

DISS. ETH NO. 14835

INVESTIGATION OF WATER DRAINAGE  
THROUGH AN ALPINE GLACIER BY  
TRACER EXPERIMENTS AND NUMERICAL MODELING

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

THOMAS SCHULER

Dipl. Hydr. Universität Freiburg im Breisgau

born 19. March 1971

in Bühl/ Baden (Germany)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H.-E. Minor, examiner

Dr. U. H. Fischer, co-examiner

Dr. G. H. Gudmundsson, co-examiner

Dr. L. N. Braun, co-examiner

2002

# Abstract

In this thesis, the water flow through and from Unteraargletscher, an alpine glacier in the Bernese Alps, Switzerland, is investigated with particular emphasis on the internal plumbing and its behavior in time.

To quantify water input to the glacial hydrological system during the ablation season 1999, a distributed temperature index melt model including potential clear-sky solar radiation was applied to Unteraargletscher. Model parameters were determined by calibrating calculated melt with ablation measurements. Discharge was measured in the proglacial stream for 18 days until the station was destroyed by an outburst flood. Comparison of modeled melt and measured discharge reveals an imbalance which suggests that water was stored in or beneath the glacier during this period. The culminating outburst flood presumably released this en- or subglacially stored water and may be related to a change in the configuration of the glacial drainage system as inferred from measurements of subglacial water pressure.

The morphology of the drainage system and its diurnal variability were investigated by conducting series of tracer tests over a number of discharge cycles during the ablation season 2000. Dye injections into a moulin were repeated at intervals of a few hours and were accompanied by simultaneous measurements of discharge of supraglacial meltwater draining into the moulin and bulk runoff in the proglacial stream. Records of dye concentration were analyzed using an appropriate transport model. Results of this analysis reveal a large diurnal variability in terms of transit velocity and dispersion coefficients. Furthermore, the obtained velocity-discharge and velocity-dispersion relationships display pronounced hystereses, thereby inhibiting the use of conventional evaluation techniques.

A time-dependent and physically-based model of subglacial water flow is used to investigate the observed variations of transit velocity. It is found that the ability of a Röthlisberger-channel to adjust its size to the prevailing hydraulic conditions contributes to hysteresis of the velocity-discharge relationship. Additionally, the model results further suggest that such hysteresis can be caused also by retardation of water due to inflow modulation at the junction of a tributary moulin and a main conduit.

Further, we studied the relation between conduit cross-section and tracer dispersion with numerical tracer experiments. The velocity field for steady flow through a given conduit geometry is calculated using a commercial flow solver. Tracer transport is represented by a scalar volume which is advected by the velocity field. Experiments were conducted for several scenarios by varying flow velocity and conduit geometry. Results show that a functional dependence of dispersion on the hydraulic radius of the conduit exists but it is weak. Further, it is found that the dispersion coefficient is strongly affected by changes in roughness. This suggests, that a dynamical conduit geometry can account for the observed velocity-dispersion hysteresis, especially, if the evolution of the conduit involves also roughness changes. Additionally, the effect

of inflow modulation on tracer dispersion is found to provide an equivalent explanation of the observed hysteretic behavior.

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Abhandlung wird der Wassertransport durch und der Abfluss vom Unteraargletscher in den Berner Alpen, Schweiz, untersucht. Dabei wird besondere Aufmerksamkeit dem internen Abflusssystem und seiner zeitlichen Entwicklung gewidmet.

Um den Wasserinput in das Gletscherabflusssystem während der Ablationsperiode 1999 zu quantifizieren, wurde ein flächenverteiltes Schmelzmodell auf den Unteraargletscher angewendet. Dieses Modell basiert auf einem Temperatur-Index Verfahren, das auch die potentielle Solarstrahlung mit einschliesst. Die Parameter des Modells wurden mit einer Kalibrierung der berechneten Schmelze anhand von Ablationsmessungen bestimmt. Der Wasserabfluss im Gletscherbach wurde über eine Periode von 18 Tagen aufgezeichnet, bis die Messstation von einer Flutwelle zerstört wurde. Die Bilanz von berechneter Schmelze und gemessenem Abfluss ist unausgeglichen, was auf eine Wasserspeicherung während dieser Periode in oder unter dem Gletscher hinweist. Dieses intra- oder subglazial gespeicherte Wasser wurde vermutlich in einem anschliessenden Wasserausbruch, der die Flutwelle im Gletscherbach erzeugte, wieder freigesetzt. Dieser Ausbruch wird mit einer Neukonfigurierung des Gletscherabflusssystems, die von Messungen des subglazialen Wasserdrucks abgeleitet wurde, in Verbindung gebracht.

Die Morphologie des Abflusssystems und dessen tageszeitliche Variabilität wurde mit Serien von Tracerversuchen untersucht, die über einige Abflusstageszyklen während der Ablationsperiode 2000 durchgeführt wurden. Dabei wurden die Tracereingaben in eine Gletschermühle in Intervallen von wenigen Stunden wiederholt. Gleichzeitig wurde der Abfluss im supraglazialen Bach, der in die Mühle entwässert, ebenso wie der Gesamtabfluss im proglazialen Fluss gemessen. Die erhaltenen Datenreihen der Tracerkonzentrationen wurden mit einem geeigneten Transportmodell ausgewertet. Die Resultate dieser Analyse weisen einen ausgeprägten Tagesgang der Abstandsgeschwindigkeiten und der Dispersionskoeffizienten auf. Die daraus abgeleiteten Geschwindigkeits-Abfluss- und Geschwindigkeits-Dispersions-Beziehungen zeigen jeweils eine deutliche Hysterese. Dieser Umstand verhinderte eine weitere Auswertung mittels konventioneller Verfahren.

Ein zeitabhängiges und physikalisch basiertes Modell subglazialer Abflussprozesse wurde eingesetzt, um die beobachteten Variationen der Abstandsgeschwindigkeiten zu untersuchen. Es ergab sich, dass die Eigenschaft eines Röthlisberger-Kanals, seine Grösse an die vorherrschenden hydraulischen Bedingungen anzupassen, zur Hysterese der Geschwindigkeits-Abfluss-Beziehung beiträgt. Zudem geben die Modellergebnisse zu erkennen, dass eine solche Hysterese ebenfalls durch eine Regulierung des Zuflusses aus einer Gletschermühle in einen Hauptkanal verursacht werden kann.

Des Weiteren wurde die Beziehung zwischen dem Kanalquerschnitt und der Tracer-Dispersion mit numerischen Tracerexperimenten untersucht. Dabei wurde zuerst mit einem kommerziellen Programm das stationäre Geschwindigkeitsfeld durch eine gegebene Kanalgeometrie berechnet. Der Tracertransport wurde daraufhin simuliert mittels einem Skalarvolumen, das mit

diesem Geschwindigkeitsfeld advektiert wird. Experimente für mehrere Szenarien wurden durchgeführt, indem die Fließgeschwindigkeit oder die Kanalgeometrie geändert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass zwar ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Dispersion und dem hydraulischen Radius des Kanals besteht, dieser aber schwach ist. Ausserdem stellte sich heraus, dass der Dispersionskoeffizient stark von Rauigkeitsänderungen beeinflusst wird. Diese Ergebnisse deuten an, dass eine dynamische Kanalgeometrie für die beobachtete Geschwindigkeits-Dispersions Hysterese verantwortlich gemacht werden kann, besonders, wenn die Entwicklung des Kanals mit einer Rauigkeitsänderung einhergeht. Zudem wurde gezeigt, dass eine Zufluss-Regulierung einen ähnlichen Effekt auf die Tracerdispersion hat und somit eine äquivalente Erklärungsmöglichkeit für die beobachtete Hysterese bietet.