor. Dies liegt an der Bedeutung der Schelfeise für die Stabilität antarktischer Inlandeismassen einerseits und der Rolle, die Schmelzprozesse an der Basis von Schelfeisen und der damit verbundene Eintrag von Süßwasser in den Antarktischen Ozean für die Bildung von global bedeutenden Wassermassen andererseits spielen. Es ist nicht auszuschließen, dass Veränderung im Antarktischen Bodenwasser bedeutende Folgen für die globale thermohaline Zirkulation hat, die wiederum unmittelbare Auswirkungen auf die Klimaentwicklung nach sich ziehen.

## 2.4 ERFOLGTE UND GEPLANTE PUBLIKATIONEN

### 2.4.1 Publikationen

- Grosfeld, K. and H. Sandhäger, The evolution of a coupled ice shelf - ocean system under different climate states, *Global and Planetary Change, Special Issue on Ice Sheets and Neotectonics*, **42** (1-4), 107-132, 2004
- Grosfeld, K., H. Sandhäger and M. A. Lange, Ice shelf regions under climate change: studies with a coupled ice shelf - ocean approach, *CLIVAR Exchanges - Focus on Coupled Modelling*, **28**, 2003
- Lange, M. A., N. Blindow, B. Breuer, K. Grosfeld, T. Kleiner, C.-O. Mohrholz, M. Nicolaus, C. Oelke, H. Sandhäger and M. Thoma, Numerical Model Studies of Antarctic Ice Sheet-Ice Shelf- Ocean Systems and Ice Caps, *Annals of Glaciology*, **41**, in press.
- Lange, M. A., K. Grosfeld, M. Thoma and H. Sandhäger, Die Wechselwirkungen von antarktischen Schelfeisgebieten und dem Ozean und der Beitrag zur ozeanischen Wassermassenbildung, in *Warnsignale aus den Polarregionen – Wissenschaftliche Fakten*, Lozán, J.L., H. Graßl, H.-W. Hubberten, P. Hupfer, L. Karbe, and D. Piepenburg (eds.); Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, Germany, pp. 87-91, 2006.
- Nicolaus, M. and K. Grosfeld, Ice-Ocean Interactions underneath the Antarctic ice shelf Ekströmisen, *Polarforschung*, **72** (1), 17-29, (printed 2004), 2002.
- Thoma, M., K. Grosfeld and M. A. Lange, The impact of mixing parameterisation and bathymetry filtering on the simulated hydrography along steep continental shelf regions in terrain following ocean models, *FRISP-Report*, **17**, submitted-a.
- Thoma, M., K. Grosfeld and M. A. Lange, The impact of the Eastern Weddell Ice Shelves on water masses in the eastern Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, submitted-b.
- Thoma, M., K. Grosfeld, C. O. Mohrholz and M. A. Lange, Modelling ocean circulation and ice-ocean interaction in the southeastern Weddell Sea, in *Forum for Research into the Ice Shelf Processes (FRISP): Report No 16 (2005)*, Smedsrud, L.H. (ed.); Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen, Norway, pp. 33-42, 2005.

### 2.4.2 Präsentationen

- **EGS-AGU-EUG Joint Assembly**  
06.-11.04.2003, Nice, France.  
Grosfeld, K., H. Sandhäger and M. A. Lange:  
Impacts of ice shelf disintegration on water mass formation and circulation in the Larsen Ice Shelf region, Antarctica.
- **IUGG**  
20.06 - 11.07.2003, Sapporo, Japan.  
Sandhäger, H., K. Grosfeld, M. A. Lange, H. H. Hellmer, 2003:  
Sensitivity of a coupled ice shelf - ocean system to changes in climatic boundary conditions.
- **17. International Forum for Research into Ice Shelf Processes (FRIS), 17.-18. June 2003, Cambridge, UK.**  
Thoma, M., K. Grosfeld, M. A. Lange, 2003:  
Eastern Weddell Ice Shelves and their Interaction with the ocean.



## Abschlußbericht zum Teilprojekt

*Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres*

---

- **American Geophysical Union, 2003 Fall Meeting**  
08.-12.12.2003, San Francisco, USA.  
Grosfeld, K., H. Sandhäger, and M. A. Lange:  
Coupled ice shelf — ocean system simulations for different climate scenarios.
- **American Geophysical Union, 2003 Fall Meeting**  
08.-12.12.2003, San Francisco, USA.  
Lange, M. A., K. Grosfeld, D. R. MacAyeal, K. Saheicha:  
Stability of Antarctic ice shelves and their role in the global climate.
- **American Geophysical Union, 2003 Fall Meeting**  
08.-12.12.2003, San Francisco, USA.  
Holland, D. H., J. Runter, K. Grosfeld, H. Hellmer, A. Jenkins, M. A. Morales Maqueda, M. Hemer, M. Williams, J. M. Klinck, and M. Dinniman:  
The Ice Shelf - Ocean Model Intercomparison Project (ISOMIP).
- **American Geophysical Union, 2003 Fall Meeting**  
08.-12.12.2003, San Francisco, USA.  
Thoma, M., K. Grosfeld, and M. A. Lange:  
On the freshwater contribution of the Eastern Weddell Ice Shelves to water mass formation in the Weddell Sea.
- **International Symposium on Ice and Water Interactions**  
26.-30.07.2004, Portland, Oregon, USA.  
Lange, M.A., K. Grosfeld, and H. Sandhäger: On the Role of Ice Shelf-Ocean Interaction für the Antarctic Climate System.
- **International Symposium on Ice and Water Interactions**  
26.-30.07.2004, Portland, Oregon, USA.  
Mohrholz, C.-O., M. Thoma, M. A. Lange, H. Sandhäger, K. Grosfeld: Numerical modelling of Riiser-Larsen and Brunt Ice Shelves, Antarctica.
- **International Symposium on Ice and Water Interactions**  
26.-30.07.2004, Portland, Oregon, USA.  
Thoma, M., K. Grosfeld, M. A. Lange:  
Climate sensitivity of the Eastern Weddell Ice Shelf - ocean system.
- **18. International Forum for Research into Ice Shelf Processes (FRIS),**  
5.-7. October 2004, Helgoland, Germany.  
Thoma, M., K. Grosfeld, Mohrholz, Chris-Oliver, M. A. Lange, 2004:  
Modeling ocean circulation and ice - ocean interaction in the southeastern Weddell Sea.
- **18. International Forum for Research into Ice Shelf Processes (FRIS),**  
5.-7. October 2004, Helgoland, Germany.  
Mohrholz, C.-O., M. Thoma, M. A. Lange, R. Sandhäger, K. Grosfeld:  
Numerical modelling of Riiser-Larsen and Brunt Ice Shelves, Antarctica.
- **XXVIII SCAR meeting**  
26.07. - 30.7.2004, Bremen, Germany  
Lange, M. A., N. Blindow, M. Brinkhaus, K. Grosfeld, C.-O. Mohrholz, C. Oelke, B. Paschke, K. Saheicha, H. Sandhäger, and M. Thoma: Numerical Model Studies of Antarctic Ice Shelves and Ice Caps.
- **EGU General Assembly**  
24.-29.04.2005, Vienna, Austria.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

Mohrholz, C.-O., Thoma, M., K. Grosfeld, and M. A. Lange: Preliminary results of a coupled ice-shelf – ocean model for the south-east Weddell Sea.

- **19. International Forum for Research into Ice Shelf Processes (FRIS)**  
7.-8. 06 2005, Bergen, Norway.  
Thoma, M., K. Grosfeld, M. A. Lange, 2005:  
The impact of mixing parameterisation and bathymetry filtering on the simulated hydrography along steep continental shelf regions in terrain following ocean models.
- **22. Internationale Polartagung**  
18.09.-24.09.2005, Jena, Germany  
Lange, M. A., K. Grosfeld, und M. Thoma: Schelfeis-Ozean Wechselwirkung und ihre Rolle im globalen Klimasystem
- **22. Internationale Polartagung**  
18.09.-24.09.2005, Jena, Germany  
Mohrholz, C.-O., und M. A. Lange: Schelfeismodellierung unter der Berücksichtigung von Scherbrüchen und Eisströmen

Bei der Herbsttagung der *American Geophysical Union (AGU)* in San Francisco, USA, 08.-12. 12. 2003, wurde von den Antragstellern, gemeinsam mit Prof. Dr. D. MacAyeal (University of Chicago), eine eigene Vortragsitzung organisiert. Unter dem Thema ***Ice-Ocean Interactions and the Cryosphere*** wurden etwa acht Vorträge und neun Poster präsentiert. Die Herbsttagung der AGU ist die weltweit größte geophysikalische Konferenz, an der 6.000 bis 8.000 Wissenschaftler aus aller Welt teilnehmen.

## 2.5 LITERATURHINWEISE

- Arnell, M., C. Liu, R. Compagnucci, L. da Cunha, K. Hanaki, C. Howe, G. Mailu, I. Shiklomanov and E. Stakhiv, Hydrology and Water Resources, in *IPCC, 2001: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White (eds.); Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, N.Y., USA, pp. 191-234, 2001.
- Baldwin, M. P., L. J. Gray, T. J. Dunkerton, K. Hamilton, P. H. Haynes, W. J. Randel, J. R. Holton, M. J. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, D. B. A. Jones, J. S. Kinnersley, C. Marquardt, K. Sato and M. Takahashi, The Quasi-Biennial Oscillation, *Reviews of Geophysics*, **39**, 179-229, 2001.
- BAS, SPRI and WCMC, Antarctic digital database, Version 2.0. Manual and bibliography, Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, U.K., 1998;
- Fahrbach, E., R. G. Peterson, G. Rohardt, P. Schlosser and R. Bayer, Suppression of bottom water formation in the southeastern Weddell Sea, *Deep Sea Research*, **41** (389-411), 1994.
- Gerdes, R., A primitive equation ocean circulation model using a general vertical transformation. Part 1: Description and testing of the model, *Journal of Geophysical Research*, **98** (C8), 14,683-14,701, 1993.
- Gjessing, Y. and B.Wold, Absolut movements, mass balance and snow temperatures of the Riiser-Larsenisen, Antarctica, *Norsk Polarinstitutt, Skrifter*, **187**, 23-31, 1986.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

- Griffies, S., *Fundamentals of ocean climate models*; Princeton University Press, Princeton 2004.
- Grosfeld, K. and H. Sandhäger, The evolution of a coupled ice shelf - ocean system under different climate states, *Global and Planetary Change, Special Issue on Ice Sheets and Neotectonics*, **42** (1-4), 107-132, 2004.
- Haidvogel, D. B. and A. Beckmann, *Numerical ocean circulation modeling*; Imperial College Press, London, U.K. 1999.
- Hedfors, J., Force Budget Analysis of Glacier Flow, Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, Sweden, 2004.
- Holmlund, P., I. Brown, J.-O. Näslund and R. Petterson, Balanced flow of the Veststraumen ice stream, Droning Maud Land, Antarctica, pp. handout presented at Seventh International Symposium on Antarctic Glaciology, ISAG, Milan, Italy, 2003.
- Hulbe, C. L., R. Johnston, I. Joughin and T. Scambos, Marine ice modification of fringing ice shelf flow, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **37** (3), 323–330, 2005.
- Jacobs, S. S., H. H. Hellmer and A. Jenkins, Antarctic ice sheet melting in the Southeast Pacific, *Geophysical Research Letters*, **23** (9), 957-960, 1996.
- Jansen, D., H. Sandhäger and W. Rack, Model experiments on large tabular iceberg evolution: ablation and strain thinning, *Journal of Glaciology*, **51** (174), 363-372, 2005.
- Lange, M. A., N. Blindow, B. Breuer, K. Grosfeld, T. Kleiner, C.-O. Mohrholz, M. Nicolaus, C. Oelke, H. Sandhäger and M. Thoma, Numerical Model Studies of Antarctic Ice Sheet-Ice Shelf- Ocean Systems and Ice Caps, *Annals of Glaciology*, **41**, in press.
- Lange, M. A., K. Grosfeld, M. Thoma and H. Sandhäger, Die Wechselwirkungen von antarktischen Schelfeisgebieten und dem Ozean und der Beitrag zur ozeanischen Wassermassenbildung, in *Warnsignale aus den Polarregionen – Wissenschaftliche Fakten*, Lozán, J.L., H. Graßl, H.-W. Hubberten, P. Hpfner, L. Karbe, and D. Piepenburg (eds.); Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, Germany, pp. 87-91, 2006.
- Leggett, J., W. J. Pepper and R. J. Swart, Emissions scenarios for IPCC: An update, in *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Houghton, J.T., B.A. Callander, and S.K. Varney (eds.); Cambridge University Press, Cambridge, U. K., pp. 69-95, 1992.
- Lucchitta, B. K., Antarctic ice streams and outflow channels on Mars, *Geophys. Res. Let.*, **28** (3), 403-406, 2001.
- Lythe, M., D. G. Vaughan and the BEDMAP Consortium, BEDMAP - bed topography of the Antarctic, 1:10,000,000 scale map, British Antarctic Survey, Cambridge, UK, **BAS (Misc) 9**, 2000;
- Lythe, M. B., D. G. Vaughan and BEDMAP Consortium, BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, **106** (B6), 11,335-11,351, 2001.
- MacAyeal, D. R., S. Shabtaie, C. R. Bentley and S. D. King, Formulation of ice shelf dynamic boundary conditions in terms of a Coloumb rheology, *Journal of Geophysical Research*, **91** (B8), 8177-8191, 1986.
- Manabe, S. and R. J. Stouffer, Multiple-century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide, *Journal of Climate*, **7**, 5-23, 1994.

## Abschlußbericht zum Teilprojekt

Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres

---

- Mayer, C., *Numerische Modellierung der Übergangszone zwischen Eisschild und Schelfeis*; Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung; *Berichte zur Polarforschung/Reports on Polar Research*, Bremerhaven, Germany 1996.
- O'Farrell, S. P., J. L. McGregor, L. D. Rotstayn, W. F. Budd, C. Zweck and R. Warner, Impact of transient increases in atmospheric CO<sub>2</sub> on the accumulation and mass balance of the Antarctic Ice Sheet, *Annals of Glaciology*, **25**, 137-144, 1997.
- Orheim, O., Flow and thickness of Riiser-Larsenisen, Antarctica, *Norsk Polarinstitutt, Skrifter*, **187**, 5-20, 1986.
- Pacanowski, R. C. and S. G. H. Philander, Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical oceans, *Journal of Physical Oceanography*, **11**, 1443-1451, 1981.
- Sandhäger, H., Quantifizierung eisdynamischer und massenhaushaltsrelevanter Basisgrößen eines antarktischen Inlandeis-Schelfeis-Systems unter Einsatz eines numerischen Fließmodells, PhD thesis, University of Münster, Münster, Germany, 2000.
- Serreze, M. C., J. A. Maslanik, T. A. Scambos, F. Fetterer, J. Stroeve, K. Knowles, C. Fowler, S. Drobot, R. G. Barry and T. M. Haran, A record minimum arctic sea ice extent and area in 2002, *Geophysical Research Letters*, **30** (3), 10-13, 2003.
- Smagorinsky, J., General circulation experiments with primitive equations: I. The basic experiment, *Monthly Weather Review*, **91**, 99-164, 1963.
- Smedsrud, L. H., A. Jenkins, D. M. Holland and O. A. Nøst, Modeling ocean processes below Finbulisen, Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, **111**, doi:10.1029/2005JC002915, 2006.
- Thoma, M., K. Grosfeld and M. A. Lange, The impact of mixing parameterisation and bathymetry filtering on the simulated hydrography along steep continental shelf regions in terrain following ocean models, *FRISP-Report*, **17**, submitted-a.
- Thoma, M., K. Grosfeld and M. A. Lange, The impact of the Eastern Weddell Ice Shelves on water masses in the eastern Weddell Sea, *Journal of Geophysical Research*, submitted-b.
- Thoma, M., K. Grosfeld, C. O. Mohrholz and M. A. Lange, Modelling ocean circulation and ice-ocean interaction in the southeastern Weddell Sea, in *Forum for Research into the Ice Shelf Processes (FRISP): Report No 16 (2005)*, Smedsrud, L.H. (ed.); Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen, Norway, pp. 33-42, 2005.
- Vaughan, D. G., J. L. Bamber, M. Giovinetto, J. Russell and A. P. R. Cooper, Reassessment of net surface mass balance in Antarctica, *Journal of Climate*, **12**, 933-946, 1999.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, New, improved version of Generic Mapping Tools released (abstract), *Transactions, American Geophysical Union (EOS)*, **79**, 579, 1998.

## **3. ABSCHLUSSBERICHT – TEIL III**

### **3.1 ERFOLGSKONTROLLBERICHT**

#### **3.1.1 Beitrag zu förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

Das internationale CLIVAR-Programm (*Climate Variability and Predictability*) im Rahmen des *Weltklimaforschungsprogramms* (WCRP) widmet sich der Untersuchung und Vorhersage der Variabilität des globalen Klimasystems. Für die polare Meeresforschung besteht in diesem Kontext eines der Ziele in der Quantifizierung der Intensität und sowie der Erfassung der Sensitivität der Wechselwirkungen zwischen Ozean und Schelfeis und deren Modifikation als Folge möglicher globaler Klimavariationen. Das hier vorliegende Projekt liefert hierbei einen Beitrag zum internationalen CLIVAR/DecCen-Programm, insbesondere zu Punkt D5 *“Thermohaline Zirkulation des Südlichen Ozeans“* der Programmkomponente B 1 *Wassermassentransformation und thermohaline Zirkulation des Atlantiks*.

#### **3.1.2 Wissenschaftlicher und technischer Erfolg des Projektes**

Das abgeschlossene Vorhaben war erfolgreich. Die Modellkomponenten Schelfeismodell und Ozeanmodell wurden für die Untersuchung von Schelfeisgebieten mit komplizierter Eisdynamik (Schelfeisbereich) und schmalen Kontinentalschelfbereichen (Ozeanbereich) weiterentwickelt, um die komplexen strömungsmechanischen Systeme möglich realitätsnah darzustellen. Erst hierdurch ist die Voraussetzung zur Untersuchung klimarelevanter Fragestellungen gegeben. Die Fokussierung auf die östlichen Schelfgebiete des Weddellmeeres (Eastern Weddell Ice Shelves) liefert eine detaillierte Beschreibung derjenigen Regionen, die als Prekonditionierungsgebiete für die Wassermassenbildung im Weddellmeer angesehen werden. Es konnten neue Einblicke in die Sensitivität dieser Regionen gegenüber veränderten Klimarandbedingungen aufgezeigt werden. Sensitivitätsstudien zur Reaktion der das Weddellmeer säumenden Schelfgebiete auf klimaveränderungen deuten auf die besondere Vulnerabilität dieser Region und somit auf antarktische Komponente des globalen ozeanischen Förderbandes hin.

#### **3.1.3 Zeit- und Finanzplan**

Die vom bmb+f für den Projektzeitraum zugewiesenen Mittel wurden vollständig angefordert und verausgabt. Der notwendige Verwendungsnachweis (Zwischennachweis 2005) wurde am 01.02.2006 dem Projektträger (BEO) zugesandt. Der Finanzrahmen ist um 1.375,07 EUR unterschritten worden, die verbliebenen Restmittel wurden durch die Verwaltung der Westfälischen Wilhelms-Universität zurück überwiesen. Eine abschließende Aufstellung der aus Projektmittel beschafften Geräte (Bestandsverzeichnis) wurde dem bmbf am 17.03.2006 zugesandt. Die angeschafften Geräte (Computer) verbleiben am Institut für Geophysik und sollen in weiterführenden wissenschaftlichen Nachfolgeprojekten (DFG-Förderung) eingesetzt werden.

#### **3.1.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Das neu entwickelte Modellsystem aus dem CLIVAR-1 Projekt wurde im Anschluss im CLIVAR-2 Projekt für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen auf dem Gebiet der Schelfeis-Ozean Wechselwirkungen und der Klimasensitivität von Schelfeisgebieten eingesetzt. Die Ergebnisse der

## **Abschlußbericht zum Teilprojekt**

### *Quantifizierung und Klimasensitivität des durch Schmelzen an der Schelfeisbasis verursachten Süßwassereintrags in die Schelfbereiche des Weddellmeeres*

---

wissenschaftlichen Auswertung aus dem hier vorliegenden Projekt sind teilweise bereits veröffentlicht. Weitere Veröffentlichungen sind in Arbeit.

#### **3.1.5 *Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte***

Da im Projekt keine explizite Technologieentwicklung stattfand, erfolgten auch keine Patent- oder Schutzrechtsanmeldungen.

#### **3.1.6 *Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben***

Von der vorgesehenen Anwendung des gekoppelten Modells auf das Filchner-Ronne-Schelfeisgebiet musste abgerückt werden. Der bedeutende, aber bislang zumeist unbeachtete Einfluss von Bruch- und Scherstrukturen im Eiskörper auf die Fließdynamik des Filchner-Ronne-Schelfeises war mit einfachen Modellansätzen nur unzureichend genau numerisch simulierbar, konnte jedoch für das Brunt Schelfeis zumindest näherungsweise nachgewiesen werden.