

Diss. ETH No. 20616

**DISTRIBUTED MODELLING OF CHANGES
IN GLACIER MASS BALANCE AND RUNOFF**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

MARCO CARENZO

Dipl. Civil Eng. Polytechnic University of Turin

born November 9, 1982

citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. P. Burlando, examiner

Dr. F. Pellicciotti, co-examiner

Prof. Dr. G. Flowers, co-examiner

Dr. B. Brock, co-examiner

2012

Abstract

Accurate modelling of glacier-climate interaction processes is necessary to assess the response of glaciers to future changes in the climate. Varying levels of complexity in the representation of ablation, accumulation and glacier geometry evolution processes can lead to significant variability in model predictions. Correct modelling of glacier ablation is essential to study the response of glaciers to changes in the climate system. Physically-based energy-balance models, in which the melt rate at the glacier surface is computed using energy-balance equations, are better suitable for simulations of future melt and runoff because they rely less on calibrated parameters, in comparison to more empirical temperature-index models, in which melt is calculated as a function of air temperature. The latter method has been recently improved by including additional variables, in order to bridge the gap between the two approaches and combine the lower data requirement of the latter with the higher accuracy of the former. Comparison between the two methods has been conducted at the point scale, but few comparison studies exist at the distributed glacier scale. Accumulation modelling is a key component of the glacier mass balance. Higher amount of snow accumulated over the glacier surface leads to lower surface melt rate (as snow is characterized by higher albedo and larger radiative cooling in comparison to ice) and, therefore, delay in the ice exposure and lower ice thickness losses. Winter snow distribution in complex terrain (such as Alpine terrain) is the result of the preferential deposition induced by wind and the redistribution of snow mass due to avalanches. The findings of physically-based models of snow distribution are limited to flat and gentle terrain. More simple approaches based on the precipitation gradient and geometry characteristics (slope and curvature), without including the variability in the accumulation processes, have been used in continuous mass balance studies. Simulation of the mass transport associated with the surface mass changes caused by the interaction of the glacier with the atmosphere is necessary to reproduce the changes in surface elevation and simulate the glacier geometry evolution. Ice flow models require large input data and computational resources and their applicability to long term simulation is limited. In this case, a parameterization results more suitable for the modelling purpose.

In this study a continuous distributed mass balance and runoff (MBR) model has been developed. In order to ensure that the individual processes are correctly reproduced and to avoid compensation of errors, a multi-step calibration procedure has been carried out for the single distributed meteorological variables, energy fluxes and model components. Meteorological input variables, energy fluxes and surface characteristics have been validated directly against observations of each

of them, avoiding the model calibration against measurements of mass balance and ice thickness (which would lead to a maximization of the model performance but likely wrong input forcing fields). The range of outputs of the mass balance model is investigated for the various model components. Ablation is calculated by means of two different approaches, a physically based energy-balance model (EB) and a more empirical enhanced temperature-index model (ETI). Accumulation is modelled by simply considering the spatial variability of precipitation by means of a gradient or accounting for redistribution of snow by wind and gravity. Changes in glacier geometry are simulated by neglecting the ice flux component or parameterizing the changes in glacier surface elevation and ice thickness as a function of mass gained or loss. The MBR model is run on Haut Glacier d'Arolla, Switzerland, for the period 2002-2007. Initially, each component is validated individually; discrete ablation stake readings, continuous surface lowering measured by Ultrasonic Depth Gauges and snowline evolution monitored by georeferenced photos are used for the ablation, whereas differences between LIDAR surveys and snow height measurements are used for the accumulation. Then the modelled ice volume losses are compared against the measured ones obtained as differences between Digital Elevation Models (DEMs), in this way validating the integrated model outputs. The comparison between measured and modelled runoff provides additional indication of the model applicability for water resources management purposes. Finally, in order to test the model suitability for assessment of the impact of the future global warming and variation in the precipitation regime on the glacier, ice volume changes, snow and ice melt rate variations as well as changes in the runoff regime are simulated by forcing the model with temperature and precipitation downscaled from the Regional Circulation Model Reg-CM3 (Global Climate Model ECHAM5 - A1B emission scenario).

Sommario

Un'accurata modellizzazione delle interazioni tra clima e ghiacciaio risulta necessaria per la corretta riproduzione della risposta dei ghiacciai ai futuri cambiamenti climatici. Diversi livelli di complessità nella rappresentazione dei processi di scioglimento, accumulo ed evoluzione della geometria dei ghiacciai possono portare ad una rilevante variabilità nelle previsioni del modello. Una corretta modellizzazione dei processi di scioglimento è fondamentale per definire la risposta dei ghiacciai ai cambiamenti atmosferici. Modelli "fisicamente basati" come quelli a bilancio di energia, in cui lo scioglimento alla superficie del ghiacciaio è definito mediante equazioni fisiche, sono più adeguati per le simulazioni future di scioglimento e deflusso perché non dipendono dalla calibrazione di parametri, a differenza di modelli più empirici, in cui lo scioglimento è definito in funzione della temperatura. Quest'ultima metodologia è stata recentemente migliorata mediante l'introduzione di variabili aggiuntive al fine di ridurre il gap tra le due tipologie di modello e combinarne le caratteristiche: minor numero di dati di input nei modelli empirici e maggiore accuratezza nella modellizzazione nei modelli fisicamente basati. Un confronto tra le due tipologie è stato condotto a scala puntuale, ma esistono pochissimi studi a scala distribuita. Accumulo è una componente fondamentale nel bilancio di massa di un ghiacciaio. Una maggiore quantità di neve accumulata sulla superficie del ghiacciaio comporta un minor scioglimento (in confronto ad una superficie ghiacciata, uno strato di neve è caratterizzato da un valore di albedo più alto ed un maggior raffreddamento interno) e, quindi, un ritardo dell'esposizione della superficie ghiacciata ed una minore perdita di ghiaccio. La distribuzione invernale di neve in un ambiente complesso come un ghiacciaio alpino è il risultato di processi di deposito indotti dal vento non omogenei nello spazio e della redistribuzione della massa di neve causata dalle valanghe. Modelli "fisicamente basati" di accumulo della neve sono validi generalmente solo per aree pianeggianti e con minore complessità geometrica. Metodologie più semplici basate su gradienti di precipitazione e su caratteristiche geometriche come pendenza e curvature, senza includere la variabilità nei processi di accumulo, sono spesso usate negli studi di bilancio di massa. La simulazione della redistribuzione della neve, associata alla variazione di massa prodotta dalle interazioni tra ghiacciaio e atmosfera, è necessaria per riprodurre le variazioni geometriche e modellare l'evoluzione del ghiacciaio. Modelli che riproducono le dinamiche interne di un ghiacciaio richiedono una maggiore quantità di dati di input e risorse computazionali; la loro applicazione per simulazioni a lungo termine risulta perciò limitata. In questo caso, una parametrizzazione è più adatta per lo scopo di modellizzazione.

In questo studio è stato sviluppato un modello distribuito per la simulazione continua del bilancio di massa e del conseguente deflusso di un ghiacciaio (MBR model). Al fine di assicurare che il singolo processo sia correttamente riprodotto e di evitare la compensazione di errori, è stata condotta una procedura di calibrazione a più livelli che ha coinvolto la singola variabile meteorologica, il singolo flusso energetico ed il singolo componente del modello. Variabili meteorologiche, flussi energetici e caratteristiche superficiali sono state validate direttamente mediante il confronto con le singole osservazioni di ciascuno di essi, evitando la calibrazione del modello a mezzo di misure di bilancio di massa e volume di ghiaccio (che comporterebbe la massimizzazione delle prestazioni ma ad una probabile simulazione errata delle forzanti di input). La varietà dei risultati è analizzata per le singole componenti. Lo scioglimento è calcolato mediante due tipologie di approccio: un modello fisicamente basato a bilancio di energia (EB) ed un modello più empirico ad indice di temperatura (ETI). L'accumulo è simulato considerando semplicemente la variabilità spaziale della precipitazione a mezzo di un gradiente o prendendo in considerazione la redistribuzione della neve indotta da vento e gravità. I cambiamenti nella geometria del ghiacciaio sono simulati non considerando la componente di trasporto interno di ghiaccio o parametrizzando le variazioni nella geometria della superficie e nello spessore del ghiacciaio in funzione della quantità di massa persa o guadagnata ogni anno. La modellizzazione è condotta sul ghiacciaio svizzero Haut Glacier d'Arolla per il periodo 2002-2007. Inizialmente ogni componente del modello è validato individualmente; letture di paline ablatometriche, abbassamento della superficie misurato in continuo mediante UDG ed evoluzione della linea della neve monitorato mediante fotografie georeferenziate sono le misure usate per la validazione dello scioglimento. Differenze tra LiDAR e misure di altezza di neve sono invece usate per l'accumulo. La modellizzazione del volume di ghiaccio perso come conseguenza del ritiro del ghiacciaio è validata mediante il confronto con le differenze tra DEMs, effettuando così una validazione integrata della modellizzazione. Il confronto tra deflusso misurato e modellato fornisce un'indicazione aggiuntiva sull'applicabilità del modello per la sua utilizzazione nella gestione delle risorse idriche. In ultima analisi, al fine di testare la possibilità di utilizzare il modello per studi di valutazione dell'impatto del surriscaldamento globale e delle variazioni nel regime di precipitazione previsti per il futuro, variazioni del volume di ghiaccio e cambiamenti nello scioglimento di neve e ghiaccio e nel deflusso del ghiaccio sono simulati forzando il modello con previsioni di temperatura e precipitazione ottenuti dal Regional Climate Model Reg-CM3 (Global Climate Model ECHAM5 usando lo scenario di emissioni gassose nell'atmosfera A1B).

Zusammenfassung

Eine akkurate Modellierung der Interaktionsprozesse zwischen Gletscher und Klima ist wichtig für die Abschätzung zukünftiger Gletscherveränderungen durch den Klimawandel. Unterschiedliche Komplexitätsgrade der Modellierung der Veränderung der Prozesse der Ablation, Akkumulation und der Gletschergeometrie führen zu signifikanten Unterschieden in der Vorhersagen. Deshalb ist eine korrekte Modellierung der Gletscherablation wesentlich für die Untersuchung der Gletscherveränderung durch den Klimawandel. Eine physikalisch und energiebilanzierte Modellierung, welche die Schmelzrate anhand von Energiebilanzgleichungen berechnet, eignet sich besser zur Simulation der Gletscherschmelze und des Oberflächenabflusses als ein empirisches Temperatur-Index-Modell, das die Schmelzrate als Funktion der Lufttemperatur mithilfe von Kalibrationsparametern berechnet. Die Variablen der letzteren Modellierung wurde kürzlich erweitert, um die geringe Input-Datenmenge mit der grösseren Genauigkeit zu kombinieren. In vielen Studien wurden die beiden Methoden punktuell verglichen, wohingegen es an grossflächigen Vergleichen mangelt. Die Gletschermassenbilanz hängt primär von der Modellierung der Akkumulation ab: Durch eine Schneedeckschicht wird die Sonneneinstrahlung stärker reflektiert und kühlt radioaktiv besser als eine Eisschicht. Folglich führt eine Zunahme des akkumulierten Schnees zu einer Abnahme des Schmelzprozesses, wodurch die Freisetzung des Gletschereises verzögert und die Gletscherausdünnung reduziert wird. Die geografische Verteilung der Schneeablagerung in alpinen Terrain hängt von den Ab- und Umlagerungsprozessen durch Wind und Lawinen ab. Vorhandene physikalischen Modelle der Schneeverteilung beschränken sich auf flache und gleichmässige Topografien, während Studien zur Massenbilanz vereinfachte Ansätze verwenden, welche den Niederschlagsgradient und die Charakteristiken der Geometrie (Gefälle und Krümmung) berücksichtigen und die Unsicherheiten der Akkumulationsprozessen vernachlässigen. Eine Simulation des Massentransports unter Berücksichtigung der Massenveränderung an der Gletscheroberfläche infolge der Interaktion mit der Atmosphäre ist wesentlich, um die Veränderung der Oberflächenhöhen und Gletschergeometrie zu modellieren. Eisfluss-Modelle erfordern eine grosse Input-Datenmenge und Rechenleistung, wodurch deren Anwendung auf langfristige Modellrechnungen beschränkt ist. In diesem Fall eignet sich eine Parametrisierung besser für die Modellierung.

In der folgenden Studie wird ein kontinuierlich verteiltes Modell der Massenbilanz und des Oberflächenabflusses (MBR) entwickelt. In einem mehrstufigen Kalibrationsprozess der individuell verteilten meteorologischen Variablen, Energieflüsse und Modellkomponenten wird die korrekte

Wiedergabe der individuellen Prozesse überprüft und die gegenseitige Kompensation der Fehler vermieden. Meteorologische Eingabevariablen, Energieflüsse und Oberflächencharakteren werden direkt anhand der beobachteten Grössen validiert und eine Kalibration anhand von Messungen der Massenbilanz und der Eisstärke wird vermieden. Letzteres könnte die Leistung des Modells zwar maximieren jedoch auch falsche Eingabedaten generieren. Die Outputbandbreite des Massenbilanzmodells wird für die verschiedenen Modellkomponenten untersucht. Die Ablation wird anhand von zwei unterschiedlichen Ansätzen berechnet, einem physikalischen Energiebilanz-Modell (EB) und einem eher empirischen Temperatur-Index-Modell (ETI), und gemittelt. Die Berechnungen der Akkumulation berücksichtigen die räumliche Variabilität des Niederschlags durch den Mittelwert des Gradienten oder der Schneeumlagerung durch den Wind und die Schwerkraft. Die Modellierung der Veränderung der Gletschergeometrie vernachlässigt den Einfluss des Eisflusses und parametrisiert die Veränderungen der Gletscheroberflächenlage und der Eisstärke als Funktion der Zu- und Abnahme der Masse. Das MBR Modell wird auf den Haut Glacier d’Arolla, Schweiz, für die Periode 2002-2007 angewendet. In einem ersten Schritt wird jede Komponente individuell kalibriert: Zur Bestimmung der Ablation wurden diskrete Messungen der Ablation mit Messlatten, kontinuierliche Messungen der Gletscheroberflächenlage mit Ultrasonic Depth Gauges und ein Monitoring der Schneelinienveränderung mit georeferenzierter Bildokumentation verwendet, wie auch Unterschiede zwischen LIDAR Betrachtungen und Messungen der Schneehöhe zur Bestimmung der Akkumulation. In einem zweiten Schritt werden die modellierten Verluste des Eisvolumens mit den Messungen verglichen, welche aus der Differenz des Digital Elevation Model (DEMs) bestimmt werden und so wird der integrierte Output des Modells validiert. Der Vergleich zwischen dem gemessenen und modellierten Oberflächenabfluss ergibt einen weiteren Indikator für die Anwendbarkeit des Modells für das Wasserressourcenmanagement. In einem letzten Schritt, wird die Tauglichkeit des Modells zur Vorhersage der Gletscherveränderung durch die zukünftige globale Erwärmung und durch die Schwankungen des Niederschlagsregimes untersucht. Hierfür werden die Veränderungen des Eisvolumens, die Variationen der Schnee- und Gletscherschmelzraten, wie auch die Veränderungen des Oberflächenabflussregime simuliert, indem das Modell durch Temperatur und Niederschlag als Input-Daten, aus der Regional Circulation Model Reg-CM3 (Global Climate Model ECHAM5-A1B emission scenario) herunterskaliert, forciert wird.