

Zukunft ohne Eis

Zweiter Bayerischer
Gletscherbericht:
Klimawandel in den Alpen



Cover: Skigebiet am Zugspitzplatt im Sommer.

Diese Seite: Der Südliche Schneeferner auf dem Zugspitzmassiv existiert fast nicht mehr.



Jeder Beitrag zählt!



„Zukunft ohne Eis“ – das ist nicht mehr hypothetisch, sondern traurige Realität. Das „ewige“ Eis leidet im Klimastress unter galoppierender Schwindsucht. Aktuelle Einschätzungen zufolge könnten wir in zehn Jahren die letzten bayerischen Alpengletscher verlieren.

Wie wird sie sein, die Zukunft ohne Eis? In diesem Bericht suchen wir mit der Bayerischen Akademie der Wissenschaften nach Antworten. Klar ist: Die Folgen des „Gletschersterbens“ für die Natur, aber auch für Wasserhaushalt oder Energieversorgung der Alpenregionen werden erheblich sein. Die gute Nachricht: Noch ist ein Zeitfenster für wirksamen Klimaschutz offen! Deshalb haben wir ein bayerisches Klimaschutzgesetz und ein 700 Millionen Euro schweres Maßnahmenpaket. Aber das Wichtigste: Klimaschutz in Bayern ist ein Mitmachprojekt! Mit dieser Broschüre wollen wir Ihnen nicht nur die Schönheit der Alpengletscher nahebringen, sondern Sie auch für aktiven Klimaschutz sensibilisieren. Jeder Beitrag zählt!

Der Bayerische Gletscherbericht erscheint erstmals als Gemeinschaftswerk des Umweltministeriums und der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Er zeigt den Schulterschluss zwischen Klimapolitik und Klimaforschung in Bayern.

Thorsten Glauber, MdL
Bayerischer Staatsminister für Umwelt und Verbraucherschutz



Forschung für die Öffentlichkeit

Der Zustand der Alpengletscher, die heute mit bemerkenswerter Geschwindigkeit schrumpfen, ist seit Ende des 19. Jahrhunderts Untersuchungsgegenstand der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Damals richtete sie eine Kommission für „Gradmessung“ ein, in deren Nachfolge heute Geodäten und Glaziologen Veränderungen der Kryosphäre (vulgo: Eis und Schnee) nicht nur in Bayern und Österreich, sondern auch in den Hochgebirgen Zentralasiens untersuchen. Als renommierte außeruniversitäre Forschungseinrichtung mit einem Schwerpunkt auf geistes- und naturwissenschaftlichen Langzeitvorhaben ist die BAdW der ideale Ort für methodologisch anspruchsvolle Untersuchungen zu den langfristigen Auswirkungen des Klimawandels.

Die glaziologische Expertise bei der Beantwortung aktueller Fragen ist auch der Grund für die Einbeziehung in die strategischen Überlegungen des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz und die gemeinsame Herausgabe dieser Broschüre. Sie basiert auf Analysen, die unter der Leitung des BAdW-Glaziologen Dr. Christoph Mayer durchgeführt wurden, und zeigt, dass die Ergebnisse der Spitzenforschung für eine breite Öffentlichkeit verständlich aufbereitet werden können.

Prof. Dr. Thomas O. Höllmann
Präsident der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Grußworte

An den Schneeschichten eines Gletschers lassen sich klimatische Bedingungen der Vergangenheit ablesen.

Was ist eigentlich ...

... ein Gletscher?

In der Gletscherforschung (Glazilogie) gibt es keine eindeutige Definition für Gletscher. Vor allem die minimal erforderliche Fläche des Eisfeldes wird oft unterschiedlich gehandhabt. Drei Bedingungen müssen aber erfüllt sein:

- Die Eisvorkommen existieren mehrere Jahre (bei den bayerischen Gletschern erfüllt).
- Es findet eine Deformation und damit eine Bewegung statt (bei einigen der bayerischen Gletscher erfüllt).
- Der Gletscher weist einigermaßen regelmäßige eine definierte Fläche mit Massenzuwachs auf (in Bayern nur noch sehr bedingt erfüllt).

In den Alpen spricht man üblicherweise ab einer Untergrenze von 0,1 km² von Gletschern. Über dieser Grenze liegen in Bayern nur noch der Höllentalferner und der Nördliche Schneeferner.

Inhalt

| | |
|----|---|
| 6 | Gletscher – Zeugen des Klimawandels |
| 10 | Interview: Wie arbeiten Gletscherforscher? |
| 14 | Gletscher als Teil unserer Umwelt |
| 16 | Was beeinflusst Gletscher? |
| 18 | Gletschergebiete im Wasserkreislauf |
| 20 | Gletscher in Bayern heute |
| 22 | Nördlicher Schneeferner |
| 24 | Südlicher Schneeferner |
| 26 | Höllentalferner |
| 28 | Watzmanngletscher |
| 30 | Blaueis im Kar |
| 32 | Expeditionsbericht: ein Tag auf dem Höllentalferner |
| 36 | Gletscher als Mahnmale des Klimawandels |
| 38 | Entwicklung der fünf bayerischen Gletscher |
| 42 | Blick über die Grenze |
| 44 | Zukunft der Alpengletscher |
| 48 | Literatur, Bildnachweise und Impressum |
| 50 | Kurz & knapp: 10 Fakten zum Zustand der Alpengletscher |

Gletscher – Zeugen des Klimawandels



Die Zugspitze im Winter: Zu dieser Jahreszeit liegen hier meist um die fünf Meter Schnee.

Was ist eigentlich ...

... die globale Mitteltemperatur?

Unter der weltweiten Durchschnittstemperatur versteht man die über die gesamte Erde gemittelte bodennahe Lufttemperatur in einem bestimmten Zeitraum. Die Berechnung ist aufwändig, da vor allem auf den Ozeanen nur wenige Messstationen zur Verfügung stehen und die Flächen entsprechend gewichtet werden müssen. Allerdings zeigen Langzeitbeobachtungen einen eindeutigen Trend zur globalen Erwärmung in den letzten Jahrzehnten.

Die Alpengletscher sind Zeugen des Klimawandels. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts schmelzen sie fast ununterbrochen ab und zeigen eindrücklich, wie sich die klimatischen Bedingungen verändert haben. Die Klimaveränderung wiederum hat Einfluss auf Umwelt und Natur in den Bergen. Obwohl die Zusammenhänge offensichtlich scheinen, muss man nach ihrer Eindeutigkeit fragen: Ist das Abschmelzen eines Gletschers die direkte Folge einer Klimaveränderung? Bleibt der Zusammenhang zwischen Klima und Gletscherreaktion über die Zeit immer gleich? Sind die Reaktionen von Gletschern aus verschiedenen Alpenregionen vergleichbar? Und welche Bedingungen haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass Gletscher anwuchsen?

Der Sommer setzt den Gletschern zu

Die Tage der Gletscher in Bayern sind gezählt. 2018 umfassten die Reste der Eisfelder an der Zugspitze, am Hochkalter und am Watzmann nur noch eine Gesamtfläche von weniger als 0,5 km². Ein Akkumulationsgebiet können die bayerischen Gletscher schon lange nicht mehr regelmäßig ausbilden. Der Grund dafür ist nicht etwa fehlender Winterschnee: Der Deutsche Wetterdienst meldet auf dem Zugspitzplatt zum Ende des Winters regelmäßig Schneehöhen von fünf Metern und mehr. Dagegen sorgt der durchschnittliche Sommer selbst auf der Zugspitze für Witterungsverhältnisse, die den Winterschnee in etwas mehr als einem Monat abschmelzen lassen. Bis zum Herbst sind dann auch die Eisreserven unter der Schneeschicht betroffen.

Bis ins 19. Jahrhundert reicht die geodätische Beobachtung der Alpengletscher zurück. Die langfristigen Messreihen zeigen, dass bereits in den 1950er Jahren viele Gletscher unterhalb von 3.000 m verschwunden waren. Inzwischen deuten die Messungen darauf hin, dass nun Gletscher verloren gehen werden, die bis auf 3.500 m reichen, denn im Laufe des letzten Jahrhunderts hat sich das Klima dort oben an die zuvor 500 m tiefer vorherrschenden Verhältnisse angenähert. Dementsprechend könnte sich die Lufttemperatur, die etwa um 0,6 °C pro 100 Höhenmetern abnimmt, auf 3.500 m um ungefähr 3° C erhöht haben, sofern man Änderungen anderer Klimaparameter nicht einbezieht. Solche Temperaturanstiege sind an hochalpinen Beobachtungsstationen bereits mehrfach belegt – und sie übertreffen die Zunahme der globalen Mitteltemperatur deutlich. Das ist durch die Verhältnisse im Hochgebirge zu erklären: Es beeinflusst die Temperatur vor Ort entscheidend, wie lange der Schnee liegen bleibt und wie stark die Eisflächen schmelzen.

Wasserdampf spielt eine wichtige Rolle

Gletscherschmelze wird aber nicht primär durch die Temperatur verursacht. Vielmehr sind unterschiedliche Mechanismen verantwortlich, die sich gegenseitig verstärken können. Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Zunahme des Wasserdampfs in der Luft und damit der absoluten Feuchte eine wichtige Rolle spielt. Der Wasserdampfgehalt ist sehr eng mit der Lufttemperatur gekoppelt und entzieht sich weitgehend einer

Was ist eigentlich ...

... ein Akkumulationsgebiet?

Eine Gletscherfläche mit Massenzuwachs heißt in der Glaziologie Akkumulationsgebiet (Akkumulation = Anhäufung, Ansammlung). Es handelt sich dabei um einen Bereich im höher gelegenen Teil, auf dem im Winter gefallener Schnee den Sommer auch ohne künstliche Maßnahmen überdauert. Aus diesen Schneeschichten entsteht dann Gletschereis – aus 5 m Schnee wird z. B. eine rund 1,5 m dicke Eisschicht. Das neue Eis wird in die tieferen Lagen transportiert und gleicht im Ablationsgebiet, also dem Teil des Gletschers mit Netto-Eisverlust, das Abschmelzen aus. Übersteigt die Eisschmelze diesen Nachschub, verringert sich die Masse, und die tiefsten Bereiche des Gletschers verschwinden. Diese Situation hat in den letzten Jahren in den Alpen zu einem gewaltigen Rückgang der Eisreserven geführt.



Was ist eigentlich ...

... Firn?

Als Firn bezeichnet man in der Glaziologie Winterschnee, der einen ganzen Sommer lang überdauert hat. Manchmal wird der Begriff auch für flache Gletscher ohne ausgeprägte Gletscherzunge oder für Teile eines Gletschers im Akkumulationsgebiet verwendet (z. B. der Jungfraufrirn am Aletschgletscher in der Schweiz).

Heute überdauern nur noch spärliche Eis- und Schneereste den Sommer auf der Zugspitze.

Gletscher in den Alpen



■ Gletscher ▲ Berggipfel ■ Städte

Aktuell zählt man im gesamten Alpenraum ungefähr 3.500 Gletscher – einige sind auf dieser Karte eingezeichnet. In Bayern gibt es derzeit noch fünf Gletscher. Mit einer Länge von 23 km ist der Aletschgletscher in den Berner Alpen der größte Talgletscher der Alpen. Die Alpengletscher sind wesentliche Zulieferer für den Rhein, die Rhône, den Po und die Donau.

direkten Kontrolle – allerdings führen vom Menschen erzeugte Treibhausgase zu einer Erhöhung der Temperatur und damit auch der absoluten Feuchte.

Fest steht: Ab einer gewissen Luftfeuchte schmilzt Eis bei gleichbleibender Lufttemperatur deutlich schneller. Die dauerhafte Überschreitung dieses „Kipp-Punktes“ wird die Schmelze der Gletscher beschleunigen und ihnen in weiten Teilen der Alpen ihre Existenzgrundlage entziehen. Wo genau diese Schwelle liegt, steht allerdings noch nicht fest.

Natürliche Schwankung oder Klimaerwärmung?

Doch könnte der aktuelle Gletscherrückgang nicht Teil einer natürlichen Schwankung sein? Seit dem Ende der Kleinen Eiszeit um 1850 beobachtet man in den Alpen periodische Veränderungen des Klimas von je etwa 35 Jahren Dauer. Dabei wechselten sich Zeiten starken Eisverlusts mit Perioden geringfügiger Erholung ab. Seit Beginn des neuen Jahrtausends ist allerdings kein entscheidender Rückgang der Lufttemperatur mehr festzustellen und seit 2010 setzt sich der Trend zu einem weiteren Anstieg im Alpenraum ungebrems fort.

Indem man die Massenveränderungen der Gletscher parallel zu meteorologischen Daten betrachtet, ist es möglich, neben Lufttemperatur und Niederschlag weitere Klima-Faktoren zu ermitteln, die großen Einfluss auf die Gletscher haben. So lässt sich der Wechsel zwischen starken Eisverlusten von 1920 bis 1955 und Massenzugewinnen in den 1970er Jahren durch Schwankungen der kurzweiligen Sonnenstrahlung in Boden-

nähe erklären. Ursache dafür war aber keine Veränderung der Sonnenaktivität, sondern die starke Verschmutzung der Erdatmosphäre, die dadurch nicht mehr so durchlässig für Sonnenstrahlung war. Dagegen ist es sehr wahrscheinlich, dass in den letzten Jahrzehnten die langwellige Strahlung in der unteren Atmosphäre massiv zugenommen hat, was dazu führt, dass die Gletscher schneller abschmelzen. Hierfür ist die Emission von Treibhausgasen, vor allem von Kohlenstoffdioxid (CO₂), verantwortlich, – aber in noch stärkerem Maß die Wasserdampfkonzentration. Sie nimmt in den bodennahen Schichten der Atmosphäre zu und ist eng an den CO₂-Gehalt der Luft gekoppelt.

Nicht nur bayerische Gletscher sind betroffen

Dass sich die Zusammensetzung der Atmosphäre verändert, ist der heute wichtigste Treiber des Klimawandels. Nur globale Anstrengungen zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen können diesen Prozess abschwächen oder gar zum Stillstand bringen. Für die bayerischen Gletscher kommen solche Maßnahmen aber in jedem Fall zu spät.

Die Verluste an Gletscherfläche betreffen nicht nur Bayern, sondern den gesamten Alpenraum sowie die Gletscher weltweit. Im Durchschnitt büßten die Alpengletscher zwischen 2000 und 2011 jeweils 1,05 m an Eisdicke pro Jahr ein. Daraus ergibt sich, dass selbst bei einem gleichbleibenden Verlust und unter der Annahme einer mittleren Gletscherdicke von 45 m in 20 Jahren beinahe die Hälfte des Eises in den Alpen verschwunden sein wird.

Was ist eigentlich ...

... die Massenbilanz?

Die Massenbilanz ergibt sich, wenn man die Zugewinne durch Akkumulation (von lat. accumulare = anhäufen) und die Verluste durch Ablation (von lat. ablatio = Abtragung) auf einem Gletscher gegenüberstellt. Sie wird zum Zeitpunkt der geringsten Firnausdehnung im Herbst und über ein Jahr berechnet. Ist in einem Jahr mehr Eis abgeschmolzen als Schnee hinzugekommen, ist die Massenbilanz negativ. Bei einem Überschuss an Akkumulation ist sie positiv. Ausgedrückt wird die Massenbilanz in der durchschnittlichen Höhe einer dem Eisverlust bzw. -gewinn äquivalenten Wassersäule, verteilt über den ganzen Gletscher. Eine Massenbilanz von -500 mm bedeutet z. B. einen Verlust an Gletschereis innerhalb eines Jahres, der einer Wassersäule von 500 mm über der ganzen Gletscherfläche entspricht.

„Letzte Refugien beinahe ungestörter Natur“

Gletscher üben auf viele Menschen eine große Faszination aus. Wie Wissenschaftler sie erkunden und erforschen, erklärt der **Glaziologe Dr. Christoph Mayer** im Gespräch.

Herr Mayer, Gletscher werden oft als „Gedächtnis der Klimaentwicklung“ bezeichnet. Warum ist das so?

Gletscher bestehen im Grunde aus übereinander liegenden Schneeschichten, die im Laufe der Zeit zu Eis geworden sind. Obwohl dieses „Schichtpaket“ sich deformiert und langsam bergab wandert, bleibt die Reihenfolge im Inneren unverändert. Alles, was an klimatischen Informationen dort gespeichert ist, können wir daher mit geeigneten Methoden auslesen und interpretieren.

Wie versuchen Gletscherforscher, dieses Gedächtnis für ihre Arbeit zu nutzen?

Es ist erforderlich, eine möglichst gute Probe der Eissäule zu bekommen. Dazu werden vor allem in kalten und hohen Regionen, wo es keine Schmelze gibt, Eiskerne gebohrt. So ein Eiskern, der in der Antarktis auch mal 2–3 km lang sein kann, enthält dann Schicht für Schicht Informationen zu den klimatischen Verhältnissen in der Vergangenheit. Mit unterschiedlichen Methoden kann man aus diesem Material die Niederschlagsmenge, die Temperatur und sogar die Zusammensetzung der Atmosphäre in der Vergangenheit ermitteln.

Neben dem Blick in die Vergangenheit der Gletscher interessiert vor allem ihr Ist-Zustand. Welche Methoden gibt es, um festzustellen, wie es ihnen geht?

Das wesentliche Werkzeug, um den Zustand der Gletscher zu ermitteln, ist die Massenbilanz. Das bedeutet, wir bestimmen, wie viel Masse in Form von Schnee sich in einem Jahr auf dem Gletscher ablagert und wie viel im selben Zeitraum abschmilzt.

Allerdings sind solche Untersuchungen nur über lange Zeiträume sinnvoll, da sich so die langfristige Entwicklung der Gletscher beurteilen lässt. Heute setzt man neben der direkten Bestimmung der Massenänderung oft auch Satellitenverfahren ein, um die Änderung der Fläche oder des Volumens über einen bestimmten Zeitraum zu ermitteln. Damit lassen sich viel größere Regionen abdecken. Was die Genauigkeit und räumliche Auflösung angeht, sind aber Bodenmessungen noch nicht zu ersetzen.

Was ist eigentlich ...

... ein Theodolit?

Ein Theodolit ist ein hochgenauer Winkelmesser mit Fernrohr. Damit kann man von einem Punkt mit bekannter Position die Winkel zwischen anderen Punkten oder der Nordrichtung und einem Messpunkt horizontal und vertikal bestimmen. Wenn man zusätzlich die Distanz zwischen den Punkten misst, kann man mithilfe von Dreiecksberechnungen (Triangulation) die Position der Punkte bestimmen.

Christoph Mayer bei der Arbeit mit einem Theodolit. Das Gerät ergänzt die modernen satellitengestützten Verfahren.



„Die Reaktionszeit von Gletschern ähnelt der Spanne, durch die auch Klima definiert ist. Daher sind Gletscher so gute Indikatoren für die Klimaentwicklung.“

Für Gletscherforschung ist Trittsicherheit gefragt: Vor den Messungen kommt die mühsame Wanderung über das Eis.

Die Messmethoden sind heute vielfältig: Die Eisdicke lässt sich mit einem Radarsignal bestimmen.



In den übereinander liegenden Schneeschichten von Gletschern sind viele klimatische Informationen gespeichert.



Wie haben sich die Messmethoden im Vergleich zum Beginn der Forschung verändert?

Heute verfügen wir über deutlich mehr Messmethoden, wobei die Grundlagen nahezu unverändert sind. Zu Beginn der Forschung hat man die Oberfläche von Gletschern noch mithilfe von Stereofotografien an einzelnen Punkten von Hand berechnet. Heute werden dazu Luftbilder verwendet – und statt einzelner Punkte bestimmt ein spezielles Programm in wenigen Minuten die Koordinaten tausender Punkte. Damit ist nicht nur die Datenerhebung, sondern auch die Auswertung erheblich effektiver geworden. Sogar die Bestimmung einzelner Punkte mithilfe von Satellitennavigation ist heute mit wenigen Mausklicks zu erledigen, während die Forscher früher jeden Punkt erst mit Theodoliten eingemessen und danach die Position per Triangulation ermittelt haben.

Welche Ausbildung braucht man, um Gletscher zu erforschen? Ist interdisziplinäre Arbeit von Vorteil?

Gletscherforschung ist an sich interdisziplinär, da es sehr viele unterschiedliche Aspekte zu untersuchen gibt. Die Bestimmung der Oberflächengeometrie ist eine geodätische Aufgabe, die Messung von Eisdicken eine geophysikalische. Die Auswertung von Eiskernen erfordert physikalische und chemische Kenntnisse. Der Beitrag der Gletscher zum Wasserkreislauf wird von Hydrologen untersucht, während die Reaktion der Gletscher auf das Klima ein Thema für Meteorologen ist. Ohne Interdisziplinarität gäbe es keine Gletscherforschung.

Wie lange arbeiten Sie selbst schon mit Gletschern, und was fasziniert Sie an Ihrem Fachgebiet?

Ich arbeite seit fast 30 Jahren an Fragen zu Gletschern und deren Veränderung. Faszinierend ist, dass es ein so vielschichtiges Thema ist, und deswegen sehr unterschiedliche Menschen und Gruppen zur Lösung von Problemen beitragen. Zudem sind für mich Gletscher letzte Refugien beinahe ungestörter Natur (wenn man vom Einfluss des Klimas auf den Gletscherschwund einmal absieht) und damit Zeugnisse einer heute weitgehend verschwundenen Welt.

Warum ist es wichtig, Gletscher über längere Zeit zu beobachten? Gletscher sind nicht nur das Gedächtnis der Klimaentwick-

lung, sie reagieren auch verhältnismäßig langsam auf Umweltveränderungen. Die Reaktionszeit von Gletschern ähnelt der Spanne, durch die auch Klima definiert ist (das Mittel aus 30 Jahren Wetter). Daher sind Gletscher so gute Indikatoren für die Klimaentwicklung. Dies führt jedoch auch dazu, dass Daten aus einzelnen Jahren keine große Aussagekraft haben. Nur Beobachtungen über lange Perioden geben Auskunft über die Sensitivität dieser Systeme und die Zusammenhänge mit anderen Umweltparametern.

Auf welche wichtigen Fragen unserer Zeit gibt die Vermessung von Gletschern Antworten?

Zuallererst auf die nach der Entwicklung des Klimas. Die Eisbohrkerne sind ein einzigartiges Archiv der Klimageschichte der letzten Million Jahre. Aber auch die jüngere Vergangenheit können wir durch die Untersuchung der Gletscher besser verstehen und lokale klimatische Verhältnisse besser rekonstruieren. Für die Zukunft brauchen wir die Informationen der Gletscher, um die Folgen des Klimawandels besser abschätzen zu können: Gletscher spielen eine wichtige Rolle für den Wasserkreislauf, z. B. für den Meeresspiegel, aber auch (wenn man die polaren Eisschilde betrachtet) als Einflussfaktor des Klimas selbst.

Fragen: Lisa Scherbaum

Dr. Christoph Mayer

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt „Erdmessung und Glaziologie“ der BADW. Er beschäftigt sich hauptsächlich mit den Veränderungen der Schneakkumulation auf Gletschern und untersucht den Einfluss von Schuttbedeckung auf die Eisschmelze. Neben den Vermessungsarbeiten in den Alpen liegen seine Forschungsschwerpunkte in Hochasien, dem Himalaya und den Polargebieten.

Gletscher als Teil unserer Umwelt

Das Eis der Gletscher beeinflusst den **weltweiten Wasserkreislauf**. Doch auch sie selbst sind abhängig von verschiedenen Umweltfaktoren.

Gletscher sind Teil unserer Umwelt: Mit ihren Eisreserven tragen sie zum weltweiten Wasserkreislauf bei und haben so unmittelbaren Einfluss auf die sie umgebende Natur. Doch auch sie selbst sind abhängig von verschiedenen Umweltfaktoren, die dazu führen, dass sie anwachsen oder abschmelzen: Sie reagieren deutlich sichtbar auf Veränderungen des weltweiten Klimasystems, die in den letzten Jahrzehnten vor allem von menschengemachten Treibhausgasen beeinflusst wurden. Zudem hängt der Meeresspiegel von der Zu- oder Abnahme der Eismassen ab, in der Hauptsache an den großen Eisschilden. Aber auch die Gebirgsgletscher spielen derzeit noch eine wesentliche Rolle.

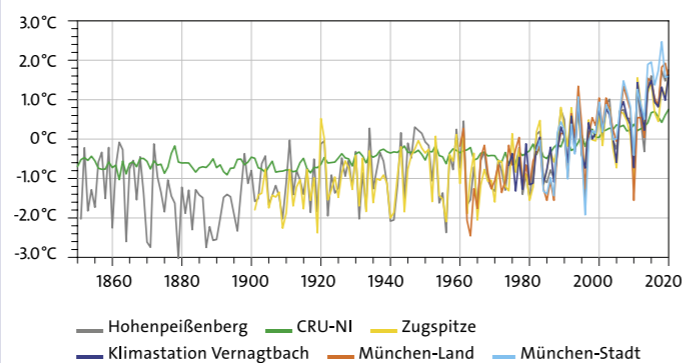
Gletschereis entsteht nur langsam

Dass Gletscher existieren, verdanken sie hauptsächlich Niederschlag in Form von Schnee. Bis frisch gefallener Schnee in Gletschereis umgewandelt ist, dauert es mehrere Monate oder – in sehr kalten Regionen – sogar Jahre. Bei frischem Schnee liegen die Kristalle noch so locker nebeneinander, dass eine Neuschneedecke bis zu 95 % aus Luft besteht und eine geringe Dichte aufweist (ca. 100 kg/m³). Mit der Zeit wird der Schnee verdichtet, und der Restschnee nach der Schmelzperiode, der sogenannte Firn, hat eine deutlich höhere Dichte von rund 500 kg/m³. Firn verwandelt sich durch Schmelzen und Wiedergefrieren sowie den Druck der darüber liegenden Schichten schließlich in Gletschereis, das luftundurchlässig und kompakt ist (Dichte: 910 kg/m³). Es befindet sich im Vergleich zu anderen Feststoffen auf der Erdoberfläche fast ständig nahe des Schmelzpunktes und ist zwar langsam, aber gut verformbar. Daher kann sich Gletschereis auf geneigten Berghängen wie eine zähe Flüssigkeit in Richtung Tal bewegen.

Temperatur ist nicht gleich Klima

Die Lufttemperatur spüren Menschen ganz direkt: Sie ist ein wesentlicher Teil dessen, was wir als „Wetter“ wahrnehmen. Daher ist oft die Änderung der Temperatur gemeint, wenn man von der Entwicklung des Klimas spricht. Wie sich die Temperatur

Änderung der Jahresmitteltemperatur relativ zum Mittelwert 1981–2010



im Alpenraum verändert hat, zeigt die obige Grafik: Sie vergleicht unterschiedlich lange Reihen der jährlichen Temperaturanomalien an mehreren Stationen in Bayern mit denen des Mittels für die Nordhalbkugel. Die lange Messreihe am Hohenpeißenberg dokumentiert eine deutliche Abkühlung nach dem Ende der Kleinen Eiszeit um 1890, als sich die bayerischen Gletscher noch ausdehnten. Seit den 1980er Jahren ist an allen Stationen gleichermaßen ein Anstieg der Temperatur zu verzeichnen, der deutlich steiler ausfällt als für das Mittel der Nordhalbkugel. Insgesamt betrachtet ist die Temperatur aber nur eine Größe unter vielen, die man unter dem Begriff „Klima“ zusammenfassen kann. Für den Einfluss des Klimas auf die Massenbilanz der Gletscher ist die Temperatur zwar ein guter Hinweis – ob sie wachsen oder schmelzen, ist allerdings das Ergebnis eines Zusammenspiels unterschiedlicher Faktoren. Einige dieser Faktoren beeinflussen sich gegenseitig, sodass bestimmte Prozesse verstärkt oder abgeschwächt werden. Die Reaktionszeit eines Gletschers kann je nach seiner Größe, seiner Lage und den lokalen klimatischen Bedingungen zwischen wenigen Jahren und einigen Jahrzehnten betragen. Insgesamt sind Gletscher deshalb so gute Klimaindikatoren, weil an ihnen erst dann deutliche Veränderungen zu sehen sind, wenn der Trend der Witterungsänderungen sich dauerhaft in eine Richtung bewegt.

Das Eis der Gletscher trägt in ihrem direkten Umfeld wesentlich zur Wasserversorgung bei.

95%

Luft sind maximal in einer Neuschneedecke enthalten.

Was ist eigentlich ...

... eine Gletscherzunge?

Als Gletscherzunge bezeichnet man den schmalen, oft zungenförmigen unteren Teil eines Gletschers. Im Gegensatz zum Akkumulationsgebiet, das oft aus mehreren Becken besteht, fließt ein Gletscher üblicherweise nur in ein Tal und endet dann in einer langgestreckten Gletscherzunge. Eine Gletscherzunge muss nicht vollständig aus Eis bestehen, sondern ist oft von Geröll oder Schutt bedeckt. Allerdings haben nicht alle Gletscher ein zungenförmiges Ende, oder sie haben ihre Zunge schon verloren.

Was beeinflusst Gletscher?

Ob Gletscher anwachsen oder schmelzen, hängt von einem **Zusammenspiel** unterschiedlicher Faktoren ab: eine Übersicht.

910 kg/m³

beträgt die Dichte
von Gletschereis, das erst nach
Monaten bis Jahren entsteht.



Globalstrahlung

Kurzwellige Sonnenstrahlung, die auf die Erdoberfläche trifft, heißt Globalstrahlung. Sie bestimmt die bodennahe Lufttemperatur und ist die wichtigste Energiequelle für Gletscherschmelze.

Wie intensiv die Globalstrahlung ausfällt, hängt von ihrer Dämpfung durch die Atmosphäre (z. B. durch Wolken) und vom Einfallswinkel (z. B. Unterschied zwischen Sommer und Winter) ab. Kurzfristig dämpfen vor allem Wolken die Globalstrahlung, langfristig aber auch die Zusammensetzung der Atmosphäre: Aerosole und Spurengase können sie erheblich reduzieren.

Insgesamt nimmt die Globalstrahlung aber seit Beginn des 20. Jahrhunderts zu, mit einer Unterbrechung in den 1950er und 1960er Jahren. Die Details dieser Entwicklung sind noch nicht vollständig verstanden. Ausgeschlossen werden können natürliche Schwankungen der Strahlungsleistung der Sonne.



Lufttemperatur

Neben der Meereshöhe beeinflusst vor allem das Verhältnis zwischen Einstrahlung und Ausstrahlung die Lufttemperatur. In Zeiten mit positiver Strahlungsbilanz (mehr Einstrahlung als Ausstrahlung, z. B. im Sommer) erwärmt sich die bodennahe Luft, ansonsten kühlt sie sich ab.

Im Hochgebirge verringert die über Schnee und Eis deutlich höhere Albedo (s. rechts) zwar die absorbierte Einstrahlung. Da sich eine Gletscheroberfläche aber nicht über 0 °C erwärmen kann, wird die übrige Energie vollständig für das Schmelzen oder Verdunsten von Eis eingesetzt.

Dennoch hat die Lufttemperatur große Bedeutung für die Gletscher: Nimmt die Temperatur durch den Klimawandel generell zu, verkürzen sich die Zeiträume, in denen Schnee fällt – und Schnee ist für das Wachstum der Gletscher entscheidend.



Feuchte

Die Luftfeuchte hat eine oft wenig berücksichtigte Bedeutung für die Gletscherschmelze: Mit steigender Temperatur nimmt die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf exponentiell zu. Damit hängt die Umwandlung von Eis zu Wasser und Wasserdampf nicht nur von der verfügbaren Wärme-Energie ab, sondern auch von der Wasserdampfsättigung der Luft.

Ein übliches Maß für die Luftfeuchtigkeit ist die relative Feuchte. Sie ist definiert als das prozentuale Verhältnis zwischen dem tatsächlichen Gehalt an Wasserdampf in der Luft und deren maximaler Aufnahmekapazität. Diese wiederum ist abhängig von der Lufttemperatur: Ist die Luft über dem Gletscher vollständig mit Wasserdampf gesättigt, kann kein Schmelzwasser mehr verdampfen, und die Energie wird vollständig für die Schmelze verwendet. An feuchten Tagen ist daher die Eisschmelze bei gleichem Energieangebot erhöht.

Ein absolutes Maß für die Luftfeuchtigkeit ist der sogenannte Wasserdampfpartialdruck (Dampfdruck). Er gibt an, wie viel der Wasserdampf zum insgesamt herrschenden Luftdruck beiträgt.



Albedo

Das Verhältnis von einfallender Globalstrahlung zu reflektierter Strahlung nennt man Albedo. Je dunkler eine Oberfläche ist, desto mehr Energie kann sie aus der Strahlung absorbieren. Daher steht auf einem Gletscher mit dunklerer Oberfläche (Eis statt Schnee, Bedeckung mit Staub oder Mikroorganismen) mehr Energie für die Schmelze zur Verfügung.

Mit flacherem Sonnenstand wächst auch die Albedo – deshalb wirkt ein mit Neuschnee bedeckter Gletscher im Winter heller als im Sommer. Ablagerungen von Schmutz und Staub, die mit der touristischen Nutzung der Gletscher zunehmen können, führen zu einer Verringerung der Albedo. Dadurch absorbiert die Gletscheroberfläche einen höheren Teil der einfallenden Globalstrahlung, und Eis und Schnee schmelzen schneller.

Generell ist es äußerst schwierig, den Niederschlag im Gebirge zu messen, das gilt vor allem für die Messung von Schneehöhen und deren Wasseräquivalent.



Niederschlag

Für den Massenhaushalt von Gletschern ist Niederschlag sehr wichtig. Berge stehen dem Transport der Luftmassen im Weg und lösen daher häufig Regen- oder Schneefälle aus. Diese nehmen mit der Höhe zu und können auf den Gipfeln doppelt so stark sein wie im Tal. Unabhängig von der Höhe gibt es aber auch lokale Unterschiede in der Niederschlagsmenge.

Im Hochgebirge fällt Niederschlag von Oktober bis Mai in der Regel als Schnee, der auf den Gletschern die Eisschmelze im Sommer ausgleicht.

Die in Regenwasser enthaltene Wärme lässt Gletscher dagegen schneller schmelzen. In Sommern mit viel Regen am Spätnachmittag, wie etwa 2017, ist daher die Gletscherschmelze intensiver als in trockenen Jahren.

Generell ist es äußerst schwierig, den Niederschlag im Gebirge zu messen, das gilt vor allem für die Messung von Schneehöhen und deren Wasseräquivalent.



Geländeform

Die meisten meteorologischen Größen verändern sich stark mit der Höhe – deswegen wirkt sich das Gelände auch auf den Zustand von Gletschern aus. Die bayerischen Gletscher befinden sich alle in einem Höhenbereich, in dem unter den heutigen klimatischen Bedingungen keine Gletscher mehr entstehen könnten, weil Schnee dort nicht über mehrere Jahre liegen bleibt.

Auch die Art des Geländes ist wesentlich: Ausgedehnte Flächen im Akkumulationsgebiet führen zu einem großen Schneeangebot. Steile Felsumrandungen – etwa beim Höllentalferner – beschatten und liefern Lawinenschnee. Der Neigungswinkel und die Ausrichtung der Gletscheroberfläche zur Sonne hin bestimmen den Einfluss der Strahlung.



Eisbewegung

Da Gletschereis über längere Zeiträume verformbar ist, bewegt es sich langsam talabwärts. Seine Geschwindigkeit kann dabei mehrere hundert Meter pro Jahr betragen. Die bayerischen Gletscher kommen innerhalb eines Jahres aber höchstens noch wenige Meter voran.

Wie schnell sich Gletschereis bewegt, hängt von seiner Dicke und von der Oberflächenneigung ab. Zusätzlich spielt die Temperatur eine Rolle, da kaltes Eis schwerer zu verformen ist als Eis nahe am Schmelzpunkt. Gletscher können über ihren Untergrund gleiten, wenn dort Schmelzwasser existiert. Sobald an ihrer Zunge mehr Eis schmilzt, als aus dem Akkumulationsgebiet nachtransportiert werden kann, werden die Gletscher kürzer.



Schuttbedeckung

Im Laufe der Zeit können große Bereiche der Gletscherfläche mit Schutt bedeckt werden. Das Gesteinsmaterial kommt entweder durch die Schmelze langsam an die Oberfläche oder fällt durch Lawinen und Felsstürze darauf.

Ist die dunkle Gesteinschicht nur einige Millimeter dick, absorbiert sie die Sonnenstrahlung und gibt die entstehende Wärme an das Eis ab. Somit schmilzt es schneller als unbedecktes Eis. Ist die Schicht dicker, wirkt sie hingegen isolierend, und das darunterliegende Eis schmilzt langsamer. Häufig trennen sich diese Bereiche bei abschmelzenden Gletschern im Laufe der Zeit von der eigentlichen Gletscherzunge ab und bilden sogenanntes Toteis.

Gletschergebiete im Wasserkreislauf

Betrachtet man das Wassersystem der Erde, sind Gletscher **wahre Langzeitspeicher**. Ganze Regionen sind auf sie angewiesen.

Im Gegensatz zur Schneedecke, die sich innerhalb eines Jahres auf- und wieder abbaut, sind Gletscher im Wasserhaushalt wahre Langzeitspeicher. Das Gletschereis dient dabei als Wasservorrat, der durch Niederschlag in Form von Schnee aufgefüllt wird, während die Eisschmelze im Sommer den Vorrat abbaut.

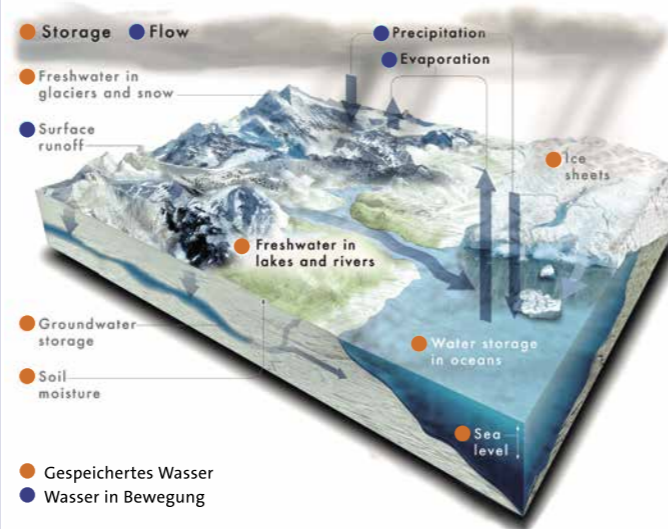
Gletscher liefern Wasser, wenn andere Quellen wegfallen

Das Schmelzwasser fließt wegen des meist großen Gefälles sehr schnell über Gletscherbäche ab. Neben diesem Schmelzwasser führen Gebirgsflüsse aber auch Wasser aus der übrigen Schneeschmelze im späten Winter und Frühjahr sowie Regen und einen Teil Grundwasser. Üblicherweise liefern die Gletscher dann besonders viel Schmelzwasser, wenn diese anderen Quellen erschöpft sind, zum Beispiel während trockener Schönwetterlagen im Sommer. Damit tragen sie dazu bei, dass Flüsse einen ausgeglicheneren Wasserpegel haben, was etwa für den Betrieb von Flusskraftwerken oder die Entnahme von Kühlwasser von Vorteil ist. Wie stark dieser Effekt ausfällt, hängt davon ab, wie hoch der Anteil des Schmelzwassers aus Gletschern im Vergleich zu den anderen Komponenten ist. Das Verhältnis lässt sich zwar nicht direkt messen, aber über sogenannte Abflussmodelle schätzen. So war es ein Schwerpunkt des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts GLOWA-Danube, den Anteil des Gletscherschmelzwassers im Gebiet der oberen Donau inklusive des Inns im Verhältnis zu Regen und Schneeschmelze zu bestimmen.

Wie viel tragen die Alpengletscher zum Wasserhaushalt bei?

Je nach Gletscher ist es sehr unterschiedlich, wie viel Schmelzwasser abfließt: An der momentan nur noch 15 ha großen Oberfläche des Nördlichen Schneefeners können an einem heißen Julitag bis zu 10 cm Eis abschmelzen – das entspricht

Wasserkreislauf der Erde



Sonnenwärme trägt dazu bei, dass Gletscher schmelzen. Ihr Wasser fließt in Flüsse, Seen und Ozeane. Verdunstetes Wasser füllt als Schnee die Eisvorräte wieder auf – doch wegen des Klimawandels kann dieser Effekt die Schmelze heute nicht mehr ausgleichen.

einer Wassermenge von beinahe 14 Mio. Litern. Verglichen mit dem durchschnittlichen täglichen Trinkwasserverbrauch der Stadt München, der bei ungefähr 205 Mio. Litern liegt, sind das nur knapp 7 %. Für die übergeordneten Einzugsgebiete ist die Bedeutung der Alpengletscher für den Wasserkreislauf also eher gering. So liegt die mittlere jährliche Niederschlagshöhe im Einzugsgebiet der Donau (inklusive des Inns) bei Passau/Achleiten bei 926 mm. Im Jahr 2000 betrug die in den insgesamt 556 Gletschern des Einzugsgebiets gespeicherte Wassermenge dagegen nur 214 mm bezogen auf die Fläche des Einzugsgebiets. Aus diesen Gletschern schmolzen im Rekordjahr 2003 ungefähr 21 mm Wasser ab; durchschnittlich sind es nur um die 6 mm



80%

der Gesamtwassermenge stammt in hochgelegenen Einzugsgebieten der Alpen aus Gletschern.

In den Trockenregionen der Erde sind Landwirtschaft, Industrie und Gesellschaft abhängig von Gletscherwasser.

pro Jahr. Folglich entspricht die Eisschmelze nur etwa 0,5 – 2 % des Niederschlags. Weil der Anteil aber vor allem in Trockenperioden ansteigt, ist er dennoch wichtig.

Wasserknappheit wegen schwindender Gletscher muss man nur innerhalb der Alpen befürchten. Dort wird sich die ausbleibende Gletscherschmelze vor allem in den hochgelegenen Einzugsgebieten nahe der Gletscher bemerkbar machen: Hier gibt es in heißen und trockenen Sommern keinen Ersatz für das Gletscherwasser, das bis zu 80 % der Gesamtwassermenge ausmacht.

Geringe Bedeutung der bayerischen Gletscher

Das Gesamtvolumen der bayerischen Gletscher von 3,95 Mio. m³ entspricht etwa der Wassermenge, die bei einer durchschnittlichen Wasserführung von 63,8 m³ pro Sekunde in der Isar innerhalb von 17 Stunden durch München fließt. Zur gesamten Eisreserve im Einzugsgebiet der oberen Donau tragen sie gerade einmal mit 0,09 % bei. Selbst im deutlich kleineren Einzugsgebiet der Isar am Pegel München (Fläche: 2.840 km²) entsprechen ihre Eisreserven nur einem durchschnittlichen Niederschlag über die Gesamtfläche von 2,8 mm gegenüber dem jährlichen Gebietsniederschlag von über 1000 mm. Diese Zahlen zeigen, dass die bayerischen Gletscher für den Wasserhaushalt im Freistaat vernachlässigbar sind.

Die Schneeschmelze ist relevant

Im Gegensatz zur Eisschmelze spielt die Schneeschmelze eine wichtige Rolle für die Flüsse im Alpenvorland, deren Quellen in den Alpen liegen. Diese Flüsse, darunter etwa Iller, Lech, Isar und Inn, führen zeitweise über 30 % Schneeschmelzwasser und insgesamt höhere Wassermengen als Flüsse ohne Anschluss an das Gebirge. So hat z. B. die Isar in München eine deutlich höhere Wasserführung als die benachbarte Amper am Pegel Inkofen, wo ein vergleichbar großes Einzugsgebiet entwässert wird, das aber vollständig im Alpenvorland liegt. Hier zeigt sich die häufig zitierte Wirkung des „Wasserschlosses Alpen“ als Wasserlieferant

für das Umland: Der vergleichsweise hohe Niederschlag in den Alpen kommt auch der Wasserversorgung in den angrenzenden Regionen zugute.

Weltweite Situation: In Trockengebieten wird das Wasser knapp

In anderen Regionen der Welt bestimmen Gletscher wesentlich stärker die Verfügbarkeit von Wasser. So fällt während des Sommers in großen Gebieten Zentralasiens kaum Regen. Die Gletscher des Tien Schan und des Pamir tragen hier wesentlich zur Wasserversorgung bei, indem sie die Flüsse Amu-Darja und Syr-Darja mit Wasser speisen. Das Verhältnis der sommerlichen Schmelzwasserproduktion zum Gesamtniederschlag, der v. a. im Winter fällt, ist gerade im Gebiet des Aral-Sees mit 79 % sehr hoch. Generell trägt das Schmelzwasser rund um die Gebirge des Tien Schan und des Pamir trotz der Größe des Einzugsgebiets mehr als 20 % zum gesamten Wasserhaushalt bei.

Ganz anders ist die Situation im Einzugsgebiet des Ganges: Hier prägt fast ausschließlich der Monsunregen von Juni bis September den Gesamtniederschlag. In den restlichen Monaten fällt fast kein Regen. Der prozentuale Anteil des Gletscher-Schmelzwassers aus den Quellgebieten im Himalaya ist mit 33 % des Niederschlags ähnlich groß wie im oberen Ötztal. Vergleichbar ist die Lage im ebenfalls vom Sommermonsun beeinflussten Einzugsgebiet des Indus in Pakistan und Nordwest-Indien.

Die größte Bedeutung hat die Gletscherschmelze in Regionen, in denen im Sommer so gut wie gar kein Niederschlag fällt, wie beispielsweise am Rio Santa in Peru. Hier ist das geschmolzene Eis der Gletscher während der Trockenmonate der einzige relevante Beitrag zum Flusswasser – es trägt mit mindestens 40 %, in den oberen Bereichen sogar mit bis zu 80 %, zur jährlichen Gesamtwassermenge bei.

Insgesamt muss man die Bedeutung der Gletscher für den Wasserkreislauf weltweit differenziert betrachten. Die durch ihr Abschmelzen verursachte Wasserknappheit wird aber vor allem Menschen in den Trockengebieten dieser Erde treffen.

Gletscher in Bayern heute

Für das Vorhaben „**Alpengletscher als Klima-indikatoren**“ untersuchten Forscher der BADW den Zustand von Bayerns Gletschern.



Vermessungsarbeiten am
Südlichen Schneeferner:
Eisreste gibt es hier nur noch
unter den Schneedepots des
Skigebiets auf der Zugspitze.

Finanziert vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz haben Forscher der Bayerischen Akademie der Wissenschaften die Gletscher Bayerns 2018 neu vermessen. Mit diesem Bericht liegen die neuen Berechnungen für Volumen und Fläche vor: Seit 2012 haben die Gletscher deutlich an Masse und Ausdehnung verloren. Insgesamt beträgt ihre Gesamtfläche aktuell 44,6 ha im Vergleich zu 70,4 ha im Jahr 2012. Das entspricht einem Flächenverlust von 37 % oder ungefähr 36 Fußballfeldern.

Die Klimaveränderung setzt den Gletschern zu

Das Gesamtvolumen der bayerischen Gletscher lag im Jahr 2018 bei nur noch 3,95 Mio. m³ – damit betrug ihre durchschnittliche Dicke 8,9 m. Für das Vergleichsjahr 2009 haben die Forscher die Gletschervolumina auf der Basis des durch das Abschmelzen freigelegten Untergrunds neu berechnet. Daher stimmen diese aktualisierten Werte nicht mehr mit denen des letzten Berichts überein. Es ergibt sich für 2009 ein Gesamtvolumen von 10,3 Mio. m³. Damit beträgt der Volumenverlust von 2009 zu 2018 62 %. Dieser große Verlust über nur neun Jahre macht deutlich, dass die klimatischen Bedingungen für die Existenz von Gletschern in den bayerischen Alpen nicht mehr gegeben sind. Schon seit Jahrzehnten liegt die klimatische Schneegrenze oberhalb der Gipfelhöhen, und die Veränderung des Klimas setzt den Gletschern stark zu.

Bald nur noch vier deutsche Gletscher

Bisher gab es in den bayerischen Alpen noch fünf Gletscher: den Nördlichen und Südlichen Schneeferner und den Höllentalferner auf dem Zugspitzmassiv (2.962 m), den Watzmann-gletscher unterhalb der Watzmannmittelspitze (2.713 m) und das Blaueis im Kar nördlich des Hochkalters (2.607 m) in den Berchtesgadener Alpen. Aktuell ist der Höllentalferner nicht nur der flächenmäßig größte Gletscher in Bayern, er hat auch das größte Volumen, gefolgt vom Nördlichen Schneeferner. Vor allem im Hinblick auf das Volumen spielen der Südliche Schneeferner, der Watzmann-gletscher und das Blaueis heute keine Rolle mehr. Im Gegensatz zu den anderen Gletschern konnte das Blaueis seine Volumenverluste mit 48 % noch in Grenzen halten. Der Südliche Schneeferner hat dagegen 80 % seines Volumens verloren – seine Eisreste werden in wenigen Jahren verschwunden sein. Damit wird es in Deutschland bald nur noch vier Gletscher geben.

37 %
ihrer Fläche haben
die bayerischen Gletscher
seit 2012 verloren.

Lage der fünf bayerischen Gletscher



Volumina und charakteristische Eisdicken der bayerischen Gletscher*

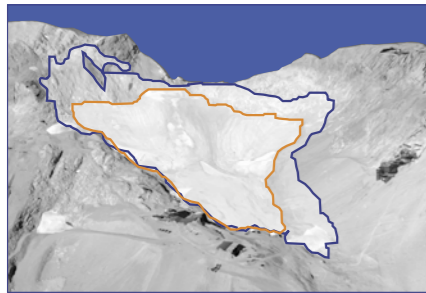
| Gletscher | Volumen (Mio. m³) | Mittlere Dicke (m) | Max. Dicke (m) |
|-------------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| Nördlicher Schneeferner | 1,71 (5,16) | 10,6 (16,8) | 33 (52) |
| Südlicher Schneeferner | 0,08 (0,40) | 1,3 (4,6) | 10 (16) |
| Höllentalferner | 1,74 (4,87) | 10,4 (19,8) | 33 (48) |
| Watzmann-gletscher | 0,14 (0,61) | 2,9 (10,7) | 10 (16) |
| Blaueis | 0,28 (0,54) | 5,3 (7,4) | 17 (21) |

Flächen und charakteristische Höhen der bayerischen Gletscher*

| Gletscher | Fläche (ha) | Höchster Punkt (m) | Tiefster Punkt (m) |
|-------------------------|-------------|--------------------|--------------------|
| Nördlicher Schneeferner | 16,1 (27,8) | 2686 (2792) | 2588 (2556) |
| Südlicher Schneeferner | 1,8 (4,8) | 2621 (2665) | 2560 (2557) |
| Höllentalferner | 16,7 (24,7) | 2549 (2589) | 2207 (2203) |
| Watzmann-gletscher | 4,8 (5,6) | 2108 (2119) | 1998 (1998) |
| Blaueis | 5,2 (7,5) | 2361 (2368) | 2023 (1937) |

*Die Zahlen in Klammern sind die Werte zum Zeitpunkt der letzten Vermessung, wobei diese durch Neuberechnung des Gletscherbetts nicht mehr mit den Werten des ersten Gletscherberichts übereinstimmen.

Nördlicher Schneeferner



Entwicklung der Gletscherflächen

— 2006 reicht die Eisbedeckung noch fast durchgehend bis ins Zentrum Sonnalpin (s. Foto rechte Seite).

— 2018 hat der Gletscher seine Zunge fast vollständig verloren.

Der Nördliche Schneeferner ist der höchstgelegene, aber inzwischen nur noch zweitgrößte Gletscher Bayerns. Er entstand nach der Aufspaltung des Plattachferners auf dem Zugspitzplatt und befindet sich in einer Karmulde. Wegen der Lage direkt östlich des Grates zwischen Zugspitze und Schneefenerkopf fallen dort häufig hohe Niederschläge. Seit 1979 schmilzt der Nördliche Schneeferner wie alle bayerischen Gletscher immer weiter ab, was allerdings durch seine Einbettung lange Zeit nur zu geringen Flächenänderungen führte. Inzwischen hat der Gletscher jedoch einen Großteil seiner Zunge verloren: Dort war das Eis deutlich dünner als im Zentrum. Auch der steile Bereich unterhalb des Schneefenerkopfs ist wegen seiner geringeren Eisdicken inzwischen komplett verschwunden.

Was ist eigentlich ...

... eine Karmulde?

Als Karmulde bezeichnet man eine kessel-förmige Vertiefung in der alpinen Landschaft, die an einer oder mehreren Seiten von Graten und Gipfeln umgeben ist. Solche Mulden wurden meist von kurzen Gletschern ausgeschürft, die durch die hohen Niederschläge auf der windabgewandten Seite der Gebirgskämme entstanden.



Der Nördliche Schneeferner im September 2016 von der Bergstation der Zugspitzbahn aus. Deutlich zu sehen ist die künstliche Zugangsrampe vom Zentrum Sonnalpin in die Mulde des Gletschers.



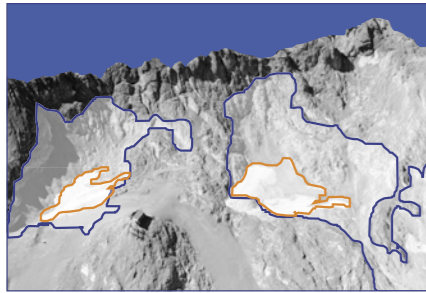
2006

Perspektivische Ansichten des Nördlichen Schneefeners auf dem Zugspitzplatt in den Jahren 2006 und 2018, abgeleitet aus Luftbildaufnahmen.



2018

Südlicher Schneeferner



Entwicklung der Gletscherflächen

— 2006 ist der Gletscherrückgang am Südlichen Schneeferner bereits stark fortgeschritten.

— 2018 sind nur noch Eisreste vorhanden.

Der Südliche Schneeferner existiert heute fast nicht mehr, obwohl er kurz nach dem Zerfall des Plattachferners der größte Gletscher in Bayern war. Da der Untergrund nicht so günstig beschaffen ist wie am Nördlichen Schneeferner (keine ausgeprägte Muldenlage), war das Gletschereis hier deutlich dünner. Daher verlor der Südliche Schneeferner sehr viel von seiner Fläche. Heute erhalten sich die Eisreste nur noch unter den sommerlichen Schneedepots des Skigebiets an der Zugspitze.



Ebenfalls von der Bergstation der Zugspitzbahn aufgenommen: der Südliche Schneeferner im September 2016.

Was ist eigentlich ...

... Toteis?

Teile des Eises, die nicht mehr aktiv mit einem Gletscher verbunden sind, bezeichnet man als Toteis. Sie sind meist mit Sediment bedeckt und zeigen wegen ihrer fehlenden Verbindung mit dem übrigen Gletscher keine Bewegung mehr. Solche Toteiskörper kommen in der Regel in Regionen mit einem lang anhaltenden Verlust von Gletschermasse vor. Da fließende Gletscher Mulden im Untergrund gut ausfüllen können, bleiben in solchen Mulden wegen der höheren Eisdicke auch nach einem Abschmelzen des Gletschers Eisreste zurück. Bei stark schuttbedeckten Gletschern kann es geschehen, dass der in höheren Bereichen dünnere Schutt das Eis weniger schützt als an der Zunge. Dadurch kommt es dort zu stärkerer Eismelze und die Zunge wird vom Hauptgletscher getrennt. Bei großen Schuttdicken können solche Toteiskörper viele Jahrzehnte überdauern. Nach ihrem Abschmelzen bilden sich z. T. Toteislöcher oder -kessel.



2006

Der Südliche Schneeferner auf dem Zugspitzplatt in den Jahren 2006 und 2018. Neben den Eisresten ist 2018 die Bergstation des Ersatzbaues für den alten Lift erkennbar.



2018

Höllentalferner



Entwicklung der Gletscherflächen

- 2006 ist das mit Eis bedeckte Gebiet noch verhältnismäßig groß.
- 2018 ist die Gletscherzunge des Höllentalferners deutlich zurückgegangen.

Was ist eigentlich ...

... ein Moränenwall?

Ein Moränenwall entsteht durch Gesteinsmaterial (Moränen), das Gletscher bei ihrer Bewegung mittransportieren und aufhäufen. Man unterscheidet zwischen Seitenmoränen an den Gletscherseiten und End- oder Stirnmoränen, die sich bei einem Gletschervorstoß an der Gletscherfront bilden.

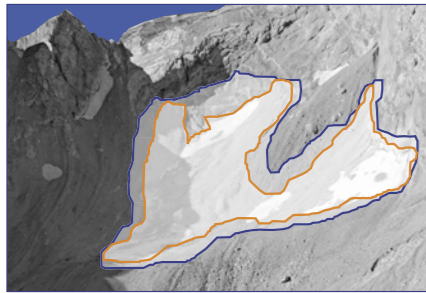
Der Höllentalferner ist heute der größte Gletscher Bayerns. Er liegt in einer tiefen Senke nördlich des Zugspitzgipfels. Nach Süden hin beschatten ihn mehrere hundert Meter hohe Felswände. Auch nach Westen und Nordwesten rahmen hohe Felswände den Gletscher ein. Der Höllentalferner – etwa 200 bis 300 m tiefer gelegen als der Nördliche Schneeferner – kann nur existieren, weil er die meiste Zeit im Schatten der umliegenden Berge liegt und die Niederschläge durch die windabgewandte Lage stark sind. Er ist der einzige Gletscher in Bayern, der noch eine echte Gletscherzunge hat und in dessen oberem Bereich zumindest zeitweise mehr Schnee fällt als abschmilzt. Lawinenabgänge aus der Felsumrahmung verursachen einen wesentlichen Teil der Akkumulation im oberen Teil des Gletschers. Die steile Geländeform und der große Gegensatz zwischen Schnee-Eintrag im oberen Bereich und starker Eisschmelze auf der Gletscherzunge führen dazu, dass sich der Gletscher deutlich bewegt, was an einigen großen Spalten im mittleren Teil zu sehen ist. In der unmittelbaren Umgebung des Höllentalferners kann man wie an keinem anderen Gletscher in Bayern die neuzeitliche Geschichte der Gletschervorstöße erkennen: Moränenwälle zeugen von den Gletscherausdehnungen um 1820, 1850, 1920 und dem letzten kurzen Vorstoß, der etwa im Jahr 1980 endete.

Der Höllentalferner im September 2016: Schutt bedeckt zunehmend die Gletscherzunge. Deutlich zu sehen sind die tiefen Schmelzwasserrinnen auf der Gletscherzunge.



Der Höllentalferner nördlich des Zugspitzgipfels in den Jahren 2006 und 2018: Die Gletscherzunge ist deutlich zurückgegangen und das Akkumulationsgebiet erheblich abgesunken.

Watzmanngletscher



Entwicklung der Gletscherflächen

— 2009 ist der Watzmanngletscher großflächig mit Schnee bedeckt.

— 2018 sind Eisreste fast nur noch in der Karmulde zu erkennen.

Der Watzmanngletscher ist inzwischen in großen Teilen von Schutt bedeckt. Er befindet sich östlich der Mittelspitze des Watzmanns und ist mit einer mittleren Höhe von nur 2.060 m über dem Meer der tiefstgelegene Gletscher Bayerns. Die bisherigen Beobachtungen zeigen, dass der Watzmanngletscher deutlicher als die anderen Gletscher auf klimatische Veränderungen reagierte: In der Wärmeperiode vor 1949 zerfiel er in einzelne Firnflecken und wurde längere Zeit nicht mehr als Gletscher gezählt. Während alle anderen bayerischen Gletscher von 1949 bis 1959 weiter erheblich an Masse verloren, wuchs der Watzmanngletscher jedoch bereits wieder an. Bis etwa 1980 verzeichnete er die relativ größte Flächenzunahme aller Gletscher in Bayern und stieß deutlich vor.

Mittlerweile entwickelt sich das Volumen des Watzmanngletschers allerdings so wie das der anderen kleineren Gletscher. Heute füllt das Eis nur noch die Karmulde sowie eine Flanke direkt unter dem Watzmann, die stark schuttbedeckt und gut vor der Sonneneinstrahlung geschützt ist. Wegen seiner Lage ändert sich die Fläche des Gletschers nur wenig, und der Eisverlust zeigt sich hauptsächlich, indem die Oberfläche absinkt.



Was ist eigentlich ...

... Geodäsie?

Geodäsie oder Erdmessung beschäftigt sich mit der Ermittlung der Form der Erde: Die Erde ist keine Kugel, sondern an den Polen abgeplattet und zudem leicht unregelmäßig geformt. Eine der zentralen Aufgaben der Geodäsie ist es, eindeutige Bezugsräume als Grundlage für Vermessung und Navigation zu bestimmen.

Geodätische Messungen am Watzmanngletscher, 2019. Im Gegensatz zu den Vorjahren ist die Oberfläche nach dem Sommer noch mit Schnee bedeckt.



Der Watzmanngletscher östlich des Watzmanngipfels 2009 und 2018. Wegen der starken Schneebedeckung ist 2009 die Ausdehnung des Gletschers nur schwer zu erkennen. 2018 ist der Gletscher fast ganz in die Karmulde zurückgeschmolzen und erstreckt sich noch unter dem Schutt auf der rechten Flanke.

Blaueis im Kar



Entwicklung der Gletscherflächen

— 2009 erkennt man deutlich einen oberen und unteren Gletscherteil.
— 2018 ist das Blaueis in fünf Einzelteile zerfallen.

Das Blaueis, der nördlichste Gletscher in Bayern, ist in einen tiefen Einschnitt nördlich des Hochkalter-Gipfels eingebettet. Seine Lage schützt es fast ganzjährig weitgehend vor Sonneneinstrahlung. Die steile Felsumrahmung sorgt dafür, dass sich viel Lawinenschnee ansammeln kann. Zur Zeit seiner größten Ausdehnung um 1820 bedeckte das Blaueis etwa 25 ha – heute sind davon nur noch 5,2 ha geblieben. In den letzten Jahren hat sich der Gletscher mehrfach geteilt, indem durch die Eisschmelze hochstehende Felsriegel freigelegt wurden. Der steilere obere Bereich besteht inzwischen aus zwei getrennten Eisflächen, der flachere untere Bereich hat sich in drei Einzelteile aufgespalten. Die unterste Teilfläche des Gletschers ist schon seit Jahren mit Schutt bedeckt. Mit 5,3 m durchschnittlicher Eisdicke ist das Blaueis allerdings noch in einer besseren Situation als der benachbarte Watzmanngletscher (2,9 m).

Seit Jahren bekommt der ehemalige Zungenbereich keinen Nachschub aus Akkumulation oder Eistransport und schmilzt daher weiter ab. Auch der obere Teil des Gletschers ist im Herbst nur noch selten mit Schnee bedeckt. Trotz der schattigen Lage ist es daher nur noch eine Frage von wenigen Jahren, bis das Blaueis vollständig abgeschmolzen sein wird.



Seine schattige Lage schützt das Blaueis vor Sonneneinstrahlung.

2018



2009

Bilder aus den Jahren 2009 und 2018 zeigen, wie sich das Blaueis nördlich des Hochkalter-Gipfels entwickelt hat: Heute ist der Gletscher in mehrere Einzelteile zerfallen. Der tiefste und schuttbedeckte Bereich erstreckt sich unterhalb des unteren Bildrands.

Ein Tag auf dem Höllentalferner

Die Geophysikerin **Dr. Astrid Lambrecht** schildert eine Forschungsexpedition auf einen bayerischen Gletscher.

04.00 Uhr: Aufstehen!

Um vier Uhr morgens ist es Mitte November stockdunkel: keine schöne Zeit, um aufzustehen. Frühstück ist keine Option, da der Magen dazu noch nicht bereit ist. Doch die Abfahrt von der Akademie im Zentrum Münchens ist auf fünf Uhr festgesetzt, damit wir die heute geplanten Arbeiten am Höllentalferner unterhalb des Zugspitzgipfels noch bei Tageslicht schaffen. Eisdickenmessungen muss man bei kalten Temperaturen durchführen, weil Schmelzwasser das Radarsignal dämpft oder gar nicht durch den Gletscher dringen lässt. Daher nehmen wir diese Messungen entweder im Herbst oder zu Beginn des Frühjahrs vor. Leider ist derzeit die Höllentalangerhütte geschlossen, und inklusive der Anfahrt steht uns ein langer Messtag bevor. Also flugs rauf aufs Fahrrad und in die Akademie geradelt. Meine Kollegen sind schon eingetroffen. Das Material haben wir am Vortag gepackt, es ist schnell eingeladen.

06.30 Uhr: Ankunft am Fuß der Zugspitze

Nach etwa eineinhalb Stunden erreichen wir Hammersbach am Fuß der Zugspitze. Es ist immer noch dunkel, als wir unseren Dienstwagen auf dem Wanderparkplatz abstellen und die Rucksäcke packen. Alles, was wir am Vortag bereitgestellt haben, muss mit: die unhandliche Radarantenne, der Controller, Batterien für die Stromversorgung, der Laptop für die Datenaufzeichnung, die dicken Radarkabel und Seile, um das Messsystem über den Gletscher zu ziehen. Zusätzlich benötigen wir noch GNSS-Empfänger – besser bekannt unter dem Namen des amerikanischen Satellitensystems GPS – inklusive Kabeln und Batterien. Damit können wir die Position unserer Messungen genau bestimmen. Schaufeln, Maßbänder, eine Waage, Probenzylinder und Kleinteile zur Bestimmung der Schneedichte vervollständigen unsere Ausrüstung. Hinzu kommt noch die persönliche Habe, vor allem Handschuhe, Mütze und eine winddichte Jacke, und obendrauf gibt es dann noch die Trinkflasche und den Tagesproviand.

07.00 Uhr: Frühstück im Stehen

Nach einem kleinen Frühstück im Stehen geht es los. Wir wandern mit den schweren Rucksäcken und im Schein der Stirnlampen durch den immer noch dunklen Wald entlang des Hammersbachs. Schon bald wird der Weg steiler, der Fahrweg



Im Spätherbst ist der Aufstieg zum Gletscher schwierig, besonders hier am Anfang des Klettersteigs.

endet, und in der Dämmerung nähern wir uns dem Eingang der Höllentalklamm. Der Weg durch die Klamm ist um diese Jahreszeit schon geschlossen und wir nehmen einen kurzen Umweg über den Stangensteig, um erst im oberen Bereich der Klamm wieder auf den Hauptweg zu kommen. Gegen halb neun erreichen wir die Höllentalangerhütte, endlich ein wenig Zeit für eine Rast und etwas zu trinken! Mehr als tausend Höhenmeter sind schon geschafft. Das Wetter scheint stabil zu sein, auch wenn einige Wolken unterwegs sind. Apropos unterwegs: Um diese Uhr- und Jahreszeit sind wir hier alleine.

09.00 Uhr: Einstieg in den Klettersteig

Nach der kurzen Erholung drücken die Rucksäcke nicht mehr ganz so schwer auf dem Weg hinauf zu den Seilversicherungen unterhalb des „Bretts“, einer glatten Felswand, zu deren Querung nur ein paar Eisenstifte aus dem Fels ragen. Die Eisenbügel der langen Leiter am Einstieg des kleinen Klettersteigs fühlen sich ziemlich kalt an. Zwanzig Minuten später stehen wir vor der Felswand. Vorsichtig und an dem fest installierten Stahlseil gesichert geht es Schritt für Schritt hinüber auf die andere Seite. Von nun an ist Stapfen im Schnee angesagt. Zum Glück kennen wir den Weg. Zwischen den Latschenkiefern



Um die Gletscherdicke berechnen können, müssen die Forscherinnen und Forscher zunächst ermitteln, wie dick und dicht der Schnee ist.



Alltag bei vielen Expeditionen: Montage einer Antenne zur Datenübertragung.

Eisdickenmessung am Höllentalferner. Die Antenne sendet laufend Signale aus und empfängt Reflexionen aus dem Untergrund.

ist es manchmal trügerisch, und leicht versinkt man in einem schneebedeckten Loch. Besser wird es, als wir die erste und älteste Moräne des Höllentalferners erreichen. Von nun an ist der Weg eindeutig, und um kurz nach elf Uhr erreichen wir nass geschwitzt und schon etwas müde den Gletscher.

11.30 Uhr: Endlich geht's um die Eisdicke

Wir bauen die wissenschaftlichen Geräte zusammen. Eine GNSS-Station haben wir auf einem Felsen fixiert, die andere kommt direkt auf die Radarantenne, sodass wir die genaue Position während der Messungen berechnen können. Bei Eisdickenmessungen wird ein Radarsignal durch das Eis gesendet und dessen Reflexion am Untergrund wieder aufgezeichnet. Aus der Zeitspanne zwischen Aussendung und Empfang des Signals kann die Dicke des Eiskörpers bestimmt werden. Zum Glück ist die Schneedecke auf dem Gletscher weitgehend fest und man sinkt nicht allzu tief ein. Nachdem alles zusammengebaut ist, geht es los: Einer zieht die Antenne hinter sich her, während der andere mit dem angeschlossenen Laptop daneben läuft und die Signale überprüft. Es ist wichtig, immer schnell zu erkennen, ob es irgendwo Probleme gibt und Messungen wiederholt werden müssen. Der Weg gletscheraufwärts ist ziemlich anstrengend, vor allem, da wir zuvor schon 1.400 Höhenmeter aufgestiegen sind. Auf dem Weg hinunter ist es dagegen die Radarantenne, die gebändigt werden muss, damit sie nicht wie ein ungesteuerter Schlitten entwischt. Während diesem Auf und Ab, Kreuz und Quer realisiert man erst, wie groß und steil der Gletscher eigentlich ist. Um den Gletscheruntergrund einigermaßen gut abbilden zu können, benötigen wir einige Messprofile, am besten mit vielen Kreuzungen, an denen das Signal der unterschiedlichen Profile verglichen werden kann.

13.30 Uhr: Mittagspause und Schnee-Messungen

Zeit für die Mittagspause: Erstaunlich, wie schnell Semmeln, Käse und Wurst bei allen verschwinden. Aber noch sind wir nicht fertig: Damit wir die korrekte Tiefe berechnen können, ist es wichtig zu wissen, wie dick und dicht die Schneeschicht auf dem Eis ist – denn die Radarwellen durchlaufen Schnee und Eis mit einer unterschiedlichen Geschwindigkeit. Daher graben wir einen Schneeschacht, messen die Schneedicke



und bestimmen die Dichte des Schnees. Damit können wir die Radarmessungen am Schneeschacht kalibrieren und diese Korrektur dann bei allen anderen Messungen verwenden. Nach etwa einer Stunde ist es geschafft. Nun müssen alle Geräte und Werkzeuge wieder eingepackt werden. Bei einer letzten kurzen Rast genießen wir den Blick über den einsamen Gletscher in seinem Schneekleid. Es ist kein Vergleich zum Sommer, wenn sich hier manchmal Hunderte von Bergsteigern am Einstieg zum Klettersteig oberhalb der Höllentalferners stauen. Heute haben wir nur zwei einsame Alpinisten gesehen, die diese lange Tour in Angriff genommen haben.

16.30 Uhr: Abstieg in der Dämmerung

Aber nun heißt es absteigen, solange noch genügend Licht vorhanden ist. Schließlich ist es schon halb fünf und wir müssen zumindest den schwierigen oberen Teil der Strecke hinter uns bringen, bevor die Dämmerung einsetzt. Doch abwärts geht es deutlich leichter: Die Spur im Schnee ist schon getreten und die Rucksäcke schieben von hinten. Sobald wir die unterste Leiter verlassen haben, sind wir erleichtert. Nun kann nicht mehr viel schiefgehen. Auf dieser Höhe liegt fast kein Schnee mehr, der flache Weg führt angenehm zur Höllentalangerhütte, gefolgt nur noch von Schluchtweg und Stangensteig. Die letzten einhalb Stunden müssen die Stirnlampen uns wieder den Weg weisen, bevor wir gegen sieben Uhr abends am Parkplatz ankommen. Die Beine sind auf den letzten Metern ziemlich schwer geworden. Jetzt liegt nur noch die Heimfahrt vor uns und dann eine heiße Dusche – nach einem langen Tag auf Deutschlands größtem Gletscher, von dem wir nun auch wissen, wie dick er ist.

Dr. Astrid Lambrecht

ist Geophysikerin und wurde mit einer Arbeit über die Massenbilanz antarktischer Gletscher promoviert. Sie beschäftigt sich seit vielen Jahren hauptsächlich mit dem Gletscherverhalten in den hochgelegenen Gebieten Zentralasiens und ist derzeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Forschungsvorhaben „Erdmessung und Glaziologie“ der Bayerischen Akademie der Wissenschaften beschäftigt.

Gletscher als Mahnmale des Klimawandels

Anfang des 19. Jahrhunderts vermaß man mit dem Plattachferner **erstmal**s einen bayerischen Gletscher. Dass davon heute nur noch Reste existieren, zeigt das Ausmaß der Gletscherschmelze.

Das vergletscherte Zugspitzplatt 1890, vom Reintal aus gesehen.



Nicht maßstabsgetreue Darstellung (1826) der ersten Vermessung des Zugspitzplatts von 1820 bis 1825.

Die vermutlich erste kartographische Darstellung eines Gletschers in Bayern stammt aus dem Jahr 1774: Auf einem Kartenblatt ist der „Plattacher Ferner“ auf dem Zugspitzplatt vermerkt. Damals war er mit einer Fläche von etwa 300 ha der mit Abstand größte Gletscher in Bayern. Vergleicht man die Zahl mit der heutigen Gesamtfläche aller bayerischen Gletscher von etwa 45 ha, wird deutlich, wie stark die Eisbedeckung in den letzten 250 Jahren zurückgegangen ist.

Von 1820 bis 1826 kartierte Leutnant Josef Naus das Zugspitzplatt erstmals im Detail und vermaß auch den noch zusammenhängenden Plattachferner. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts dehnten sich – wie in den meisten Gebieten der Alpen – die Gletscher maximal aus. Je nach Literaturquelle liegt der Höhepunkt dieser Ausdehnung zwischen 1820 und 1856. Die Umriss des Gletschers auf der Zugspitze dokumentierten Forscher erneut von 1850 bis 1860. 72 Jahre nach der ersten Kartierung nahm das Königlich Bayerische Topographische Bureau von 1890 bis 1892 die bayerischen Gletscher erstmals vollständig auf. Leiter der Arbeiten war Sebastian Finsterwalder, Geodät und Ordinarius an der Technischen Hochschule München sowie Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Ihm verdanken wir die erste wissenschaftliche Beschreibung der Gletscher in Bayern und die ersten quantitativen Angaben über ihre Veränderungen. Finsterwalder bestimmte folgende Flächen: Watzmanngletscher 21 ha, Blau eis 20 ha, Höllentalferner 48 ha und Plattachferner 160 ha.

In den Jahren um 1920 wuchsen die meisten Gletscher im Alpenraum wieder an. Zwar gibt es für die bayerischen Gletscher in dieser Zeit keine genauen Daten, doch Finsterwalder fertigte 1917 mehrere Panoramafotos an. Sie zeigen eine aufgewölbte Gletscherzunge am Schneeferner – charakteristisch für wachsende Gletscher. Zwischen 1920 und 1950 schmolzen alle Gletscher in Bayern stark zurück. In dieser Zeit teilte sich der bis dahin zusammenhängende Plattachferner auf dem Zugspitzplatt in drei eigenständige Gletscher auf: den Südlichen Schneeferner im Südwesten unterhalb von Wetterwanddeck und Wetterspitzen, den Nördlichen Schneeferner unterhalb von Schneefernerkopf, Schneefernerscharte und Zugspitzzeck sowie den Östlichen Schneeferner direkt am Fuß des Zugspitz-Gipfels. Letzterer war bis in die 2000er Jahre noch als Firnfeld erkennbar und ist inzwischen komplett verschwunden.

Innerhalb der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts büßten die bayerischen Gletscher fast zwei Drittel ihrer Fläche und etwa die Hälfte ihrer Masse ein, wobei der Verlust vor allem in den Zeitraum von 1920 bis 1950 fällt. In dieser Periode lag die Lufttemperatur im Sommer durchschnittlich um 2 °C höher als in der Zeit davor, und die Sonneneinstrahlung war überdurchschnittlich stark. Da damals die Gletscher noch weiter ins Tal reichten und diese Flächen groß waren, konnten große Mengen Eis abschmelzen. Heute sind die Gletscher auf höhere Regionen begrenzt und viel kleiner – daher verändern sie sich inzwischen weniger stark.

2/3

ihrer Masse büßten die bayerischen Gletscher in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ein.



Blick vom Südlichen Schneeferner Richtung Reintal – links die Ausläufer des Nördlichen Schneeferners.

Entwicklung der fünf bayerischen Gletscher

Fläche und Volumen aller Gletscher haben seit Mitte des 20. Jahrhunderts **stark abgenommen**. Doch es gibt einige Besonderheiten.

Ab Mitte des 20. Jahrhunderts begann die regelmäßige Untersuchung der bayerischen Gletscher, die das Projekt „Erdmessung und Glaziologie“ der Bayerischen Akademie der Wissenschaften inzwischen mindestens im Abstand von zehn Jahren durchführt. Somit lässt sich die Entwicklung über fast 70 Jahre verfolgen. Nimmt man die früheren Beobachtungen an der Zugspitze hinzu, lassen sich dort die Veränderungen innerhalb der letzten 125 Jahre quantitativ nachvollziehen. Die historischen Kartierungen der Berchtesgadener Gletscher machen es möglich, ihre Entwicklung seit dem Ende des 19. Jahrhunderts zu beurteilen.

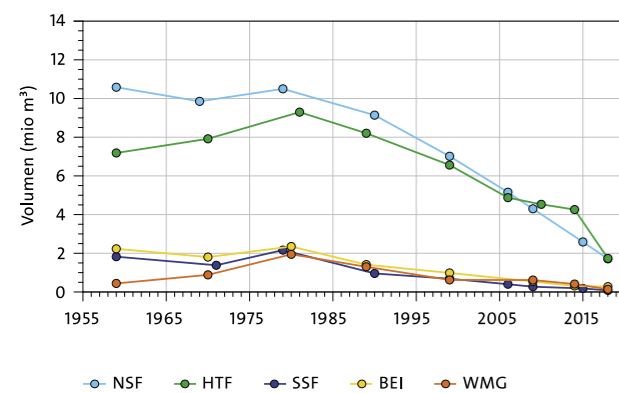
Große Flächenverluste seit 1980

Mitte des 19. Jahrhunderts wiesen die Gletscher in Bayern noch eine Fläche von etwas mehr als vier Quadratkilometern auf, wobei der Plattachferner auf der Zugspitze mit 75 % den größten Anteil einnahm. Die Grafiken (unten) zeigen die jüngere Geschichte der bayerischen Gletscher auf Basis der Vermessung durch die Akademie zwischen 1949 und 2018. In diesem Zeitraum stellten die Forscher einen Rückgang der Gesamtfläche aller Gletscher von ca. 120 ha (1,2 km²) auf 45 ha fest, der allerdings nicht kontinuierlich verlief. In einer ersten Abschmelzphase verkleinerte sich die Gletscherfläche Ende der 1950er Jahre auf etwas mehr als einen Quadratkilometer. Danach wuchs sie bis 1980 um 30 % an. Die Flächenzunahmen der einzelnen Gletscher waren dabei durchaus unterschiedlich: Auffällig ist, dass der Südliche Schneeferner deutlich größer wurde. Erst nach 1980 verkleinerten sich die Gletscherflächen durchgängig – ein Trend, der sich bis heute fortsetzt. Am stärksten veränderte sich der Südliche Schneeferner (Flächenverlust von 94 %). Weil der Nördliche Schneeferner innerhalb der letzten zehn Jahre stark zurückging, ist der größte bayerische Gletscher heute der Höllentalferner.



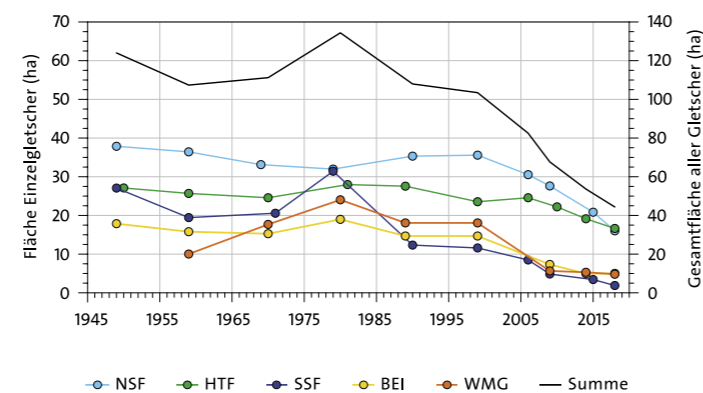
Der Höllentalferner, aufgenommen während der ersten umfassenden Vermessung der bayerischen Gletscher Ende des 19. Jahrhunderts.

Volumen der bayerischen Gletscher



Entwicklung des Eisvolumens der bayerischen Gletscher bis 2018, basierend auf den regelmäßigen Vermessungen der Oberfläche und der Rekonstruktion des Gletscheruntergrunds aus Bodenradar daten. NSF: Nördlicher Schneeferner; HTF: Höllentalferner; SSF: Südlicher Schneeferner; BEI: Blau eis; WMG: Watzmann gletscher.

Flächen der bayerischen Gletscher



Veränderungen der Fläche der bayerischen Gletscher seit der Mitte des 20. Jahrhunderts (linke Achse). Die schwarze Linie zeigt die Gesamtfläche (rechte Achse). NSF: Nördlicher Schneeferner; HTF: Höllentalferner; SSF: Südlicher Schneeferner; BEI: Blau eis; WMG: Watzmann gletscher.

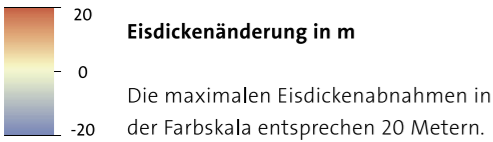
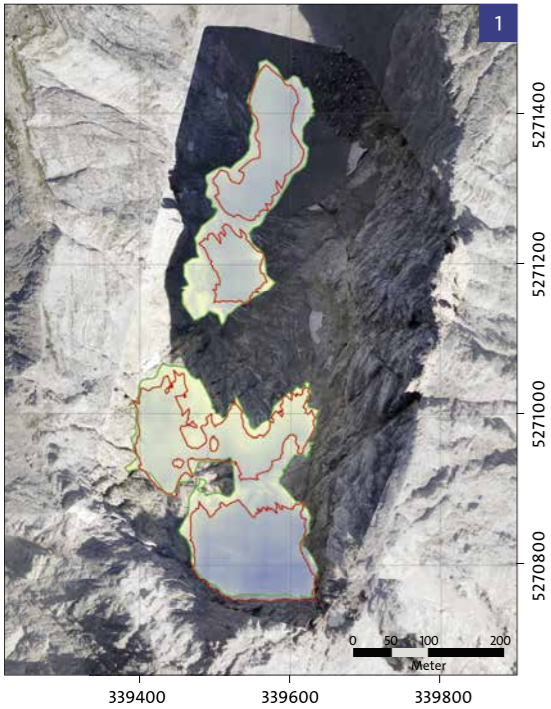
Lufttemperatur als Indikator für die Gletscherentwicklung

Die längerfristigen Flächenveränderungen von Gletschern lassen auf die Veränderung des regionalen Klimas schließen: Insbesondere der Verlauf der Summenkurve aller fünf Gletscher steht in einem relativ guten statistischen Zusammenhang zu dem der globalen Abweichung der Lufttemperatur vom lang-jährigen Durchschnitt. Die Lufttemperatur ist demzufolge ein recht guter Indikator für den Einfluss des Klimas auf die Gletscher. Die Einzelkurven zeigen allerdings unterschiedliche Verläufe, die auf lokal wirksame Prozesse hindeuten. So ist bei den kleinen Gletschern (Südlicher Schneeferner, Blau eis und Watzmann gletscher) die Flächenzunahme bis 1980 viel ausgeprägter als bei den größeren Gletschern (Nördlicher Schneeferner und Höllentalferner), wo das Wachstum erst deutlich verzögert und über einen längeren Zeitraum zu sehen ist. Der Höllentalferner zeigt in den letzten 10 bis 20 Jahren Abweichungen: Als einziger bayerischer Gletscher konnte er zwischen 2005 und 2010 seine Fläche noch einmal leicht vergrößern. Während alle Gletscher an der Zugspitze weiterhin zurückschmelzen, verharren die Flächen der Berchtesgadener Gletscher auf sehr niedrigem Niveau. Das liegt einerseits an der Schuttbedeckung im unteren Bereich des Blau eises, die das darunter liegende Eis schützt, andererseits am schüsselförmigen Gletscherbett des Watzmann gletschers, das keine großen Flächenänderungen zulässt.

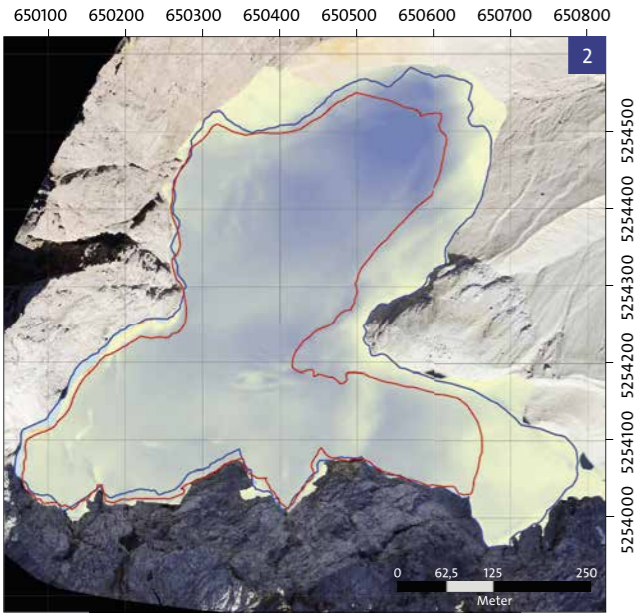
Warum reagieren einzelne Gletscher anders?

Da für einzelne Gletscher keine genauen meteorologischen Daten vorliegen, lässt sich die Ursache für individuelle Abweichungen nicht genau bestimmen. Gewisse Schlussfolgerungen lassen sich aber anhand der Wechselwirkungen verschiedener Einflussfaktoren auf Gletscher (vgl. S. 16/17) ziehen: Die verlangsamte Reaktion der größeren Gletscher (Nördlicher Schneeferner und Höllentalferner) auf Massenzuwächse in den 1970er Jahren hängt damit zusammen, dass diese die Bewegung des Eises erst nach und nach verstärkten. Vorstöße ereigneten sich daher erst in den 1980er Jahren, obwohl bereits wieder die Erwärmung eingesetzt hatte. Spontane oder sehr markante Vorstöße sind daher nicht immer ein guter Klimaindikator. Ein Großteil der Gletscher in Bayern ist von mehr oder weniger hohen und steilen Felswänden umgeben. Diese sorgen dafür, dass durch Lawinenabgänge zusätzliche Schneemassen auf die Gletscheroberflächen gelangen. Lawinen treten besonders im Spätwinter und Frühjahr auf, wenn die Niederschlagsmengen mit steigenden Temperaturen wieder zunehmen. So geht den Gletschern weniger Masse verloren, was eventuell dazu geführt hat, dass der Höllentalferner zwischen 2006 und 2014 schwächer schrumpfte als zuvor. Diese Lage und die damit verbundenen zusätzlichen Schneemassen haben den bayerischen Gletschern das Überleben bis heute gesichert.

Veränderung der Eisdicken der bayerischen Gletscher zwischen 2006/2009 und 2018

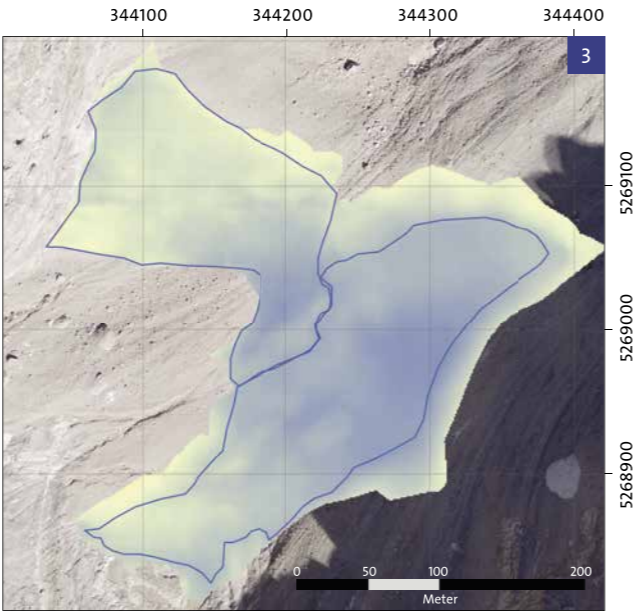


- 1. Blaueis
- 2. Höllentalferner
- 3. Watzmanngletscher
- 4. Nördlicher Schneeferner



Das Eis wird dünner

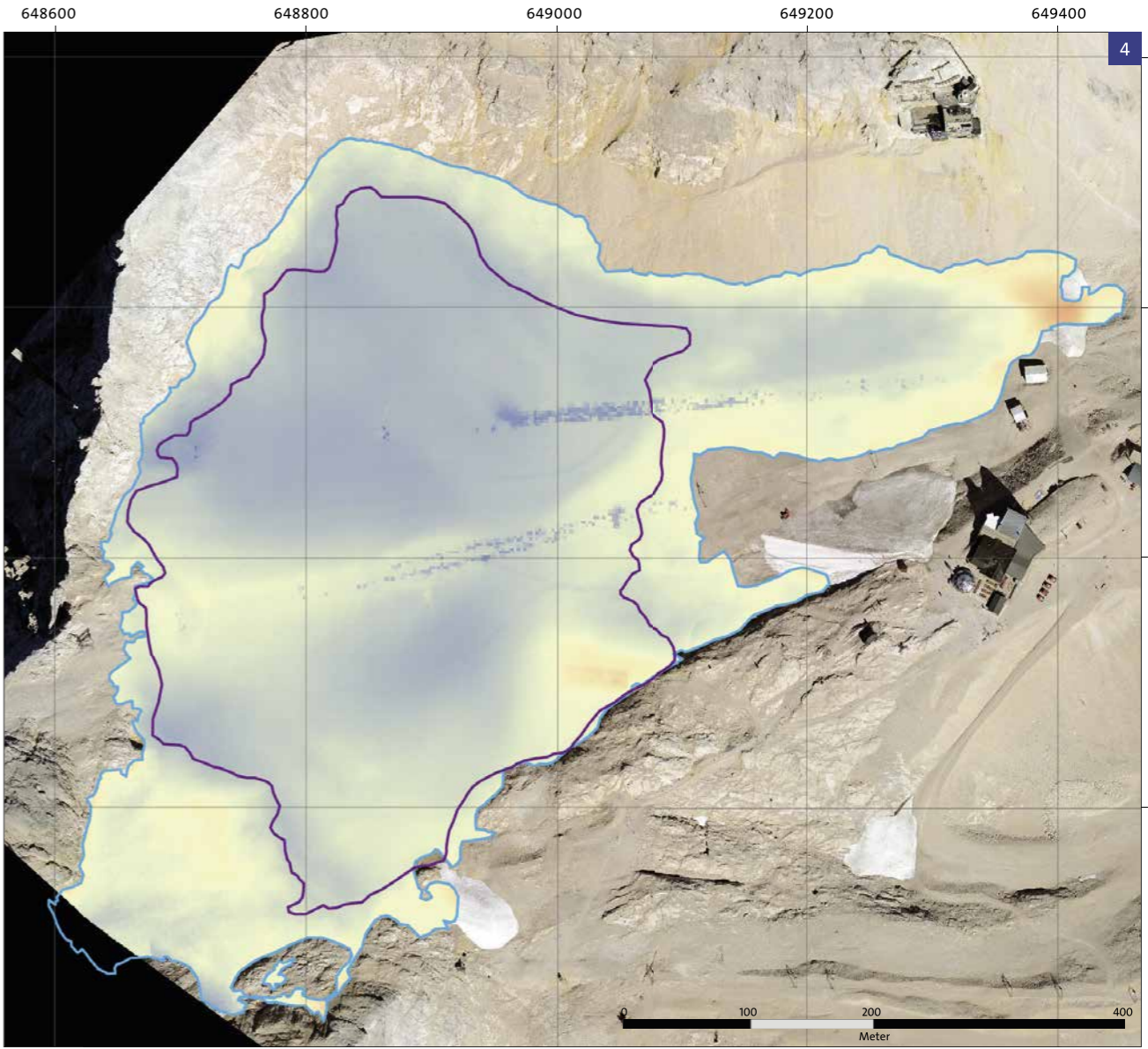
Die Reaktion der Gletscher auf klimatische Veränderungen zeigt sich nicht nur an den Gletscherflächen, sondern auch in der Entwicklung der Eisdicke. Dazu bestimmen Forscherinnen und Forscher regelmäßig die Oberflächenhöhe. Die Differenz zwischen den Messungen ergibt den lokalen Zugewinn oder Verlust von Eis. Diese Daten haben mehr Aussagekraft als Änderungen der Fläche, da sie in direktem Bezug zur Oberflächenmassenbilanz der Gletscher stehen, die das Volumen beeinflusst. Allerdings sind Messungen der Eisdicke deutlich aufwändiger als eine reine Flächenbestimmung, die auch mithilfe von Satellitenbildern erzielt werden kann. Vor dem charakteristischen Massenzuwachs in den 1970er Jahren liegen nicht viele Daten zur Eisdicke vor. Zumindest für die Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg lässt sich aber festhalten, dass alle Gletscher geschrumpft sind. Seit 1980 ging mit Ausnahme von Südlichem Schneeferner und Blaueis an allen Gletschern zunehmend Masse verloren. Die Gründe für die Entwicklung des Blaueises sind nicht ganz klar, könnten aber mit der zunehmenden Schuttbedeckung im unteren Teil des Gletschers zusammenhängen. Die starken Verluste innerhalb der letzten zehn Jahre sind dagegen der Aufspaltung des Gletschers in mehrere Teile geschuldet: Kleine Eisfelder reagieren empfindlicher auf das von der Sonne aufgeheizte Gestein. Am Südlichen Schneeferner treten geringere Verluste auf, weil seine noch verbliebene geringe Fläche als Schneepot der Zugspitzbahnen dient. Die abgebildeten Grafiken zeigen die Veränderungen der Eisdicke an Nördlichem Schneeferner, Höllentalferner, Watzmanngletscher und Blaueis zwischen 2006/2009 und 2018. Die blauen Flächen kennzeichnen dabei Bereiche, in denen die Eisdicke geringer geworden ist. Für beide Untersuchungszeitpunkte sind jeweils die Gletschergrenzen eingezeichnet. Am Höllentalferner sind die Verluste im Bereich der Gletscherzunge – wie es eigentlich typisch für Gletscher ist – am größten. Innerhalb von 13 Jahren schmolzen hier maximal nahezu 30 m Eis ab, was einem durchschnittlichen Jahresverlust von über 2 m entspricht. Dieser Wert lag zwischen 1981 und 2010 noch bei durchschnittlich 1,3 m. Am Nördlichen



Schneeferner ist 2018 gar keine Zunge mehr vorhanden. Das scheinbare Anwachsen der Eisdicke (orange Einfärbung) ist auf Maßnahmen der Zugspitzbahnen zurückzuführen: Die Betreiber schufen eine Rampe zum Gletscher und schütteten den untersten Zungenbereich zu. Die anscheinend punktuellen Höhenverluste entlang der Lifttrassen (dunkelblaue Linien) sind dagegen zu vernachlässigen. Allerdings scheint die Instandhaltung des südlichen Skilifts dazu geführt zu haben, dass der Gletscher in diesem Bereich weniger stark absinkt.

In den Berchtesgadener Alpen zeigt sich vor allem der Einfluss von Schuttbedeckung auf die Eisschmelze: Der nordöstliche Teil des Watzmanngletschers verzeichnet deutlich weniger Verluste, obwohl er deutlich mehr direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt ist – der Grund dafür ist seine vollständige Bedeckung mit Geröll. Auch beim Blaueis zeigen die untersten (nördlichen), mit Schutt bedeckten Gletscherteile geringere Verluste als der stärker beschattete, dafür freiliegende obere (südliche) Bereich. Die Verluste sind in den Berchtesgadener Alpen insgesamt geringer, weil die dortigen Gletscher im Gegensatz zu denen der exponiert gelegenen Zugspitze weniger direkte Sonnenstrahlung erhalten.

2m
Eisdicke verliert der Höllentalferner im Durchschnitt pro Jahr.



Blick über die Grenze

Weltweit sind seit den 1990er Jahren **Billionen Tonnen Eis** verloren gegangen – das zeigt sich auch im Alpenraum.

Der Klimawandel setzt sämtlichen Gletschern im Alpenraum in allen Höhenbereichen gleichermaßen zu. Seine Auswirkungen sind je nach Gletschergröße und -lage aber erst mit zeitlicher Verzögerung zu sehen. Die bayerischen Gletscher am Nordrand der Alpen liegen in einem Höhenbereich, in dem heute kaum mehr Gletschereis zu finden ist – nur wegen ihrer auf den Seiten 22 bis 31 beschriebenen Besonderheiten teilen sie das Schicksal einiger bereits komplett abgeschmolzener Eisfelder im Karwendelgebirge oder in den Lechtaler Alpen noch nicht. Inzwischen sind ihre Eisvorräte jedoch so weit geschrumpft, dass es nur noch eine Frage der Zeit ist, bis es in Bayern keine Gletscher mehr gibt. Doch wie sieht es in den anderen Alpenländern aus?

Zeitreise am Vernagtferner

Sechzig Kilometer südlich von Bayern, am Alpenhauptkamm, fühlt man sich um etwa 80 Jahre in die Vergangenheit zurück-versetzt: In den Ötztaler Alpen sind zwischen 3.000 und 3.600 m Höhe noch ausgedehnte Gletscher vorhanden. Seit 1964 erfassen Forscherinnen und Forscher der Bayerischen Akademie der Wissenschaften am Vernagtferner kontinuierlich die Massenbilanz und das Klima. Ähnlich wie der Schneeferner auf dem Zugspitzplatt hat auch der Mitte des 19. Jahrhunderts etwa fünfmal so große Vernagtferner inzwischen 60 % seiner damaligen Fläche und 80 % der ursprünglichen Masse verloren. Auch hier verschwanden zwei Drittel der Masse vor 1950. Heute ist der Vernagtferner in einem ähnlichen Zustand wie der Schneeferner um 1950. Nach dem Verlust seiner Gletscherzunge und einer deutlichen Reduzierung des Akkumulationsgebiets verringert sich die Eisdicke zunehmend, er zerfällt in mehrere Teile, die unterschiedlich stark zurückschmelzen. Modellrechnungen deuten darauf hin, dass der Gletscher bis 2050 nahezu vollständig verschwunden sein wird.

Im Ötztal sind heute noch ausgedehnte Gletscher vorhanden.



Massenverluste im Alpenraum: regionale Unterschiede

Der Klimawandel ist zwar überall in den Alpen wirksam, dennoch gibt es große regionale Unterschiede, was den Gletscher-rückgang angeht. Dabei ist die Ausgangslage zu Beginn der starken Klimaveränderungen von entscheidender Bedeutung, insbesondere die Höhenlage und die Akkumulationsbedingun-gen am jeweiligen Gletscher. Der Vernagtferner etwa konnte in den 1970er Jahren wegen seiner Lage in einem inneralpinen Trockengebiet nicht so stark an Masse zulegen wie die Alpen-gletscher in den feuchteren Regionen. Deshalb ist er inzwi-schen überdurchschnittlich stark geschrumpft. Während viele kleinere Gletscher kaum mehr längerfristige Akkumulation auf-weisen und daher allmählich abschmelzen, sind die größe-ren Gletscher mit höher gelegenen Akkumulationsgebieten in einem besseren Zustand: So wird es wesentlich länger dauern, bis der ursprünglich 900 m dicke Aletschgletscher in den Berner Alpen abgeschmolzen ist, als das beim noch maxi-mal 30 m dicken Schneeferner der Fall ist.

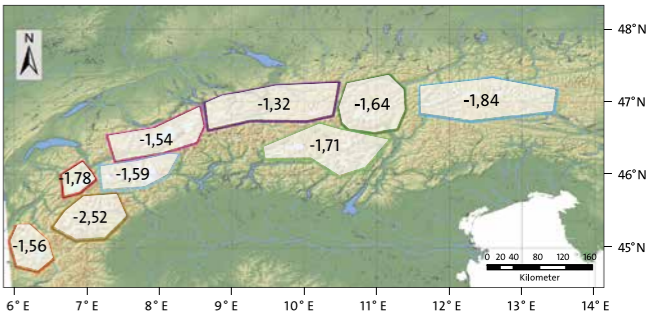
Eisdicke und Niederschlag hängen zusammen

Im gesamten Alpenraum nimmt die Eisdicke der Gletscher deutlich ab: Je nach Region gehen jährlich zwischen 1,3 und 2,5 m verloren. Die Unterschiede hängen klar mit der regiona-len Verteilung des Niederschlags in den Wintermonaten zu-sammen: Vom Schnee profitieren vor allem die Regionen am Nord- und Westrand der Alpen, während die im Osten und Süden gelegenen Gletscher besonders viel Masse einbüßen. Speziell am Alpensüdrand können ebenfalls extreme Nie-derschläge auftreten – dies spielt aber keine entscheidende Rolle, denn die Niederschläge fallen dort hauptsächlich im Sommer und damit als Regen. Auf Basis dieser meteoro-logischen Charakteristika haben die Forscher die Alpen in Regionen aufgeteilt, die entweder einzelne, dominierende Gebirgsgruppen repräsentieren (Montblanc, Wallis) oder ähnlichen klimatischen Verhältnissen entsprechen (etwa zentrale Ostalpen und östliche Ostalpen).

Noch kühlen Gletscher ganze Regionen

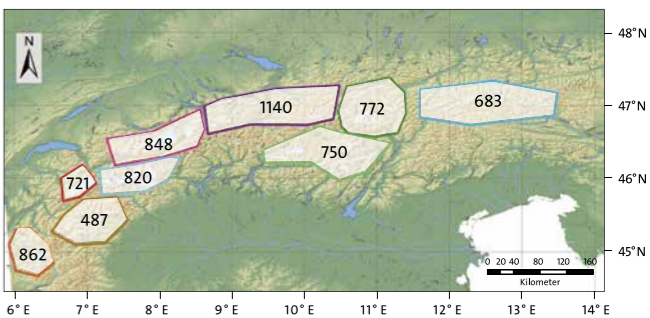
Die Lufttemperatur im Alpenraum ist stark abhängig von der Höhe: Auf den Viertausendern der Schweiz ist es beispiels-weise um 5° C kälter als auf dem Gipfel der Zugspitze, der rund 3.000 m hoch ist. Dennoch sind auch weit über 4.000 m aufragende Gletscher von den Klimaveränderungen betroffen, da es hier in den Sommermonaten inzwischen oft wärmer wird als 0° C. In den einzelnen Gebieten hängt die Lufttemperatur wesentlich mit den dort verbliebenen Gletscherflächen zu-sammen. Die mit Eis bedeckten Gebiete sind aktuell in den Walliser Alpen (Matterhorn, Gornergletscher), den Berner Alpen (Eiger, Aletschgletscher) und der Montblanc-Region noch relativ groß. Da Gletscher eine kühlende Wirkung auf bodennahe Schichten der Atmosphäre haben, ist es in Regionen mit großen verbliebenen Gletscher-flächen deutlich kälter als in weniger vergletscherten Gebieten. Mit dem Abschmelzen der Gletscher werden sich diese Temperaturunterschiede jedoch auflösen – und wenn die Temperatur in den heute noch stark vergletscher-ten Gebieten ansteigt, wird sich der Klimawandel auch dort immer stärker auswirken.

Regionale Änderung der mittleren Gletscher-Eisdicke pro Jahr



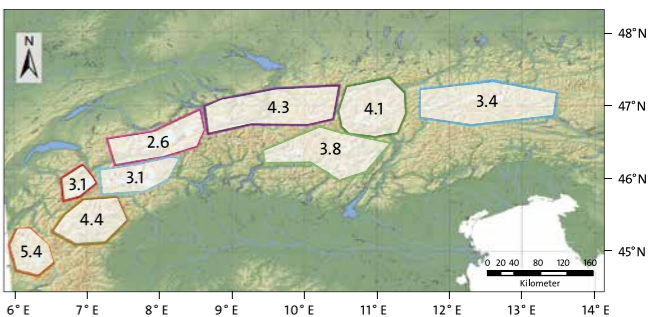
Durchschnittliche jährliche Änderungen der Eisdicken (m) in verschie-denen Alpenregionen. Grundlage sind Berechnungen der gletscher-weiten Höhenänderungen für die einzelnen Regionen auf der Basis der verfügbaren Höhenmodelle für die Alpen von 2000 und 2011.

Regionaler Niederschlag in den „Wintermonaten“ Oktober bis Mai



Durchschnittliche Niederschlagshöhen (mm) in den „kalten“ Mona-ten Oktober bis Mai. In diesem Zeitraum fallen auf den Gletschern Niederschläge in der Regel in Form von Schnee. Die Farbskala deutet die Niederschlagssummen von gering bis hoch an.

Regionale Sommertemperatur (Juli bis August) auf 3.000 m

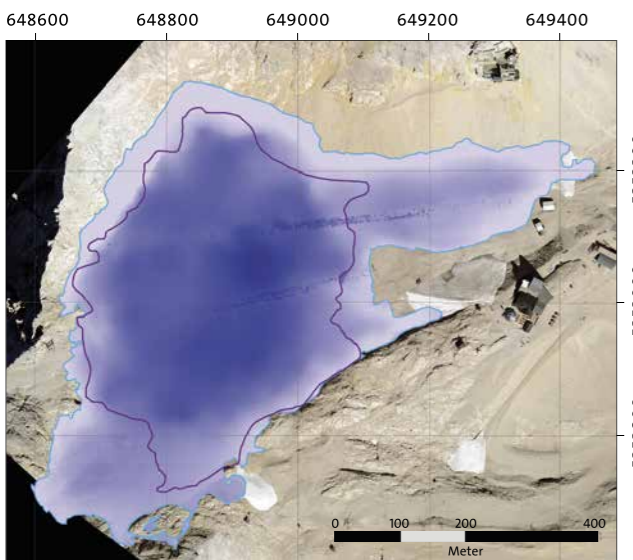


Mitteltemperaturen (°C) im Alpenraum für die Sommer-monate Juni, Juli und August, bezogen auf eine Referenzhöhe von 3.000 m und die Klimaperiode der Jahre 1980 bis 2010.

Zukunft der Alpengletscher

Von der groben Abschätzung bis zur genauen Berechnung: Für **Prognosen** gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Räumliche Verteilung der Eisdicke des Nördlichen Schneeferners 2009



Eisdicken 2009 in m
Das Maximum der Eisdicke lag 2009 noch bei etwa 50 m. Die blaue Linie zeigt die Umriss des Gletschers im Jahr 2009, die violette im Jahr 2018.

Wie lange wird es in den Alpen noch Gletscher geben? Diese Frage interessiert besonders, seitdem extreme Hitzeperioden wie im Sommer 2003 auch in Deutschland keine Seltenheit mehr sind. In der Vergangenheit lagen die Angaben, ab wann die Alpen in Bayern eisfrei sein werden, zwischen 2015 und 2050. Diese große Spannbreite verdeutlicht, wie schwierig eine Schätzung ist.

Die bisherige Entwicklung ermöglicht grobe Prognosen

Die Grundlage für alle Prognosen zur Zukunft der Gletscher bildet die Eisdicke und deren räumliche Verteilung auf dem Berg – sie ist inzwischen für alle fünf bayerischen Gletscher bekannt. Die maximale Eisdicke betrug auf dem Nördlichen Schneeferner und dem Höllentalferner im Jahr 2018 noch 33 m, während sie auf dem Blaueis nur noch bei 17 m und auf Watzmanngletscher und Südlichem Schneeferner jeweils noch bei 10 m lag. Berücksichtigt man den bisherigen Rückgang der Eisdicke zwischen 20 m in neun Jahren (2009–2018) und 30 m innerhalb der 30 Jahre zuvor und nimmt außerdem an, dass sich der Trend zu höheren Schmelzraten fortsetzt, lässt sich eine erste Abschätzung treffen: Unter diesen Bedingungen werden auch die größeren bayerischen Gletscher die nächsten zehn Jahre kaum überstehen. Die kleineren Gletscher könnten theoretisch sogar schon in allernächster Zeit verschwunden sein.

Genauere Modelle erfordern umfangreiche Daten

Möchte man jedoch genauere Informationen zur künftigen Entwicklung der Gletscher erhalten, sind komplexe Modelluntersuchungen erforderlich, in die umfangreiche Datensätze einfließen. Die Grundlage hierfür bildet ein genaues Höhenmodell der Oberfläche und die zugehörige räumliche Verteilung der Eisdicke, auf dieser Seite zu sehen am Beispiel des Nördlichen Schneeferners. Die Grafik entstand anhand der Daten, die die Forscher durch ihre Messungen im Jahr 2009 und 2018 direkt am Gletscher gewonnen haben.

Falls direkte Messungen an der Oberfläche nicht möglich oder vorgesehen sind, müssen die Ergebnisse durch ein Massenbilanzmodell auf der Basis von Wetterdaten berechnet werden. So können Forscher die Veränderung der Massenverteilung und der Ausdehnung der Gletscher ermitteln. Zusätzlich kommt manchmal auch ein weiteres Modell zum Einsatz, das die Eisbewegung vorhersagt. Prinzipiell lassen sich so Prognosen für die Zukunft aufstellen: Regionale Klimamodelle, die mit bestimmten Szenarien arbeiten, liefern in diesem Fall die fehlenden Wetterdaten. Doch genaue Vorhersagen sind schwierig, weil Klima-Szenarien immer mit Unsicherheiten behaftet sind und das „Modellwetter“ für einzelne Tage deutlich von der Realität abweichen kann.

Modellstudie für die Zugspitzgletscher

Komplexe Modelluntersuchungen fanden von 2007 bis 2010 im Rahmen einer Studie für die Zugspitzgletscher statt. Als Ausgangsbedingung dienten Gelände- und Eisdickenmodelle des Jahres 2006. Als numerisches Modell wurde das gekoppelte Massenbilanz- und Eismverteilungsmodell SURGES verwendet, für das das Verbundprojekt GLOWA-Danube

Simulationsdaten bereitstellte. Die Forscher arbeiteten mit drei unterschiedlichen Wetter-Szenarien: Eines war das Ergebnis des regionalen Klimamodells REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg, eines ein Datensatz, der auf der Basis der Szenarien des Weltklimarates IPCC von 2007 generiert wurde, und das letzte eine einfache Fortschreibung des bisher gemessenen Klimatrends. Die Ergebnisse für den Nördlichen und den Südlichen Schneeferner auf Basis des REMO-Datensatzes zeigt die Abbildung auf dieser Seite: Demnach wären der Südliche Schneeferner bis 2025 und der Nördliche Schneeferner bis 2030 nahezu vollständig abgeschmolzen.

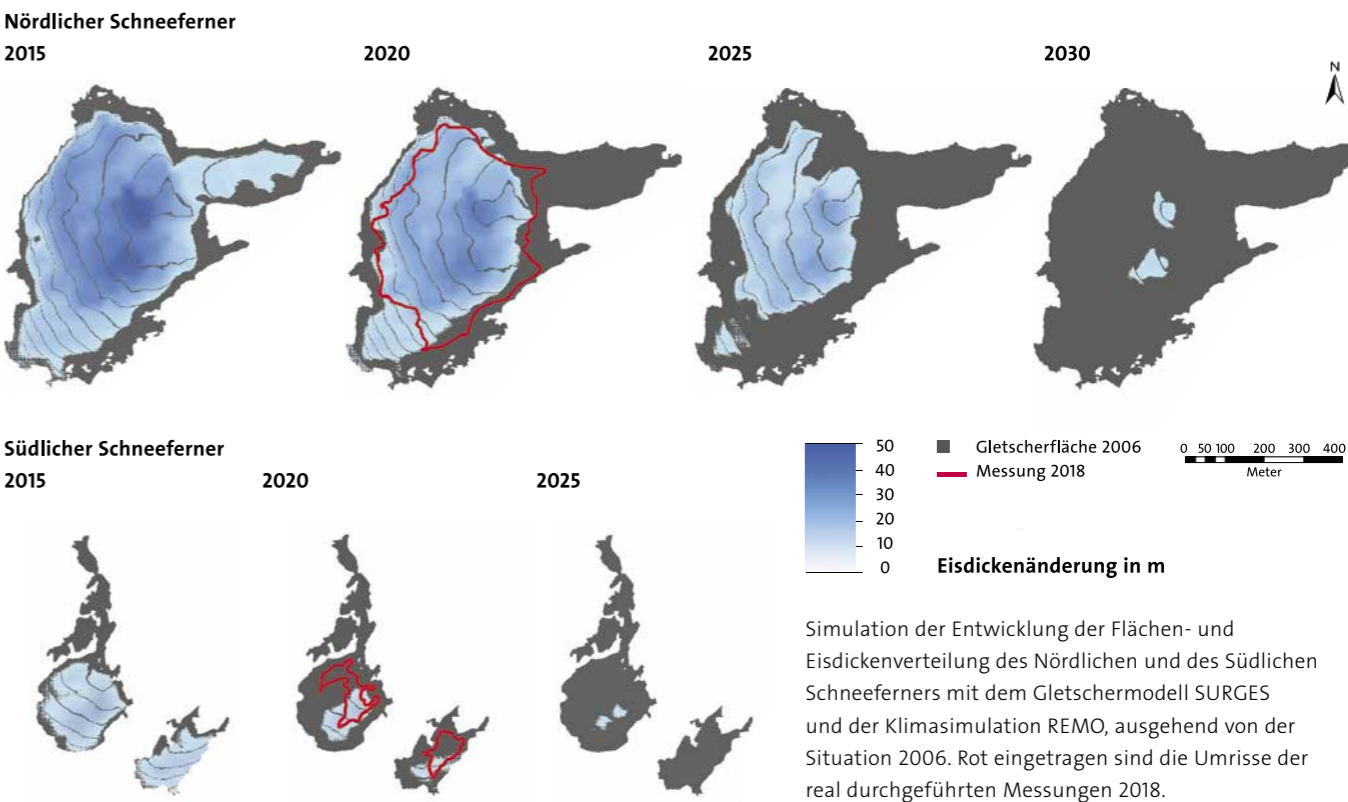
Die Studie lieferte Modellergebnisse für die Zeit von 2007 bis 2030. Daher lassen sich sowohl die Prognosen als auch die gewählten klimatischen Randbedingungen bis zur Gegenwart anhand von inzwischen gewonnenen Messdaten überprüfen. Interessant ist hierbei, dass alle drei Simulationen die tatsächliche Entwicklung der Lufttemperatur bis 2018 unterschätzen: Das gemessene Temperaturniveau liegt heute 0,3 °C über der höchsten Annahme der Szenarien von 2007. Für den Nördlichen Schneeferner stimmen sowohl die Umrisse wie auch die prognostizierte Eisdickenverteilung sehr gut mit den neuesten Messungen überein. Das prognostizierte Endstadium des Südlichen Schneeferners wird dagegen relativ unsicher wiedergegeben: In der Endphase eines Gletscherrückgangs gelangen auch komplexe Modellsysteme an ihre Grenzen. Viele Einflüsse, wie etwa die Maßnahmen der Betreiber des Skigebietes, aber auch kleinräumige Prozesse (etwa lokale Schattenbildung oder Triebsschneeansammlungen) kann eine Simulation nicht berücksichtigen.

Was ist eigentlich ...

... ein Klimaszenario?

Klimaszenarien sind Fortschreibungen des Klimas in die Zukunft in Abhängigkeit von der erwarteten Veränderung der Umwelt. Da das Klima auf physikalischen Prozessen in der Atmosphäre basiert, kann seine Entwicklung in gewissen Grenzen vorausberechnet werden. Diese Zeitreihen in die Zukunft werden vor allem verwendet, um die Entwicklung anderer Prozesse des Erdsystems wie etwa die der Gletscher zu untersuchen. Klimaszenarien werden auf der Basis von globalen Atmosphären-Modellen errechnet, wobei die Vorhersagekraft mit der Zeitspanne in die Zukunft abnimmt, da sich nicht alle Parameter und Wechselwirkungen genau bestimmen lassen. Eine wichtige Eingangsgröße ist die zukünftige Emission von Treibhausgasen, die mit Rücksicht auf unterschiedliche politische Entscheidungen und menschliches Verhalten nur abgeschätzt werden kann.

Simulation der Entwicklung der Flächen- und Eisdickenverteilung des Nördlichen und des Südlichen Schneeferners

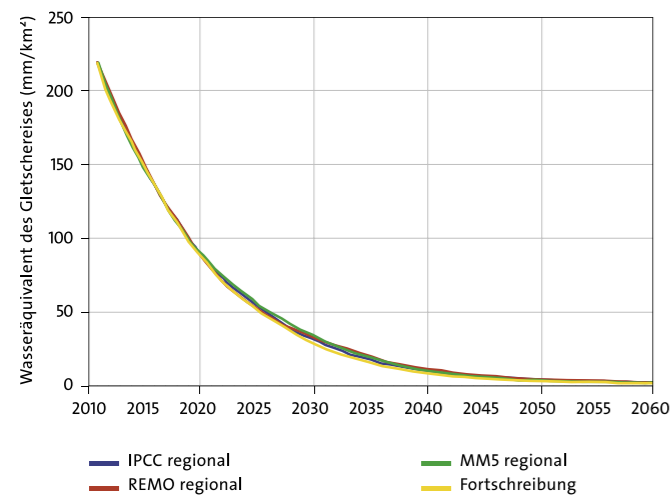


Was sind eigentlich ...

... RCP, MM5 und IPCC?

Die gängigen Repräsentativen Emissions-Szenarien (RCP), die für Klimamodellierungen verwendet werden, sind RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5, welche einer Treibhausgas-Konzentration von 400 ppm, 650 ppm und 1370 ppm CO₂-Äquivalent entsprechen. Die Einheit „ppm“ (parts per million) beschreibt dabei, dass in einem Luftvolumen von einer Million Moleküle die angegebene Menge Moleküle des entsprechenden Gases vorkommt. Ein Wert von 400 ppm in der Atmosphäre wurde bereits 2015 erreicht – daher entspricht RCP 2.6 einer effektiven Reduzierung von CO₂ bis 2100, während RCP 8.5 einen weiteren starken CO₂-Anstieg darstellt. Ein weiteres während der erwähnten Modellstudie aktuelles Zirkulationsmodell war MM5, welches ebenfalls für die Berechnung der Klimaentwicklung weltweit verwendet wurde. Da alle Modelle die physikalischen Zusammenhänge nur unvollständig beschreiben können, berechnet man die Prognosen immer mit mehreren Szenarien, um die Ergebnisse abzusichern und die Bandbreite der zu erwartenden Veränderung aufzuzeigen.

Veränderung der Eisreserve der Gletscher im Inn-Einzugsgebiet



Veränderung der Eisreserve der Gletscher im Einzugsgebiet des Inns (77.000 km²) während der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts mit unterschiedlichen Klimaszenarien, basierend auf dem Gletschermodell SURGES des GLOWA-Danube-Verbundprojekts.

In rund zehn Jahren sind die Gletscher in Bayern Geschichte

Auf Basis aller bisherigen Messungen und Prognosen erscheint es sehr wahrscheinlich, dass in Bayern ab 2030 nur noch unscheinbare Reste der ehemaligen Gletscher zu finden sind. Selbst der Höllentalferner, aktuell der größte bayerische Gletscher, ist entgegen früherer Annahmen inzwischen sehr deutlich zurückgegangen. Den Nördlichen Schneeferner dürfte er zwar um ein paar Jahre überdauern, doch sein Erscheinungsbild wird sich in den nächsten zehn Jahren erheblich verändern.

Welche Chancen haben andere Alpengletscher?

Sofern der Klimawandel weiter fortschreitet, haben diejenigen Gletscher die besten Überlebenschancen, die heute noch relativ groß sind und in Regionen mit hohen Bergen sowie hohen Niederschlägen liegen. Begünstigt sind somit die Gletscher in den Berner Alpen, den Walliser Alpen und der Montblanc-Region. Zuerst komplett eisfrei sein werden die östlichen und südlichen Regionen der Alpen.

Wie auch bei den bayerischen Gletschern sind für eine genauere Angabe komplexe Modellrechnungen auf der Basis von Klimaszenarien nötig, die die Entwicklung jedes einzelnen Gletschers in den Alpen miteinbeziehen. Im Rahmen des GLOWA-Danube-Verbundprojekts und unter Beteiligung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften konnten solche Rechnungen für vier Klima-Szenarien realisiert werden. Untersucht wurde das 77.000 km² große Einzugsgebiet des Inns mit insgesamt 556 Gletschern, deren Gesamtvolumen im Jahr 2000 bei 16,4 km³ lag. Die Klima-Szenarien für das Gebiet unterscheiden sich in ihren Trends zum Temperaturanstieg: Der Weltklimarat IPCC prognostizierte zum Zeitpunkt der Modellierungen im Laufe des 21. Jahrhunderts eine Erwärmung um 3,2 °C, REMO sowie die Fortschreibung des Trends um jeweils 5,2 °C und das Szenario MM5 (Mesoscale Meteorology Model 5) um 4,5 °C. Die Grafik zur Veränderung des gesamten Eisvolumens der 556 Gletscher setzt es in Beziehung zur Fläche des Einzugsgebiets, um die Bedeutung für den Wasserkreislauf hervorzuheben.

Modellrechnung für das Inn-Einzugsgebiet: Gletschereis nur noch über 3.600 Metern

Die Modellrechnung zeigt, dass die Gletschermasse nicht linear abnimmt, sondern mit der sich verringernden Fläche und der Verlagerung der Gletscherzungen in höhere Bereiche exponentiell kleiner wird. So nähert sie sich asymptotisch der Nulllinie: Im Modelljahr 2060 bleibt noch eine geringe Eismasse übrig. Dieses letzte Gletschereis verteilt sich über kleine Flächen oberhalb von 3.600 m im Bernina-Massiv, den Hohen Tauern und den Ötztaler Alpen. Nahezu keinen Einfluss auf die Entwicklung haben hier die unterschiedlichen Klima-Szenarien, da sie sich im Alpenraum zu wenig unterscheiden.

Unser Verhalten hat noch Einfluss

Eine ähnliche Tendenz zeigt eine Untersuchung von Forschern der ETH Zürich aus dem Jahr 2019 für den Alpenraum. Im Gegensatz zur GLOWA-Studie legen die Forscherinnen und

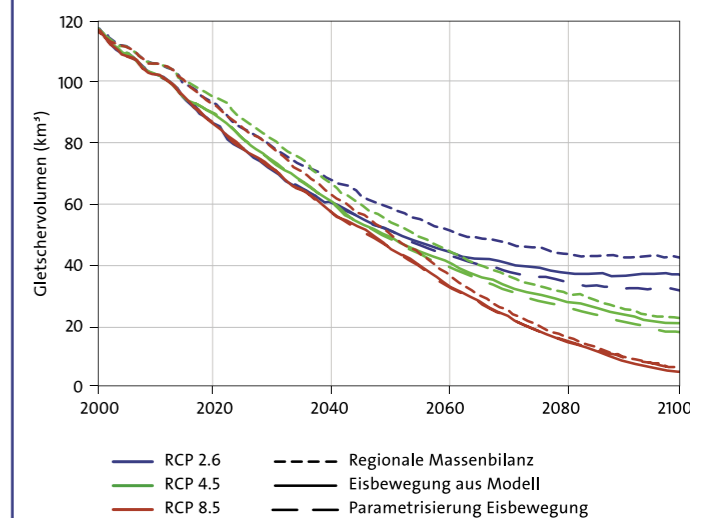


Forscher hier neuere IPCC-RCP-Szenarien zur Klimaprojektion zugrunde, die auf der Entwicklung der künftigen Treibhausgas-Emissionen basieren. Die neuen Szenarien prognostizieren Abweichungen der Lufttemperatur um bis zu 10° C und umfassen damit einen sehr viel breiteren Korridor als in der GLOWA-Studie.

Die Studie berücksichtigt unterschiedliche Ansätze zur Eisbewegung – denn zumindest bei den sehr großen Gletschern hat diese einen wichtigen Einfluss auf die Massenverluste, wenn Eis in tiefere Lagen transportiert wird, wo es stärker abschmilzt. Doch auch der Einfluss der Treibhausgas-Emissionen ist deutlich sichtbar: Innerhalb dieses Jahrhunderts könnten abhängig von unserem zukünftigen Emissionsverhalten zwischen 70 und 95 % des im Jahr 2000 noch vorhandenen Eisvolumens von 120 km³ verlorengehen. Unter der Annahme des RCP 8.5-Szenarios würden im nächsten Jahrhundert nur noch wenige Gletscherareale um die höchsten Gipfel der Alpen übrig bleiben – rechnet man mit dem Szenario RCP 2.6, sind die Flächen entsprechend größer.

Ob die Alpengletscher in Europa noch eine Zukunft haben, hängt somit in erster Linie davon ab, ob es tatsächlich gelingt, die Emission von weiteren Treibhausgasen nennenswert zu reduzieren oder gar zu stoppen. Selbst dann wird allerdings ein Großteil der Eisreserven in den Alpen verschwinden.

Änderung des Eisvolumens im gesamten Alpenraum



Änderung des Eisvolumens im gesamten Alpenraum während des 21. Jahrhunderts für unterschiedliche Emissionszenarien (RCP 2.6, 4.5. und 8.5) sowie Eisbewegungs-Modelle.

Literatur, Bildnachweise und Impressum

Literatur und WWW

Alean, J. (2008): Gletscher der Alpen.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2015): Klima-Report Bayern 2015 – Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten.

Böhm, R., Auer, I., Schöner, W. et al. (2007): Gletscher im Klimawandel. Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern.

Lozán, J. L., Breckle, S.-W., Escher-Vetter H. et al. (2020): Warnsignal Klima. Hochgebirge im Wandel. Wissenschaftliche Auswertungen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Neukirchen, F. (2009): Die Folgen des Klimawandels.

wiki.bildungsserver.de/klimawandel

www.bayerische-gletscher.de

www.br.de/klimawandel/gletscher-bayern-alpen-schmelzen-klimawandel-100.html

www.gletscherarchiv.de

www.glowa-danube.de

Fachliteratur

Brunner, M. I., Farinotti, D., Zekollari, H., Huss, M., & Zappa, M. (2019): Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. Hydrology and Earth System Sciences, 23 (11), 4471–4489.

Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J. J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., & Pandit, A. (2019): A consensus estimate for the icethickness distribution of all glaciers on Earth. Nature Geoscience, 12 (3), 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>.

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

Hagg, W., Mayer, C., Mayr, E., & Heilig, A. (2012): Climate and glacier fluctuations in the Bavarian Alps in the past 120 years. Erdkunde, 121–142.

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

Mayer, C., Hagg, W. (2018): Die Entwicklung der bayerischen Gletscher seit der Kleinen Eiszeit. Geographische Rundschau 5/2018, 18–23.

Sommer, C., Malz, P., Seehaus, T. C., Lippl, S., Zemp, M., & Braun, M. H. (2020): Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century. Nature communications, 11(1), 1–10.

Vincent, C., Fischer, A., Mayer, C., Bauder, A., Galos, S. P., Funk, M., Thibert, E., Six, D., Braun, L. & Huss, M. (2017): Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years. Geophysical Research Letters, 44(3), 1376–1383.

Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2019): Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. The Cryosphere, 13(4), 1125–1146.

Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2019): On the imbalance and response time of glaciers in the European Alps. Geophysical Research Letters, 47(2), e2019GL085578.

Bildnachweise

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz: S. 3 li., S. 8 u., S. 21 o.; Ch. Charalampidis: S. 34; K. Dziwok: S. 30 u.; Erdmessung und Glaziologie/BAdW: S. 40, S. 41, S. 44, S. 50; S. Finsterwalder: S. 36/37, S. 37 u., S. 39; Glowa: S. 46; Glowa/M. Weber: S. 45; W. Hagg: Cover, S. 6/7, S. 8/9, S. 22 u., S. 26 u., S. 35 o., S. 47 o.; istory/Nadiinko: S. 16/17; A. Lambrecht: S. 4/5, S. 11, S. 13, S. 26 u., S. 28 u.; Ch. Mayer: S. 2, S. 12, S. 14, S. 19, S. 20, S. 21 m., S. 21 u., S. 22 oben, S. 23, S. 24, S. 25, S. 26 o., S. 27, S. 28 o., S. 29, S. 30 o., S. 31, S. 32, S. 35 u., S. 38, S. 42, S. 48/49, S. 51, S. 52; NASA/JPL-Caltech: S. 18; J. Naus: S. 36 u.; A. Nowotnick: S. 33; pixabay/fietzfotos: S. 15; N. Schmid-Burgk: S. 3 re.; Studio Umlaut: S. 22, S. 24, S. 26, S. 28, S. 30: o. bearb.; M. Weber: S. 43; H. Zekullari: S. 47 u.

Herausgeber

Bayerische Akademie der Wissenschaften (BAdW)
Alfons-Goppel-Str. 11
80539 München
www.badw.de

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV)
Rosenkavalierplatz 2
81925 München
www.stmuv.bayern.de

Autoren

Dr. Christoph Mayer, Bayerische Akademie der Wissenschaften
Dr. Wilfried Hagg, Hochschule München/LMU München
Dr. Markus Weber, LMU München
Dr. Astrid Lambrecht, Bayerische Akademie der Wissenschaften

Redaktion

Lisa Scherbaum
Gabriele Sieber (Bildredaktion)
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der BAdW

Gestaltung

Studio Umlaut, www.studio-umlaut.com

Druck

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
www.ldbv.bayern.de

© BAdW/StMUV 2021

Der Vernagtferner im österreichischen Ötztal.

Kurz & knapp

10 Fakten zum Zustand der Alpengletscher

3 Gletscher sind je nach Region weltweit ein wichtiger Teil des Wasserhaushalts. Die Bedeutung der Alpengletscher ist für den Wasserhaushalt relativ gering. In den **Trockengebieten** der Welt wird hingegen **langfristig Wasser knapp**, wenn die Gletscher als Langzeitspeicher wegfallen.

4 Seit den 1980er Jahren sind die Gletscherflächen in Bayern **nicht mehr angewachsen**. Auch die Dicke des Gletschereises geht seitdem stetig zurück.

5 Die Gesamtfläche der bayerischen Gletscher liegt aktuell bei 44,6 ha im Vergleich zu 70,4 ha im Jahr 2012. Das entspricht einem **Flächenverlust von 37 %**.

6 Aktuell ist der **Höllentalferner** der größte Gletscher Bayerns. Der Südliche Schneeferner wird in der allernächsten Zeit verschwunden sein, gefolgt vom Blaueis und vom Watzmanngletscher.

7 Auf der Basis aller bisherigen Messungen und Prognosen ist es sehr wahrscheinlich, dass in Bayern **ab 2030 nur noch unscheinbare Reste** der ehemaligen Gletscher zu finden sind.

8 Andere Alpengletscher sind wegen ihrer Lage **oberhalb von 3.000 m** teils in einem besseren Zustand. Doch auch hier nehmen die Eisdicke und die Fläche kontinuierlich ab.

9 Dadurch, dass die Eisflächen der Gletscher kleiner werden, wird sich die **Temperatur im Alpenraum insgesamt erhöhen**.

10 Zwischen 2060 und 2100 werden in den Alpen Gletscher nur noch **in den höchstgelegenen Regionen** vorkommen, bzw. Restgletscher ehemaliger großer Gletscher existieren. Wann das letzte Eis verschwindet, hängt davon ab, ob wir unsere Treibhausgas-Emissionen reduzieren können.



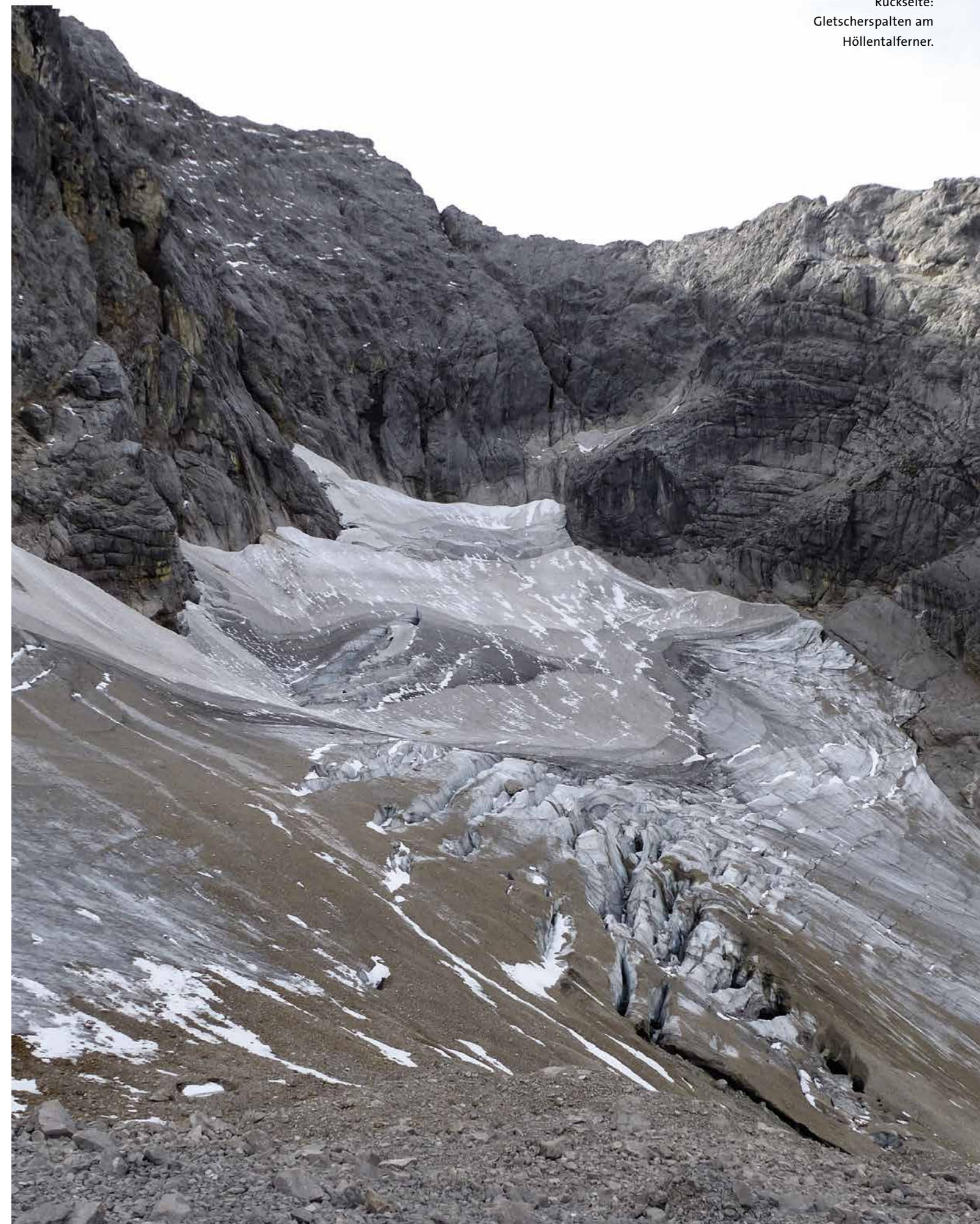
Vernagtal (Österreich)



Vernagtferner im Ötztal



Rofental im Sommer



Diese Seite:
Der Höllentalferner ist
heute der größte
Gletscher Bayerns.

Rückseite:
Gletscherspalten am
Höllentalferner.

