



Doctoral Thesis

Understanding and Modelling Snow Accumulation on Glaciers

Author(s):

Clemenzi, Ilaria

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010863699> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 23545

Understanding and Modelling Snow Accumulation on Glaciers

A dissertation submitted to attain the degree of

Doctor of Sciences of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ILARIA CLEMENZI

Laurea di dottore in Ing. per l'Ambiente e il Territorio,

Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

born on 18.04.1980

Italian

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. P. Burlando, examiner

Dr. F. Pellicciotti, co-examiner

Prof. Dr. M. Lehning, co-examiner

Prof. Dr. J. W. Pomeroy, co-examiner

2016

Abstract

Understanding how snow is distributed at the end of the accumulation season and which are the physical processes contributing to its formation is a key step to achieve a better assessment of the water resources stored in high elevation, glacierized catchments and improve model estimations of glacier mass balance and catchment water balance. The spatial snow distribution at the end of the accumulation season represents the initial conditions for the ablation season and together with meteorological forcing contribute to determine melting patterns and runoff timing. In glacierized areas winter snowpack and its spatial distribution are particularly important because they influence the timing of the ice exposure during the ablation. Areas with shallower snowpack result to be earlier exposed and thus contribute more in terms of ice melt and ice mass loss compared to those with deeper snowpack which remain longer or completely snow covered. Snow distribution is highly variable in mountainous environments. In high elevation catchments characterized by steep topography and absence of vegetation the snow cover heterogeneity at the end of the accumulation was mainly attributed to uneven deposition of precipitation due to wind, snow drifts and snow redistribution by avalanches. Despite the increasing number of studies, the relevant processes, their temporal stability across accumulation seasons and their relative contribution to the development of snow distribution are still poorly understood. The aim of this study was to better understand the snow accumulation in glacierized catchments and investigate the interaction of wind and snow by means of accumulation measurements, data analysis and modelling experiments. Snow depth maps obtained from high resolution and high accuracy LiDAR data were used to analyse the snow depth spatial patterns and their temporal stability at the end of two accumulation seasons over the Haut Glacier d'Arolla, a valley glacier situated in the Swiss Alps. Results showed that snow depth over the glacier exhibited a fractal behaviour in two spatial regions separated by a scale break distance. Fractal dimensions were in general lower before the scale break distance than after. Furthermore, the fractal characteristics (fractal dimensions and scale break distance) were consistent between the two seasons. Differences in the snow depth scaling behaviour between the upper catchment and the glacier tongue were found. The fractal dimensions before the scale break were higher in the upper catchment, suggesting

that the strength of the snow depth spatial correlation is weaker in the upper catchment. On the glacier tongue the snow depth distribution showed an anti-persistent structure along the wind direction associated to snow storms and drift events, while a persistent structure along the perpendicular direction was found. This occurrence is instead not evident in the upper catchment. The interaction of wind with the local macro and micro topography to distribute and redistribute snow was assumed to contribute to the observed variability. A modelling approach was then used to further investigate the snow transport induced by wind and the simulated spatial distribution of snow on the glacier and at catchment scale. Specifically, a modelling chain based on a wind model and distributed, physically-based snow model was used and tested. The capability of the mass consistent wind model, WINDS, was tested to reproduce 3D mean wind fields at high spatial (25 m) and temporal (h) resolution at the catchment wide-area. Model simulations were validated with the on-glacier and off-glacier observations available at automatic weather stations in the site. Results showed that a reasonable agreement was achieved between observed and simulated wind regime (wind speed and direction) especially when local wind was dominated by the mesoscale forcing channelled through the catchment. This condition was found related to the occurrence of precipitation events during the ablation and the accumulation season. Given the reasonable performance of the wind model in reproducing the flow characteristic at the site, the snow model Alpine3D was forced with the modelled 3D mean wind fields to reconstruct the snow patterns in the catchment during one accumulation season and in particular for typical storm and interstorm periods. Therefore, the effect of wind was considered both on precipitation deposition and on already deposited snow. The amount of mobilized snow was higher during snowfall events than during non-snowfall events for all the analysed cases, which indicates that deposition patterns are mostly influenced by snow transport induced by wind during snowfall. Spatial differences characterized the patterns of end of snowfall season accumulation. With regards to redistribution effects due to wind, snow deposition prevailed on most of the glacier area, while on mountain ridges and slopes both snow erosion and deposition occurred. Hence, the interaction between wind and snow was an important mechanism to delineate the snow patterns during the accumulation season both on the glacier and at catchment scale, with the highest amount of snow transported during snowfall events. These results suggest that future efforts should focus on the intra-seasonal monitoring of snow cover and meteorological forcing to achieve a better understanding and modelling of the snow cover evolution and controlling mechanisms.

Zusammenfassung

Erkenntnisse über die Schneevertelung am Ende der Akkumulationszeit und die unterschiedlichen physikalischen Prozesse, die zu dessen Bildung beigetragen haben, sind ein wichtiger Schritt für ein verbessertes Abschätzen von Wasserressourcen- und Massenbilanzmodellen von hohen und vergletscherten Einzugsgebieten. Die räumliche Schneevertelung am Ende der Akkumulationszeit definiert die Anfangsbedingungen für die Ablationssaison und bildet zusammen mit meteorologischen Einflüssen die Grundlage für Schmelzmuster und Abfluss in Raum und Zeit. In vergletscherten Regionen ist die Winterschneedecke und ihre räumliche Verteilung besonders wichtig, da sie den Zeitpunkt der Freilegung des Gletschereises während der Ablation beeinflusst. Bereiche mit geringmächtiger Schneedecke liegen nämlich früher frei und tragen somit früher zur Eisschmelze und den darauffolgenden Verlust an Eismasse bei, als Bereiche mit durchgehender oder mächtiger Schneedecke. Die Schneevertelung in alpinen Gebieten ist sehr variabel. Die Schneedecke in hohen und vergletscherten Einzugsgebieten, charakterisiert durch steile Topographie ohne Vegetation, zeigt am Ende der Akkumulationsperiode einen hohen Heterogenitätsgrad, verursacht durch die ungleichmässige Ablagerung des Niederschlages, Schneevertelungen und Schneeumverteilung durch Lawinen. Trotz der zunehmenden Anzahl Studien, welche die Heterogenität von Schneedecken untersuchen, sind die relevanten Prozesse, ihrer Persistenz über die Akkumulationssaison und ihr relativer Beitrag zur Entwicklung der Schneevertelung noch immer kaum verstanden. Das Ziel dieser Studie war um die Schnee Akkumulation in vergletscherten Einzugsgebieten besser zu verstehen und zusätzlich die Schnee-Wind Interaktion, durch Verwendung von Messung und Datenanalyse und mit Hilfe von Modellierungsexperimenten, zu untersuchen. Um das räumliche Muster der Schneedecke und Ihrer Persistenz am Ende von zwei Akkumulationsperioden auf dem Haut Glacier d’Arolla, einem Talgletscher in den Schweizer Alpen, zu analysieren, wurden Schneehöhenkarten unter Verwendung von hochaufgelösten und messgenauen LiDAR-Daten generiert. Die Schneehöhen auf dem Gletscher zeigten ein fraktales Verhalten in zwei räumlichen Regionen, aufgeteilt durch eine Skalierungsbruchdistanz. Die fraktale Dimensionen waren in der Regel vor der Skalierungsbruchdistanz niedriger als danach und die fraktalen Eigenschaften (fraktale Dimensionen und Skalierungsbruchab-

stand) waren über beide Jahreszeiten konsistent. Das Skalierungsverhalten der Schneehöhen zwischen dem oberen Einzugsgebiet und der Gletscherzunge war hingegen unterschiedlich. Die fraktalen Dimensionen vor dem Skalierungsbruch waren im oberen Einzugsgebiet verglichen mit der Gletscherzunge höher, was darauf hindeutet, dass die räumliche Korrelation der Schneehöhe in der oberen Gletscherregion schwächer ausgeprägt ist. Die Schneehöhen Verteilung auf der Gletscherzunge zeigte eine anti-persistente Struktur entlang der Windrichtung, welche mit Schneestürmen und Verwehungen in Verbindung gebracht werden konnte, während eine persistente Struktur entlang der senkrechten Richtung festgestellt werden konnte. Dieses Auftreten wurde im oberen Einzugsgebiet nicht beobachtet. Es ist wahrscheinlich, dass die vorgefundene Schneehöhenvariabilität durch ein Zusammenspiel von Wind und der lokalen Makro- und Mikrotopographie sowie der Verteilung und Umverteilung von Schnee verursacht wurde. Zusätzlich wurde ein Modellierungsansatz verwendet, um Schneetransport durch Wind und die simulierte räumliche Verteilung von Schnee auf Gletscher- sowie Einzugsgebietsebene zu untersuchen. Insbesondere wurde eine Modellierungskette, basierend auf einem Windmodell und einem räumlichen, physikalisch basierten Schneemodell, verwendet und getestet. Die Fähigkeit des massenkonsistenten Windmodells, WINDS, wurde darauf getestet, ob mittlere 3D-Felder mit hoher räumlicher (25 m) und zeitlicher (h) Auflösung im Einzugsgebiet reproduziert werden können. Die Modellsimulationen wurden mit Gletscherbeobachtungen von den im Gebiet verfügbaren automatischen Wetterstationen auf- und abseits des Gletschers validiert. Die Ergebnisse zeigten, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den beobachteten und simulierten Windverhältnissen (Windgeschwindigkeit und -richtung) erreicht wurde, wenn lokaler Wind durch, im Einzugsgebiet kanalisierte, mesoskalige Windsysteme dominiert wurde. Dieser Zustand wurde in Verbindung mit dem Auftreten von Niederschlagsereignissen während der Ablation und der Akkumulationszeit gebracht. Durch die akzeptablen Leistung des Windmodelles in der Abbildung der lokalen Strömungscharakteristik, wurden die mittleren Windfelder im Schneemodell Alpine3D verwendet, um Schneemuster während der Akkumulationssaison und insbesondere während typischen Sturm- und Zwischenperioden im Einzugsgebiet zu rekonstruieren. Die Wirkung von Wind wurde somit sowohl auf die Ablagerung von Niederschlag als auch auf bereits abgelagerten Schnee miteinbezogen. Die Menge mobilisierten Schnees war bei Schneefallereignissen während aller analysierten Fällen höher als bei Ereignissen ohne Schneefall, was darauf hindeutet, dass Ablagerungsmuster vorwiegend durch Wind-induzierten Schneetransport während Schneefallereignissen beeinflusst wird. Die Muster der Schnee gesamt mengen am Ende der Schneefallsaison waren durch räumliche Unterschiede gekennzeichnet. Auf dem grössten Teil der Gletscherfläche waren Schneeablagerungen vorherrschend, während an Berggräten und -hängen zusätzlich auch Erosion zur Schneeverteilung beitrug.

Darum ist die Wechselwirkung zwischen Wind und Schnee ein wichtiger Mechanismus, um

Schneemuster auf der Gletscher- und der Einzugsgebietsebene während der Akkumulationszeit zu beschreiben, wobei die grösste Schneemenge bei Schneefallereignissen transportiert wird.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass künftige Anstrengungen auf die intra-saisonale Überwachung der Schneedecke und meteorologische Parameter konzentriert werden müssen, um ein besseres Verständnis der Schneedeckenentwicklung und deren Kontrollmechanismen und damit deren präziseren Modellierung zu erreichen.

Sommario

Conoscere quale sia la distribuzione del manto nevoso alla fine della stagione di accumulo e quali siano i processi fisici che l'abbiano determinata è fondamentale per ottenere una valutazione più accurata della risorsa idrica immagazinata nei bacini idrografici di alta montagna con copertura glaciale e migliorare, in tal modo, i modelli di previsione sia per il bilancio di massa dei ghiacciai che per il bilancio idrologico complessivo dei bacini montani. La distribuzione del manto nevoso alla fine della stagione di accumulo infatti insieme alle forzanti meteorologiche determinano le condizioni e i tempi con cui avviene la fusione della neve e/o del ghiaccio ed il deflusso di acqua di fusione. Nei bacini con copertura glaciale, il manto nevoso invernale e la sua distribuzione spaziale sono particolarmente importanti perchè influenzano il momento in cui avviene l'esposizione del ghiaccio durante il periodo di ablazione nivoglaciale. Nelle aree del ghiacciaio dove il manto nevoso è meno spesso, il ghiaccio è esposto più a lungo all'azione delle forzanti meteorologiche e quindi la perdita di massa di ghiaccio è maggiore rispetto a quelle aree dove o il manto nevoso è più spesso o sono completamente coperte di neve o rimangono coperte di neve per un periodo più lungo. Negli ambienti montani il manto nevoso è distribuito spazialmente e temporalmente in modo molto eterogeneo. Nei bacini di alta quota caratterizzati da una topografia scoscesa e dall'assenza di vegetazione, l'eterogeneità del manto nevoso invernale è stata attribuita principalmente alla deposizione irregolare delle precipitazioni nevose causata dal vento, al trasporto della neve per effetto dell'azione del vento e delle valanghe. Nonostante i processi di accumulo nevoso siano stati oggetto di ricerca di un numero crescente di studi, quale siano i processi rilevanti, la loro ricorrenza tra le diverse stagioni di accumulo ed il loro contributo alla formazione ed allo sviluppo della distribuzione del manto nevoso sono ancora poco compresi. Lo scopo pertanto di questo studio è quello di indagare in tale ambito e dare un contributo finalizzato ad una migliore comprensione dell'accumulo nevoso nei bacini con copertura glaciale. Ciò è ottenuto mediante l'uso di osservazioni relative all'accumulo nevoso, la loro analisi e con esperimenti di modellazione numerica. Mappe delle altezze di neve al termine di due stagioni di accumulo, ottenute da dati LiDAR ad alta precisione e risoluzione, sono state utilizzate per analizzare la struttura spaziale del manto nevoso sul ghiacciaio Haut Glacier d'Arolla nelle Alpi svizzere e la sua ricorrenza

tra le diverse stagioni. I risultati mostrano che la distribuzione dell'altezza della neve sul ghiacciaio è caratterizzata da un comportamento frattale in due regioni spaziali delineato da una distanza di cambiamento di scala. La dimensione frattale in generale ha un valore minore prima della distanza di cambiamento di scala che dopo di essa. Inoltre, le caratteristiche frattali (dimensioni frattali e distanza di cambiamento di scala) sono simili nelle due stagioni prese in considerazione. Alcune differenze di comportamento sono rilevabili tra la struttura spaziale della neve nel bacino superiore e sulla lingua glaciale. La dimensione frattale che descrive la struttura spaziale del manto nevoso a distanze inferiori alla distanza di cambiamento di scala ha valori maggiori nel bacino superiore rispetto a quella relativa alla lingua glaciale. Questo risultato indica che la correlazione spaziale tra le osservazioni dell'altezza di neve è più debole nel bacino superiore. Sulla lingua del ghiacciaio la distribuzione dell'altezza di neve mostra una struttura anti persistente nella direzione del vento che è associata agli eventi di precipitazione nevosa e di trasporto della neve per effetto dell'azione del vento, mentre lungo la direzione perpendicolare la struttura è persistente. Questo tipo di comportamento non si ravvisa nel bacino superiore. L'interazione del vento con la topografia di grande e piccola scala è indicata come la causa della variabilità osservata nella distribuzione della neve. Al fine di approfondire l'effetto del trasporto indotto dal vento sulla distribuzione della neve invernale al suolo è stato successivamente utilizzato un approccio modellistico. Nello specifico, una catena modellistica basata su un modello di vento e su un modello fisicamente basato di trasporto della neve è stata testata a livello distribuito. In primis è stata testata la capacità del modello di vento di riprodurre campi di vento tridimensionali ad alta risoluzione spaziale (25 m) e temporale (h) alla scala di bacino. Le simulazioni del modello sono state validate con le osservazioni disponibili alle stazioni meteorologiche automatiche posizionate sia sul ghiacciaio che nel bacino. I risultati ottenuti mostrano che esiste una buona concordanza tra il regime del vento osservato e quello simulato (velocità e direzione del vento) nel caso in cui il vento locale segue la forzante di mesoscala che si incanala nel bacino. Questa condizione si verifica per gli eventi di precipitazione osservati sia durante la stagione di ablazione che quella di accumulo. Verificata la ragionevole prestazione del modello di vento, il modello Alpine3D, che riproduce la dinamica dei processi superficiali del manto nevoso tra i quali il trasporto della neve, è stato utilizzato con i campi di vento modellati per ricostruire l'accumulo a scale di bacino e sul ghiacciaio, in particolare, durante e dopo gli eventi di precipitazione nevosa in una stagione di accumulo. In tutti i casi analizzati la quantità di neve mobilitata è più elevata durante le nevicate che nel periodo immediatamente successivo alle stesse, suggerendo che la distribuzione del manto nevoso è in gran parte influenzato dal trasporto del vento durante le nevicate che nei periodi immediatamente successivi ad esse. Alcune differenze spaziali si riscontrano a scala di bacino. La neve viene accumulata sulla maggior parte del ghiacciaio, mentre sui crinali e sui versanti la neve viene rimossa e ridistribuita dal vento nel bacino idrografico o al di fuori di esso. L'interazione tra il vento e la neve

risulta quindi essere un importante meccanismo che influenza la distribuzione della neve durante la stagione di accumulo sia sul ghiacciaio che nel bacino, con la maggior quantità di neve trasportata dal vento durante le nevicate per tutti i casi analizzati. Questi risultati indicano che, per approfondire la conoscenza dell'evoluzione del manto nevoso, dei meccanismi che la controllano e ottenere una migliore modellazione dei processi di accumulo, gli sforzi futuri dovranno essere indirizzati a monitorare l'evoluzione del manto nevoso e delle forzanti meteorologiche a scala intra stagionale.