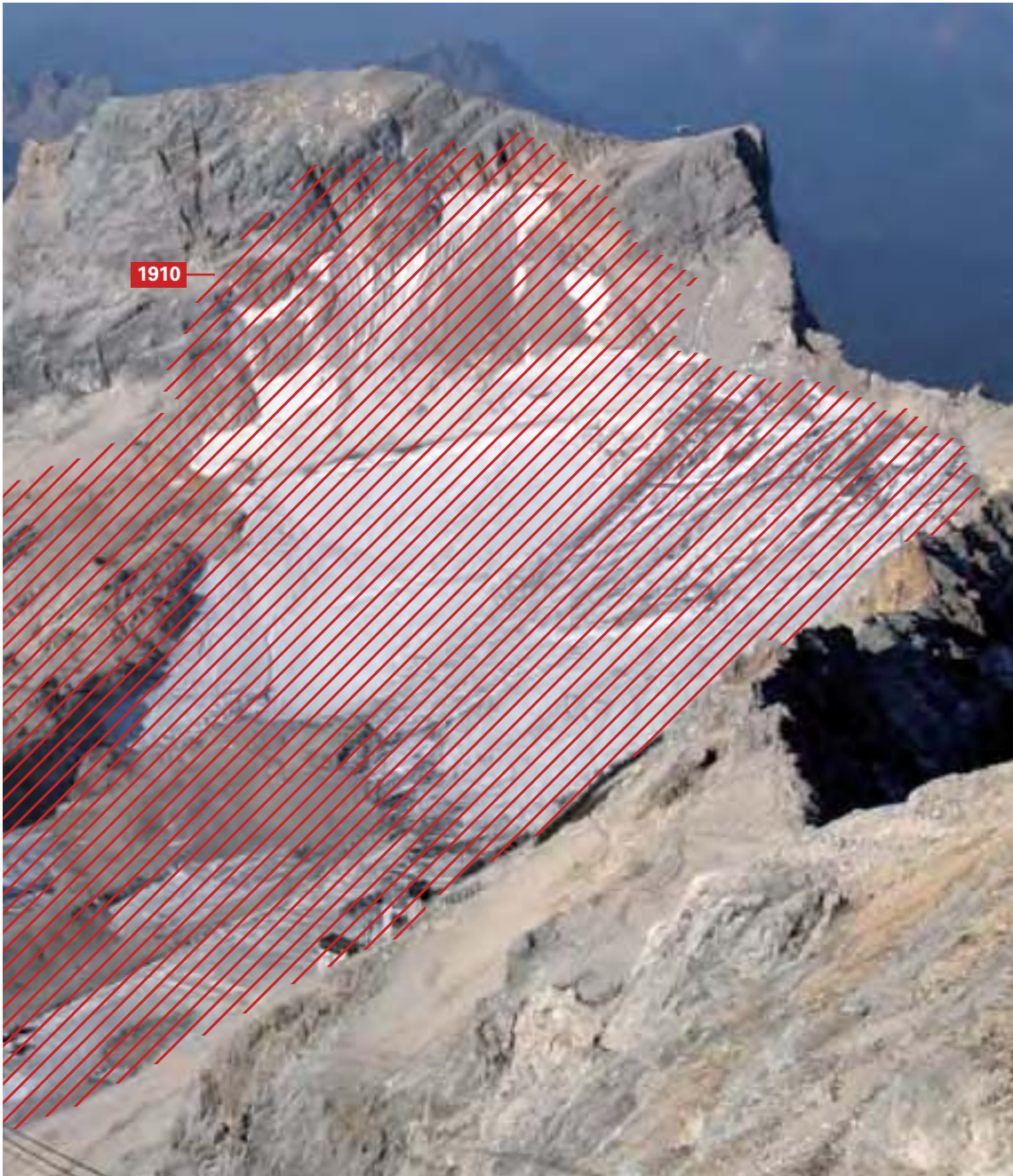




Nördlicher Schneeferner, Zugspitzplatt: Vergleich 1910/2009

Bayerische Gletscher im Klimawandel – ein Statusbericht



Zugspitze

Gletscher faszinieren den Menschen seit jeher. Gletscher sind unberührte Naturwunder, sensible Ökosysteme, Wasserspeicher, Orte der Schönheit und der Magie, der Beständigkeit und des Wandels zugleich. Diese Werke der Schöpfung und Evolution gilt es zu bewahren und zu schützen.

Gletscher sind aber auch Mahnmale des Klimawandels. Sie reagieren in beispiellosem Tempo auf die Veränderung des globalen Klimasystems, das durch die Emission von Treibhausgasen aufgrund menschlicher Aktivitäten zunehmend erwärmt wird. Überall auf der Erde schmelzen Gletscher ab und ziehen sich in größere Höhen zurück.

Der Klimawandel ist eine der größten Bedrohungen der Alpen und ihrer Gletscher. Die Natur reagiert hier besonders deutlich, weil sich zahlreiche empfindliche Gebiete und naturbelassene Landschaften auf relativ kleinem Raum befinden. Der nachhaltige Schutz wertvoller und klimasensitiver Ökosysteme in den Alpen, wie Bergwälder oder alpine Wildflüsse sowie der Schutz gefährdeter Tier- und Pflanzenarten gehören deshalb zu den vordringlichen Aufgaben der nächsten Jahre. Als einziges deutsches Bundesland mit Alpenanteil hat Bayern dabei eine besondere Verantwortung für den Natur- und Umweltschutz im Gebirge.

Als Folgen des Klimawandels können sich in den alpinen Regionen zahlreiche Gefahrenmomente ergeben. Diese Georisiken, wie Fels- und Eisschlag oder Murenabgänge, müssen rechtzeitig vermieden oder eingedämmt werden. Im Rahmen der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie wurden zum Schutz von Mensch und Natur in den Alpen bereits umfangreiche Konzepte erarbeitet. Die Themenbereiche erstrecken sich vom Wildbachschutz, der Erstellung von Gefahrenhinweiskarten, nachhaltigen Schutzmaßnahmen im Bergwald, über die Kartierung von Permafrost, einem Klimaktionsplan Alpenkonvention bis zur Neuausrichtung der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus zu einer der weltweit führenden Klima- und Wetterforschungsstationen. Die Veränderung des alpinen Raums durch den Klimawandel wird im Rahmen internationaler Forschungsvorhaben untersucht.

Im Bewusstsein um die Bedeutung hochalpiner Naturräume dürfen Gletscher nicht als tote Eismassen in den Höhen der Gebirge betrachtet werden. Sie verdienen unsere ganze Aufmerksamkeit als ein grundlegender Baustein des sensiblen und schützenswerten „Öko- und Geosystems Hochgebirge“. Unsere Gletscher sind markante Zeichen der Bayerischen Alpen, insbesondere der Berchtesgadener Alpen und des Wettersteingebirges. Sie tragen zur Attraktivität der Gebiete bei. Helfen Sie mit, damit auch die nachfolgenden Generationen die Schönheit der Alpen bewundern und genießen können!

Bei Dr. Christoph Mayer, Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, sowie Dr. Wilfried Hagg, Department für Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität München, bedanken wir uns für die Erstellung des zu Grunde liegenden wissenschaftlichen Berichts.



Dr. Marcel Huber MdL
Staatsminister

Melanie Huml MdL
Staatssekretärin

An der Bayerischen Akademie der Wissenschaften wird seit fast 50 Jahren Gletscherforschung betrieben. Lange bevor die Diskussion um den Klimawandel und die Reaktion der Gletscher die Tagesordnung beherrschte, untersuchten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in München die Zusammenhänge zwischen den klimatischen Verhältnissen und der Entwicklung der Gebirgsgletscher. Dabei geht die „Münchener Schule“ der Gletscherforschung bis ins 19. Jahrhundert zurück, als Sebastian Finsterwalder die erste wissenschaftliche Karte eines Gletschers aus Vermessungsaufnahmen entwickelte.

Die Gletscherentwicklung wirkt wie ein Filter für das Wettergeschehen: Nur langfristige Änderungen spiegeln sich in den Gletschern wider. Dies erlaubt es den Forschern, die relevanten Prozesse im Klimageschehen zu identifizieren und zu bewerten. Allerdings benötigt diese Forschung auch einen langen Atem, da die Entwicklungen über lange Zeiträume beobachtet und registriert werden müssen. Erst dann erschließt sich der wahre Wert der Beobachtungen in einem großen Zusammenhang. Daher ist die Gletscherforschung zu Recht in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften beheimatet, einer Institution, die langfristige Forschungsprojekte als eine ihrer Kernaufgaben versteht.

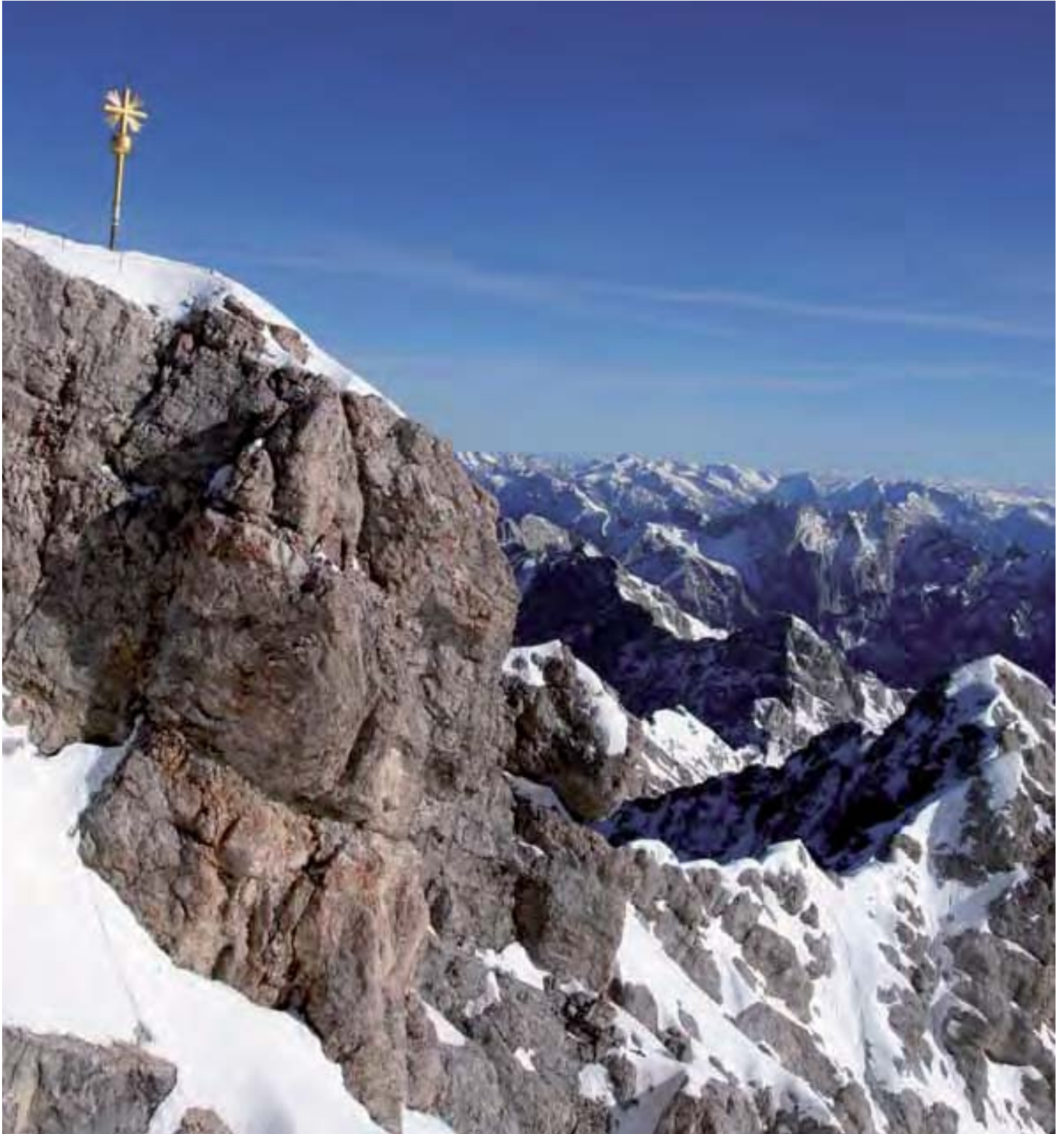
Der vorliegende Gletscherbericht hätte ohne die jahrzehntelange Beobachtung der bayerischen Gletscher nicht geschrieben werden können. Der Zustand der Gletscher in Bayern, aber auch alpenweit, ist besorgniserregend. Die weitere Entwicklung ist jedoch alles andere als klar, da die vorherrschenden Prozesse im Vergehen der Gletscher bis heute nicht vollständig verstanden sind. Daher muss die Beobachtung auch in den nächsten Dekaden fortgeführt werden.

Der vorliegende Bericht stellt eine wichtige Zusammenfassung der bisher gewonnenen Erkenntnisse dar und veranschaulicht auch dem fachfremden Leser die Faszination des Hochgebirges mit seinem „ewigen Eis“.



Prof. Dr. Karl-Heinz Hoffmann

Präsident der Bayerischen Akademie
der Wissenschaften



Zugspitzkreuz

Vorwort	2
1. Gletscherrückgang – eine dramatische Folge­reaktion des Klimawandels in den Alpen	6
2. Methoden der Gletscherforschung	8
3. Einflussfaktoren auf die Entwicklung von Gletschern in den Alpen	10
4. Bedeutung der Alpengletscher im Wasserkreislauf	13
5. Gletscher in Bayern heute – eine Bestandsaufnahme	14
Nördlicher Schneeferner	16
Südlicher Schneeferner	17
Höllentalferner	18
Watzmann­gletscher	19
Blaueis	20
6. Entwicklung der Gletscher in Bayern	21
Historische Aufzeichnungen seit dem 18. Jahrhundert	21
Systematische Erfassung der bayerischen Gletscher ab 1950	22
Ausblick in die Zukunft der bayerischen Gletscher	25
7. Ein Blick nach Europa: Haben die Gletscher der Alpen eine Zukunft?	26
Alpengletscher im Überblick	26
Schweizer Alpengletscher	27
Österreichische Alpengletscher	27
Zusammenfassung	29
Glossar	30
Fachliteratur und Quellen	32
Allgemeine Literatur zum Thema Gletscher	34
Internetquellen	34
Impressum	36

1. Gletscherrückgang – eine dramatische Folgereaktion des Klimawandels in den Alpen

Sowohl Ausmaß und Geschwindigkeit der globalen Erderwärmung als auch die vom Menschen emittierten Treibhausgase als wesentliche Ursache des Klimawandels sind unbestritten. Aufgrund des Klimawandels sind während der vergangenen hundert Jahre die Lufttemperaturen in Bayern je nach Region um 0,5 bis 1,2°C im Jahresmittel angestiegen, am stärksten in den beiden letzten Jahrzehnten (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008).

Regionale Klimamodelle und Ergebnisse aus der Klimaforschung zeigen, dass insbesondere das sensible Ökosystem Alpen in den kommenden Jahrzehnten weiter von einem überdurchschnittlichen Lufttemperaturanstieg betroffen sein wird. Schon jetzt ist die Temperaturzunahme in den Alpen nahezu doppelt so groß wie der globale Durchschnittswert, d. h. bis zu 2°C. Natur und Umwelt werden dadurch erheblich beeinträchtigt. So führte der Klimawandel in den Alpen zu einem Anstieg der Schneegrenze um 250 bis 300 m mit gravierenden Auswirkungen – auch auf die Gletscher. Die 0°C-Grenze hat sich z. B. im Hitzesommer 2003 für mehrere Wochen auf eine Höhe von 4000 m nach oben verschoben. Die Folgen des Klimawandels sind in den Alpen besonders weitreichend und gravierend, weil das Ökosystem Alpen aufgrund der räumlichen Enge, der zahlreichen spezialisierten Lebensgemeinschaften und deren geringen Wander- bzw. Ausweichmöglichkeiten sehr empfindlich und verwundbar ist.

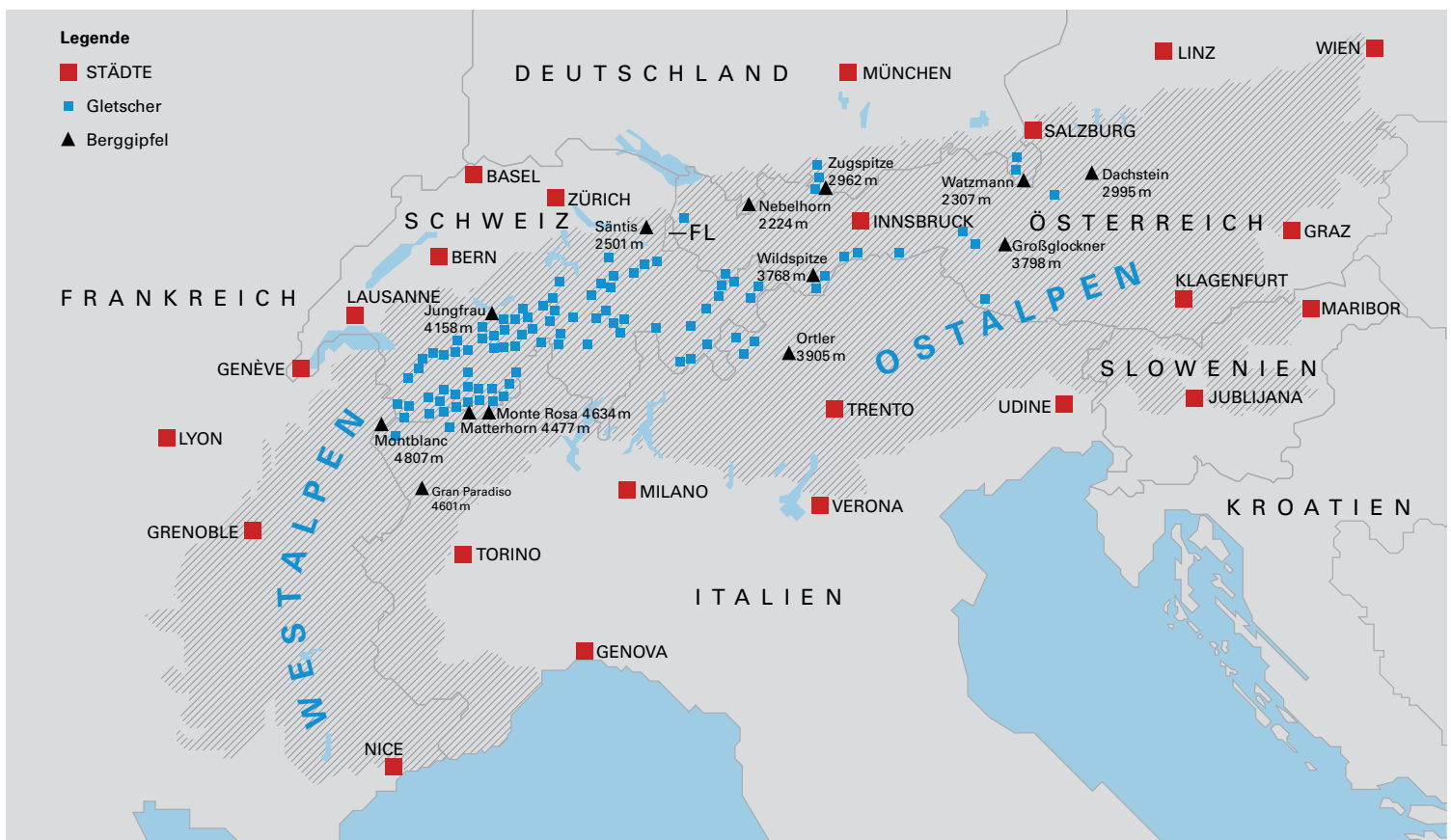
Dass der Gletscherschwund ein sich selbst verstärkender Prozess ist, lässt seine Folgen noch gefährlicher werden. Die starke Reduktion heller Schnee- und Firnflächen durch Abschmelzprozesse führt vermehrt zu dunkleren, schneefreien Flächen, welche die Sonnenstrahlung besser absorbieren und sich dadurch weiter aufwärmen. Auch die Intensität der Sonneneinstrahlung, Luftdruck und -bewegung, Art und Menge von Niederschlägen gehorchen in Höhenlagen anderen Gesetzmäßigkeiten als im Tal. So fallen die Sommerniederschläge auch in höheren Gebirgslagen inzwischen meist als Regen und nicht mehr als Schnee. Massenverluste und Abschmelzen der Gletscher werden so unterstützt.

In den europäischen Alpen gibt es noch etwa 5000 Gletscher. Davon liegen

- 43 % in der Schweiz (= ca. 1050 km²) ,
- 23 % in Italien (= 560 km²),
- 19 % in Österreich (= 560 km²),
- 14 % in Frankreich (= 350 km²).

Weniger als einen Quadratkilometer umfassen die Gletscherflächen der fünf deutschen Gletscher in Bayern (Alean, J., 2010).

Gletscher in den Alpen



Weltweit warnen Gletscherforscher vor den dramatischen Veränderungen des „ewigen Eises“, die seit der beginnenden Industrialisierung um die Mitte des 19. Jahrhunderts ablaufen. Beispiele finden sich weltweit: die 400 Gletscher des Transili-Alatau, einer Gebirgsgruppe des Nord-Tien-Schan-Gebirges in Zentralasien haben von 1955 bis 1990 ca. 32 % ihres Volumens verloren (Uvarov & Vilesov, 1998), die berühmten weißen Kappen des Mount Kenia und des Kilimandscharo in Ostafrika schmelzen so schnell, dass sie in den nächsten Dekaden ganz verschwunden sein werden (Dow & Downing, 2007). In den kanadischen Rocky Mountains sind mehrere Gipfel zum ersten Mal seit 2.500 Jahren eisfrei (Dow & Downing, 2007).

Das weitere Abschmelzen der Eismassen in Grönland wird mit einem erheblichen Anstieg der Meeresspiegel einhergehen, von dem insbesondere Inseln im Pazifik und küstennahe Städte u. a. im asiatischen Raum bedroht sind. Das Schmelzen der Gletscher verändert die Wasserführung von Flüssen und führt zu Wasserknappheit für Millionen von Menschen auf der Welt. Wichtige Trinkwasserspeicher gehen durch die Gletscherschmelze verloren. Von gewaltigen Wassermassen schmelzender Gletscher gebildete Seen, wie z. B. im Himalaya, brechen ihre natürlichen Dämme und überfluten ganze Regionen.

Die Gletscher in den europäischen Alpen sind inzwischen bis auf etwa ein Drittel ihres Volumens im Jahr 1850 zurückgegangen und haben nahezu die Hälfte ihrer Fläche verloren (Zemp et al., 2007). Ursächlich ist die zunehmende Erwärmung der Lufttemperatur durch den Klimawandel.

Da sich in der kurzen Zeit des Abschmelzens die Vegetation nicht an die eisfreien Flächen anpassen kann, verbleiben unbewachsene Geröllhalden und Wasserflächen, die potenzielle Gefahrenquellen darstellen.

Zu den sogenannten Georisiken gehören abstürzende Felsbrocken, Eisschlag oder Murenabgänge, die ganze Landschaften und Orte in montanen Regionen bedrohen.

Durch den Klimawandel ausgelösten Folgen für die Alpen sind u.a.:

- Zunahme von Hitzewellen
- Anstieg der winterlichen Lufttemperatur stärker als der sommerlichen
- Zunahme von Extremwetter-Ereignissen und Hochwasser
- Verschiebung der Vegetationszonen in die Höhenlagen
- massiver Gletscherrückgang
- Zunahme alpiner Gefahren, wie Steinschlag, Murenabgänge
- Abnahme der Tage mit Frost im Winter
- Rückgang der Schneefälle, früherer Beginn der Schneeschmelze

Diese alpinen Gefahren für Mensch und Natur müssen rechtzeitig vermieden oder eingedämmt werden.

2. Methoden der Gletscherforschung

Da Gletscher auf Klimaveränderungen und nicht so sehr auf einzelne warme Jahre (= Witterung) reagieren, liefern sie wertvolle Beweise für langfristige Veränderungen. Die Zeichen der Ausdehnung und der Rückzüge sind im „ewigen Eis“ deutlich zu sehen und ermöglichen es, klimatische Veränderungen aus Zeiten abzuleiten, von denen keine Messwerte vorliegen. Die Gletscher werden häufig als das Gedächtnis der historischen Klimaentwicklung bezeichnet. Wie in einem Archiv können in den Tiefen der Eismassen der polaren Eisschilde durch Bohrkern Relikte der Vergangenheit wie Staub, Ruß, Pflanzenteile, Gasbläschen gefunden und bewertet werden. Gebirgsgletscher geben über ihre ehemaligen Ausdehnungen, die als Moränen lange in der Landschaft sichtbar bleiben, wertvolle Hinweise zur Rekonstruktion des Paläoklimas.

Die bayerischen Gletscher werden seit vielen Jahrzehnten regelmäßig untersucht, um die Veränderungen der Eismassen in Zeiten des Klimawandels zu dokumentieren und zu bewerten (Hagg et al., 2008; Heilig et al., 2010). Die Basis bilden die ersten topographischen Karten der bayerischen Gletschergebiete, die aus dem 19. Jahrhundert datieren.

Ein wichtiger Schritt für die genaue Vermessung der Gletscher war die Einführung der terrestrischen Photogrammetrie durch Sebastian Finsterwalder, bei der anhand zweier ähnlicher Fotografien eines Ortes eine dreidimensionale Abbildung abgeleitet wird (s. a. Glossar). Seit dem Ende des zweiten Weltkrieges kam für die großräumige Vermessung zunehmend die Luftbildphotogrammetrie zum Einsatz. Die Auswertungen wurden seit den 1950er Jahren am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München sowie seit 1964 in Zusammenarbeit mit der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt.

In neuerer Zeit konnten die Untersuchungen an bayerischen Gletschern durch mehrere neuere Messverfahren verbessert werden. Neben terrestrischen Laserscan-Aufnahmen für die Ableitung der Topographie kommen auch satellitengestützte GPS-Verfahren zum Einsatz. An den kleineren Gletschern kann die Topographie auch mit reflektorloser Tachymetrie, die die Bestimmung des Winkels und der Distanz zwischen Objekten und Betrachter mit dem Theodoliten zugrunde legt (s. a. Glossar), bestimmt werden (Abb. 2.2). Dies hat den Vorteil, dass man in engen Tälern nicht durch unzureichenden Satellitenempfang behindert wird.



Abb. 2.1:
Bohrkern im Gletscherfirn

Abb. 2.2:
Beispiel der reflektorlosen Tachymetrie
am Watzmanngletscher, 2009.



Für die Bestimmung der Eisdicke wurden Messungen mit Bodenradarapparaturen durchgeführt. Im Gegensatz zur Vermessung der Oberfläche muss dafür der Gletscher auf Profilen mehrfach überquert werden (Abb. 2.4). Das Radargerät wird dabei über die Eisoberfläche gezogen, die eindringenden Radarwellen werden am Felsuntergrund reflektiert und die so erzeugten Echos aufgezeichnet (Abb. 2.3). Aus der Laufzeit dieser Echsignale kann die Dicke des Gletschereises bestimmt werden.

Die Messungen zu den Eisvolumina und die turnusmäßige Vermessung der Topographie der bayerischen Gletscher wurden in den Jahren 2006 bis 2010 durch die Kommission für Erdmessung und Glaziologie durchgeführt. Die wissenschaftlichen Auswertungen liegen diesem Bericht zugrunde (Heilig, Mayer & Hagg, 2010).



Abb. 2.3 (oben):
Ergebnis einer Radaruntersuchung am nördlichen Schneeferner: Am Felsuntergrund ist der Signalwechsel klar zu sehen (blauer Pfeil), in Bereichen mit Schuttverfüllungen ist die Reflexion weniger deutlich (mittlerer Bereich, roter Pfeil).

Abb. 2.4 (links):
Einsatz eines Bodenradars im Hochgebirge zur Eisdickenmessung am Blaueis, 2006.

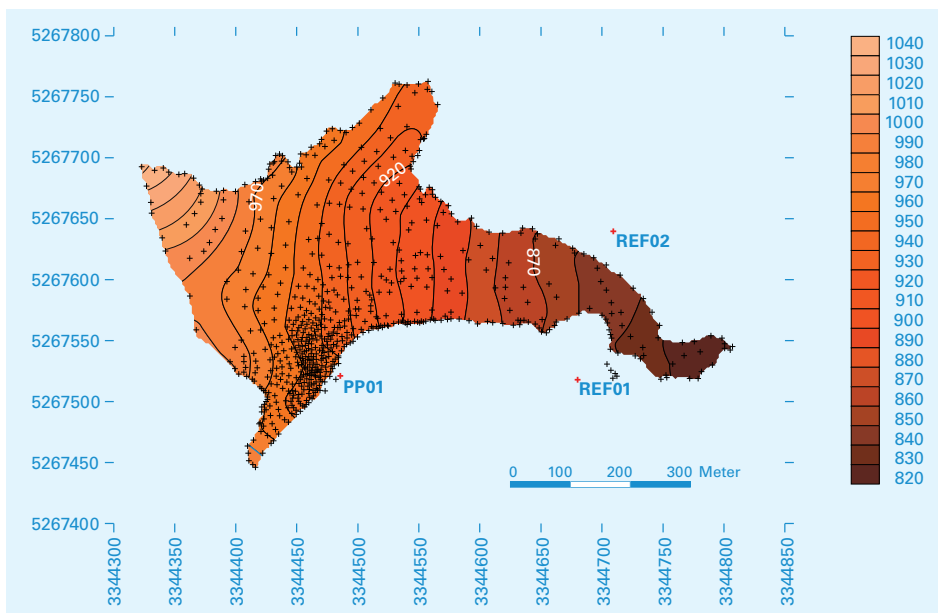


Abb. 2.5:
Beispiel der Auswertung einer Tachymetermessung für die Eiskapelle, ein ausgedehntes Schneefeld am Fuß der Watzmann-Ostwand.

3. Einflussfaktoren auf die Entwicklung von Gletschern in den Alpen

Gletscher bestehen aus Eis, einem Material, das sich im Vergleich zu anderen Feststoffen auf der Erdoberfläche fast ständig nahe an seinem Schmelzpunkt befindet. Während die Kristalle von frischem Schnee noch locker nebeneinander liegen, ein großes Luftporenvolumen von bis zu 95 % aufweisen und deshalb von geringer Dichte sind (ca. $0,1 \text{ g/cm}^3$), besitzt der Altschnee (= Firn) bereits eine Dichte von $0,5 \text{ g/cm}^3$. Hat sich der Firn durch den Druck der Schneemassen in Gletschereis verwandelt, ist er schwer und fest geworden (Dichte = $0,8\text{--}0,9 \text{ g/cm}^3$) und kann sich wie eine zähe Flüssigkeit ins Tal bewegen (Alean, 2010).

Folgende Faktoren beeinflussen die Entwicklung von Gletschern:

Lufttemperatur

In den meisten Regionen der Erde werden im Sommer Temperaturen erreicht, bei denen Eis schmilzt. Nur im extremen Hochgebirge und im Inneren Grönlands und der Antarktis bleiben die Temperaturen das ganze Jahr unter dem Schmelzpunkt. In allen anderen Regionen der Erde wird zumindest ein Teil des Gletschereises im Jahresverlauf schmelzen, während Neuschnee den Verlust wieder ausgleicht.

Blickt man in die Vergangenheit, so war in der Zeit zwischen etwa 1500 bis 1850 das Klima in Mitteleuropa durch zahlreiche kühle Sommer geprägt (Glaser, 2001). Dies führte dazu, dass die Alpengletscher an Fläche zunahmen und gegen 1850 ihre maximale Ausdehnung seit der letzten Kaltzeit erreichten.

Mit dem Beginn der Industrialisierung und der zunehmenden Erwärmung der Lufttemperatur (Abb. 3.1) begannen die Gletscher in den Alpen jedoch abzuschmelzen.

Aus Abbildung 3.2 ist ersichtlich, dass die Lufttemperaturen – nur während des Sommerhalbjahres – in den Jahren 1947 bis 1975 eine kurze Phase der Abkühlung um etwa $0,8^\circ\text{C}$ aufwiesen. Dies führte zu einem allgemein beobachteten Gletschervorstoß um 1980. Nach 1975 zeigen jedoch auch die mittleren Lufttemperaturen im Sommer eine zunehmende Erwärmung an.

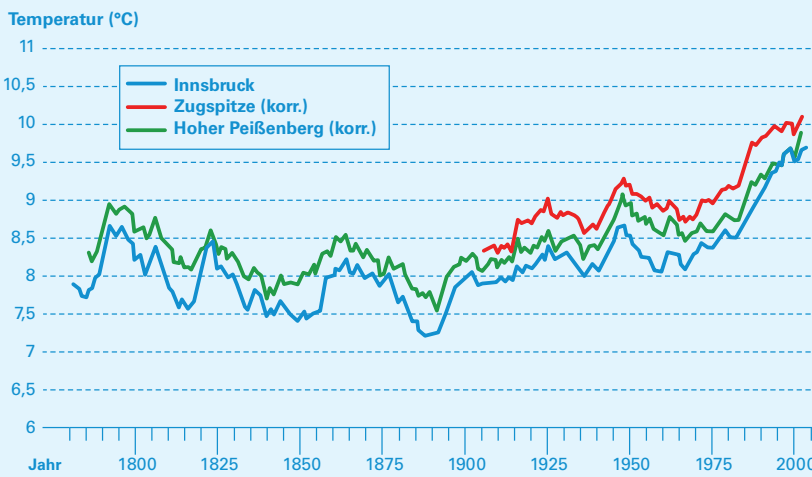


Abb. 3.1:
Mittlere Jahreslufttemperaturen seit Beginn der Aufzeichnungen an den Wetterstationen Innsbruck, Zugspitze und Hoher Peißenberg. Die Reihen der Stationen Hoher Peißenberg und Zugspitze wurden (Gradient von $0,6^\circ\text{C pro } 100 \text{ m}$) auf die Meereshöhe von Innsbruck korrigiert. (HISTALP, Auer et al., 2007)

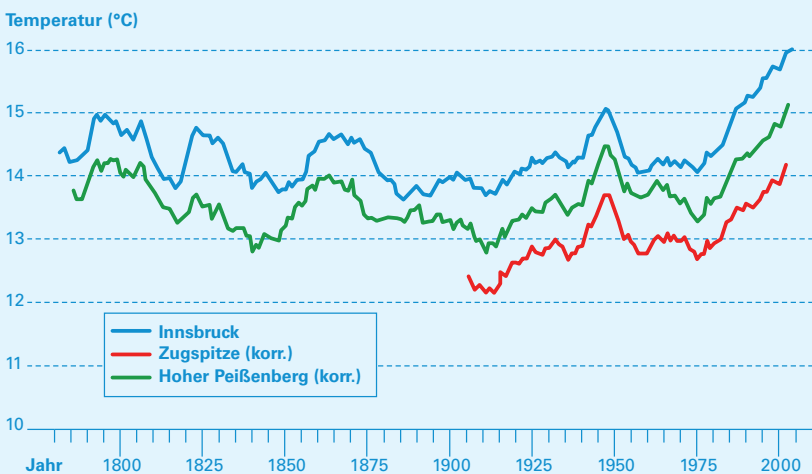


Abb. 3.2
Mittlere Lufttemperaturen während der Sommermonate seit Beginn der Aufzeichnungen an den Wetterstationen Innsbruck, Zugspitze und Hoher Peißenberg. Die Reihen der Stationen Hoher Peißenberg und Zugspitze wurden (Gradient von $0,65^\circ\text{C pro } 100 \text{ m}$) auf die Meereshöhe von Innsbruck korrigiert. (Auer et al., 2007)

Niederschlag

Neben der Lufttemperatur beeinflussen Menge, Art und Häufigkeit von Niederschlagsereignissen die Entwicklung von Gletschern. In Gebirgen nimmt der Niederschlag meist mit der Höhe zu und kann in Gipfelregionen leicht das Doppelte der Menge von Tallagen erreichen.

Niederschlag und Temperatur bestimmen im Wesentlichen den höhenabhängigen Massenumsatz eines Gletschers (Abb. 3.3).

In den sehr trockenen Gebirgen Zentralasiens wird in den höchsten Gletscherregionen nur wenig Schnee abgelagert. Die Eisschmelze an den Gletscherzungen beträgt nicht mehr als wenige Meter im Jahr. Demgegenüber reichen die Gletscherzungen in Gebirgen nahe der Meeresküste mit sehr viel Niederschlag oft bis weit in die Täler hinunter, da die großen Schneemassen zu einer starken Gletscherbewegung führen. An solchen Gletscherzungen können Schmelzraten von 10 bis 20 m pro Jahr beobachtet werden (Anderson et al., 2006). Gletscher, die solche enorme Massen an Eis transportieren, reagieren schnell auf Veränderungen des Niederschlags oder der Temperatur.

In Abb. 3.4 werden Niederschlagsaufzeichnungen aus dem inneralpinen Inntal (Innsbruck) mit der Staulage am Nordrand der Alpen (Oberstdorf) verglichen. Es wird ersichtlich, dass in der Staulage während eines Jahres mehr als doppelt so viel Niederschlag fällt wie in den inneren Alpentälern. Zudem zeigt sich eine deutlich messbare Zunahme des Jahresniederschlags an beiden Stationen. Zwischen den Jahren 1900 und 2000 erhöhte sich der mittlere Jahresniederschlag in Innsbruck um etwa 70 mm (9%) und in Oberstdorf um knapp 80 mm (4,5%).

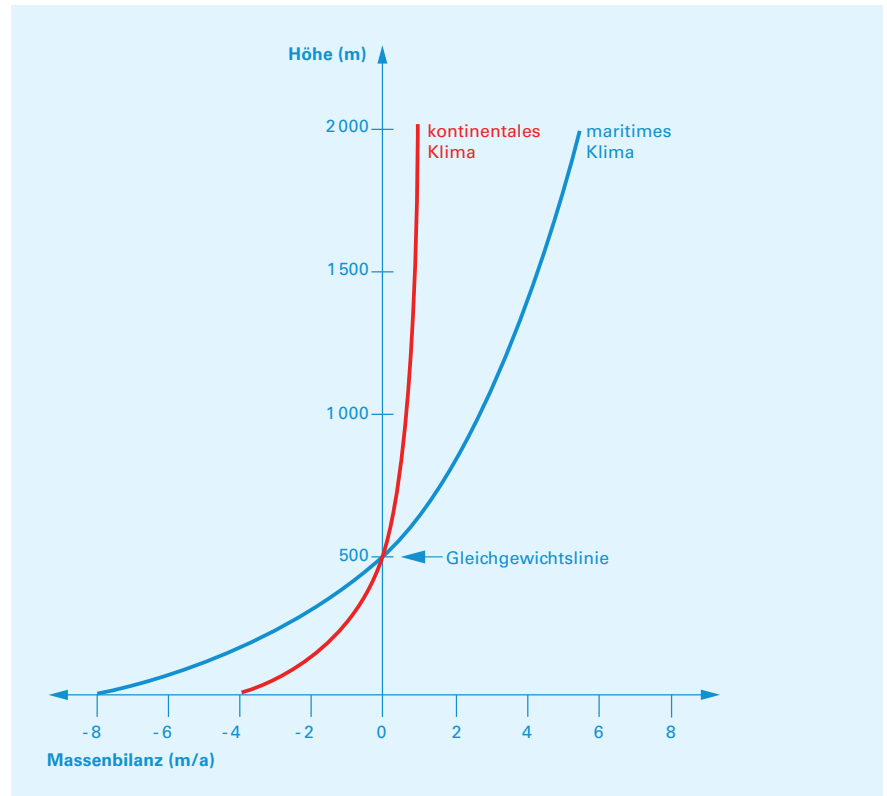


Abb. 3.3 (oben): Abhängigkeit der Massenbilanz vom Niederschlag: trockene/kontinentale Gebiete zeigen deutlich geringere Massenumsätze als feuchte/maritime Gebiete.

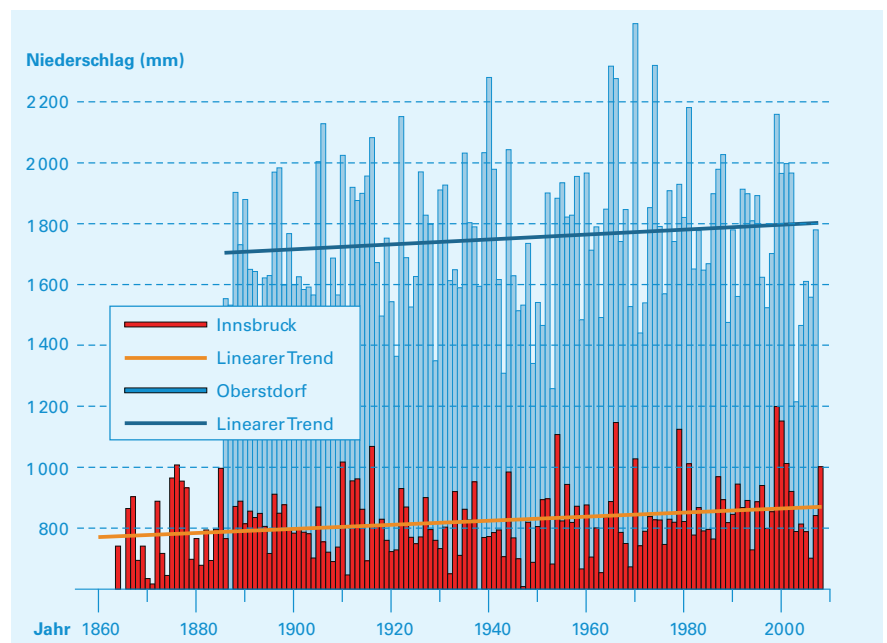
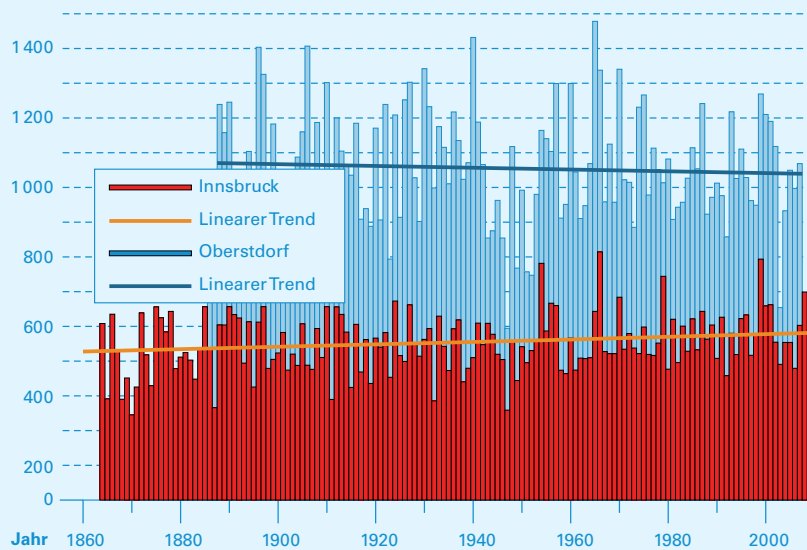


Abb. 3.4: Jahresniederschlag an den Stationen Innsbruck und Oberstdorf. (Auer et al., 2007)

Sommerniederschlag (mm)



Winterniederschlag (mm)

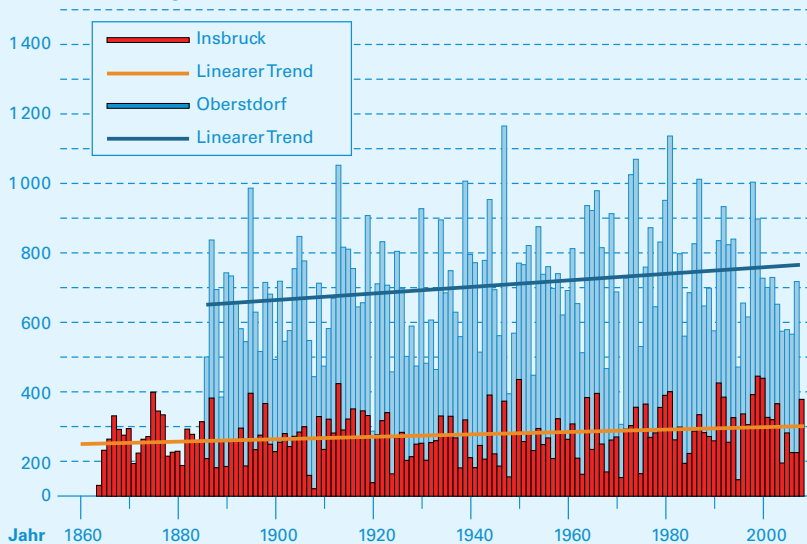


Abb. 3.5: Vergleich von Sommer- (oben) und Winterniederschlag (unten) für die beiden Stationen Innsbruck und Oberstdorf. (Auer et al., 2007)

Ein Vergleich der Sommer- und Winterniederschläge zeigt eine Zunahme der Winterniederschläge im Nordstau der Alpen (Abb. 3.5). Während in Innsbruck im Sommer etwa doppelt so viel Niederschlag fällt wie im Winter, gleichen sich die Niederschlagsmengen in Oberstdorf an (800 mm gegenüber 1050 mm).

Die wichtigsten Ursachen des Gletscherrückgangs:

- Frühlings- und Sommermonate mit intensiver Sonneneinstrahlung
- wenig Schneezuwachs im Winter (Massenumsatz)
- erhöhte Lufttemperaturen
- sommerliche Regenereignisse bis in große Höhen

Reaktionszeit

Die Gletscher reagieren mit zeitlicher Verzögerung auf die Klimaentwicklung (= Reaktionszeit des Gletschers, s. a. Glossar). Die Reaktionszeit kann je nach Größe des Gletschers, seiner Lage und den lokalen klimatischen Bedingungen zwischen wenigen Jahren und einigen Dekaden liegen. Eine steile Topographie und ein hoher Massenumsatz führen zu einer kurzen Reaktionszeit.

Gleichgewicht und Massenumsatz

Für die Beurteilung der Klimaempfindlichkeit von Gletschern sind die Lage der Gleichgewichtslinie und der Massenumsatz (s. a. Glossar) wichtig. An der Gleichgewichtslinie schmilzt genauso viel Eis im Jahresverlauf ab, wie durch Schneefall wieder hinzukommt. Wird es wärmer, verschiebt sich die Gleichgewichtslinie in größere Höhen. Eine Faustzahl für die Veränderung der Lufttemperatur mit der Höhe ist $6,5^{\circ}\text{C}$ pro 1000 m Höhenänderung (Kuhn, 1979).

Geometrie

Die Reaktion von Gletschern auf Veränderungen der Umgebungsbedingungen ist auch stark von ihrer Form (= Geometrie) abhängig. Die Länge eines Gletschers nimmt mit abnehmender Steilheit des Untergrundes deutlich zu. Dies bedeutet, dass eine Temperaturveränderung bei flachen Gletschern größere Flächenanteile betrifft und eine weitaus stärkere Reaktion im Hinblick auf die Gletscherlänge zur Folge hat, als bei steilen Gletschern.

Gletscher werden nicht nur vom Klima beeinflusst, sie können auch Einfluss auf das Klima nehmen.

Ursächlich sind zum einen ihre gewaltige Ausdehnung und der große Massenumsatz, zum anderen die starke Reflexion des eingestrahnten Sonnenlichts an ihren schneebedeckten, weißen Oberflächen (= Albedo, s. a. Glossar). Sie beeinflussen so die Bilanz der Sonneneinstrahlung, die großräumigen Wettersysteme und die Meeresströmungen. Ein globales Abschmelzen der Gletscher verstärkt deshalb den fortschreitenden Klimawandel, weil mehr einfallendes Sonnenlicht in den zurückbleibenden schnee- und eisfreien, d. h. dunklen Gebieten, absorbiert wird und zu einer weiteren Erwärmung führt.

Die Alpengletscher sind im Wasserkreislauf eine wichtige Speichergröße, die den Abfluss aus den Hochgebirgsregionen in die Flüsse im Tal reguliert. Noch werden die Hochgebirgsflüsse durch das Abschmelzen der Eisreserven im Sommer gespeist und können deshalb nicht trocken fallen. Sind diese Reserven abgeschmolzen, wird die Wasserführung der Gebirgsflüsse in erster Linie auf das veränderliche Niederschlagsangebot angewiesen sein. Gletscher wirken sich aber nicht nur auf die Niedrigwasserführung der Gebirgsflüsse aus. Überlagern sich Gletscherschmelze und starke Regenfälle, kann es auch zu gefährlichen Hochwasserereignissen kommen.

Gletscher spielen derzeit vor allem für den inneralpinen Wasserkreislauf vergletschter Einzugsgebiete mit > 30 % Vergletscherung eine Rolle. Im Hochsommer, wenn die Schneeschmelze bereits vorbei ist und die Gletscherschmelze ihren Höhepunkt erreicht, kann das Wasser in den Flüssen solcher Gebiete bis über 80 % aus Gletscherschmelzwasser bestehen, z. B. in Vent im Ötztal (Weber et al., 2010). Bereits in Innsbruck (ca. 4 % Vergletscherung des Einzugsgebiets) betrug der über das Jahr gemittelte Beitrag zum Abfluss aus der Gletscherschmelze in der Dekade 1990 bis 2000 nur noch 8 %. Während heißer und trockener Sommermonate kann jedoch der Anteil des Flusswassers im Inn bei Innsbruck zwischen 20 % und 30 % von Gletschern stammen (Weber et al., 2009).

Gletscher wirken als Wasserreserve im Sommer. Das Schmelzwasser

- ergänzt geringe Niederschläge in den Gebirgsflüssen,
- sorgt für ausgeglichene Pegelstände in den Flüssen,
- hält die Temperatur der Gebirgsflüsse auf niedrigem Niveau, was die Gefahr einer Eutrophierung in heißen Sommermonaten verringert und
- führt zu konstanteren Abflussverhältnissen und einer besseren Planbarkeit der Wasserverfügbarkeit, u. a. bei der Wasserkraftnutzung.

Fallen Gletscherschmelze und starke Niederschlagsereignisse im Frühjahr oder Frühsommer zusammen, können sich auch folgende Nachteile und Gefahren ergeben:

- Hochwasserereignisse
- Bedrohung der Fauna der Gebirgsflüsse
- Georisiken, Murenabgänge
- Einschränkung der Wasserkraftnutzung

Bedeutung nichteuropäischer Gletschergebiete im Wasserhaushalt

Während die Bedeutung der Gletscher im Wasserkreislauf der Alpen nur inneralpin eine Rolle spielt, ist sie in anderen Gebirgsregionen wesentlich ausgeprägter. In Zentralasien erhalten ausgedehnte Gebiete während des Sommers kaum Regen. Landwirtschaft, Industrie und Gesellschaft sind auf gespeichertes Wasser angewiesen. Die starke Vergletscherung des Tien Shan und des Pamir tragen dort wesentlich zur sommerlichen Wasserversorgung bei.

Im Zusammenhang mit dem Abschmelzen der Alpengletscher wird häufig auch auf den Anstieg des globalen Meeresspiegels hingewiesen. Das Abschmelzen der großen Eismassen der Antarktis und Grönlands entspräche einem Anstieg des Meeresspiegels um mehr als 60 m. Das Gesamtvolumen der alpinen Gletscher und kleineren Eiskappen weltweit kann nur zu einer Erhöhung des Meeresspiegels um 15 bis 37 cm beitragen (Lemke et al., 2007).

In den letzten 140 Jahren ist der Meeresspiegel um etwa 20 cm angestiegen, wobei sich die Geschwindigkeit des Anstiegs in den letzten 15 Jahren mit 3,1 mm/Jahr beinahe verdoppelt hat (Beckley et al., 2007). Etwas weniger als die Hälfte dieses Anstiegs wird auf das Abschmelzen der Gebirgsgletscher und Eiskappen außerhalb der Polarregionen zurückgeführt. Der Anteil der Alpengletscher spielt dabei eine untergeordnete Rolle (Dyurgerov und Meier, 2005).

Bedeutung der bayerischen Gletscher für den Wasserhaushalt

Das Gesamtvolumen aller bayerischen Gletscher von 9,45 Millionen m³ entspricht etwa der Menge an Wasser, die bei einem mittleren Abfluss innerhalb von 38 Stunden in der Isar durch München fließt. Dies zeigt, dass die bayerischen Gletscher für den Wasserhaushalt von geringer Bedeutung sind. Da der Anteil des Gletscherwassers in der Isar aus der Zugspitzregion stammt und selbst im Sommer nur wenige Promille beträgt, haben die kleinen Gletscher in Bayern keinen signifikanten Einfluss auf den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet.

Das zunehmende Abschmelzen der Gletscher setzt schon seit über 160 Jahren mehr Wasser frei als durch den Niederschlag wieder hinzukommt. Dies bedeutet, dass derzeit die Flüsse im Sommer aufgrund des Gletscherschmelzwassers mehr Wasser führen. Der Einfluss der Gletscher auf die Wasserführung der Flüsse in den Alpen wird durch die fortschreitende Flächenabnahme jedoch kontinuierlich zurückgehen.

5. Gletscher in Bayern heute – eine Bestandsaufnahme



Lage der fünf bayerischen Gletscher



Insgesamt beträgt die Fläche der bayerischen Gletscher derzeit noch etwa 70 ha. Die mittlere Dicke aller Gletscher beträgt 13,5 m, jedoch mit deutlichen Unterschieden zwischen den Gletschern. Daraus ergibt sich ein Gesamtvolumen von 9,45 Mio. m³. In den noch vergletscherten Gebirgsregionen Bayerns ist das Zusammenspiel zwischen hohen Niederschlägen, niedrigen Lufttemperaturen im Sommer und den geographischen Gegebenheiten gerade noch ausreichend für das Vorkommen von Gletschern, obwohl sie unterhalb der klimatischen Schneegrenze liegen (Hagg, 2008). Der fortschreitende Klimawandel wird dieses Zusammenspiel gravierend ändern.

In den bayerischen Alpen gibt es fünf Gletscher:

auf dem **Zugspitzmassiv** (Höhe 2962 m) im Wettersteingebirge

- Nördlicher Schneeferner (Zugspitzplatt)
- Südlicher Schneeferner (Zugspitzplatt)
- Höllentalferner (Nordseite der Zugspitze)

auf dem **Watzmann** (Höhe 2713 m) und **Hochkalter** (Höhe 2607 m) in den Berchtesgadener Alpen:

- Watzmanngletscher (Watzmannkar, östlich des Grates von der Watzmann-Mittelspitze zum Hocheck) und
- Blaueis (Kar nördlich des Hochkalter).

Nach Abschluss der letzten Vermessungsperiode in 2007 und 2009 durch die Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften ergaben sich folgende Flächen und Volumina für Bayerns Gletscher (Tabelle 1):

Flächenmäßig sind der nördliche Schneeferner und der Höllentalferner an der Zugspitze mit weitem Abstand die größten Gletscher in Bayern. Der nördliche Schneeferner beinhaltet trotz vergleichbarer Größe fast doppelt so viel Eis wie der Höllentalferner.

Die anderen drei Gletscher, der südliche Schneeferner, der Watzmanngletscher und das Blaueis, sind wesentlich kleiner und spielen hinsichtlich des Eisvolumens eine untergeordnete Rolle.

Der südliche Schneeferner und der Watzmanngletscher haben in den letzten 5 Jahren stark an Fläche verloren und besitzen schon seit Jahren keine Zone mehr, in der sich der Winterschnee über den Sommer hält (Abb. 5.1).



Abb. 5.1:
Die letzten Eisreserven des aperen südlichen Schneeferners (oben) und des Watzmanngletschers (unten). Am südlichen Schneeferner sieht man links die Schneedepots der Zugspitzbahn AG. Der restliche Gletscher ist in den letzten Jahren schon Mitte des Sommers schneefrei.

Volumina der bayerischen Gletscher (2007):

	Volumen (Mio m ³)	mittl. Dicke (m)	max. Dicke (m)
Nördlicher Schneeferner	5,16	16,8	52
Südlicher Schneeferner	0,4	4,6	16
Höllentalferner	2,9	11,7	48
Watzmanngletscher	0,6	5,9	16
Blaueis	0,4	3,8	13

Tabelle 1:
Übersicht zu charakteristischen Größen der bayerischen Gletscher.

Flächen der bayerischen Gletscher (2009):

	Fläche (ha)	höchster Punkt (m)	tiefster Punkt (m)
Nördlicher Schneeferner	27,8	2 792	2 556
Südlicher Schneeferner	4,8	2 665	2 557
Höllentalferner	24,7	2 569	2 203
Watzmanngletscher	5,6	2 119	1 998
Blaueis	7,5	2 368	1 937



Abb. 5.2 (oben): Der nördliche Schneeferner im Jahr 2009. Im oberen Bereich ist ein Teil des Gletschereises durch Geröll vom Schneefernerkopf bedeckt. Deutlich ist die Muldenform der umgebenden Topographie zu erkennen.



Abb. 5.3: Das Spaltengebiet im mittleren Bereich des Höllentalferners.

Der nördliche Schneeferner auf dem Zugspitzplatt (Abb. 5.2) ist der größte und höchstgelegene Gletscher in Bayern. Er entstand nach der Abtrennung des östlichen Teils des Plattachferners und besetzt heute eine Karmulde unterhalb des Schneefernerkopfes. Aufgrund der Lage direkt östlich des Grates zwischen Zugspitze und Schneefernerkopf treten dort sehr hohe Niederschläge auf, die ursprünglich die Ursache für die Ausbildung des Gletschers waren.

Der nördliche Schneeferner sieht, wie es der Name bereits andeutet, eher wie ein großes Schneefeld aus, wogegen der Höllentalferner die typischen Merkmale eines Gletschers zeigt, d. h. Eisbewegung, Spalten und getrenntes Akkumulations- und Ablationsgebiet.

Im Gegensatz zu allen anderen Gletschern besitzt er eine ausgeprägte Zunge und ein relativ stabiles Akkumulationsgebiet; er weist im mittleren Bereich auch noch eine Spaltenzone auf, die für unerfahrene Bergsteiger durchaus gefährlich sein kann (Abb. 5.3).

Seit 1979 schmilzt der nördliche Schneeferner wie alle bayerischen Gletscher kontinuierlich zurück. In den letzten Jahren wird der Massenverlust aber hauptsächlich durch eine Verminderung der Eisdicke sichtbar. Aufgrund seiner Muldenlage führt ein Abschmelzen der Ränder zwar zu einem Einsinken des Gletschers, aber nur mit geringen Flächenänderungen. Mit knapp 50 m maximaler Eisdicke ist der nördliche Schneeferner auch der Gletscher mit den größten Eisreserven.



Der südliche Schneeferner war kurz nach dem Zerfall des Plattachferners der größte Gletscher in Bayern. Da die Topographie des Untergrundes nicht so günstig ist, wie am nördlichen Schneeferner (keine ausgeprägte Muldenlage), verfügt er über deutlich geringere Eisdicken.

Der südliche Schneeferner erlitt den größten Flächenverlust aller bayerischen Gletscher und bedeckt heute nur noch eine Fläche von weniger als 5 ha (Abb. 5.4).

Abb. 5.4:
Der südliche Schneeferner im Jahr 2005. Der Gletscher füllt nur noch eine kleine Karmulde direkt unterhalb des Grates aus. Die benachbarten Rinnen sind durch Schneefelder bedeckt.



Abb. 5.5:

Der Höllentalferner im Jahr 2010.

Die Zunge des Gletschers ist auf beiden Seiten mit Schutt bedeckt, so dass das Eis nur im mittleren Bereich zu erkennen ist. Dort wird es von tiefen Schmelzwasserrinnen durchzogen. Der obere Bereich des Gletschers liegt fast den ganzen Tag im Schatten und erhält im Winter große Mengen an Lawinschnee.

Der Höllentalferner liegt in einer tiefen Senke nördlich des Zugspitzgipfels und wird nach Süden hin von mehr als 300 m hohen Felswänden beschattet (Abb. 5.5). Auch nach Westen und Nordwesten ist der Gletscher von hohen Felswänden eingerahmt, durch die ein Klettersteig auf die Zugspitze führt. Die geschützte Lage und das hohe Niederschlagsaufkommen tragen dazu bei, dass der heute zweitgrößte Gletscher in den Bayerischen Alpen, etwa 300 m tiefer als der nördliche Schneeferner gelegen, noch existiert.

Der Höllentalferner ist der einzige Gletscher, der noch über eine echte Gletscherzunge verfügt und im oberen Bereich einen Schneezuwachs aufweist. Ein wesentlicher Teil der Akkumulation im oberen Teil des Gletschers stammt von Lawinenabgängen aus der Felsumrahmung. Die steile Topographie und der ausgeprägte Massenumsatz führen zu einer deutlichen Gletscherbewegung, die sich an einer Stufe des Untergrundes im mittleren Teil des Gletschers in einigen großen Spalten zeigt. Im Gletschervorfeld des Höllentalfernens ist wie an keinem anderen Gletscher in Bayern die neuzeitliche Geschichte der Gletschervorstöße zu erkennen. Moränenwälle zeugen von den Hochständen des Gletschers um 1820, 1850, 1920 und dem letzten kurzen Vorstoß, der etwa 1980 endete.



Abb. 5.6 (oben):
Der Watzmann.



Abb. 5.7:
Der Watzmanngletscher im
Jahr 2006. Der Gletscher ist schon
weit in die Karmulde hinein
abgeschmolzen. Die Altschneereste
im oberen (rechten) Gletscher-
bereich sind in den letzten Jahren
verschwunden, so dass der
Gletscher Masse verloren hat.

Der Watzmanngletscher östlich der Mittelspitze des Watzmanns (Abb. 5.6) ist mit einer mittleren Höhe von nur 2060 m über dem Meer der tiefstgelegene Gletscher in Bayern.

Alle bisherigen Beobachtungen belegen, dass der Watzmanngletscher deutlicher als die anderen Gletscher auf klimatische Veränderungen reagiert. Während alle anderen Gletscher in der Periode von 1949 bis 1959 noch erheblich an Masse verloren, zeigte der Watzmanngletscher bereits einen Zuwachs. Der Gletscher hat bis etwa 1980 den größten Zuwachs aller bayerischen Gletscher verzeichnet und ist damals deutlich vorgestoßen.

Die Wärmeperiode in den 1940er-Jahren führte dazu, dass der Gletscher in einzelne Firnflecken zerfiel und nicht mehr als Gletscher wahrgenommen wurde. Dieses Schicksal steht dem Gletscher auch heute wieder unmittelbar bevor (Abb. 5.7).



Abb. 5.8:
Das Blaueis im Jahr 2007.
Der obere steile Bereich des
Gletschers ist von der ehemaligen
Gletscherzunge im flachen Grund
getrennt. Der untere Bereich ist
heute weitgehend von einer
dünnen Schuttschicht bedeckt.

Das Blaueis ist in einen tiefen Einschnitt nördlich des Gipfels des Hochkalter eingebettet (Abb. 5.8). Dieser Gletscher ist gleichzeitig der nördlichste und jener mit der tiefsten Gletscherzunge in Bayern. Durch seine Lage ist er fast das gesamte Jahr weitgehend vor Sonneneinstrahlung geschützt, während die steilen Felswände große Mengen an Lawinenschnee auf den Gletscher transportieren.

Die erste topographische Aufnahme des Gletschers stammt von Anton Waltenberger aus dem Jahr 1889. Zur Zeit der Maximalausdehnung, um 1820, bedeckte das Blaueis etwa 25 ha. Heute dagegen sind es nur noch 7,5 ha. Das Blaueis gliedert sich in einen sehr steilen oberen Bereich und eine deutlich flachere Zunge. Diese beiden Teile hingen bis vor wenigen Jahren noch zusammen.

Das Blaueis besteht heute aus zwei Teilen und besitzt im Mittel über die Gletscherfläche die geringste Eisdicke von nur noch knapp 4 m. Die Aufteilung des Gletschers führt dazu, dass zwei sehr unterschiedliche Eiskörper existieren. Weil der ehemalige Zungenbereich keinen Nachschub mehr aus dem höheren Becken erhält und gleichzeitig auf einer sehr niedrigen Meereshöhe liegt, sind die Massenbilanzverhältnisse sehr ungünstig. Der obere Bereich hingegen liegt – sehr gut vor Sonneneinstrahlung geschützt – wesentlich höher und erhält durch Lawinen aus den darüber liegenden Felswänden im Winter reichlich Schnee.

6. Entwicklung der Gletscher in Bayern

Historische Aufzeichnungen seit dem 18. Jahrhundert

Die vermutlich erste kartographische Darstellung eines Gletschers in Bayern stammt aus dem Jahre 1774. Auf einem Kartenblatt des Atlas Tyroliensis ist der „Plattacher Ferner“ auf dem Zugspitzplatt vermerkt. Zu dieser Zeit erstreckte sich die Vergletscherung über die gesamte Hochfläche, also über den heute nördlichen und südlichen Schneeferner. Dieser Gletscher war mit einer Fläche von etwa 300 Hektar der mit Abstand größte Gletscher in Bayern (Finsterwalder, 1951). Im Vergleich zu einer heutigen Gesamtfläche aller bayerischen Gletscher von etwa 70 ha ist das eine ansehnliche Größe.

Im Jahr 1820 wurde das Zugspitzplatt dann von Josef Naus erstmals im Detail kartiert und der noch zusammenhängende Plattacher Ferner vermessen (Abb. 6.1). Anlässlich dieser Vermessung wurde die Zugspitze vermutlich das erste Mal bestiegen. Wie in den meisten Gebieten der Alpen war auch hier die maximale Ausdehnung der Gletscher in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts erreicht. Je nach Literaturquelle war dies zwischen 1820 (Hirtreiter, 1992) und 1856 (Finsterwalder, 1951).

Erst 72 Jahre nach der ersten Vermessung, im Jahr 1892, erfolgte die erste vollständige Aufnahme aller Gletscher in Bayern. Im Wettersteingebirge und in den Berchtesgadener Alpen erfolgte dies durch Sebastian Finsterwalder (Finsterwalder, 1896). Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Plattacher Ferner kurz vor seiner Aufspaltung in zwei getrennte Gletscher (Abb. 6.2); die Eiskapelle am Fuße der Watzmann-Ostwand bildete noch einen kleinen eigenständigen Gletscher (Abb. 6.3).

Im Zeitraum zwischen 1920 und 1950 schmolzen alle Gletscher in Bayern weiter ab. Auf dem Zugspitzplatt bildeten sich schließlich drei Gletscher heraus, von denen der östliche Überrest des alten Plattachferners inzwischen auch verschwunden ist. Die Eiskapelle verlor damals bereits ihre Gletscherzunge. Sie ist heute nur noch ein von Lawinen gespeistes Schneefeld.



Abb. 6.1 (oben): Kartographische Darstellung der ersten, nicht maßstabsgetreuen Vermessung des Zugspitzplatts im Jahre 1820. Auf dem Zugspitzplatt ist der ausgedehnte Plattacher Ferner zu erkennen (max. Breite etwa zwei Kilometer).



Abb. 6.2: Der Gletscher auf dem Zugspitzplatt kurz vor seiner Aufspaltung in zwei Teile. Aufnahme von 1875. (Waltenberger, 1882)



Abb. 6.3: Ausschnitt des Watzmann Gletschers aus der Originalaufnahme des Topographischen Bureaus von 1897 (Breite des Gletschers etwa 500 Meter).

Anfang der 1950er Jahre begann die regelmäßige Untersuchung und Vermessung aller bayerischen Gletscher, die inzwischen im 10-Jahres-Abstand von der Kommission für Erdmessung und Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München durchgeführt wird (Escher-Vetter & Rentsch, 1994; www.glaziologie.de).

Es existiert heute eine mehr als 60-jährige Zeitreihe der Gletscherentwicklung in den Bayerischen Alpen. Die Beobachtungen am Schneeferner dokumentieren sogar die Gletscherentwicklung auf dem Zugspitzplatt während der letzten 120 Jahre. Berücksichtigt man die historischen Kartierungen der Berchtesgadener Gletscher, kann auch dort die Veränderung der Gletscher seit Ende des 19. Jahrhunderts nachvollzogen werden.

Entwicklung der Gletscherflächen in Bayern

Die Veränderung der Gletscherflächen spiegelt, insbesondere bei ausgedehnten Gletscherzungen, sehr gut längerfristige klimatische Entwicklungen wider.

Die Rekonstruktion der maximalen Gletscherflächen in Bayern während der letzten Jahrhunderte erfolgt durch Vermessung von Endmoränen, z. B. bei Burghausen, Memmingen, Kaufbeuren oder in der Nähe des Chiemsees. Endmoränen sind die Zeitzeugen vergangener Gletscherausdehnungen, weil sie während eines Vorstoßes eingeschlossenes und an der Oberfläche befindliches Geröll zum Zungenende des Gletschers transportieren. Dort wird es durch Ausschmelzen deponiert und bildet die Endmoräne. Schmilzt ein Gletscher, bleibt dieses Moränenmaterial zurück und markiert die Ausdehnung des vorhergehenden Vorstoßes.

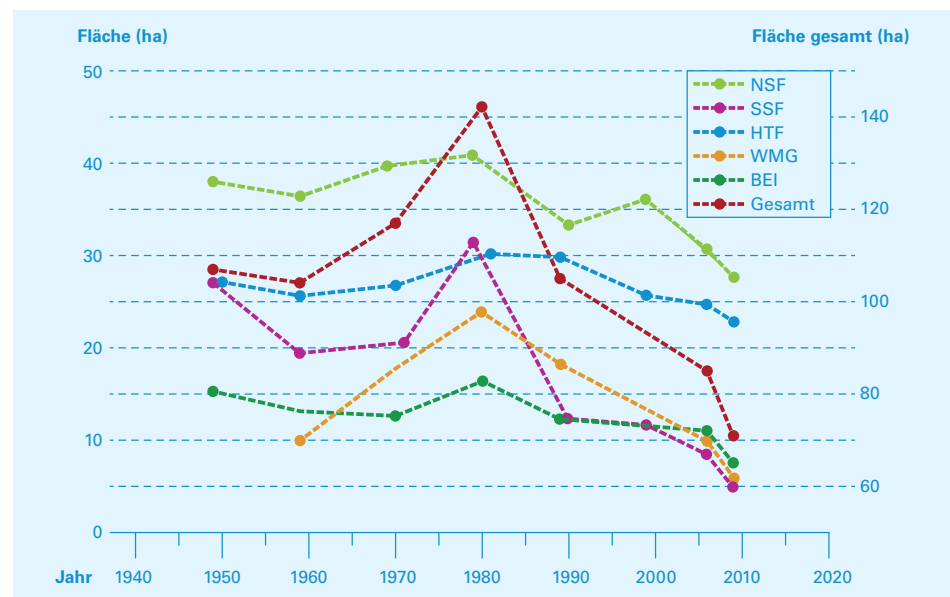
Die bayerischen Gletscher wiesen **um 1850** noch eine Fläche von etwas mehr als vier Quadratkilometer auf, wobei der damals noch zusammenhängende Gletscher auf dem Zugspitzplatt mit 75% den größten Anteil an der Gesamtfläche hatte. In der Abbildung 6.4 ist die Entwicklung der Gletscherflächen in Bayern seit 1950 dargestellt. Es lässt sich ablesen, dass:

- **Ende der 1950er Jahre** die Gesamtfläche der bayerischen Gletscher etwa einen Quadratkilometer erreichte;
- **von Ende der 1950er Jahre bis 1980** die gesamte Gletscherfläche um ca. 30% zunahm. Die bayerischen Gletscher dehnten sich jedoch mit unterschiedlicher Ausprägung aus: so zeigt das Blaueis (grüne Linie in Abb. 6.4) diese Flächenzunahme verzögert erst nach 1970, während der Watzmanngletscher (schwarze Linie in Abb. 6.4) seine Fläche in diesem Zeitraum mehr als verdoppelt hat;
- sich **seit etwa 1980** die Gletscherflächen in Bayern aufgrund des Klimawandels dramatisch verringert haben. Der südliche Schneeferner verlor 84% seiner Fläche. Der nördliche Schneeferner (-32%) und der Höllentalferner (-18%) mussten dagegen moderate Flächenverluste hinnehmen;
- **seit etwa 2000** der Flächenverlust aller bayerischen Gletscher eine rapide, klimabedingte Beschleunigung erfahren hat, der einzig der Höllentalferner aufgrund seiner Muldenlage noch widerstehen kann.

Bilanz:

Die Gesamtfläche der bayerischen Gletscher betrug im Jahr 2009 noch 71 Hektar.

Abb. 6.4:
Entwicklung der Gletscherflächen in Bayern seit Mitte des 20. Jahrhunderts. Der Zeitpunkt der Messungen an den einzelnen Gletschern ist mit Punkten markiert (wobei:
NSF = nördlicher Schneeferner
SSF = südlicher Schneeferner
HTF = Höllentalferner
WMG = Watzmanngletscher
BEI = Blaueis).



Entwicklung der Eisdicke der bayerischen Gletscher

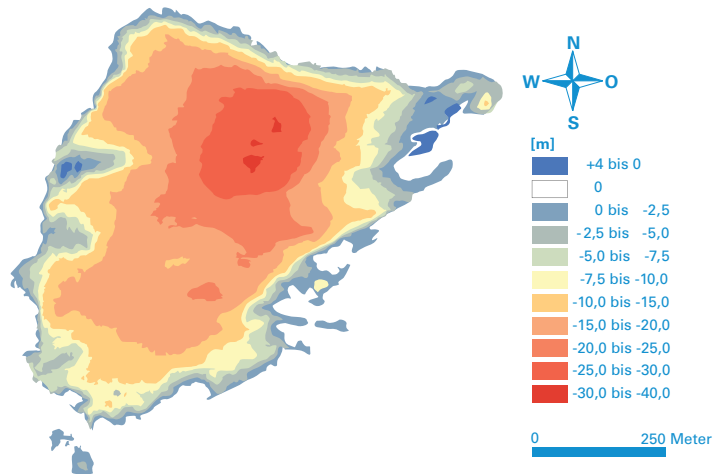
Die Reaktionen der Gletscher auf klimatische Veränderungen zeigen sich nicht nur in der Veränderung der Gletscherflächen, sondern auch in der Mächtigkeit des „ewigen Eises“ bzw. in der Veränderung dessen mittlerer Oberflächenhöhe. Gewinnt ein Gletscher an Eismasse, so wächst die Höhe an, während sie bei einem Massenverlust abnimmt. Dies ist ein Grund, weshalb die Bestimmung der Höhenänderung mehr Aussagekraft in der Gletscherforschung hat, als die reine Beobachtung der Flächenänderung.

Die Höhendifferenzen aller bayerischen Gletscher werden in mehrjährigem Abstand erfasst. Detaillierte Aufnahmen der Gletschertopographie oder schwierige, kontinuierliche Messungen sind dazu notwendig. In der Abbildung 6.5 sind Auswertungen der Höhenmessungen an bayerischen Gletschern in einer Übersicht im Zeitraum von ca. 1950 bis 2009 dargestellt.

Die Eisdickenverteilung des **nördlichen Schneeferners**, des **Watzmanngletschers** und des **Höllentalferners** ist relativ gleichmäßig, da sich die Gletscher seit Mitte des 20. Jahrhunderts in einer Muldenlage befinden. Die Entwicklung der Eisdickenverluste ist für diese drei Gletscher ähnlich. Der Höllentalferner besitzt noch eine ausgeprägte Zunge, an der die höchsten Eisdickeverluste auftreten, während in seiner stabilen Akkumulationszone nur geringe Dickenänderungen stattfinden.

Die größten Eisdickenverluste für die drei Gletscher wurden in der wärmsten Dekade von 1999 bis 2009 beobachtet – der Trend ist stetig zunehmend (Abb. 6.6).

Eisdickenabnahme 1976 bis 2006
Nördlicher Schneeferner



Eisdickenabnahme 1981 bis 2010
Höllentalferner

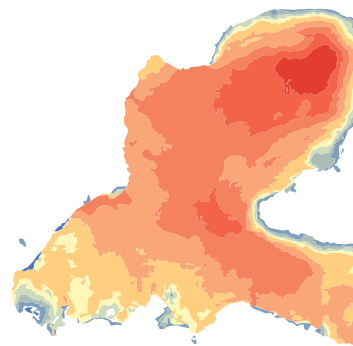


Abb. 6.6:
Vergleich der Eisdickenänderung der beiden größten bayerischen Gletscher, nördlicher Schneeferner (oben) und Höllentalferner (unten), für vergleichbare Zeiträume. Beide Gletscher haben in den letzten 30 Jahren maximal über 30 m Eis verloren. Im Mittel über die Gletscherfläche sind es bei beiden Gletschern etwa 18 m Eisdickenabnahme.

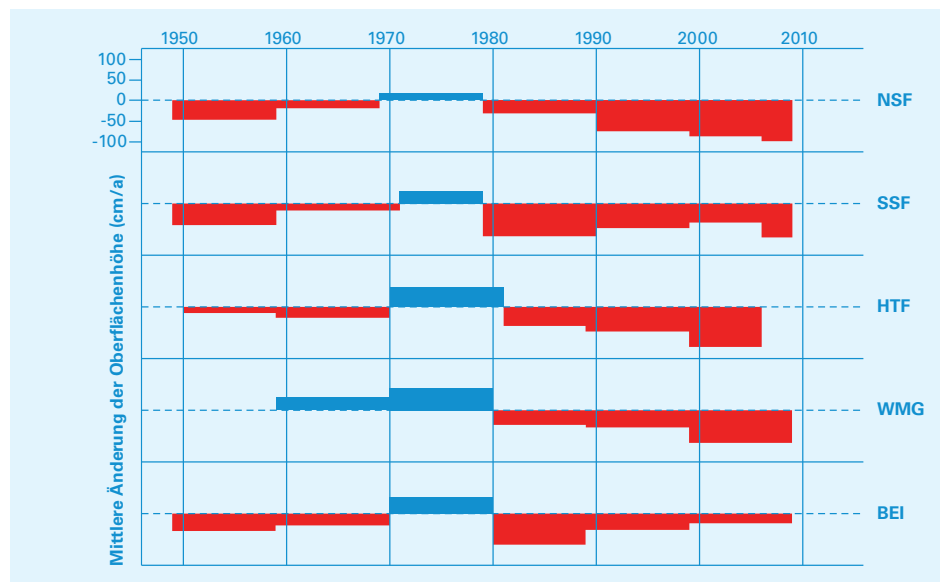


Abb. 6.5:
Die mittleren Höhenänderungen der bayerischen Gletscher während der letzten sechs Jahrzehnte (Mayr, 2010). Abgesehen von der leichten Zunahme der Eisdicken im Zeitraum von 1970 bis 1980, zeigten alle Gletscher einen Massenverlust, (wobei:
NSF = nördlicher Schneeferner
SSF = südlicher Schneeferner
HTF = Höllentalferner
WMG = Watzmanngletscher
BEI = Blauais).

Am Beispiel des nördlichen Schneeferners zeigt sich, dass vor allem der Bereich des Eises mit mehr als 30 m Dicke deutlich zurückgegangen ist (Abb. 6.7). Der Bereich mit mehr als 50 m dickem Eis ist verschwunden. Trotz dieses massiven Eisverlustes hat sich die Gletscherfläche nicht wesentlich geändert. Der mittlere Eisdickenverlust von etwa 6 m in diesen 7 Jahren hat aber dazu geführt, dass nun ein großer Bereich des Gletschers weniger als 15 m dick ist. Sollten die klimatischen Verhältnisse in den nächsten 10 Jahren ähnlich sein wie heute, wird der nördliche Schneeferner einen erheblichen Flächenverlust erfahren.

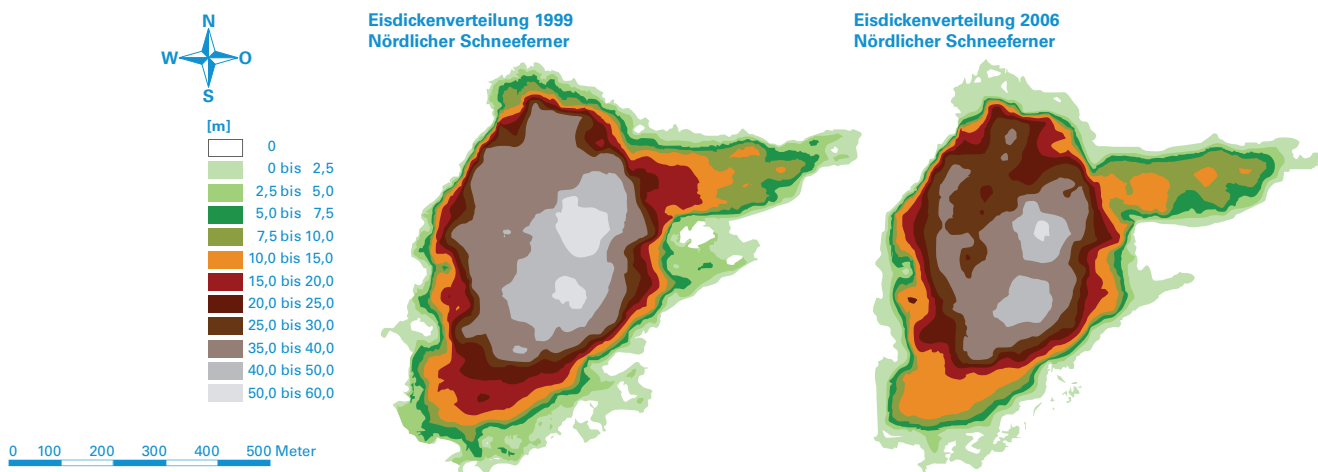


Abb. 6.7:
Vergleich der Eisdickenverteilung
des nördlichen Schneeferners von
1999 (links) und 2006 (rechts).
(Heilig et al., 2010)

Das sehr raue Gelände um den **südlichen Schneeferner** füllte sich in den 1970er Jahren mit Schnee und es bildete sich eine ausgedehnte, aber dünne Eisdecke aus. Diese verschwand schon in den darauffolgenden Jahren, was sich in einem erheblichem Flächenverlust widerspiegelt. In den Jahren zwischen 1989 und 2006 waren es dann vorwiegend die dünneren Randbereiche des Gletschers, die vollständig verschwanden. Seit 2006 ist der Gletscher auf den Bereich der oberen Karmulde begrenzt und das flächenhafte Abschmelzen dieses mächtigen Eiskörpers weist vergleichbare Werte wie am nördlichen Schneeferner und am Höllentalferner auf.

Die Eisdicke am **Blaueis** nimmt seit ca. 1990 weniger stark ab, weil durch das starke Schmelzen zwischen 1980 und 1989 mehr Moränenmaterial im tieferen Bereich des Gletschers auf die Oberfläche gebracht wurde. Dieses schützt den Gletscher vor Sonneneinstrahlung, sobald es einige Zentimeter dick ist. Hier muss jedoch zwischen oberem und unterem Gletscherbereich unterschieden werden: Während die Eisdicken des unteren Gletscherteils bereits sehr gering sind, weist der obere Teil des Gletschers durch seine geschützte Muldenlage nur geringe Mächtigkeitsänderungen auf.

Bilanz:

Während der vergangenen drei Jahrzehnte (seit ca. 1980) nimmt die Eisdicke aller bayerischen Gletscher kontinuierlich ab. Die absoluten Dickenverluste des Eises sind jedoch von Gletscher zu Gletscher entsprechend der lagebedingten Situation unterschiedlich.

Die bayerischen Gletscher konnten nur wegen ihrer überwiegend geschützten Lagen in Gebieten mit außergewöhnlich hoher Akkumulation (Niederschlag als Schnee oder Lawineneintrag) bis heute überdauern.

Alle Gletscher in Bayern wiesen in den letzten 30 Jahren negative Massenbilanzen auf. Es ist daher anzunehmen, dass das Abschmelzen mit der zu erwartenden Klimaentwicklung weiter voranschreiten wird.

Die **Berchtesgadener Gletscher** liegen auf einer sehr geringen Meereshöhe und die Abschmelzvorgänge sind bereits deutlich sichtbar. Der untere Teil des Blauaises und der Watzmanngletscher werden in den nächsten Jahren verschwinden. Die maximalen Mächtigkeiten dieser beiden Eiskörper lagen 2007 noch bei etwa 15 m (Abb. 6.8). Bei einem derzeitigen Eisverlust von etwa 1 m pro Jahr könnten selbst bei gleichbleibenden klimatischen Bedingungen beide Eiskörper bis 2020 nahezu verschwunden sein. Die zunehmende Schuttauflage auf dem unteren Teil des Blauaises wird diesen Zeitpunkt höchstens um wenige Jahre hinauszögern. Der obere Teil des Blauaises besitzt wesentlich günstigere Akkumulationsbedingungen und weist durch die höhere Lage und die starke Schattenlage auch geringere Schmelzraten auf. Daher kann erwartet werden, dass dieser Gletscherteil noch längere Zeit überdauern wird.

An der **Zugspitze** ist vor allem der südliche Schneeferner von einem völligen Abschmelzen bedroht. In den letzten Jahren wurden keine Altschneereste am Ende des Sommers mehr beobachtet. Dies und das Fehlen eines Firnkörpers deuten darauf hin, dass der Gletscher sein Akkumulationsgebiet schon seit Längerem verloren hat. Daher wird voraussichtlich auch dieser Gletscher in den nächsten 10 bis 15 Jahren bis auf wenige Eisreste abgeschmolzen sein.

Die derzeitige teilweise Abdeckung des Gletschers durch die Zugspitzbahn AG zur Sicherung der Liftstützen wird nach dem Neubau des Sesselliftes 2012 eingestellt. Der bisher damit verbundene Effekt niedrigerer Schmelzraten war nur auf einen sehr kleinen Bereich beschränkt und hat, genauso wie am nördlichen Schneeferner, keinen Einfluss auf die Entwicklung des Gesamtgletschers.

Eisdickenverteilung 2007
Watzmanngletscher

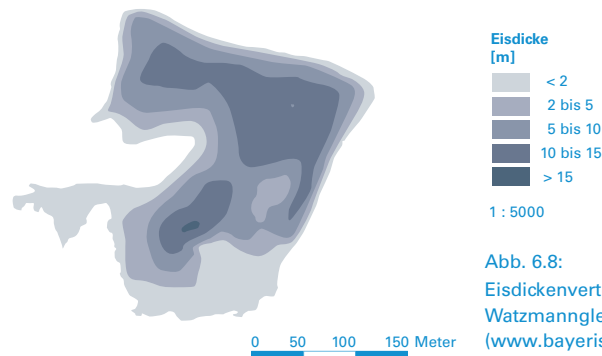
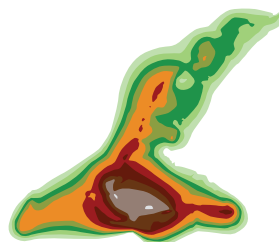


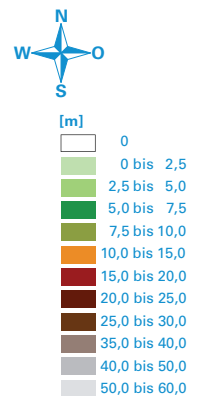
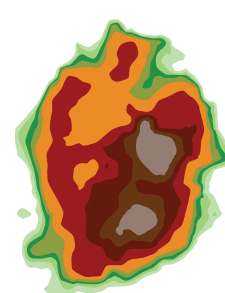
Abb. 6.8:
Eisdickenverteilung des
Watzmanngletschers 2007.
(www.bayerische-gletscher.de)

Im Gegensatz zu den kleineren Gletschern haben der **nördliche Schneeferner** und der **Höllentalferner** bessere Bedingungen für eine längere Überlebensdauer (Abb. 6.9). Dies liegt einerseits an dem weitaus größeren Eisvolumen der beiden Gletscher, andererseits aber auch an ihrer Lage. Der nördliche Schneeferner liegt etwa 400 m höher als die Gletscher in den Berchtesgadener Alpen. Die relativ offene Exposition Richtung Osten begünstigt das weitere Abschmelzen.

Gletscherentwicklung 2020
Höllentalferner



Gletscherentwicklung 2020
Nördlicher Schneeferner



0 100 200 300 400 500 Meter

Der **Höllentalferner** erhält durch seine Lage etwa 22% mehr Akkumulation als der nördliche Schneeferner und ist zudem durch die Ausrichtung gegen Nordosten und die hohen Felswände sehr gut gegen Sonneneinstrahlung geschützt. Aufgrund dieser Situation wird vermutlich der Höllentalferner auch der letzte verbleibende Gletscher in Bayern sein.

Eine Prognose für das Jahr 2020 für beide Gletscher auf der Grundlage der Entwicklung der letzten zehn Jahre (gleichbleibende klimatische Bedingungen) zeigt, dass der nördliche Schneeferner seine jetzt schon unbedeutende Zunge verlieren wird und die maximalen Eisdicken auf etwas über 30 m reduziert werden. Der Höllentalferner zeigt im Verhältnis weniger Verluste und behält noch einen Großteil seiner Zunge. Auch hier werden die Eisdicken deutlich abnehmen, die maximalen Eisdicken aber vermutlich über denen des nördlichen Schneeferners liegen.

Abb. 6.9:
Gletscherentwicklung bis 2020 für
den nördlichen Schneeferner (rechts)
und den Höllentalferner (links).
Zu sehen ist die resultierende Eis-
dickenverteilung. Beide Gletscher
verlieren deutlich an Volumen
und Fläche, bleiben ihrem Charakter
nach aber erhalten.

7. Ein Blick nach Europa: Haben die Gletscher der Alpen eine Zukunft?

Alpengletscher im Überblick

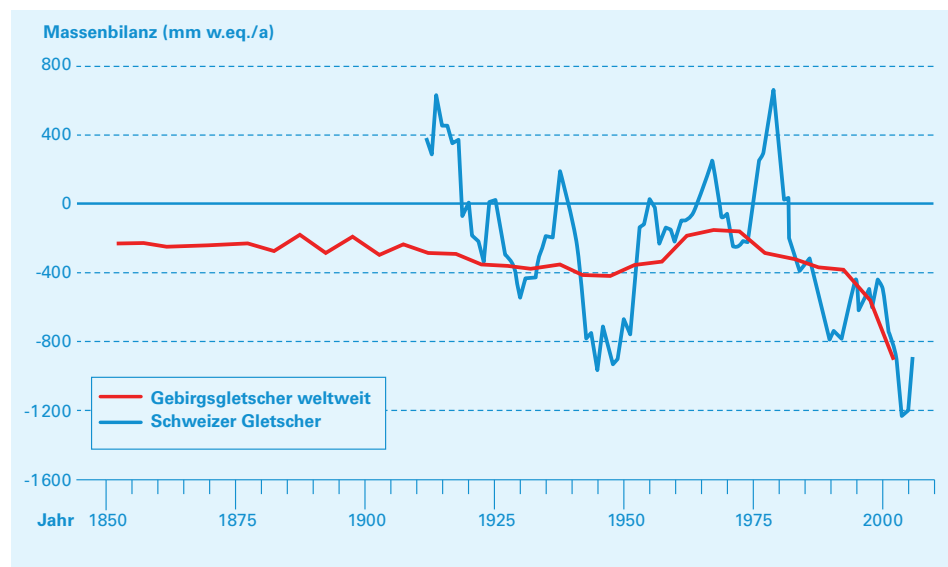
Die Hochgebirgsregionen der Alpen sind seit dem Ende der letzten Kaltzeit vor etwa 10000 Jahren das einzige Gebiet in Mitteleuropa, das noch immer deutlich von Gletschern geprägt wird. Insgesamt gab es 1973 etwa 5200 Gletscher in den Alpen, die eine Gesamtfläche von 2900 km² einnahmen (Haeberli et al., 1989). Eine Abschätzung für das Jahr 2000, berechnet aus den gemessenen Veränderungen der Schweizer Gletscher, ergibt eine Gesamtfläche von etwa 2270 km² (Zemp et al., 2007). Dies bedeutet einen Flächenverlust von knapp 22 % in Bezug auf 1973. Gegenüber dem letzten Gletscher-Hochstand um 1850, mit einer Gletscher-Gesamtfläche von rund 4500 km² ist sogar ein Rückgang um 50 % zu beobachten.

Diese Veränderung der Eismassen in den Alpen verläuft nicht gleichmäßig. Allein schon aus den zwei Zeiträumen zwischen 1850 bis 1973 und 1973 bis 2000 zeigt sich, dass die mittleren Flächenverluste von 0,29 % pro Jahr zwischen 1850 und 1973 auf 0,82 % pro Jahr zwischen 1973 und 2000 anstiegen. Betrachtet man die Verteilung des Gletschereises in den Alpen, so stellt sich heraus, dass 82 % der Gletscher kleiner als 0,5 km² sind. Diese Gletscher stellen aber nur 21 % der gesamten Gletscherfläche dar, während die sieben größten Gletscher zusammen bereits 10 % der Gesamtfläche bedecken (Zemp et al., 2007).

Aus der Gletscherausdehnung und dem gemessenen Volumen einzelner Gletscher kann auf das Gesamtvolumen der Alpengletscher geschlossen werden. Diese Abschätzung zeigt, dass das Eisvolumen aller Gletscher in den Alpen von etwa 100 km³ in 1970 bis 1999 um 25 % abgenommen hat und damit nur noch 75 km³ beträgt (Paul et al., 2004). Dies bedeutet auch, dass in den drei letzten Dekaden des 20. Jahrhunderts 25 km³ Wasser zusätzlich zum normalen Abfluss in den Alpenflüssen transportiert wurden und dies vorwiegend während der heißen Sommermonate.

Regelmäßige quantitative Untersuchungen zur Massenveränderung von Gletschern gibt es erst seit etwa 60 Jahren (Zemp et al., 2007). Die Mehrzahl der Messungen erfolgte in den Alpen. Aus der Rekonstruktion der Massenveränderungen kann die zeitliche Entwicklung der Gletscher bis zum Ende der kleinen Eiszeit, Mitte des 19. Jahrhunderts, beurteilt werden (Cogley et al., 2009). Berücksichtigt man alle Gebirgsgletscher weltweit, dann war der Massenumsatz in den letzten 160 Jahren negativ, d. h. die Eismasse der Gletscher hat sich verringert (Abb. 7.1).

Abb. 7.1: Vergleich der Massenänderung von Gebirgsgletschern weltweit (Cogley et al., 2009) mit einer Auswahl von 30 Gletschern in der Schweiz (Huss et al., 2010). Die Änderung der Gletschermasse ist als Höhe einer Wassersäule gemittelt über die Gletscherfläche angegeben, wobei die Werte jeweils über fünf Jahre gemittelt sind. Ein Wert von -500 bedeutet damit einen Verlust von einer gleichmäßigen Wasserschicht von 500 mm über dem gesamten Gletscher in einem Jahr.



Schweizer Alpengletscher

Eine Auswahl von 30 Schweizer Gletschern zeigt trotz der starken Fluktuation einen vergleichbaren Trend (Huss et al., 2010). In den Schweizer Alpen sind Phasen mit Massenzuwächsen zwischen 1912 und 1918, um 1967 und in der zweiten Hälfte der 1970er Jahre zu beobachten. Seit 1982 werden auch für diese Auswahl an Schweizer Gletschern nur noch Massenverluste gemessen. Ein Vergleich mit den Sommertemperaturen (jeweils gemittelt über 11 Jahre und im Vergleich zu der mittleren Sommertemperatur 1960 bis 1990; Auer et al., 2007) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Massenveränderungen der ausgewählten Schweizer Gletscher (Abb. 7.2).

Die jeweiligen kälteren Zyklen der Sommertemperaturen (etwa 1910 bis 1920) weisen einen Massenzuwachs der Gletscher auf, während in den wärmeren Phasen (z. B. 1940er Jahre) die Gletscher an Masse verlieren. Sehr deutlich wird dieser Trend in der Zeit nach 1980 mit einer stetigen Zunahme der Temperatur und deutlich negativen Gletscher-Massenbilanzen.

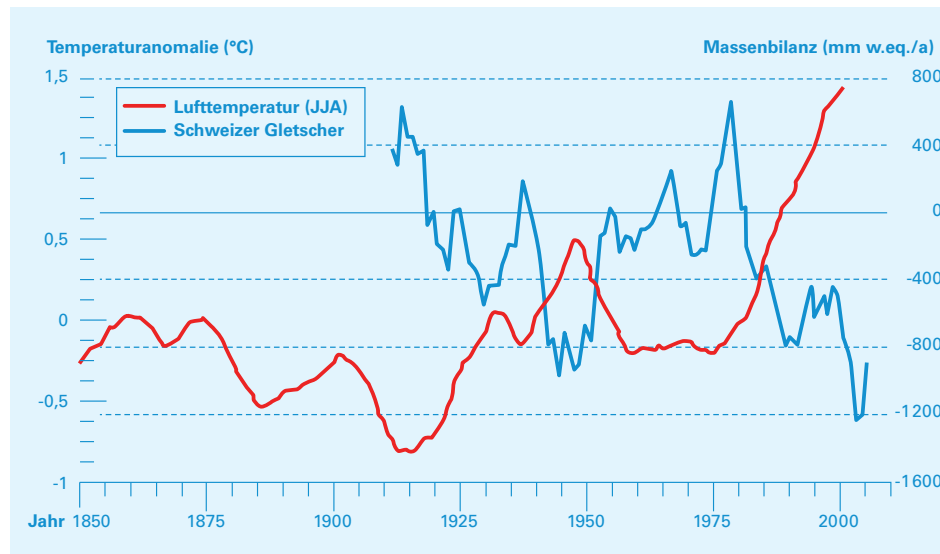


Abb. 7.2: Abweichung der sommerlichen Lufttemperatur (Juni–August, 11-jähriges gleitendes Mittel) vom langjährigen Mittelwert (1961 bis 1990), berechnet aus homogenisierten Daten über den Alpenraum (Auer et al., 2007).

Dazu im Vergleich die Entwicklung der ausgewählten Schweizer Gletscher (Huss et al., 2010).

Österreichische Alpengletscher

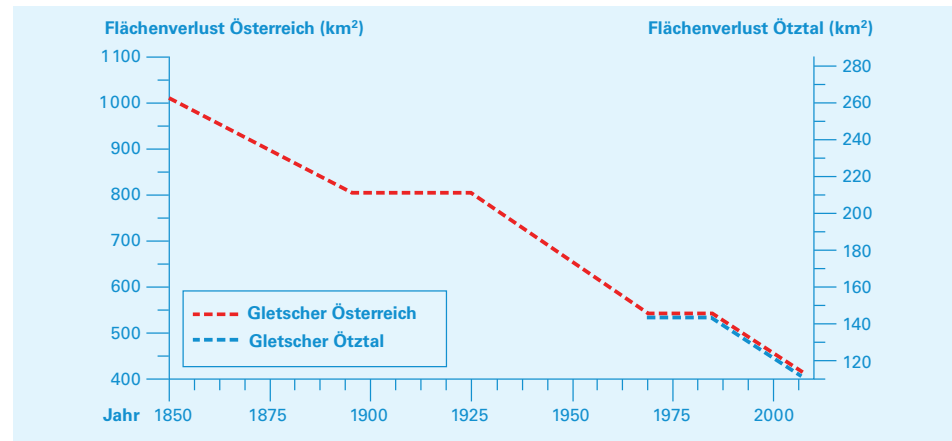
In den Ostalpen stellen die Gletscher Österreichs den mit Abstand größten Anteil. Bezogen auf die Gletscherfläche beträgt der österreichische Anteil an den Alpengletschern etwa 18 % (Zemp et al. 2007).

Neben kleineren vergletscherten Gebieten sind vor allem die Eisgebiete der Ötztaler, der Stubai und der Zillertaler Alpen in Tirol bekannt sowie die Venedigergruppe und die Hohen Tauern, die sich über Tirol, Salzburg und Kärnten ausdehnen. Diese Gebirgsgruppen repräsentieren zusammen etwa 85 % der gesamten Gletscherfläche in Österreich. Zum Zeitpunkt des letzten vollständigen Gletscherinventars in Österreich (1998) betrug die Gesamtfläche der Gletscher 471 km² (Lambrecht & Kuhn, 2007). Dies entspricht in etwa der Fläche, welche die Alpengletscher in den Jahren 1970 bis 2000 verloren haben, obwohl in diese Periode auch der alpenweite Vorstoß Ende der 1970er Jahre fällt.

Gegen Ende der letzten Kaltzeit vor etwa 14 000 Jahren schmolzen die mächtigen Auslassgletscher wie etwa der Inntalgletscher, der bis weit über Rosenheim nach Norden reichte, innerhalb weniger tausend Jahre ab. Nur die Gletscher in den Hochgebirgsregionen konnten sich halten und bedeckten vor etwa 9 500 Jahren ungefähr eine ähnliche Fläche wie auch vor 160 Jahren (Gross, 1987).

Nach einer mittelalterlichen Warmphase setzte eine mehrere Jahrhunderte dauernde Periode gletschergünstigen Klimas ein, die mit diesem neuzeitlichen Maximum der Gletscherbedeckung um 1850 in den Alpen endete. Seitdem geht die Fläche der Alpengletscher zurück. Für die österreichischen Gletscher bedeutet dies einen Flächenverlust von 540 km² bis 1997. In den Perioden negativer Massenbilanz beschleunigte sich die Abschmelzung mit der Zeit (Abb. 7.3).

Abb. 7.3:
Entwicklung der Gletscherfläche
in den österreichischen Alpen von
1850 bis 1997 (Gross, 1987;
Lambrecht und Kuhn, 2007).
Für den Zeitraum 1969 bis 2006
ist zusätzlich die Entwicklung
im Ötztal dargestellt.
(Abermann et al., 2010)

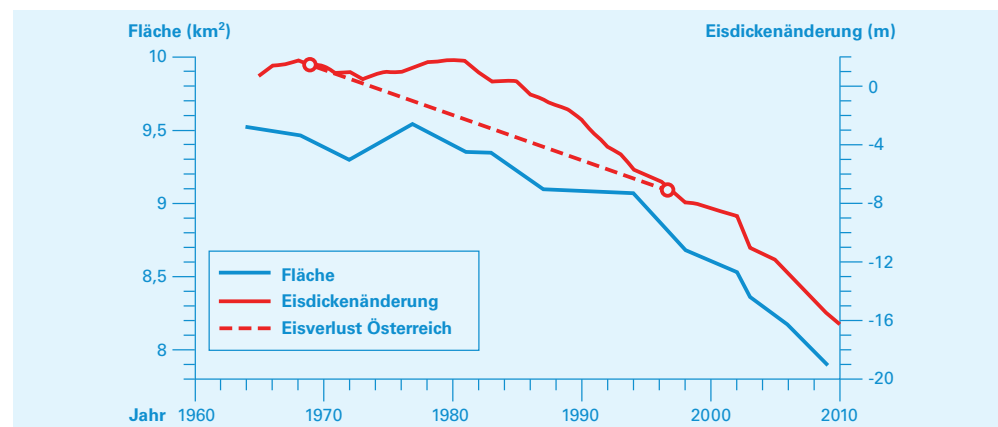


Im Zeitraum von 1850 bis 1969 sind mehr als 14% aller Gletscher in Österreich verschwunden, wobei dies vor allem die kleinen Gletscher betraf. Dieser Trend hat sich auch danach unverändert fortgesetzt.

Die Änderung der Gletscherflächen ist das auffälligste Merkmal des Gletscherrückgangs während der letzten 160 Jahre. Allerdings ist es für die Beurteilung der weiteren Entwicklung ganz entscheidend, auch den Verlust an Eisvolumen zu untersuchen. Auf der Basis der beiden österreichischen Gletscherinventare von 1969 und 1997 konnte festgestellt werden, dass die österreichischen Gletscher während dieser Periode im Mittel etwa 8,7 m ihrer Eisdicke eingebüßt haben (Lambrecht & Kuhn, 2007). Vom Österreichischen Alpenverein werden jährliche Messungen der Längenänderungen an einer Reihe von Gletschern vorgenommen.

Ein Vergleich der Abschmelzung der österreichischen Gletscher mit der Entwicklung am Vernagtferner, der seit 1964 von der Bayerischen Akademie der Wissenschaften untersucht wird, zeigt eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Eisdickenänderung. Die jährlichen Veränderungen des Vernagtferners entsprechen der Entwicklung der österreichischen Gletscher. In der Periode zwischen 1969 und 1982 gab es einen geringen Massenzuwachs, der dann bis 1986 wieder abschmolz. Der gemessene Eisverlust ist daher erst zwischen 1986 und 1997 eingetreten und beträgt knapp 60 cm Eis pro Jahr (Abb. 7.4).

Abb. 7.4:
Flächen- und Eisdickenänderung am
Vernagtferner, Ötztaler Alpen,
seit 1964. Zusätzlich ist der mittlere
Eisdeckenverlust aller österreichischen
Gletscher zwischen den
zwei Gletschermessungen 1969
und 1997 eingezeichnet.





Die relativen Änderungen in der Dicke des Gletschers sind größer als in der Fläche. Im Zeitraum zwischen 2000 und 2010 betrug der Flächenverlust 17 %, während sich ein Volumenverlust von ca. 22 % ergab (Lambrecht & Kuhn, 2007). Seit 1997 ist dieser Wert am Vernagtferner angestiegen und beträgt nun im Mittel über 70 cm pro Jahr oder mehr als 9,5 m in den vergangenen 13 Jahren. Betrachtet man die letzten fünf Jahre, dann sind es sogar beinahe 90 cm Eisverlust jährlich. Dieser Eisdickenverlust ist speziell in der letzten Dekade sehr gut durch Fotografien belegt (Abb. 7.5).

Im Jahre 1969 betrug die mittlere Dicke aller Gletscher in Österreich noch 42 m, während es 1997 noch etwas über 37 m waren.

Eine Analyse der Gletschermessungen zeigt, dass die mittelfristige Gleichgewichtslinie (die Höhe, auf der sich Schneeniederschlag und Schmelze die Waage halten) zwischen 1850 und 1969 um 94 m angestiegen ist (Gross, 1987). Die Gletscher passen sich dementsprechend an: die Schmelzflächen dehnen sich aus, die Akkumulationsgebiete werden kleiner und die Massenbilanzen tendieren zu negativen Werten. Dadurch nimmt die Eisdicke speziell in den tieferen Lagen der Gletscher ab, der Eistransport verringert sich und führt zu einer schnellen Ausdünnung der Gletscherzungen. Dort schmilzt das Eis vollständig ab und die Gletscherfläche verkleinert sich solange, bis der Gletscher wieder im Gleichgewicht mit seiner neuen Gleichgewichtslinie ist, d. h. das Angebot an jährlichem Schneezutrag im Akkumulationsgebiet befindet sich wieder im Einklang mit der Abschmelzung im Ablationsgebiet.

Nach dem Ende der kleinen Eiszeit um 1850 stellte sich dieses Gleichgewicht aufgrund eines wieder wärmeren Klimas auf einem beinahe 100 m höheren Niveau ein. Seither wurde bis zum Ende des 20. Jahrhunderts ein weiterer Anstieg der mittelfristigen Gleichgewichtslinie um etwa 150 m in nur 30 Jahren beobachtet. Im Jahre 1998 befand sie sich im Mittel für alle österreichischen Gletscher zwischen 3100 und 3200 m Meereshöhe.

Abb. 7.5:
Der Eisverlust am Vernagtferner zwischen 2000 (links) und 2010 (rechts) anhand von Fotografien einer automatischen Beobachtungskamera.

Zusammenfassung

Die Gletscher der Alpen reagieren zwar mit einer zeitlichen Verzögerung auf den rezenten Klimawandel, sind von diesem aber erheblich betroffen. Der fortschreitende Gletscherschwund über den gesamten Alpenraum wirkt sich nicht nur auf das sensible ökologische Umfeld mit zum Teil spezialisierten Lebensgemeinschaften aus, sondern hat auch Folgen für den regionalen Wasserkreislauf und ist mit der Gefahr von Georisiken verbunden.

Die bayerischen Gletscher werden bei gleichbleibender Klimaentwicklung in naher Zukunft fast vollständig verschwunden sein, lediglich der Höllentalferner auf der Zugspitze wird aufgrund seiner hohen Felsumrahmung, die ihn gegen Sonneneinstrahlung schützt und ihn zusätzlich mit Lawinenschnee versorgt, der letzte verbleibende Gletscher in Bayern sein.

Glossar

Akkumulation

Massengewinn auf einem Gletscher, vorwiegend durch Schneefall. Akkumulation kann allerdings auch durch den Windtransport und Lawineneintrag von Schnee aus benachbarten Gebieten auf die Gletscheroberfläche erfolgen.

Ablation

Massenverlust eines Gletschers, in der Regel durch Abschmelzen von Eis während der Sommermonate.

Albedo

Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden Oberflächen. Wird ein hoher Anteil der einfallenden Sonnenstrahlung an weitläufigen, weißen Flächen auf der Erde ins All reflektiert, wirkt dies der Erderwärmung entgegen.

Auslassgletscher

Masse eines Gletschers am Rande einer Eiskappe oder eines Eisschildes, die durch begrenzende Bergketten in das Vorland transportiert wird.

Eutrophierung

Überdüngung eines Gewässers, meist durch menschlichen Einfluss verursacht. Bei erhöhten Temperaturen im Gewässer genügen bereits geringe Konzentrationen an zugeführten Nährstoffen (Stickstoff- und Phosphorverbindungen), um eine hohe Produktivität auszulösen, die u.a. zu Algenblüten und in Folge zu Sauerstoffmangel im Gewässer führen kann.

Ferner

Bezeichnung für Gletscher, vor allem im tirolerischen Sprachraum verbreitet.

Firn

Winterschnee, der einen ganzen Sommer überdauert hat. Wird manchmal auch für flache Gletscher ohne ausgeprägte Gletscherzunge oder Teile eines Gletschers im Akkumulationsgebiet verwendet (z. B. der Jungfraufirn am Aletschgletscher in der Schweiz).

Gleichgewichtslinie

Die (gedachte) Linie auf einem Gletscher, an der sich die Eisschmelze und der Zutrag durch Schneefall über die Spanne eines Jahres ausgleichen. Unterhalb der Gleichgewichtslinie überwiegt die Ablation, oberhalb der Massenzuwachs durch Schneefall.

Gletscher

Eine Eismasse, die über mehr als ein Jahr existiert, aus Schneefall gebildet wurde und Anzeichen von Eisbewegung aufweist. Eismassen werden erst ab einer bestimmten Größe ihrer Ausdehnung als Gletscher bezeichnet.

Gletscherzunge

Der untere Bereich eines Talgletschers, der sich in einem Taleinschnitt erstreckt und im Vergleich zu höher gelegenen Bereichen schmal und langgestreckt erscheint und bis zum Gletscherende reicht.

GPS-Verfahren

Messverfahren der Satellitennavigation. Beim „Global Positioning System“ (GPS) wird die Lage und Höhe eines Punktes auf der Erde durch die Berechnung des Abstandes zu mehreren Satelliten ermittelt. Dies kann auch für einen bewegten GPS-Empfänger berechnet werden und liefert die Positionen entlang des zurückgelegten Weges (kinematisches GPS-Verfahren).

Kargletscher

Meist kleine Gletscher, die keine Gletscherzunge mehr aufweisen und sich auf die Ausdehnung eines Kares an einem Berg beschränken.

Laserscan-Verfahren

Distanzmessung mit Hilfe eines von der Zieloberfläche reflektierten Laserstrahls. Durch die gleichzeitige Bestimmung der Richtung des Laserstrahls können große Flächen in kurzer Zeit dreidimensional vermessen werden.

Massenbilanz

Die Aufsummierung der Zugewinne durch Akkumulation und der Verluste durch Ablation auf einem Gletscher. Die Massenbilanz wird zum Zeitpunkt der geringsten Firnausdehnung im Herbst und über ein Jahr berechnet. Ist in einem Jahr mehr Eis abgeschmolzen als Schnee hinzugekommen ist, ist die Massenbilanz negativ. Für einen Überschuss an Akkumulation ist die Bilanz positiv. Ausgedrückt wird die Massenbilanz in der durchschnittlichen Höhe einer dem Eisverlust/-gewinn äquivalenten Wassersäule, verteilt über den ganzen Gletscher. Eine Massenbilanz von -500 mm bedeutet einen Verlust an Gletschereis über den Zeitraum eines Jahres, der einer Wassersäule von 500 mm über der ganzen Gletscherfläche entspricht.



Moränenwall

Vom Gletscher aufgetürmtes Gesteinsmaterial, entweder an den Seiten des Gletschers (Seitenmoräne) oder durch einen Gletschervorstoß an der Gletscherfront (End- oder Stirnmoräne).



Photogrammetrie

Verfahren zur Bestimmung der Topographie auf der Grundlage des stereoskopischen Effekts. Aus zwei Fotografien, die in einem geringen Abstand voneinander das gleiche Objekt abbilden, können durch Berechnung der relativen Objektwinkel die dreidimensionalen Koordinaten des Objekts ermittelt werden. Das Prinzip ist analog zum dreidimensionalen Sehen der menschlichen Augen.



Tachymetrie

Vermessungsverfahren für die Lagebestimmung einer Oberfläche mit Hilfe eines Theodolits (Bestimmung der Winkel zwischen Messgerät und Zielpunkt) und eines integrierten Distanzmessers. Normalerweise wird der Zielpunkt durch einen Spiegelreflektor definiert, der den Strahl des Distanzmessers reflektiert. Bei der reflektorlosen Tachymetrie werden natürliche Punkte angezielt, die sich in einer Distanz zum Messgerät befinden, bei der die reflektierende Intensität noch für eine Streckenmessung ausreicht.

Auer, I. et al.: *HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region*, International Journal of Climatology, 2007, 27(1), S. 17–46.

Beckley, B.D.; Lemoine, F.B.; Lutchke, S.B.; Ray, R.D.; Zelensky, N.P.: *A reassessment of global and regional mean sea level trends from TOPEX and Jason-1 altimetry based on revised reference frame and orbits*, Geophys. Res. Lett., 2007, 34.

Brunner, K.: *Die kartographische Darstellung von Schwankungen der bayerischen Gletscher*, Kartographische Nachrichten, 1974, Heft 6, S. 215–219.

Cogley, J.G.: *Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis*, Annals of Glaciology, 2009, 50, S. 96–100.

Dow, K.; Downing, T.: *Weltatlas des Klimawandels*, Europäische Verlagsanstalt, 2007.

Dyurgerov, M.B.; Meier, M.F.: *Glaciers and the changing earth system: a 2004 snapshot*, Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Colorado, 2005, Occasional Paper, Nr. 58, S. 177 ff.

Escher-Vetter, H.; Rentsch, H.: *The behavior of the Bavarian glaciers: results from survey and mass balance modeling*, Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie, 1994, Band 31/1995, S. 183 ff.

Finsterwalder, S.: *Bericht über die Gletscher des Deutschen Reichs 1895*. Veröffentlicht von der Commission Internationale des Glaciers in: Les Variations périodiques des glaciers, Premiere Rapport 1896, 1895/2: S. 129–147.

Finsterwalder, R.; Rentsch, H.: *Das Verhalten der bayerischen Gletscher in den letzten zwei Jahrzehnten*. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie, 1973, Band IX, S. 64 ff.

Glaser, R.: *Klimageschichte Mitteleuropas: 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen*, Primus, Darmstadt, 2001, S. 227 ff.

Gross, G.: *Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich 1850–1920–1969*, Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie, 1987, Band 23, Heft 2, S. 131–141.

Haeberli, W.; Bosch, H.; Scherler, K.; Østrem, G.; Wallén, C. (eds.): *World glacier inventory: Status 1988*. Nairobi: IAHS(ICS)/UNEP/ UNESCO/World Glacier Monitoring Service, 1989.

Hagg, W.: *Die Bedeutung kleiner Gletscher am Beispiel der bayerischen Alpen*. 2008, Geographische Rundschau, 3/2008, S. 22–29.

Hagg, W.; Mayer, C.; Steglich, C.: *Glacier changes in the Bavarian Alps from 1989/90 to 2006/07*, Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 2008, 42/1, S. 37–46.

Heilig, A.; Mayer, C.; Hagg, W.: *Projekt „Schwindende Eisreserven im Klimawandel – Unterschiede der Gletscherreaktion zwischen zentralalpinen Trockengebieten und den Hochniederschlagsgebieten der Bayerischen Alpen“*, Projektbericht für das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, 2010.

Hirtleiter, G.: *Spät- und postglaziale Gletscherschwankungen im Wettersteingebirge und seiner Umgebung*. München, Geographische Abhandlungen, 1992, Reihe B 15, S. 176 ff.

Huss, M.; Hock, R.; Bauder, A.; Funk, M.: *100 year mass changes in the Swiss Alps linked to the Atlantic Multidecadal Oscillation*. 2010, Geoph. Res. Lett., 37.

Intergov. Panel Clim. Change (IPCC), (ed.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. 2007, Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M. et al. Cambridge, UK, Cambridge University Press.

- Lambrecht, A.; Kuhn, M.: *Glaciers changes in the Austrian Alps during the last three decades derived from the new Austrian glacier inventory*, Annals of Glaciology, 2007, 46, S. 177–184.
- Lambrecht, A.; Mayer, C.: *Temporal variability of the non-steady contribution from glaciers to water discharge in western Austria*. 2009, Hydrol. J.; S. 376, 353–361.
- Lemke, P.; Ren, J.; Alley, R.; Allison, I.; Carrasco, J.; Flato, G.; Fujii, Y.; Kaser, G.; Mote, P.; Thomas, R.; Zhang, T.: Chapter 4: *Observations: changes in snow, ice and frozen ground*. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.C.; Averyt, K.; Tignor, M.; Miller, H.L. (eds) *Climate change 2007: the physical science basis. Intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- Mayr, E.: *Die Bayerischen Gletscher: Neuvermessung und Beurteilung ihrer Entwicklung und Klimaabhängigkeit*. Diplomarbeit am Department für Geographie der LMU München, 2010, unveröffentlicht.
- Vilesov, E. N.; Uvarov, V. N.: *Present degradation of glaciation on the northern slope of the Zailiskiy Alatau*. Data of glaciological studies, 1998, S. 84, 52–59.
- Waltenberger, A.: *Die Zugspitze und die Umrandungen des Plattach- und des Höllentalfeners. Karte 1:50 000, Orographie des Wettersteingebirges und der Mieminger Kette*, Augsburg, 1882.
- Waltenberger, A.: *Special-Karte der Berchtesgadener Alpen 1:50 000*. München, Z. DuÖAV 18, 1886.
- Waltenberger, A.: *Über topographische Messungen und Terrainaufnahmen im Gebirge. Mit besonderer Bezugnahme auf die Mappirungs-Arbeiten im Berchtesgadener Gebiet*. Z. DuÖAV 17, 1887, S. 99–127.
- Weber, M.; Prasch, M.; Braun, L.: *Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft*. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, 2009, Nr. 86, S. 1–30.
- Weber, M.; Braun, L.; Mauser, W.; Prasch, M.: *Contribution of rain, snow- and icemelt in the upper Danube discharge today and in the future*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 2010, S. 33, 221–230.
- Zemp, M.; Haeberli, W.; Hoelzle, M.; Paul, F.: *Glacier fluctuations in the European Alps 1850–2000: an overview and spatiotemporal analysis of available data*. In: Orlove, B.; Wiegandt, E.; and Luckman, B.H., eds. *Darkening peaks: glacier retreat, science, and society*. Berkeley, CA, University of California Press, 2007.

Allgemeine Literatur zum Thema Gletscher

Alean, J.: *Schweizer Gletscher. Gefährdete Naturwunder.* Mondo Verlag, Vevey, 2006.

Alean, J.: *Gletscher der Alpen.* Haupt Verlag, Bern, 2010.

Bachmann, R. C.: *Gletscher der Alpen.* Hallwag Verlag Bern und Stuttgart, 1978.

Bayerisches Landesamt für Umwelt:
Bayerns Klima im Wandel – erkennen und handeln. Reihe UmweltThema, 2008.

Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit:
Klimawandel in den Alpen. Eigenverlag
Berlin, 2007.

Böhm, R.; Schöner, W.; Auer I.; Hynek, B.;
Kroisleitner, C.; Weyss, G.: *Gletscher
im Klimawandel. Vom Eis der Polargebiete
zum Goldbergkees in den Hohen Tauern.*
Zentralanstalt für Meteorologie und Geo-
dynamik, Wien, 2007.

Maisch, M.; Wipf, A.; Denneker, B.; Battaglia, J.;
Benz, C.: *Die Gletscher der Schweizer Alpen.
Gletscherhochstand 1850, Aktuelle Ver-
gletscherung, Gletscherschwund-Szenarien.*
2. Auflage, vdf Hochschulverlag AG an der
ETH Zürich, 2000.

Wagnon, P.; Vincent, C.; Six, D.; Fancou, B.:
Gletscher. Primus Verlag, Darmstadt, 2008

Winkler, S.: *Gletscher und ihre Landschaften:
Eine illustrierte Einführung.* Primus Verlag,
Darmstadt, 2009.

Zängl, W.; Hamberger, S.: *Gletscher im
Treibhaus. Eine fotografische Zeitreise in die
alpine Eiswelt.* Tecklenborg Verlag, Steinfurt,
2004.

Zryd, A.: *Eine kleine Geschichte der Gletscher:
Die Alpengletscher im Klimawandel.*
Haupt Verlag, Bern, 2008.

Internetquellen

www.adaptalp.org

www.bayerische-gletscher.de

www.glaziologie.de

www.klima.bayern.de

www.schneefernerhaus.de

www.stmug.bayern.de

www.swisseduc.ch

Impressum

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit (StMUG)
Rosenkavalierplatz 2
81925 München

Internet: www.stmug.bayern.de

E-Mail: poststelle@stmug.bayern.de

Gestaltung: emde gestaltung, Stuttgart

Bildnachweis: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG): S. 3;
Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU): Dr. Wilfried Hagg:
Titelseite, S. 8 unten, S. 16 oben, S. 17, Astrid Lambrecht: S. 9 Mitte;
Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG): S.26
Bayerische Akademie der Wissenschaften: Dr. Christoph Mayer: S. 15,
S. 16 oben und unten, S. 17, S. 18, S. 19 Mitte; M. Obermeier: S. 20;
fotolia.com: S. 2 + S. 31 oben und Mitte (fotobeam.de), S. 4 (Zanthia),
S. 14 (aboe), S. 19: (wmann), S. 31 unten (tine3011)

Druck: Mintzel Druck, Hof

Stand: Februar 2012

© StMUG, alle Rechte vorbehalten

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier

Hinweis: Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung.

Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Publikation wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt.

Der Inhalt wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.