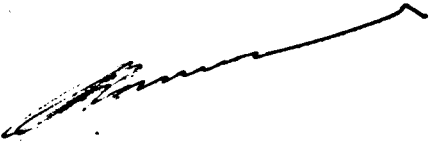


**CHANGES OF ALPINE CLIMATE AND GLACIER WATER
RESOURCES**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
JIYANG CHEN
B. Sci. (Northwest University, China)
M. Sci. (Institute of Glaciology and Geocryology,
Chinese Academy of Sciences)
born August 24th 1957
citizen of China



accepted on the recommendation of
Prof. Dr. A. Ohmura, examiner
Prof. Dr. H. Lang, co-examiner
PD. Dr. W. Haerberli, co-examiner

Abstract

Changes of Alpine climate and glacier water resources

The aim of the present work is to understand the changes in Alpine glacier water resources during the period of the 1870s-1970s and the consequent influences on the hydrological characteristics of glacierized basins. In relation to this topic, the changes in Alpine climate and glacier mass balance are also examined.

The change in Alpine glacier water resources is shown by analyzing the variations of ice-covered area and mass balance whereby the ice-covered area at different stages is evaluated on map comparisons. The mass balance is reconstructed for eight Alpine glaciers with data of the summer half-year temperature and annual precipitation. The influences resulting from glacier changes on hydrological characteristics of glacierized basins are analyzed in relation to the ratio of basin ice cover (the ice-covered area to the basin area). Furthermore, a method is proposed to simulate the changes in annual runoff due to the changes in precipitation, temperature and the basin ice cover. The changes in mass balance, geometry of glaciers and water balance components are basically due to the changes in climate which are deduced from the available measurements at 25 meteorological stations in and near the Alps. The main results are briefly described in the following.

During the past 100 years, the Alpine glaciers have become significantly smaller. The relative retreat of long (> 5 km) glaciers for the period of the 1870s-1970s is less than 10%, while that of short glaciers is larger than 20%. The total ice-covered area in the Alps is estimated to be about $4368 \pm 54 \text{ km}^2$ in the 1870s and $2541 \pm 33 \text{ km}^2$ in the 1930s. It was 2909 km^2 in the 1970s, as is determined through the glacier inventory. The ice-covered area in the Alps decreased thus by about 33% for the period of the 1870s-1970s. Two periods with intense area-loss were the late nineteenth century and in the 1940s. Data of 26 glaciers show that thinning occurred almost continuously from the 1860s to the middle of the 1960s and that most intense decrease in thickness was the first half of the twentieth century. Weak thickening can be observed after the middle of the 1960s. The volume of the Alpine glaciers decreased by about 104 km^3 w.e. (water equivalent) from the 1870s to the present, as is shown by the estimated mass balance data.

The area-weighted mean of the reconstructed annual mass balance of the Alpine glaciers is evaluated to be -287 mm w.e./a for the period of the 1864/1865-1987/1988. The statistical characteristics of annual mass balance of Alpine glaciers are calculated from the measured data. The mean standard deviation of annual mass balance is 715 mm w.e. . The mean annual glaciological mass turnover, defined as the mean of specific mass

balance in the accumulation area and that in the ablation area, is 520 mm w.e./a. The mean annual hydrological mass turnover, which is the mean of annual accumulation and ablation, is 2200-2400 mm w.e./a for the glaciers in the Rhone and 1600 mm w.e./a for the glaciers in the Rofenache in the Oetztal Alps. Typical values of the rate of annual mass balance change with the shift of the equilibrium line altitude are found to be -3.0 to -4.5 mm w.e./m. It is shown also that the relative contribution of temperature variability to the change in mass balance is usually higher than that of precipitation variability.

It is found that for the period from the 1850s to the 1980s, the annual mean temperature has risen by about 0.8 °C. Consistent increase in annual temperature started from the 1890s and reached a climax in the late 1940s. A weak cooling occurred after the 1940s. In comparison with the changes in the mean annual temperature in the middle latitude zone (30 - 60° N), the coldest or the warmest periods in the Alps are delayed by 5-10a. For the period of the 1860s-1980s, the mean annual precipitation increased by about 180 mm. The most unfavourable decade for the Alpine glaciers is the very warm and dry 1940s.

The hydrological characteristics of partly glacierized Alpine basins, which are analyzed in relation to the ratio of basin ice cover, include the following aspects:

- the delay of the maximum monthly runoff fraction,
- the increase of the summer half-year runoff fraction,
- the role of a moderate ice cover which leads to a minimum variation in runoff,
- the long-term change in the mean runoff, and
- the correlation between runoff, temperature and precipitation. The summer half-year temperature is an important variable influencing runoff from heavily glacierized basins. As the ice-covered area decreases, the correlations between runoff and precipitation become more significant.

Besides the annual precipitation and summer half-year temperature, the change in the ratio of basin ice cover to the total basin area is the most important variable which results in the change in the runoff of heavily glacierized Alpine basins. It has been demonstrated that in the basin of the Massa at Blatten near Naters for the period of the 1922/1929-1968/1972, the changes in the mean annual runoff due to the change in annual precipitation (-52 mm) and summer half-year temperature (+0.14 °C) are -17 mm and +49 mm, respectively. In contrast, the change in the ratio of basin ice cover (-0.050) has resulted in a change of -231 mm in the mean annual runoff. Likewise, in the basin of the Rhone at Porte du Scex for the period of the 1910/1919-1968/1972, the changes in the mean annual runoff due to the changes in annual precipitation (-36 mm), summer half-year temperature (+0.47 °C) and the ratio of basin ice cover (-0.024) are -39 mm, +37 mm and -69 mm, respectively.

Zusammenfassung

Veränderungen des Klimas der Alpen und der in den Gletschern gespeicherten Wasserreserven

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, die Veränderungen der in den alpinen Gletschern gespeicherten Wasserreserven für eine 100-jährige Periode (von den 70er Jahren des letzten bis in die 70er Jahre dieses Jahrhunderts) und die sich daraus ergebenden Einflüsse auf die hydrologischen Verhältnisse vergletschelter Einzugsgebiete abzuschätzen. In diesem Zusammenhang werden die Veränderungen des Klimas und der Massenbilanz der Gletscher in den Alpen analysiert.

Die Veränderungen der in den Gletschern gespeicherten Wasserreserven werden durch die Untersuchung der Variation der eisbedeckten Fläche und des Massenhaushaltes aufgezeigt. Die Variation der eisbedeckten Fläche wurde aufgrund von Vergleichen verschiedener Karten mit unterschiedlichen Gletscherständen erhoben. Die Gletschermassenbilanz ist mit der Sommertemperatur und dem Jahresniederschlag für acht alpine Gletscher rekonstruiert worden. Die von der Gletscherveränderung verursachten Einflüsse auf die hydrologischen Verhältnisse vergletschelter Einzugsgebiete werden in Bezug auf die Vergletscherung auf der Grundlage monatlicher Mittelwerte untersucht. Ausserdem wird ein Modell vorgeschlagen, um die jährliche Abflussänderung, die von den Veränderungen der Temperatur, des Niederschlags und der Vergletscherung verursacht ist, zu simulieren. Die Veränderungen der Gletschergeometrie, der Gletschermassenbilanzen sowie der Wasserbilanzkomponenten sind grundsätzlich mit den Klimaveränderungen verbunden, welche anhand von mehr als 25 Stationen in den Alpen und in deren Nähe aufgezeigt werden. Die Hauptresultate sind im folgenden kurz beschrieben.

In den vergangenen 100 Jahren sind die alpinen Gletscher bedeutend kleiner geworden. Die relativen Längenabnahmen der langen Gletscher (> 5 km) sind für die erwähnte Periode kleiner als 10%, diejenigen der kurzen Gletscher grösser als 20%. Die gesamte eisbedeckte Fläche der Alpen ist auf 4368 ± 54 km² in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts und auf 3541 ± 33 km² in den 30er Jahren dieses Jahrhunderts geschätzt worden. In den 70er Jahren dieses Jahrhunderts beträgt die Fläche nur noch 2909 km², eine Fläche, welche aus den Daten des Gletscherinventars der Alpen bestimmt worden ist. Die eisbedeckte Fläche in den Alpen hat sich so, in der erwähnten 100-jährigen Periode, auf etwa 66% verkleinert. Es wird auf Grund der Daten von 26 alpinen Gletschern gezeigt, dass die Abnahme der Eisdicke fast ununterbrochen von den 60er Jahren des letzten bis in die Mitte der 60er Jahre dieses Jahrhunderts andauerte. Die

stärkste Abnahme wurde in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts beobachtet. Eine leichte Zunahme der mittleren Gletscherdicke lässt sich seit Mitte der 60er Jahren beobachten. Die gesamte Volumenabnahme der Alpengletscher betrug etwa 104 km^3 WE (Wasseräquivalent) in der Periode von den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts bis jetzt. Dieser Wert basiert auf den geschätzten Massenbilanzdaten.

Die Flächengewichtete mittlere rekonstruierte Massenbilanz für die alpinen Gletscher wird auf -287 mm WE pro Jahr für die Periode von 1864/1865 bis 1987/1988 geschätzt. Die statistische Grössen der jährlichen Massenbilanz der alpinen Gletscher werden mittels gemessener Daten abgeleitet. Die mittlere Standardabweichung der jährlichen Massenbilanz beträgt 715 mm WE . Der mittlere jährliche glaziologische Massenumsatz, welcher als Mittel der spezifischen Massenbilanz im Akkumulationsgebiet und derjenigen im Ablationsgebiet definiert ist, beträgt etwa 520 mm WE pro Jahr. Hingegen ist der mittlere Hydrologische Massenumsatz oder das Mittel von Akkumulation und Ablation für die Gletscher im Einzugsgebiet der Rhone zwischen 2200 und 2400 mm WE und 1600 mm WE für die Gletscher im Einzugsgebiet der Rofenache in den Oetztaler Alpen. Typische Werte für den Gradienten der Gletschermassenbilanz über die vertikale Verschiebung der Höhe der Gleichgewichtslinie betragen etwa -3.0 bis -4.5 mm WE/m . Es wird auch gezeigt, dass der relative Beitrag der Temperaturänderung für die Massenbilanz grösser ist als derjenige der Niederschlagsänderung.

Die Beobachtungen für die Periode von den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts bis 1988 zeigen, dass die mittlere Jahrestemperatur um $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ zugenommen hat. Eine merkliche Zunahme der mittleren Jahrestemperatur lässt sich seit etwa 1890 beobachten. Sie erreichte ihren Höhenpunkt in den späten 40er Jahren. Nach den 40er Jahren setzte eine leichte Abkühlung ein. Im Vergleich mit den Schwankungen der mittleren Jahrestemperatur in der Breitenzone $30\text{-}60^\circ \text{ N}$ hat die kälteste oder wärmste Periode in den Alpen eine Zeitverschiebung von 5-10 Jahre. Für die Periode von den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts bis in die 80er Jahre dieses Jahrhunderts, hat der Jahresniederschlag in den Alpen um etwa 180 mm zugenommen. Das ungünstigste klimatische Jahrzehnt für die Alpengletscher sind die sehr warmen und trockenen 40er Jahre dieses Jahrhunderts.

Die hydrologische Charakteristik teilweiser vergletscherter Einzugsgebiete, analysiert in Bezug auf den Vergletscherungsgrad, beinhaltet folgende Aspekte:

- die Verzögerung des maximalen monatlichen Abflussanteils,
- die Zunahme des Abflussanteils im hydrologischen Sommer,
- eine optimale Vergletscherung, die dadurch eine minimale Abflussvariation verursacht,
- die zeitliche Veränderung des mittleren Abflusses, und
- die Korrelation zwischen den Abfluss, der Temperatur und dem Niederschlag. Die

Sommertemperatur ist eine wichtige Variable, die den Abfluss aus stark vergletscherten Einzugsgebieten beeinflusst. Bei der Abnahme der Vergletscherung wird die Korrelation zwischen dem Abfluss und dem Niederschlag signifikanter.

Es wird gezeigt, dass die Vergletscherung eine der wichtigsten Variablen neben der Sommertemperatur und dem Jahresniederschlag ist, welche den Jahresabfluss eines stark vergletscherten Alpeneinzugsgebietes beeinflusst. Im Einzugsgebiet der Massa in Blatten bei Naters für die Periode von 1922/1929 bis 1968/1972, beträgt die Veränderung des Jahresabflusses, welche von der Veränderung des Jahresniederschlages (-52 mm) und der Sommertemperatur (+0.14 °C) verursacht sind, -17 mm beziehungsweise +49 mm. Hingegen ergibt die Veränderung der Vergletscherung (-0.050) einen Beitrag von -231 mm für die Veränderung des Jahresabflusses. Ebenfalls gute Übereinstimmung gibt es im Einzugsgebiet der Rhone in Porte du Scex für die Periode 1910/1919 bis 1968/1972. Die Änderung des Jahresniederschlags (-36 mm), der Sommertemperatur (+0.47 °C) und der Vergletscherung (-0.024) verursachte eine Veränderung des Jahresabflusses von -39 mm, +37 mm beziehungsweise -69 mm.