

GLETSCHERARCHIV

# Bayerische Gletscher

DIGITALE AUFBEREITUNG HISTORISCHER DATEN UND EINE NEUE METHODE ZUM GEODÄTISCHEN MONITORING.



Abb. 1: VON WILFRIED HAGG  
Detail aus der Karte  
„Die Zugspitze mit  
den Umrandungen  
des Plattach- und  
Höllenthalferners“  
von Waltenberger.

Bei der Diskussion über die globale Erwärmung wird immer wieder auf die Bedeutung der Gletscher als Klimaindikatoren oder Wasserspeicher verwiesen. In diesem Zusammenhang fällt auf, dass fast immer die wenigen großen Gletscher der Alpen als Beispiele angeführt werden. Dabei reagieren kleine Gletscher viel schneller auf Klimaschwankungen und stellen zudem durch ihre zahlenmäßige

Überlegenheit einen nicht unerheblichen Teil der alpinen Eisreserven.

Die fünf bayerischen Gletscher bieten sich für Zwecke der Langzeitbeobachtung (engl. *Monitoring*) besonders an, da sie bereits seit 1889 in unregelmäßigen Abständen vermessen wurden. Allerdings wurden die Daten bisher nur teilweise ausgewertet und liegen zudem auf unterschiedlichen Medien sowie in verschiedenen Maßstäben und Koordinatensystemen vor.

Ein Hauptziel des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts „Bayerische Gletscher“, das an der Sektion Geographie der LMU München (Lehrstuhl Prof. Baume) in enger Kooperation mit der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften bearbeitet wird, ist die Digitalisierung, Homogenisierung und Veröffentlichung der bestehenden Daten in der Internet-Datenbank [www.bayerische-gletscher.de](http://www.bayerische-gletscher.de).

Der technologische Fortschritt in Geodäsie und Fernerkundung eröffnet auch beim Gletschermonitoring neue Möglichkeiten, zum Beispiel bei der automatischen Generierung von digitalen Geländemodellen aus Luftbildern. Diese können kostengünstig mit Hilfe kleiner Luftfahrzeuge gewonnen werden. Eine solche Vorgehensweise zu testen, für die spezifischen Anforderungen zu optimieren und somit ein praktisches und modernes Werkzeug zu schaffen, ist ein weiteres Ziel des Projekts, das im Folgenden vorgestellt wird.

## Zur generellen Bedeutung kleiner Gebirgsgletscher

Im Alpenraum existieren fast 5500 Gletscher mit einer Gesamtfläche von etwas über 3000 km<sup>2</sup>, woraus sich eine mittlere Fläche von 0,57 km<sup>2</sup> pro Gletscher errechnet. Davon bestreiten Gletscher mit einer Fläche von unter einem Quadratkilometer rund 90 % der Anzahl und 31 % der Fläche. Nur 22 % der Gesamtfläche entfallen auf Gletscher größer als 10 km<sup>2</sup>.

Ähnliche Verteilungen werden auch in anderen Gebirgsregionen der niederen und mittleren Breiten beobachtet, was die Bedeutung der kleinen Gletscher für den Wasserhaushalt von Gebirgen und ihren Vorländern unterstreicht.

Ungeachtet dessen findet alpine Gletscherforschung schwerpunktmäßig auf relativ großen Gletschern (z. B. Aletschgletscher, Unteraargletscher, Morteratschgletscher, Hintereisferner, Vernagtferner) statt. Auch in Deutschland wurde meist dieser Weg beschritten. Für glaziologische Forschungsprojekte wurden als vermeintlich lohnendere Untersuchungsobjekte große Gletscher im Ausland gewählt, obwohl hierzulande noch fünf Musterbeispiele kleiner Gletscher mit individuellen Existenzbedingungen vorzufinden sind. Dies sind der Höllentalferner und die beiden Schneeferner an der Zugspitze (Wettersteingebirge) sowie Watzmangletscher und Blaueis in den Berchtesgadener Alpen, die eine Gesamtfläche von ca. einem Quadratkilometer bedecken.

Neben den quantitativen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sind kleine Gletscher aber auch als Klimaindikatoren von besonderer Bedeutung, da sie außerordentlich stark und schnell auf Schwankungen des Klimas reagieren. Die Stärke der Reaktion kann mit ihrer geringen Höhenerstreckung erklärt werden. Sie liegen oft mit ihrer gesamten Fläche ober- oder unterhalb der klimatischen Schneegrenze und zeigen deshalb sehr deutliche Massengewinne oder -verluste. Die schnelle Reaktion der kleinen Gletscher beruht darauf, dass Massenumsätze auf ihnen schneller vollzogen werden als auf großen. Positive Massenhaushalte erhöhen den Eistransport; wird mehr Eis aus den hochgelegenen Firngebieten nach unten transportiert als dort abschmelzen kann, reagiert das

Gletscherende mit einem Vorstoß und umgekehrt. Der Zeitabschnitt vom Klimasignal bis zur Reaktion der Zunge heißt Reaktionszeit und kann bei großen Alpengletschern viele Jahre betragen. Dies ist ein Grund, warum benachbarte Gletscher unterschiedlicher Größe ein konträres Verhalten zeigen können, und unterstreicht die Vorteile der Beobachtung kleiner Gebirgsgletscher, die schnell und synchron auf Klimaschwankungen reagieren.

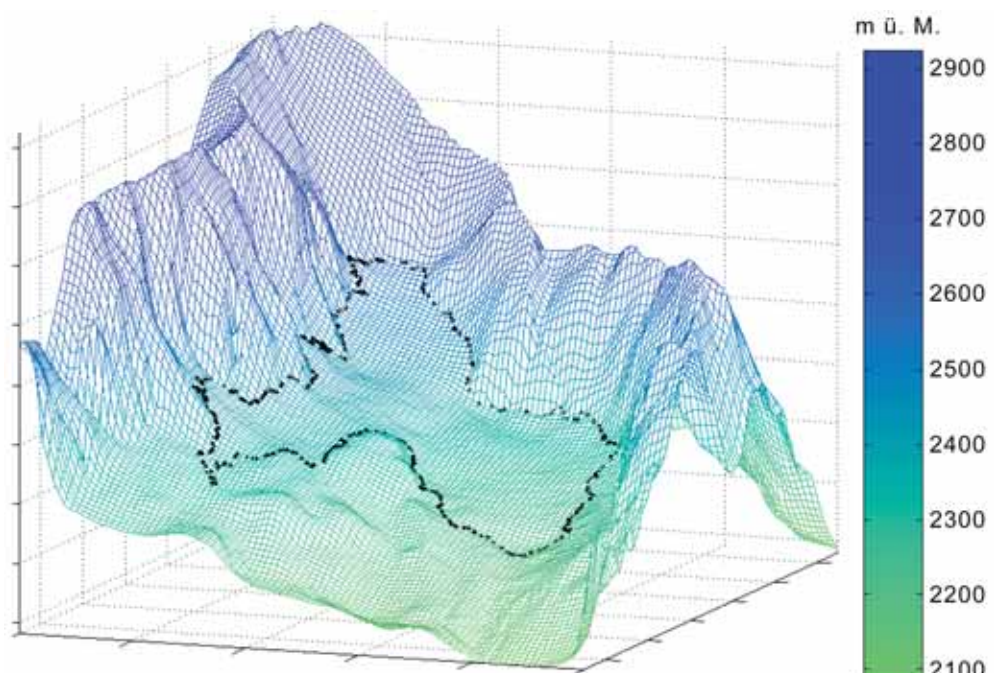
Außer für klimatologische und hydrologische Fragestellungen sind Gletscher und ihre Veränderungen auch in anderen Bereichen wie Land- und Forstwirtschaft, Ökologie oder Tourismus von großem Interesse. Im Nationalpark Berchtesgaden tragen Watzmangletscher und Blaueis zur Bereicherung des Landschaftsbilds bei, für die Verlängerung der Skisaison ist zum Beispiel die Existenz des Nördlichen Schneeferners auch von ökonomischer Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass ein öffentlich zugängliches Gletscherarchiv für unterschiedlichste Benutzergruppen von Interesse ist.

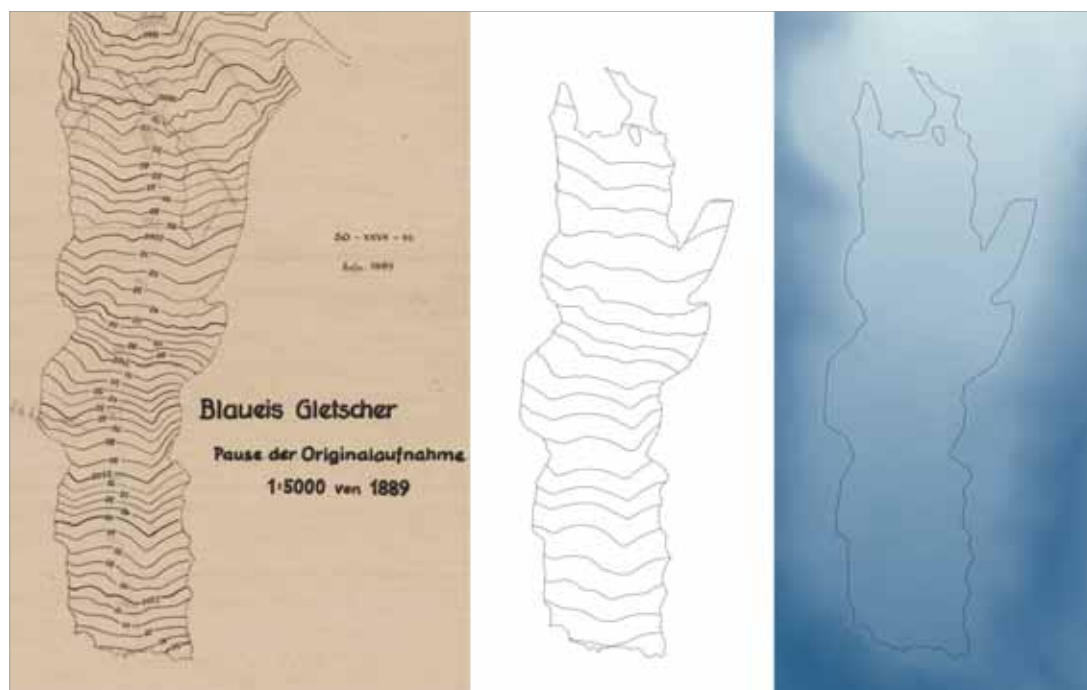
### Geschichte der bayerischen Gletschervermessung

Eine erste detailliertere Aufnahme der Zugspitze und ihrer Gletscher fand im Jahre 1820 durch den Erstbesteiger Naus statt; sie eignet sich jedoch aufgrund ihrer noch mangelnden Genauigkeit und der nicht exakt festgelegten Gletschergrenzen nicht für quantitative glaziologische Aussagen. Das Zugspitzplatt zeigte mit dem Plattachferner damals noch eine zusammenhängende Vergletscherung, die bereits in etwa der neuzeitlichen Maximalausdehnung entsprach. Um 1875 hat der Plattachferner erst wenig von dieser Fläche verloren, was eine Karte von Waltenberger im Maßstab 1:50.000 belegt (Abb. 1).

Derselbe Trigonometer Anton Waltenberger wurde im Jahr 1887 von der Münchener Geographischen Gesellschaft beauftragt, das bayerisch-österreichische Grenzgebiet im Berchtesgadener Land im Maßstab 1:5.000 zu vermessen, wovon die Karte des Blaueis aus dem Jahr 1889 stammt, die als Pause des Originals vorhanden ist (Abb. 3).

Abb. 2: Digitales Geländemodell des Höllentalfernens 1999.





**Abb. 3:** Im Jahr 1892 hat schließlich ein anerkannter Pionier der Gletschervermessung und Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Sebastian Finsterwalder, im Auftrag des königlich bayerischen topographischen Bureaus das terrestrisch-photogrammetrische Aufnahmeverfahren zum ersten Mal in Deutschland angewendet und das Zugspitzplatt im Maßstab 1:5.000 vermessen. Der Gletscher trägt hier zum ersten Mal die Bezeichnung „Schneeferner“, und er steht kurz davor, sich in zwei Teile zu trennen.

In den Jahren 1949 und 1950 erfolgte eine Neuvermessung der bayerischen Gletscher durch Richard Finsterwalder, Sohn von Sebastian und einer der Mitbegründer der Kommission für Glaziologie der Akademie. Seit 1970 führt das Institut für Photogrammetrie und Kartographie (IPK) der TU München in Zusammenarbeit mit dieser Kommission die photogrammetrische Aufnahme der bayerischen Gletscher in Abständen von ungefähr zehn Jahren durch.

Seit den 1990er Jahren kam auch digitale Photogrammetrie zum Einsatz, Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für die Visualisierung eines digitalen Geländemodells in Form eines Gitters.

Eine Inspizierung der Auswertoriginale im Archiv der TU München ergab, dass auch in Vergessenheit geratene und unveröffentlichte Auswertungen, z. B. vom Blaueis aus dem Jahr 1924, vorliegen. Die Originale sind auf Transparentpapier, Zeichenkarton oder Kunststofffolien aus Astralon gezeichnet. Vor allem Letztere sind teilweise sehr stark ausgebleicht und befinden sich an der Grenze der Lesbarkeit. Durch eine Digitalisierung dieser Höhenlinienpläne werden diese äußerst wertvollen Daten der Nachwelt erhalten und auf Dauer gesichert bleiben.

#### **Digitale Aufbereitung der historischen Daten**

Das klassische Verfahren zur dreidimensionalen geodätischen Überwachung von Gletschern ist

die Photogrammetrie, bei der aus Stereo-Paaren von Luftbildern oder terrestrischen Aufnahmen die Höheninformation gewonnen wird und an analogen Auswertgeräten Höhenlinienpläne hergestellt werden.

Aus solchen topografisch-kartografischen Produkten können sekundär digitale Geländemodelle (DGMs) hergestellt werden. Dazu werden die Pläne gescannt und anhand von Koordinatengittern georeferenziert, also einer exakten Position auf der Erdoberfläche zugewiesen. Die vorhandenen Höhenlinienpläne der bayerischen Gletscher liegen größtenteils im nicht mehr aktuellen Gauß-Krüger-System und teilweise im noch älteren bayerischen Soldner-System vor. Um ein einheitliches Bezugssystem zu schaffen, werden alle Originalpläne in das heute gebräuchliche UTM-Gitter umprojiziert. Anschließend können die Höhenlinien und Gletschergrenzen am Bildschirm abdigitalisiert werden und ein DGM mit einer bestimmten Maschenweite berechnet werden. Das DGM ist ein Bild aus Pixeln, denen alle X- und Y-Koordinaten sowie Höhenwerte zugewiesen sind. Für die bayerischen Gletscher werden digitale Höhenmodelle generiert, deren Pixel eine Seitenlänge von einem oder zwei Meter haben. In Abbildung 3 sind die Arbeitsschritte vom analogen Höhenlinienplan zum DGM am Beispiel der Karte vom Blaueis 1889 dargestellt.

Digitale Geländemodelle bieten gegenüber analogen Produkten den Vorteil einer schnelleren und ökonomischeren Auswertung der Gletscheroberflächen und nahezu unerschöpfliche Möglichkeiten bei der Visualisierung. Es können sehr schnell glaziologische Kenngrößen wie die mittlere Gletscherhöhe oder die Verteilung von Flächen, Expositionen oder Neigungen in einzelnen Höhenstufen ausgegeben

werden. Auch die Berechnung von Höhen- und Volumendifferenzen zwischen zwei Aufnahmen, für die früher mühsam Teilflächen zwischen Höhenlinien planimetriert werden mussten, nimmt nur noch sehr wenig Zeit in Anspruch. Bei den bayerischen Gletschern werden zwischen allen aufeinanderfolgenden DGMs die Flächen-, Höhen- und Volumendifferenzen berechnet. Abbildung 4 zeigt die Höhendifferenz am Watzmanngletscher zwischen 1970 und 1980, als deutliche Massengewinne verzeichnet wurden, und zwischen 1980 und 1989, als der bis heute anhaltende Abschmelztrend einsetzte.

**Entwicklung einer neuen Methodik des geodätischen Gletschermonitorings**

Die analytische und digitale Photogrammetrie hat sich in den letzten 30 Jahren deutlich weiter entwickelt, ebenso wie die für die Weiterverarbeitung geeigneten Softwarelösungen im Bereich

Geographischer Informationssysteme (GIS), DGM-Erstellung und digitale Kartographie. Digitale Werkzeuge erlauben das Überspringen analoger Zwischenprodukte und die Automatisierung einiger Arbeitsschritte wie zum Beispiel das Erstellen von DGMs. Die Gletschervermessung stellt wegen des Hochgebirgsreliefs und der Reflexionseigenschaften von Schnee und Eis einerseits besondere Anforderungen an die Photogrammetrie, andererseits bietet sie wegen fehlender dreidimensionaler Objekte wie Bäume oder Gebäude optimale Bedingungen für eine automatisierte Höhendatenerfassung.

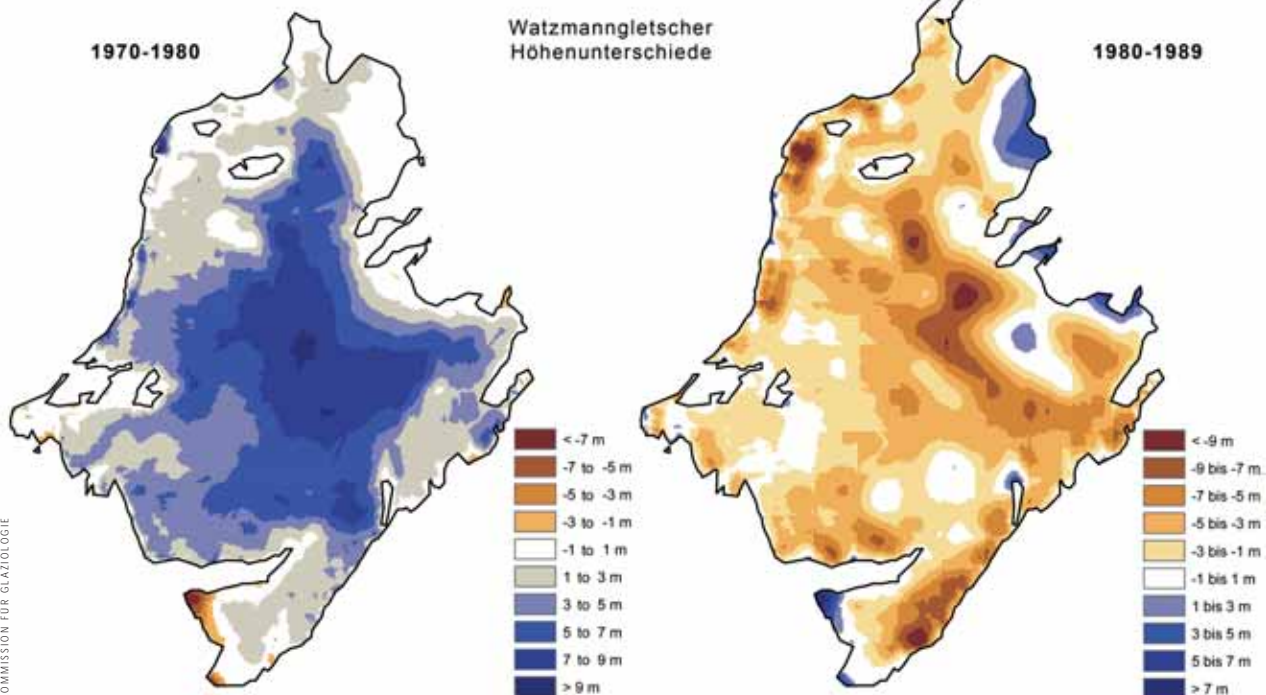
Bei der Aufnahme von Luftbildern für die DGM-Ableitung sollen zwei kostengünstige Alternativen angewandt werden. Zum einen wird die Befliegung mit einem Ultraleichtflugzeug getestet. Hier kann auf die Expertise des Lehrstuhls für Geographie und geographische Fernerkundung (Prof. Mauser) der LMU München zurückgegriffen

werden, der ein Ultraleichtflugzeug und Erfahrung mit der Aufnahme von digitalen Luftbildern für photogrammetrische Zwecke besitzt. Des Weiteren werden Digitalaufnahmen aus einer Cessna angefertigt, bei der durch den Verzicht auf für den Anwendungszweck nicht benötigte Ausrüstungsmerkmale (Verstellpropeller, Reihenmesskammer) die Erstellungskosten ausgesprochen niedrig gehalten werden können.

Zeitgleich zu den Befliegungen, die im Herbst 2006 und 2007 stattfinden, werden Kontrolldaten mittels differenzieller GPS-Messungen erhoben. Dazu wird die Gletscheroberfläche mit einer GPS-Antenne abgeschritten, um möglichst viele Punkte mit exakter Lage und Höhe zu erhalten. Somit können später die automatisch abgeleiteten DGMs mit realen Oberflächendaten verglichen und überprüft werden.

Aus den Aufnahmen werden dann mit verschiedenen Softwarepaketen automatisch DGMs abgeleitet und

**Abb. 4:** Höhenänderungen (in Metern) am Watzmanngletscher von 1970 bis 1980 und von 1980 bis 1989.



KOMMISSION FÜR GLAZIOLOGIE

anschließend der Fehler zu den GPS-Messungen ermittelt. Aus den DGMs mit den geringsten Abweichungen zu den GPS-Daten werden schließlich analog zu den älteren Vermessungen Höhenlinienpläne ausgegeben und glaziologische Kenngrößen sowie Differenzprodukte errechnet.

### Langfristige Beobachtung

Als ein Ergebnis des Projekts wird ein Werkzeug entwickelt, mit dem die bayerischen Gletscher ebenso wie andere kleine Gebirgsgletscher in Zukunft mit verhältnismäßig geringem Finanz- und Arbeitsaufwand und modernster Fernerkundungstechnologie vermessen werden können. Dieses standardisierte Verfahren wird, zusammen mit der digitalen

**Abb. 5:** Die Zugspitze mit Südlichem und Nördlichem Schneeferner sowie Höllentalferner (von links nach rechts). Aufnahme der Königlich Bayerischen Luftschiffer-Abteilung von 1917.

Datenbank, an der Kommission für Glaziologie verbleiben, die sich auch in Zukunft der Beobachtung der bayerischen Gletscher annimmt. Durch die langfristige Konzeption der Kommissionen hat die Bayerische Akademie der Wissenschaften einen nicht zu unterschätzenden Vorteil gegenüber Universitäten bei der Durchführung von Langzeitstudien.

### Die Zukunft der Gletscher in Bayern

In den 1980er Jahren sind die bayerischen Gletscher als Reaktion auf die kühlen Sommer der 1960er und 1970er Jahre zum letzten Mal vorgestoßen, worauf die Medien eine heute bereits wieder vergessene Angst vor der nächsten Eiszeit zu verbreiten versuchten. Seitdem unterliegen die fünf Gletscher in den bayerischen Alpen einem starken Massen- und Flächenschwund. Der Südliche Schneeferner ist bereits in zwei Firnbecken zerfallen, und dem Blaueis steht durch einen austauenden Felsriegel ein ähnliches Schicksal unmittelbar bevor.

Legt man die Abschmelzraten der 1990er Jahre zugrunde, als beispielsweise der Nördliche Schneeferner 90 cm pro Jahr an Höhe eingebüßt hat, so errechnet sich angesichts der geringen Eismächtigkeiten von höchstens 30 m an den dicksten Stellen keine hohe Lebenserwartung. Es ist jedoch durchaus denkbar, dass sich lawinengenährte Eisreste unterhalb Schatten spendender Felswände noch sehr lange

halten. Diese verdienen dann aber wohl kaum noch die Bezeichnung „Gletscher“, zu dem ja per Definition auch eine Bewegung des Eises gehört. Ebenso möglich ist jedoch, dass sich die bayerischen Gletscher eines Tages wieder erholen oder, nachdem sie verschwunden waren, völlig neu bilden. Auch wenn heute noch nichts auf eine Trendumkehr hinweist, sollten wir die Natur niemals als derart berechenbar ansehen und eine solche Entwicklung generell ausschließen.

*Der Autor war wissenschaftlicher Mitarbeiter der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und arbeitet derzeit als Postdoc-Stipendiat der DFG an der Sektion Geographie der LMU München.*

