

Summary

Two Alpine glaciers over the last two centuries: a scientific view based on pictorial sources

Starting with the idea of an ice age hypothesis, Louis Agassiz initiated a research program on the Lower Aare Glacier, Switzerland, which marked the beginning of modern experimental glacier research. The results of this new scientific view were published in 1847, and included the first scientific maps of a glacier on a large scale. The original drawing of the panorama by Jacques Bourkhardt, which was missing for a long time and has recently been rediscovered, shows the extension of the Lower Aare Glacier in the 1840s and the extreme conditions under which the scientists and artists had been living and working. Since 1849, the material of the Lower Aare Glacier was updated with the first photographs of Swiss Alpine glaciers. Therefore, this period of the beginning of experimental glaciology on the one hand coincides with a change of glacier representation techniques from drawings/paintings and maps to photographs within 15 years. On the other hand, it is also the time when a majority of (Alpine) glaciers show their last maximum extent.

The Lower Grindelwald Glacier, Switzerland, plays a similar important role to the Lower Aare Glacier for scientific glacier research. Its well-documented record of length variations back to 1535 illustrates the Little Ice Age climate changes. Newly discovered (stereo) photographs and old topographic maps of the Lower Grindelwald Glacier also show the impressive dimension of the 1855/56 maximum extent and the rapid glacier retreat since then.

In general, this glacier maximum extent in the mid-19th century and the subsequent retreat have been extensively studied for both, the Lower Grindelwald and the Lower Aare Glacier. The quality of its documentary data allows, probably better than elsewhere in the world, the development of accurate digital elevation models (DEMs). Thus, volume and area changes of these two glaciers since their mid-19th century maximum extent were determined by DEM comparisons.

It can be shown that the Lower Grindelwald Glacier has lost 5.5 km² of area and 1.56 km³ of ice and the Lower Aare Glacier 4.3 km² of area and 1.59 km³ of ice since their last maximum extent. However, for the Lower Grindelwald Glacier the spatial distribution of thickness changes could possibly signify extraordinary dynamical behavior since the mid-19th century.

The application of a nonlinear Backpropagation Neural Network to study the mass balance of Great Aletsch Glacier, Switzerland

Glacier mass changes are considered to represent key variables related to climate variability. We have reconstructed a proxy for annual mass balance changes in the Great Aletsch Glacier, Swiss Alps, back

to AD 1500 using a nonlinear Backpropagation Neural Network (BPN). The model skill of the BPN performs better than reconstructions using conventional stepwise multiple linear regression.

The BPN, driven by monthly instrumental series of local temperature and precipitation, provides a proxy for 20th-century mass balance. The long-term mass balance reconstruction back to AD 1500 is based on a multiproxy approach of seasonally resolved temperature and precipitation reconstructions (mean over a specific area) as input variables. The relation between the driving factors (temperature, precipitation) used and the reconstructed mass balance series is discussed. Mass changes in the Great Aletsch Glacier are shown to be mainly influenced by summer (JJA) temperatures, but winter (DJF) precipitation also seems to contribute.

Furthermore, we found a significant nonlinear part within the climate-mass balance relation of Great Aletsch Glacier.

Sensitivity of European Glaciers to Precipitation and Temperature – Two case studies

A nonlinear Backpropagation Neural Network (BPN) has been trained with high-resolution multiproxy reconstructions of temperature and precipitation (input data) and glacier length variations of the Alpine Lower Grindelwald Glacier, Switzerland (output data).

The model was then forced with two regional climate scenarios of temperature and precipitation derived from a probabilistic approach: The first scenario ("no change") assumes no changes in temperature and precipitation for the 2000–2050 period compared to the 1970–2000 mean. In the second scenario ("combined forcing") linear warming rates of 0.036–0.054 °C per year and changing precipitation rates between –17% and +8% compared to the 1970–2000 mean have been used for the 2000–2050 period. In the first case the Lower Grindelwald Glacier shows a continuous retreat until the 2020s when it reaches an equilibrium followed by a minor advance. For the second scenario a strong and continuous retreat of approximately –30 meters per year since the 1990s has been modelled.

By processing the used climate parameters with a sensitivity analysis based on neural networks we investigate the relative importance of different climate configurations for the Lower Grindelwald Glacier during four well-documented historical advance (1590–1610, 1690–1720, 1760–1780, 1810–1820) and retreat periods (1640–1665, 1780–1810, 1860–1880, 1945–1970). It is shown that different combinations of seasonal temperature and precipitation have led to glacier variations.

In a similar manner, we establish the significance of precipitation and temperature for the well-known early 18th century advance and the 20th century retreat of Nigardsbreen, a glacier in western Norway. We show that the maritime Nigardsbreen Glacier is more influenced by winter and/or spring precipitation than the Lower Grindelwald Glacier.

Zusammenfassung

Ausgangspunkt dieser Dissertation ist die in den Schweizer Alpen vorliegende einzigartige Verfügbarkeit qualitativ hochstehender Daten vergangener Gletscherveränderungen. Mit Hilfe dieser Daten lässt sich sowohl die Gletschergeschichte der letzten Jahrhunderte wie auch die Klimavariabilität innerhalb des mitteleuropäischen Raumes analysieren und quantifizieren – mit einer Präzision, welche sonst wohl in keiner anderen Gegend der Erde erreicht werden kann. Zusammen mit neueren hochauflösenden Temperatur- und Niederschlagsrekonstruktionen, welche auf verschiedenen, unabhängigen Proxy-Daten beruhen, lässt sich somit der hochkomplexe Zusammenhang zwischen Klima und Gletscher wirksamer studieren, als dies bisher der Fall war.

Die Arbeit versucht, beiden Aspekten – der Gletschergeschichte und der Analyse des Systems Klima-Gletscher – gerecht zu werden, indem die folgenden zwei Leitfragen aufgeworfen werden:

1. Wie wurden exemplarisch ausgewählte Gletscher zu Beginn/Mitte des 19. Jahrhunderts von Naturforschern und Künstlern wahrgenommen und dargestellt? Wie haben sich diese Gletscher seither verändert?
2. Inwiefern lassen sich nichtlineare neuronale Netzwerke in der Glaziologie als Alternative zu konventionellen linearen statistischen Ansätzen verwenden?

Bildquellen als Hilfsmittel zur Analyse von Gletscherperzeption und Gletscherfluktuationen

Angespornt durch die Idee einer "Eiszeittheorie" und den dadurch ausgelösten kontroversen Diskussionen initiierte der Schweizer Naturforscher Louis Agassiz (1807–1873) zu Beginn der 1840er-Jahre ein interdisziplinäres Forschungsprogramm auf dem Unteraargletscher. Diese Forschungsarbeiten können mitunter als Beginn der modernen experimentellen Glaziologie betrachtet werden. Die verschiedenen Resultate dieser neuen wissenschaftlichen Betrachtungsweise von Gletschern wurden 1847 publiziert, darunter auch die ersten Gletscherkarten von wissenschaftlichem Wert. Zusätzlich zu diesen Ergebnissen sind weitere Bildquellen (Zeichnungen, Gemälde), v.a. aber auch ein kürzlich wieder aufgetauchtes herausragendes Panorama, aus derselben Zeit bekannt. Ab 1849 kamen zudem fotografische Darstellungen von Gletschern hinzu.

Damit sind wir im Fall des Unteraargletschers in der einzigartigen Situation, dass die Entwicklung eines neuen wissenschaftlichen Forschungsgebietes, nämlich die Glaziologie, mit einem Wandel der verwendeten Aufnahmetechniken von Zeichnungen/Gemälden zu Fotografien und topografischen Karten einhergeht. Diese Entwicklung, welche sich innerhalb von lediglich 15 Jahren vollzog, fand zudem unmittelbar vor den letzten alpinen Gletscherhochständen der "Kleinen Eiszeit" statt. Wir besitzen somit aus der Zeit der genannten Maximalstände eine stattliche Zahl an Bildquellen, welche

ihrerseits zu qualitativen und quantitativen Aussagen über die damalige Gletscherausdehnung herangezogen werden können.

Der Untere Grindelwaldgletscher spielt in der Geschichte der Glaziologie eine ähnlich wegweisende Rolle wie der Unteraargletscher. Die grosse Menge an qualitativ hochstehenden Bildquellen der vergangenen vier bis fünf Jahrhunderte erlaubt es, eine detailreiche Kurve der Gletscherlängenveränderungen bis 1535 zurück zu erstellen. Verschiedene Bildquellen (v.a. Fotografien) zeigen auch hier ein Bild des imposanten Gletscherhochstandes um 1855/56 und des nachfolgenden rasanten Gletscherrückzuges.

Schliesslich können aus diesen Quellen – wahrscheinlich genauer als sonstwo – hochauflösende digitale Höhenmodelle erstellt werden, die Vergleiche zwischen früheren Gletscherständen möglich machen. Demnach hat der Untere Grindelwaldgletscher seit seinem letzten Hochstand 5.5 km² an Fläche und 1.56 km³ an Volumen eingebüsst. Eine Analyse der räumlichen Dickenveränderungen für die gleiche Zeitperiode könnte zudem Hinweise auf ein aussergewöhnliches gletscherdynamisches Verhalten des Gletschers liefern. Der Unteraargletscher verlor seit seinem letzten Hochstand 4.3 km² an Fläche und 1.59 km³ an Volumen.

Neuronale Netzwerke in der Glaziologie

Im Gegensatz zum Unteren Grindelwaldgletscher und Unteraargletscher, welche detaillierte Kurven von Längenveränderungen, aber kaum Massenbilanzmessungen aufweisen, besitzt der Grosse Aletschgletscher eine bis 1920 zurückreichende, auf hydrologischer Basis erstellte, Zeitreihe von jährlichen Massenbilanzen. Da die Massenbilanz von Gletschern als direktes, ungefiltertes Klimasignal interpretiert werden kann, kommt ihr in der Diskussion um Klimavariabilität und Klimaerwärmung eine entscheidende Rolle zu.

Mit einer, in der Glaziologie vermutlich zum ersten Mal angewandten, neuen Methodik, basierend auf neuronalen Netzwerken, wird eine jährlich aufgelöste Massenbilanzreihe des Grossen Aletschgletschers für die vergangenen fünf Jahrhunderte rekonstruiert. Dabei werden neue, hochauflösende, gegitterte Klimadaten (als unabhängige Grössen) mit der qualitativ hochstehenden Massenbilanzreihe des Grossen Aletschgletschers (als abhängige Grösse) verknüpft. Es zeigt sich, dass die Massenbilanz des Grossen Aletschgletschers vor allem durch die Sommertemperatur (Juni–August) bestimmt ist. Der Winterniederschlag (Dezember–Februar) spielt eine zeitlich variierende, aber tendenziell untergeordnete Rolle.

Auch im Bereich der Gletscherlängenvariationen werden neuronale Netzwerke eingesetzt. Da es sich aber bei der Gletscherlänge um ein indirektes, gefiltertes Klimasignal handelt, ist dessen Modellierung viel schwieriger. Nichtsdestotrotz werden als Modelleingänge wiederum saisonal aufgelöste, gegitterte Temperatur- und Niederschlagsrekonstruktionen verwendet. Die Zeitreihe der Längenveränderungen des Unteren Grindelwaldgletschers dient in diesem Fall als Zielgrösse.

In einer ersten Fallstudie werden die zukünftigen Gletscherlängenveränderungen des Unteren Grindelwaldgletschers simuliert, indem zwei regionale Klimaszenarien für den Alpenraum für die Periode 2000–50 angewandt werden. Das erstere, zurückhaltende Klimaszenario geht von einem kontinuierlichen Gletscherrückgang bis in die 2020er-Jahre aus, bevor der Gletscher ein neues Gleichgewicht einnimmt und anschliessend wieder leicht vorstossen könnte. Das zweite, wohl realistischere Klimaszenario mit erhöhten Temperaturen und wechselnden saisonalen Niederschlagsentwicklungen sagt einen kontinuierlichen und rasanten Gletscherrückgang voraus.

Eine zweite Fallstudie beinhaltet eine Sensitivitätsanalyse, wiederum basierend auf neuronalen Net-

zwerken, welche die wechselnden klimatischen Einflussfaktoren auf verschiedene Vorstösse und Rückzüge des Unteren Grindelwaldgletschers analysieren soll. Es kann gezeigt werden, dass verschiedene Kombinationen von saisonaler Temperatur und saisonalem Niederschlag einen Gletschervorstoss bzw. -rückzug auslösen können. In einem unabhängigen Vergleich mit einem norwegischen Gletscher (Nigardsbreen) konnte die Zweckmässigkeit der methodischen Annahmen bestätigt werden.

Somit können neuronale Netzwerke im Kontext des Systems Klima–Gletscher als erfolgsversprechende nichtlineare Methodik angesehen werden. Dem Vorteil der Nichtlinearität, die in neuronalen Netzwerken an sich gegeben ist, steht der Nachteil des reinen statistischen Modells gegenüber. Es muss auch festgehalten werden, dass die vorgeschlagenen Methoden nur dann Sinn machen, wenn eine aussergewöhnliche Qualität und Dichte der Klima– und Gletscherdaten vorliegt. Dann ist es auch möglich, vertiefte Einsichten in das hochkomplexe Klimasystem zu erlangen bzw. eine Methode auf ihre Stärken und Schwächen zu untersuchen. Um gar zu einer allgemeinen Theorie einer "Neuro–Glaziologie" zu gelangen, müssten aber noch weitere Gletscher in anderen Regionen der Erde (z.B. Himalaja, Neuseeland, Südamerika) untersucht werden.