

Diplomarbeit

Calving Processes at Ice Shelf Fronts in the Parallel Ice Sheet Model at PIK

Torsten Albrecht

Juli 2009



Universität Potsdam
Institut für Physik und Astronomie
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät



Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
Erdsystemanalyse - Forschungsbereich I

Betreuender Hochschullehrer: Prof. Dr. Anders Levermann
Zweitgutachter: Prof. Dr. Norbert Seehafer

Abstract

The large polar ice caps of Antarctica and Greenland are located in remote areas of our planet and accommodate colossal amounts of fresh water. Recent studies confirm a sensitive response of these systems to moderate climate change. As a consequence, severe sea level rise may leave a clear mark on populated regions. In particular, for the marine ice sheet in the western part of Antarctica, a positive feedback mechanism leading to runaway ice sheet retreat was hypothesized and recently generated increased concern. It is believed that fringe shelves of floating ice play a key role as a coupling element in this discussion, even though they do not contribute directly to sea level change. The upstream ice sheets experiences a retarding force by frictional resistance opposed to the ice flow, generally known as the buttressing effect. The physics at the boundary margins and in the so-called transition zones between the ice sheets and the ice shelves, where ice accelerates and starts to float along the grounding line, is highly complex. Its approximation by means of numerical modeling constitutes a further difficulty.

Both calving of icebergs at the seaward front and melting at the base account for most of the mass loss from the Antarctic ice sheet. A strong warming signal can enhance this mass loss and may lead to a thinning and retreat of ice shelves. Resulting loss of backpressure and inland migration of the grounding line may cause a further shrinkage of the ice sheet. Calving processes act on a large range of temporal and spatial scales and are affected by plenty of external stimuli and the confining topography. In models, calving is often parameterized ad-hoc, as a calving rate, which is extrapolated from observations or in terms of local geometrical properties, such as the ice thickness at the calving front.

In this diploma thesis, a conceptional approach has been taken to incorporate a simple calving law based on first principles of physics into a derived version of the Parallel Ice Sheet Model (PISM-PIK). Assuming tensile crack opening by along-flow spreading in combination with transversal spreading as a stability criterion and as the dominant controls of calving dynamics, a calving rate has been defined based on the related principal strain rate components. This calving rate accounts for intrinsic physical properties of the ice, such as viscosity and ice stiffness, as well as external, mechanical properties of the system as parameters and boundary conditions of velocity and strain rate calculation. By varying

these parameters, model predictions can be made about regions likely to be subjected to crevasse formation and enhanced calving initiation resulting in dynamically stable calving front positions. Although single calving events cannot be resolved by this comprehensive approach, the results of simulations display non-trivial behavior, such as the multi-stability of calving front positions and the sensitivity to prominent geographical features.

As preliminary work, a derived class of the PISM base code had been built incorporating a subgrid treatment of the advancing ice shelf front that enables a suitable approximation of the calving front boundary condition (CFBC) for velocity calculation. This methodology guarantees a reliable and robust determination of the velocity field and the derived strain rate distribution throughout the ice shelf, which we suggest to be the key parameters in calving dynamics. Verification with exact, analytical solutions for simplified geometries and validation against observational data was accomplished and demonstrated in this study.

The presented calving law is of potential interest for the community of numerical modelers of combined ice sheet and ice shelf dynamics. The clarity of this parametrization in combination with the variety of simulation outcomes promise multiple applications and further expandability on the pathway to a widespread and holistic understanding of complex interactions within the climate system.

Zusammenfassung

Die großen polaren Eiskappen der Antarktis und Grönlands befinden sich in abgelegenen Gebieten unseres Planeten und speichern kolossale Mengen an Süßwasser. Neueste Studien bestätigen eine sensible Reaktion dieser Systeme auf den Klimawandel. Infolge dessen könnte sich ein starker Anstieg des Meeresspiegels auch in bevölkerten Regionen auswirken. Insbesondere für den westlichen Teil der Antarktis gibt es die Hypothese, dass ein positiver Rückkopplungsmechanismus zu einem unaufhaltsamen Rückzug des Eisschildes führen kann. Dies verursacht derzeit immer mehr Besorgnis. Man geht in dieser Diskussion davon aus, dass schwimmende Eisschelfe am Rand der Eisschilde eine Schlüsselrolle als Kopplungselement spielen, selbst wenn sie selbst nicht direkt zum Meeresspiegelanstieg beitragen. Die Eisschilde erfahren durch die Schelfe eine rückstellende Reibungskraft, die dem Eisfluss entgegengerichtet ist, was allgemein als *Buttressing*-Effekt bezeichnet wird. Die Physik an den Rändern der Schelfe und in der Übergangszone zwischen Eisschild und Eisschelf, wo das Eis beschleunigt und an der Aufsetzlinie zu schwimmen beginnt, ist sehr komplex. Die Approximation der physikalischen Zusammenhänge mit Mitteln der numerischen Modellierung stellt eine weitere Schwierigkeit dar.

Das Kalben von Eisbergen an der Meeresfront und das Schmelzen am Grund bilden den Großteil der Massenverluste des antarktischen Eisschildes. Eine starke Erwärmung kann diesen Masseverlust verstärken und zu einer Ausdünnung und einem Rückzug der Eisschelfe führen. Eine daraus resultierende Schwächung des *Buttressing*-Effekts und damit eine landeinwärts wandernde Aufsetzlinie könnte ein weiteres Schrumpfen des Eisschildes verursachen. Kalbungsprozesse treten innerhalb einer großen Spanne von räumlichen und zeitlichen Skalen auf und werden dabei von einer hohen Zahl an äußeren Antrieben und von der das Eisschelf begrenzenden Topografie beeinflusst. In Modellen wird das Kalben oft recht *ad hoc* parametrisiert, nämlich als eine Kalbungsrate, die aus Beobachtungen in Verbindung mit geometrischen Eigenschaften wie der Eisdicke an der Eisschelfkante extrapoliert wird.

In dieser Diplomarbeit wird ein konzeptioneller Ansatz gemacht, um ein einfaches Kalbungsgesetz, welches auf Grundprinzipien der Physik basiert, in eine abgeleitete Klasse des parallelen Eisschildmodells (PISM-PIK) einzugliedern. In der Annahme, dass die Ausbildung von Rissen im Eis durch das starke Ausdehnen des Eises in Fließrichtung und quer dazu als

Stabilitätskriterium und bestimmender Faktor in der Kalbungsdynamik angesehen werden kann, wurde eine Kalbungsrate definiert, die auf der Bestimmung der damit verbundenen Hauptachselemente des Dehnungsratentensors basiert. Diese Kalbungsrate berücksichtigt spezifische Eigenschaften des Eises wie die Viskosität und Steifigkeit, aber auch externe mechanische Eigenschaften, die in die Randbedingungen für die Berechnung der Geschwindigkeit und der Dehnungsrate eingehen. Durch die Variation dieser Parameter im Modell können jeweils Aussagen über Gebiete gemacht werden, in denen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit tiefe Spalte bilden und damit verstärktes Eisbergkalben auslösen, was in einer dynamisch stabilen Position der Eisschelfkante resultiert. Obwohl einzelne Kalbungsereignisse mit diesem Ansatz nicht aufgelöst werden können, zeigen die Modellergebnisse nichttriviales Verhalten, zum Beispiel eine Multistabilität der Eisschelfkantenposition und die sensible Abhängigkeit von geografischen Besonderheiten.

In der Vorarbeit wurde eine Unterklasse des Modells PISM erzeugt und eine Methode hinzugefügt, die die sich bewegende Eisschelfkante auf einer Subskala des Gitters erfasst und es ermöglicht, eine passende Approximation der Randbedingung an der Eisschelfkanten (CFBC) für die Geschwindigkeitsberechnung einzubauen. Diese Methodik garantiert eine verlässliche und robuste Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes und der daraus abgeleiteten Dehnungsratenverteilung im gesamten Eisschelf, welche als Schlüsselparameter der Kalbungsdynamik vorgeschlagen wurden. Sowohl eine Verifikation mit exakten analytischen Lösungen für den Fall einer vereinfachten Geometrie als auch eine Validierung mit Beobachtungsdaten wurde in dieser Studie durchgeführt.

Das vorgestellte Kalbungsgesetz ist von potentiell Interesse für die Gemeinschaft der numerischen Eisschild- und Eisschelfmodellierer. Die schlichte Klarheit dieser Parametrisierung in Verbindung mit der Reichhaltigkeit der Modellresultate verspricht eine vielfältige Anwendung und weitere Ausbaufähigkeit auf dem Weg zu einem weit reichenden und umfassenden Verständnis der komplexen Wechselwirkungen innerhalb des Klimasystems.

Contents

Abstract	i
Zusammenfassung	iii
Acknowledgments	v
Table of Contents	viii
1. Introduction	1
1.1. Ice Shelves and Climate Change	1
1.2. Calving	4
1.3. Organization	7
2. Theoretical Introduction	9
2.1. Mechanics and Constitutive equations	9
2.2. Boundary Conditions at the Free Surface and the Ice Shelf Base	13
2.3. Shallow Shelf Approximation (SSA)	15
2.4. Boundary Conditions at the Calving Front and Margins	19
2.4.1. Kinematic Conditions	19
2.4.2. Dynamic Conditions	20
2.5. Analytical Solution for Free-Floating Ice Shelf	22
3. Methodology	23
3.1. Parallel Ice Sheet Model (PISM)	23
3.1.1. Discretization	24
3.2. Subgrid Treatment of the Calving Front	28
3.2.1. Introduction	28
3.2.2. Description	29
3.3. Implementation of the SSA Boundary Condition	32
3.3.1. Discretization	32
3.4. Application of Calving Laws	34
3.4.1. Introduction	34

3.4.2. Calving at a Certain Ice Thickness - Simple Calving	37
3.4.3. Calving Rate Based on Principal Strain Rate Components - Eigen Calving	38
4. Results	41
4.1. Computational Setups	41
4.1.1. Setup 1 - Flowline	41
4.1.2. Setup 2 - Rectangular Bay	41
4.1.3. Setup 3 - Ross	43
4.1.4. Setup 4 - Larsen A and B	43
4.2. Test of Subgrid Treatment at the Calving Front	46
4.2.1. Tests of Numerical Properties	46
4.2.2. Variants of Treating Carryover Mass	47
4.3. Validation of the Calving Front Boundary Condition	50
4.4. Experiments with Calving Laws	53
4.4.1. Simple Calving	53
4.4.2. Calving laws by Kenneally & Hughes (2002) and Alley <i>et al.</i> (2008) .	54
4.4.3. Eigen Calving	56
5. Conclusions	63
Glossary	65
Bibliography	67
List of Figures	80
Selbstständigkeitserklärung	81