

Diss. ETH No. 12271

# Snow Interception and Meltwater Transport in Subalpine Forests

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH  
for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

MICHAEL BRÜNDL

Dipl.-Geograph (Univ.)  
Ludwig-Maximilians-University Munich  
born January 20, 1964  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hannes Flühler, examiner  
Prof. Dr. Gode Gravenhorst, co-examiner  
Dr. Martin Schneebeli, co-examiner

1997

# Kurzfassung

Diese Arbeit wurde in den Jahren 1992 - 1996 innerhalb des Projektes „Wasserregime in der Schneedecke und im Boden an bewaldeten Gebirgsstandorten: Schneeinterzeption, Schmelzwasser- und Oberflächenabfluss“ durchgeführt (Stadler et al., 1997). Dieses Projekt wurde vom Schweizerischen Nationalfonds im Rahmen des Forschungsprogramms 31 „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“ unterstützt. Das Ziel des Projektes war die Untersuchung der Phasenwechsel und Transportprozesse zwischen Baum, Schneedecke und Boden in einem subalpinen Fichtenwald im Winter. In dieser Dissertation werden die Prozesse innerhalb der Baumkrone und die Wechselwirkung mit der Schneedecke untersucht.

Im ersten Teil wird die wichtigste Literatur aufgearbeitet und auf diese basierend werden die physikalischen Grundlagen erklärt. Die ersten Untersuchungen über Schneeinterzeption beschrieben die unterschiedlich mächtige Ablagerung von Schnee unter und neben der Krone; die physikalischen Prozesse wurden vor allem qualitativ diskutiert. Später wurde die interzeptierte Menge mit verschiedenen Methoden gemessen. Eine sehr weit verbreitete Methode war und ist das Wägen eines abgeschnittenen Baumes und damit die direkte Messung der interzeptierten Menge. Viele dieser Studien wurden in kontinentalen, trockenen Gebieten Nordamerikas durchgeführt, wo durch Sublimations- bzw. Evaporationsverluste bis zu 30% des Schneeniederschlags dem Abfluss während der Sommermonate entzogen ist. Die Experimente in den 90er Jahren trugen wesentlich zum Verständnis der physikalischen Prozesse bei.

Der zweite Teil stellt eine Methode zur Beobachtung und Messung der interzeptierten Schneemenge vor. An zwei Standorten in den Schweizer Alpen wurde eine Fichte während des Winters permanent mit einer Videokamera beobachtet. Die Bildanalyse zeigt Unterschiede in der Be- und Entladung der Krone auf. Die Bildanalyse wurde im weiteren dazu verwendet die Auslenkung der Äste unter Schneebeladung zu quantifizieren, indem die Bewegung von an Ästen befestigten Kugeln gemessen wurde. Die Auswertung der Position

der Kugeln ergibt eine Zeitserie der Astbewegung, die einen Index für die interzeptierte Schneemenge darstellt.

Die Bildanalyse zeigt jedoch auch die Probleme einer automatischen Bildauswertung von Bildern, die unter natürlichen, ungleichmässigen Lichtbedingungen aufgenommen wurden. Das Hauptproblem sind die geringen Kontraste zwischen den Kugeln und dem Hintergrund bei Tageslicht, die eine automatische Auswertung unmöglich machten. Eine automatische Auswertung war nur von Bildern möglich, die während der Nacht aufgenommen wurden. Auf diesen Bildern ist der Kontrast zwischen den beleuchteten Kugeln und dem beinahe schwarzen Hintergrund ausreichend stark. Die Videobeobachtung erwies sich als nützliches Arbeitsmittel für eine kontinuierliche Beobachtung von dynamischen Prozessen über einen längeren Zeitraum.

Die Beobachtungen an beiden Standorten, Davos (1659 m ü. M.) und Alptal (1185 m ü. M.), werden im dritten Kapitel einerseits direkt miteinander verglichen, andererseits langjährigen Messreihen der jeweiligen Standorte gegenübergestellt. Die Messungen zeigen, dass keine eindeutige Beziehung zwischen Lufttemperatur, Niederschlag und der Anzahl der Interzeptionsereignisse besteht. Ein Interzeptionsereignis wurde in diesem Zusammenhang als die Zeitspanne zwischen der ersten Schneeablagerung auf die Krone und der völligen Ausaperung der Krone definiert. Im Zeitraum November bis Februar erklärt die niedrigere, mittlere Lufttemperatur am Standort Davos die längere Aufenthaltsdauer des Schnees in der Krone, verglichen mit dem Standort Alptal wo die mittlere Aufenthaltsdauer geringer war. Im Frühling zeigt die Beziehung zwischen Schneebedeckung und mittlerer Lufttemperatur, dass die Lufttemperatur allein keine Vorhersage über die Schneebedeckung in der Baumkrone zulässt. Die geringere Globalstrahlung verursachte am Standort Alptal eine längere, mittlere Schneebedeckung der Krone als in Davos. In den Frühlingsmonaten spielte die Globalstrahlung an beiden Standorten die wichtigste Rolle für die Entladung der Baumkrone.

Die statistische Modellierung des Zusammenspiels zwischen meteorologischen Faktoren und der Ereignislänge erwies sich als problematisch. Die Vorhersage der Ereignisdauer durch Anwendung von binären Baummodellen als Alternative zur multiplen Regression zeigt, dass die Ereignisdauer nur für Ereignisse kürzer als drei Tage zufriedenstellend vorhergesagt werden kann. Längere Ereignisse konnten mit dieser Methode nur mit teils grossen Ungenauigkeiten vorhergesagt werden, da die Variabilität der meteorologischen Faktoren steigt und sich die Eigenschaften der Interzeptionsereignisse mit zunehmender Länge verändern.

Die gemessene Astbewegung aus den Videobildern bildete die Grundlage für die Abschätzung der interzeptierten Masse auf Ästen. Ein nord- und ein südexponierter Ast des Baumes in Davos wurde mit bekannten Gewichten belastet und die Auslenkung anschliessend gemessen. Damit liess sich die Astauslenkung eichen. Die Ergebnisse dieser Eichungen wurden als Zielvariable in einem Finiten-Element-Modell verwendet, mit dem das Elastizitätsmodul der Äste unter bestimmten Temperaturbedingungen berechnet wurde. Mit Hilfe dieser Simulationen erhält man eine Beziehung zwischen Asttemperatur und Elastizitätsmodul. Anhand dieser Beziehung wurde die zeitliche Änderung des Elastizitätsmoduls bei einem Interzeptionsereignis berechnet. Der Einbau der Ergebnisse aus dem numerischen Modell in ein statistisches Modell erlaubte die Berechnung der interzeptierten Schneemenge auf einem Ast. Die Ergebnisse sind in derselben Grössenordnung wie die Ergebnisse der Handmessungen (2.5 bis 4.5 kg Schnee). Die berechnete Menge an interzeptierten Schnee beträgt maximal 4.7 kg auf einem Ast mit einer Länge von 230 cm.

Besonders während Frühjahrsereignissen tropft ein grosser Anteil der interzeptierten Schneemenge als Schmelzwasser auf den Waldboden. In einem Farbtracerversuch wurden schneefreie Äste vor einem Schneefall gefärbt. Der schmelzende Schnee auf dem Ast löste den getrockneten Farbstoff und gefärbtes Schmelzwasser fiel als Tropfen in die darunterliegende Schneedecke. Die induzierten Schmelzwasserkanäle wurden sowohl bei Beobachtungen im Feld als auch mit Hilfe von Photos analysiert. Die Untersuchungen zeigen, dass das Schmelzwasser in präferentiellen Fliesswegen durch die isotherme Schneedecke geflossen ist und dass das Wasser in der Schneedecke nicht über die Projektion des Kronenrandes hinaus geflossen ist. Am Standort mit der geringeren Schneehöhe entwickelte sich eine basale Eisschicht, an der nördlich exponierten Fläche jedoch nicht. Das Schmelzwasser floss auf dieser Schicht teilweise lateral ab, allerdings nur bis zum Kronenrand. Zusammen mit den Beobachtungen in der Baumkrone ergeben diese Experimente, dass das Schmelzwasser aus der Krone direkt durch die Schneedecke in den Boden fliesst.

# Summary

This work was conducted in the years 1992-1996 within the project “Water regimes in subalpine forests: snow interception, meltwater and surface discharge” (Stadler et al., 1997). The project was supported by the Swiss National Science Foundation within the frame of the program 31 “Climate changes and natural disasters”. The aim of this project was the investigation of the phase change and transport processes between tree, snowpack and soil in a subalpine forest in winter. In this thesis the processes within the tree crown and the interaction with the snowpack are investigated.

In the first part the pertinent literature is reviewed, and the physical processes in the tree crown are described. The first investigations on snow interception described the difference of snow accumulation under and outside of a tree crown. The physical processes were described in a qualitative manner. Later on the intercepted mass was measured with different methods. A common method was and is weighing a cut tree and therefore directly measuring the intercepted mass. Most of these studies were conducted in the continental, dry climate of Northern America, where up to 30% of snow precipitation is lost for discharge in summer due to sublimation and evaporation. Experiments in the 90’s contributed mainly to the understanding of the physical processes.

The second part presents a method for observing and measuring the intercepted mass. At two sites in the Swiss Alps a spruce crown was continuously observed by a video camera during the winter. The image analysis allowed to monitor variations of loading and unloading of the crown. Image analysis was also used to quantify the deflection of the branches under snow load by extracting the positions of balls which were attached to the branches. Analysis of the position of the balls yielded a time series of the branch movement which is an expression of the intercepted snow mass.

However automated analysis of images recorded under natural, heterogeneous light conditions posed problems. The main problem are low contrasts between the balls and the background during the day which make automated analysis impossible. Automated analysis was only possible with images

recorded at night. In these images contrast between balls and the nearly black background is sufficient. Hence, video observation proved to be a valuable tool in continuous observation of dynamic processes over a long time sequence.

In the third chapter the observations made at the two sites, Davos and Alptal, were compared to each other as well as to the meteorological conditions of the long term yearly and monthly average. The measurements show that there is no unique relation between temperature, precipitation and the number of interception events. An interception event was in this context defined as a time period between first snow accumulation in the crown and the time when the tree was bare of snow again. During November through February the lower mean air temperature explain the longer duration of snow cover in the tree crown compared to Alptal where event duration was shorter. In spring the relation between temporal snow cover and mean air temperature indicates that air temperature alone does not allow the prediction of the duration of snow retention in the canopy relative to the duration of the winter period. Lower global radiation caused a longer, mean temporal snow cover of the crown compared to that at Davos. In spring global radiation played an important role at both sites.

Statistical modeling of the interplay of meteorological factors and interception event duration is a difficult task. Predicting the event duration by using binary tree regression as an alternative to multiple regression shows that event duration could only be predicted for events shorter than three days. Longer events are predicted with insufficient precision because variability of the meteorological factors increases and the characteristics of the events change with increasing event duration.

The branch motion which was measured by analyzing the video images was the basis for the estimation of intercepted mass on branches. A north and south exposed branch of the Davos tree were loaded with weights and the deflection was measured. Deflection of the branch was thus calibrated. The results of these calibrations were used as input into a Finite Element Model by which Young's modulus of the branches under certain temperature conditions was calculated. Using these simulations a function for the relation of branch temperature and Young modulus was obtained. This relation could then be used to calculate the temporal variation of Young's modulus during an interception event. Using the results of the numerical model in the statistical model facilitated the calculation of the intercepted mass on a branch. The results are in the same magnitude as those obtained by hand (2.5 to 4.5 kg snow). We calculated a maximum of intercepted snow mass of 4.7 kg on a single 230 cm long branch.

Especially during spring events a large amount of intercepted snow drips as meltwater to the ground. In a dye tracer experiment we stained the snowfree branches before a snowfall. Melting snow on branches dissolved the tracer and the colored meltwater drops fell into the snowpack beneath. The induced meltwater channels were analyzed by field observation and photography indicating that the meltwater percolated along preferential flow paths through the isothermal snowpack. All meltwater seeped through the snowpack within the projected area and no water ran off downslope beyond the crown edge. At the base of the southern exposed shallower snowpack a basal ice layer developed whereas at the northern slope no basal ice layer at the base of the snowpack could be detected. On the basal ice layer some lateral flow occurred extending only as far as the crown edge. Together with the observations in the tree crown the experiments suggested that meltwater stemming from the canopy flows directly through the snowpack into the forest soil.