

Diss. ETH No. 13278

Dynamics of glaciers and ice sheets: a numerical model study

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
Olaf Albrecht
Dipl. Ozeanograph, Christian-Albrecht Universität Kiel
born 20 July 1968
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. A. Ohmura, examiner
Prof. Dr. H. Blatter, co-examiner
Prof. Dr. G.K.C. Clarke, co-examiner

2000

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines numerisches, 3-dimensionales Gletschermodells, welches die zeitliche Entwicklung von Gletschern und Eisschilden unter der Berücksichtigung von Längsspannungen erlaubt. Als Grundlage dazu diente der Mechanikalgorithmus, den Blatter 1995 im Journal of Glaciology vorstellte.

Im ersten Paper "Numerical modelling of glacier evolution: a case study of Griesgletscher, Swiss Alps." wird das Gletschermodell beschrieben und an Hand des Griesgletschers (Schweizer Alpen) getestet. Besonderes Augenmerk galt dabei der numerischen Stabilität und der Anwendbarkeit des Modells auf kleine Gletscher (< 10 km). Es zeigte sich, dass das Modell die beobachtete Entwicklung des Griesgletschers gut reproduziert. Die Genauigkeit der Resultate wurde dabei hauptsächlich durch die reine Höhenabhängigkeit der Massenbilanz und der eingeschränkten Kenntnisse über die Gleitverhältnisse an der Gletscherbasis limitiert. Eine Abschätzung über die Entwicklung des Griesgletschers für die nächsten 100 Jahre ergab, dass sich der Gletscher unter Klimabedingungen, wie sie die letzten 30 Jahre im Durchschnitt vorlagen, bis zum Eisfall zurückziehen wird. Die selbe Simulation, jedoch mit einer mittleren Massenbilanz der frühen 90er Jahre, ergab einen noch stärkeren Rückzug des Gletschers und eine Abnahme des Gletschervolumens um ungefähr 60%. Der Beitrag durch Schmelzwasser zum Stausee unterhalb des Gletschers wäre dabei durchschnittlich 10% des Beitrages durch den Niederschlag, allerdings mit einem Spitzenwert von ungefähr 20% zu Beginn der Simulation. Durch Vorschreiben einer konstanten Massenbilanz nimmt die Menge des Schmelzwassers mit fortlaufender zeitlicher Integration ab.

Im zweiten Paper "Modelling glacier response to measured mass balance forcing" wurde das Modell unter dem Aspekt der gegenseitigen Validation von Modell und Messdaten auf den Storglaciären angewandt. Auf Grund der sehr hohen verfügbaren Datendichte bietet sich dieser Gletscher besonders für diese Validation an. Es existieren eine sehr genaue Karte des Gletscherbettes und des Einzugsgebietes, fünf topographische Karten der Eisoberfläche für die Zeitspanne zwischen 1910 und 1990 sowie eine lückenlose Zeitreihe von Winter- und Sommermassenbilanzen über die letzten 53 Jahre. Die Messungen und auch die Modellsimulationen zeigten, dass sich sowohl das Volumen als auch die Oberflächentopographie von Storglaciären in den letzten 20 Jahren nur marginal veränderte. Für die Modellsimulationen lagen die Massenbilanzen in zwei Formen vor, zum einen in höhen- und zeitabhängiger Form und zum anderen als Karten, so dass die räumliche Variation über dem Gletscher berücksichtigt ist. Die simulierte Entwicklung des Storglaciären stimmte dabei sehr gut mit der beobachteten überein obwohl kein Gleiten an der Gletscherbasis berücksichtigt wurde. Es ergaben sich relativ geringe Unterschiede in den Resultaten, wenn an Stelle der Massenbilanzkarten nur rein höhenabhängige Massenbilanzen das Modell antrieben. Auch zeigte sich, dass in Modellsimulationen die jährlichen Variationen in der Massenbilanz keine Auswirkung auf die längerfristige Entwicklung des Gletschers haben.

Die Entwicklung des Storglaciären bei einer sukzessiven Erhöhung des CO_2 Gehalts in der Atmosphäre auf $2\times\text{CO}_2$ über die nächsten 50 Jahren ist das Thema des dritten Papers "Storglaciären in doubling CO_2 climate". Durch drei unterschiedliche GCM-Läufe, einem "Downscaling" und einem Gletscher-Massenbilanz-Modell wurde die Massenbilanz für den

Storglaciären für ein $2xCO_2$ Klimaszenario bestimmt. Die Entwicklung des Gletschers über die nächsten 50 Jahre wurden mit dieser Massenbilanz und dem Gletschermodell simuliert. Dieses Modellexperiment wurde von der heutigen Klimasituation gestartet. Während der Integration über die 50 Jahre wurde die Massenbilanz linear von den heutigen Bedingungen auf die $2xCO_2$ -Verhältnisse angepasst. Durch die oben erwähnten Verifikationsexperimente war das Gletschermodell optimal geeicht worden. Die Simulation zeigte, dass der Storglaciären ungefähr 30% seines heutigen Volumens einbüßen wird, würde sich das Klima so wie geschätzt entwickeln.

Das letzte Kapitel dieser Arbeit "Ice sheet modelling" setzt sich aus einem einleitenden Kapitel und einem Paper zusammen. In diesem Teil der Arbeit wurde das Modell in der Antarktis auf ein Gebiet um den Dome C herum und auf die Summit Region von Grönland angewandt. Da die Längsspannungen nur an Orten relevant sind, an denen die Eisoberfläche waagrecht ist oder dort wo starke Variationen des Gleitens existieren, macht es auch nur Sinn, dort das Modell anzuwenden. Aus Gründen der Rechenzeit wäre es zur Zeit nicht möglich, mit dem hier präsentierten Modell die Entwicklung eines gesamten Eisschildes mit einer vernünftigen horizontalen Auflösung von beispielsweise 50 km zu simulieren. Aus diesem Grund wurde das Modell mit einem "shallow ice approximation" (SIA) Modell gekoppelt. Das SIA Modell bestimmt die Geschwindigkeiten und die Oberflächenentwicklung für das gesamte Eisschild unter Vernachlässigung der Normalspannungsgradienten. Für ein spezielles Gebiet wird das hier vorgestellte Modell in das SIA-Modell "genested". Das heisst, für dieses Gebiet werden die Geschwindigkeiten und die Oberflächenentwicklung mit dem neuen Modell bestimmt. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit sowohl die Eisdynamik des gesamten Eisschildes zu berücksichtigen, als auch die Längsspannungen in den Gebieten, wo sie relevant werden. Spezielles Augenmerk bei der Anwendung des genesteten Modells galt dabei der Bestimmung des Eisalters in Bohrkernen. Wie sich für Dome C in der Antarktis herausstellte, wurde der gesamte Dome auf Grund der Längsspannungen "überspült". Dieses Phänomen war bei den bisher verwendeten SIA-Modellen nicht sichtbar gewesen. Es kann erwartet werden, dass das Eisalter am Dome C dadurch stark beeinflusst wird. Für die Summit Region auf Grönland ist das Eis auf Grund der Längsspannungen deutlich weicher. Die Berechnungen ergaben deutliche Unterschiede im Eisalter in den unteren 500 Metern des Eises. Das neue Modell datierte das Eis ein Drittel jünger als das SIA-Modell.

Abstract

The aim of this research was to develop a numerical 3-D glacier model which computes the evolution of glaciers and ice sheets by taking into account the longitudinal stresses. It is based on the mechanical algorithm introduced by Blatter (1995).

In the first paper “Numerical modelling of glacier evolution: a case study of Griesgletscher, Swiss Alps.”, the glacier model is described and is tested for Griesgletscher, Swiss Alps. Special consideration was directed towards the numerical stability and the applicability of the model to small glaciers (< 10 km). Results show that the model determine the development of Griesgletscher with reasonable accuracy. The accuracy of the results was mainly limited by only imposing a height dependent mass balance on the model, and the limited knowledge of sliding at the glacier base. An estimate of the evolution of Griesgletscher over the next century reveals that the glacier tongue would retreat back to the icefall given a continuation of the averaged climate conditions for the last 30 years. A comparable simulation, using the averaged mass balance from the early 1990’s, reveals a larger retreat and a decreasing of the ice volume by approximately 60%. Melt contributes, on average, 10% of the inflow of water to the dammed lake below the glacier, however, with a maximum contribution of 20% at the beginning of the model simulation. Since the imposed mass balance is constant in time, the melt rate is decreasing with integration time.

The main focus of the second paper “Modelling glacier response to measured mass balance forcing” was the validation of the model and, as it turned out, a validation of the measured data. Storglaciären was used due to the availability of data, namely, an accurate map of the glacier bed including the catchment area, 5 topographical maps of the glacier surface between 1910 and 1990, and a continuous time series of summer and winter mass balances for the last 53 years. The measurements and the model simulations reveal, that the volume and the surface topography of Storglaciären were almost in equilibrium for the last 20 years. For the model simulations, the mass balances were available in two forms: height and time dependent; and as maps, which include the spatial distribution of the mass balance. The simulated evolution of Storglaciären closely matched observations, even though sliding was not taken into account. Imposing the two different mass balances on the model only causes small changes in the model results.

The evolution of Storglaciären under a linear increase of atmospheric CO_2 to $2\times\text{CO}_2$ levels over the next 50 years is the topic of the third paper “Storglaciären in doubling CO_2 climate”. With three different GCM runs, a “Downscaling” and a glacier mass balance model, the mass balance for a $2\times\text{CO}_2$ scenario on Storglaciären was determined. Today’s climate was used to start the simulation with the glacier model. During the 50 years of integration, the climate was linearly adjusted to the computed $2\times\text{CO}_2$ scenario. Optimal tuning of the glacier model was archived using the validation experiments discussed in the second paper. The simulation suggests that the volume of Storglaciären would decrease by approximately 30% for such a climate change.

The last chapter “Ice sheet modelling” consists of an analysis of ice sheet modelling for both the Antarctic ice sheet and the Summit of Greenland. Improved results using this model, can be archived when longitudinal stresses become important, e.g. in regions with

vanishing surface slope, or in regions where basal sliding significantly changes. Due to the large computation time required, it is not possible to compute the evolution of the entire ice sheet for a reasonable horizontal grid spacing of 50–100 km using this model. Therefore, the ice sheet was computed with a shallow ice approximation (SIA) model. In this model, normal stress gradients are neglected. For specific regions, in which these stresses become important, the new model was nested into the SIA model. This procedure combines the advantage of both models. The ice dynamics of the entire ice sheet are taken into account as well as the longitudinal stresses for regions where they play an important role. This coupled model was applied to the Dome C in the Antarctic and to the Greenland Summit. For Dome C, ice flow is radial from the Dome if the SIA model computes the velocity fields. This is not the case if the normal stress gradients are taken into account. The ice is forced over the dome region, following the general flow pattern. It is expected that this significantly affects the ice age at Dome C. For the Greenland Summit, the longitudinal stresses cause a softening of the ice, resulting in a significant difference in the computed ice age for the lowest 500 meters. In the SIA-model, the computed ice age is three times older than computed by the model, as presented in this study.