

## **Klimawandel – müssen wir uns vor dem Verschwinden der Gletscher fürchten? Auswirkungen auf die Wasserführung am Beispiel der Öztaler Ache und des Inn**

Ludwig Braun, Markus Weber

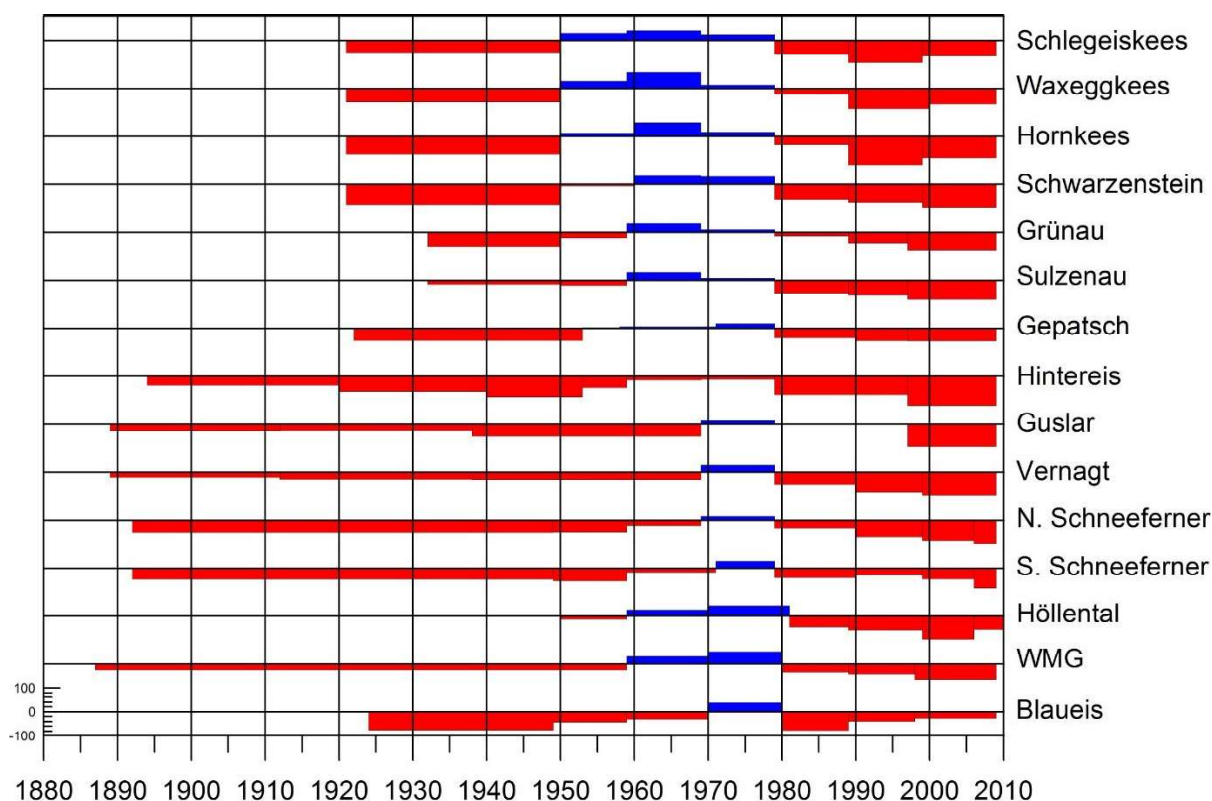
Seit 1850, dem Ende der sogenannten „Kleinen Eiszeit“, verlieren Gebirgsgletscher kontinuierlich an Masse und Fläche, unterbrochen von einer Wachstumsphase in den 1960iger und 1970iger Jahren. Seit ca. 1980 beobachten wir einen massiv beschleunigten Gletscherschwund. Die Auswirkungen sind erhöhte Abflüsse während des Gletscherrückgangs, dann aber ein drastischer Abflussrückgang ab 2020 in den ehemals stark vergletscherten Gebirgstälern. Außerhalb der Alpen wird der Verlust der Gletscherschmelze hingegen keine gravierenden Auswirkungen auf die Wasserführung der großen Flüsse haben, da das Tiefland in einer humiden Klimazone liegt, in welcher die Abflussbildung auch weiterhin primär vom Regen und von der Schneeschmelze gesteuert wird.

### **Quantitative Erfassung des Gletscherrückgangs in den Ostalpen**

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts werden unter der Obhut von Münchner Gletschervermessern die Veränderungen von ca. 15 Ostalpengletschern in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen erfasst und publiziert. Dabei wurden Ausmaße und Höhe der Gletscheroberfläche mittels photogrammetrischer Methoden bestimmt, in Karten oder Schichtlinienplänen im Maßstab

1 : 10000 dargestellt und die Differenzen der Oberflächen über den vergletscherten Gebieten gemittelt als Balkendiagramm dargestellt (Abb. 1). Diese von SEBASTIAN und RICHARD FINSTERWALDER begründete Methode belegt die kontinuierlich negativen Massenhaushalte der Gletscher seit der Mitte des 19. Jahrhunderts, dem Ende der „Kleinen Eiszeit“, welche jedoch mehrheitlich in den Dekaden 1960-1970 und 1970-1980 durch Massengewinne unterbrochen wurden.

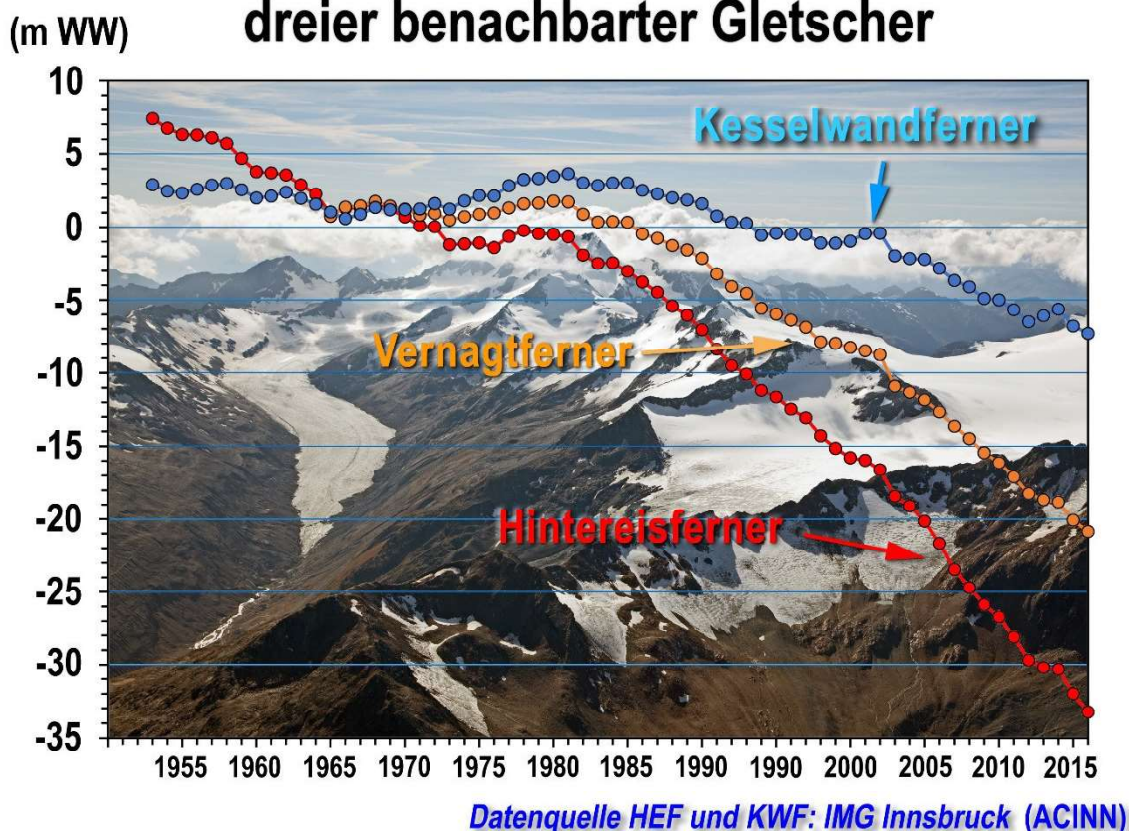
Der Vorteil der Bestimmung der Massenänderung nach der geodätischen Methode liegt darin, dass viele Gletscher regional mit vertretbarem Aufwand mittels Fernerkundung gleichzeitig vermessen werden können, von Nachteil ist jedoch die mangelnde zeitliche Auflösung und Genauigkeit. Diese Schwächen vermeiden teilweise die Bestimmung der spezifischen Oberflächenmassenbilanz nach der glaziologischen Methode, welche auf einigen ausgewählten Gletschern seit Mitte des 20. Jahrhunderts jährlich angewandt wird. Dabei müssen umfangreiche Pegel in den Gletscher eingebohrt und diese Netzwerke unterhalten werden (siehe auch MAYER et al., 2013). Diese Art der Messung ist dadurch mit erheblichem Aufwand verbunden.



**Abb. 1:** Veränderung ausgewählter Ostalpengletscher seit dem Ende des 19. Jahrhunderts basierend auf photogrammetrisch erhobenen Volumendifferenzen. Dargestellt sind die jährlichen Veränderungen der mittleren Höhe der Gletscheroberfläche [cm pro Jahr; rot: negativ, blau: positiv] der Basis der geodätischen Bestimmung des Massenhaushaltes der Gletscher nach FINSTERWALDER & RENTSCH (1981), ESCHER-VETTER (2005), aktualisiert durch C. MAYER.

Abb. 2 zeigt das Ergebnis der jährlichen Massenbilanzanalyse nach der glaziologischen Methode für drei Gletscher, die unmittelbar benachbart sind (s.a. Abb.10). Die jährlichen mittleren Eisdickenänderungen werden über die Jahre aufsummiert (kumulative Bilanz), so dass die resultierenden Kurven die langfristige Dickenänderung des Gletschers zeigt. Vergleicht man die Kurven der Gletscher untereinander, so erkennt man bei den kurzzeitigen Schwankungen ein signifikant ähnliches Verhalten, jedoch deutlich verschiedene Langzeittrends. Diese sind auf individuelle Eigenschaften der Topographie bzw. der Bewegung des Eises zurückzuführen, speziell auf die Flächen-Höhen-Verteilung und die Exposition der Gletscher. Die Massenänderung eines Gletschers ist damit nicht nur eine Anpassungsreaktion an das Klima, sondern auch das Ergebnis seiner individuellen Dynamik.

## Vergleich der kumulativen Massenbilanz dreier benachbarter Gletscher

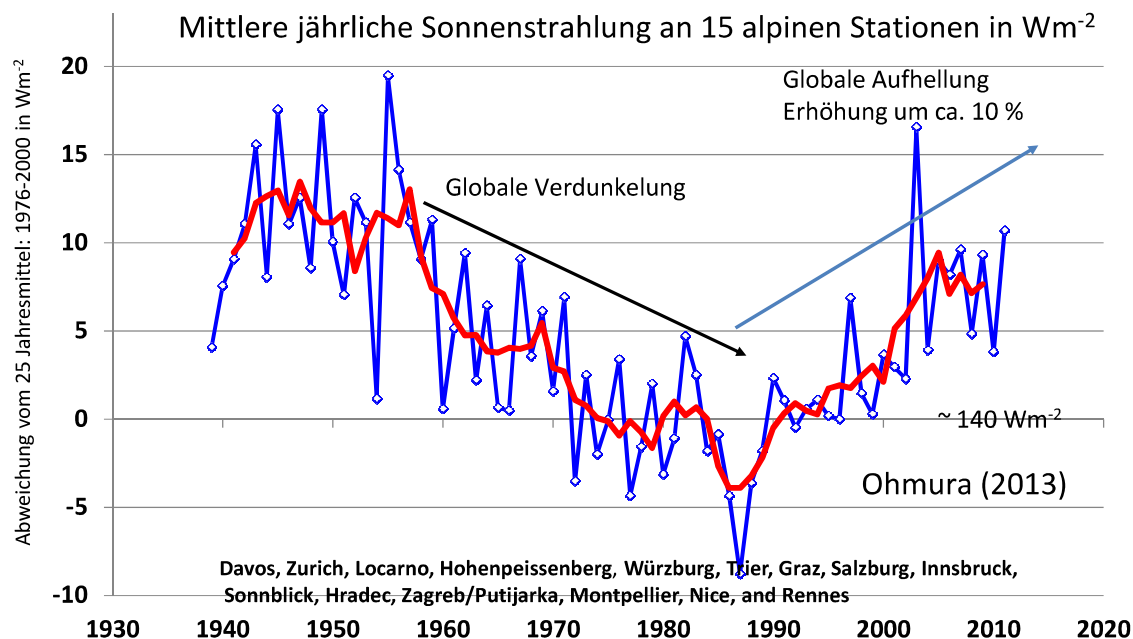


**Abb. 2:** Kumulative jährliche spezifische Massenbilanzen, bestimmt nach der glaziologischen Methode, für drei Gletscher im hinteren Ötztal. Die Kurven dokumentieren die jährliche mittlere Dickenänderung des Eiskörpers.

### Einfluss der Sonneneinstrahlung und der Aerosolbelastung der Atmosphäre auf die Massenhaushalte der Gletscher

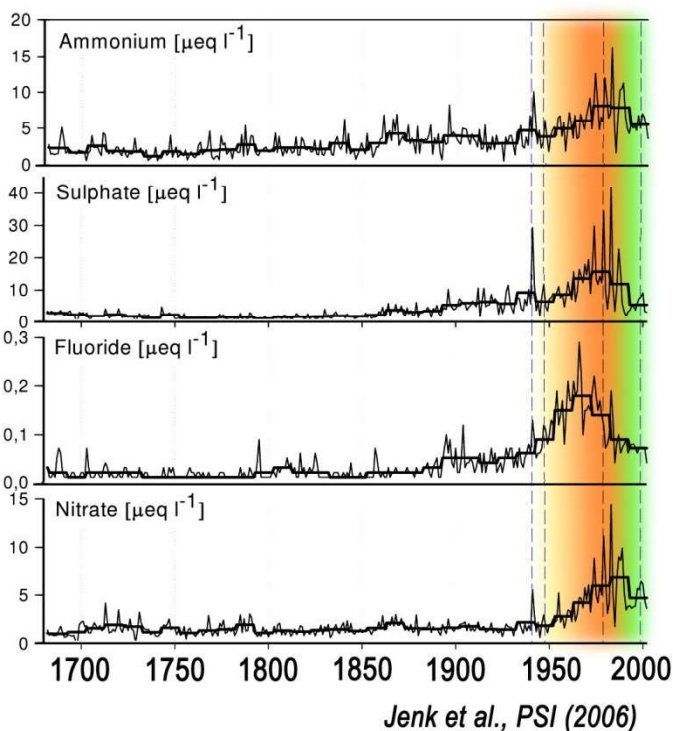
Abb. 3 zeigt die Veränderungen in der Sonneneinstrahlung von 15 alpinen Stationen nach Ohmura (2013). Dabei zeigen die Jahre 1940 bis ca. 1955 gegenüber dem Mittelwert der Jahre 1976 bis 2000 um ca. 10 % höhere Werte, gefolgt von einer deutlichen Verminderung der Einstrahlung in den 1960iger und 1970iger Jahren, der Phase der sogenannten „globalen Verdunkelung“. Ab ca. 1985 bis heute steigt die Sonneneinstrahlung beinahe wieder auf das ehemalige hohe Niveau, der Phase der „globalen Aufhellung“. Diese Veränderungen im Strahlungsgenuss hatten massiven Einfluss auf die Massenveränderungen der Gletscher.

Die Aerosolbelastung im Alpenraum kann für die Zeit von 1700 bis heute anhand von Eisbohrkernen am Fiescherhorn demonstriert werden (Abb. 4, Jenk et al., 2006). Die Konzentration der analysierten Luftschadstoffe hat in den 1960iger und 1970iger Jahren (Zeit des sogenannten „Wirtschaftswunders“) stark zugenommen, gefolgt von einem generellen Abfallen der Konzentrationen nach 1980 mit der Einführung von Luftreinigungsverfahren. Damit kann die Erhöhung der Transparenz der Atmosphäre zu einem gewissen Anteil mit der Zunahme in der kurzwelligen Einstrahlung in Zusammenhang gebracht werden.



**Abb. 3:** Veränderungen in der mittleren jährlichen Sonneneinstrahlung an 15 alpinen Stationen nach Ohmura (2013). Abweichungen vom Mittelwert (ca.  $140 \text{ Wm}^{-2}$ ) der Jahre 1976-2000. Die rote Linie sind über 5 Jahre gleitend gemittelte Werte.

### Analyse der Aerosolkonzentration in Eisbohrkernen am Fiescherhorn

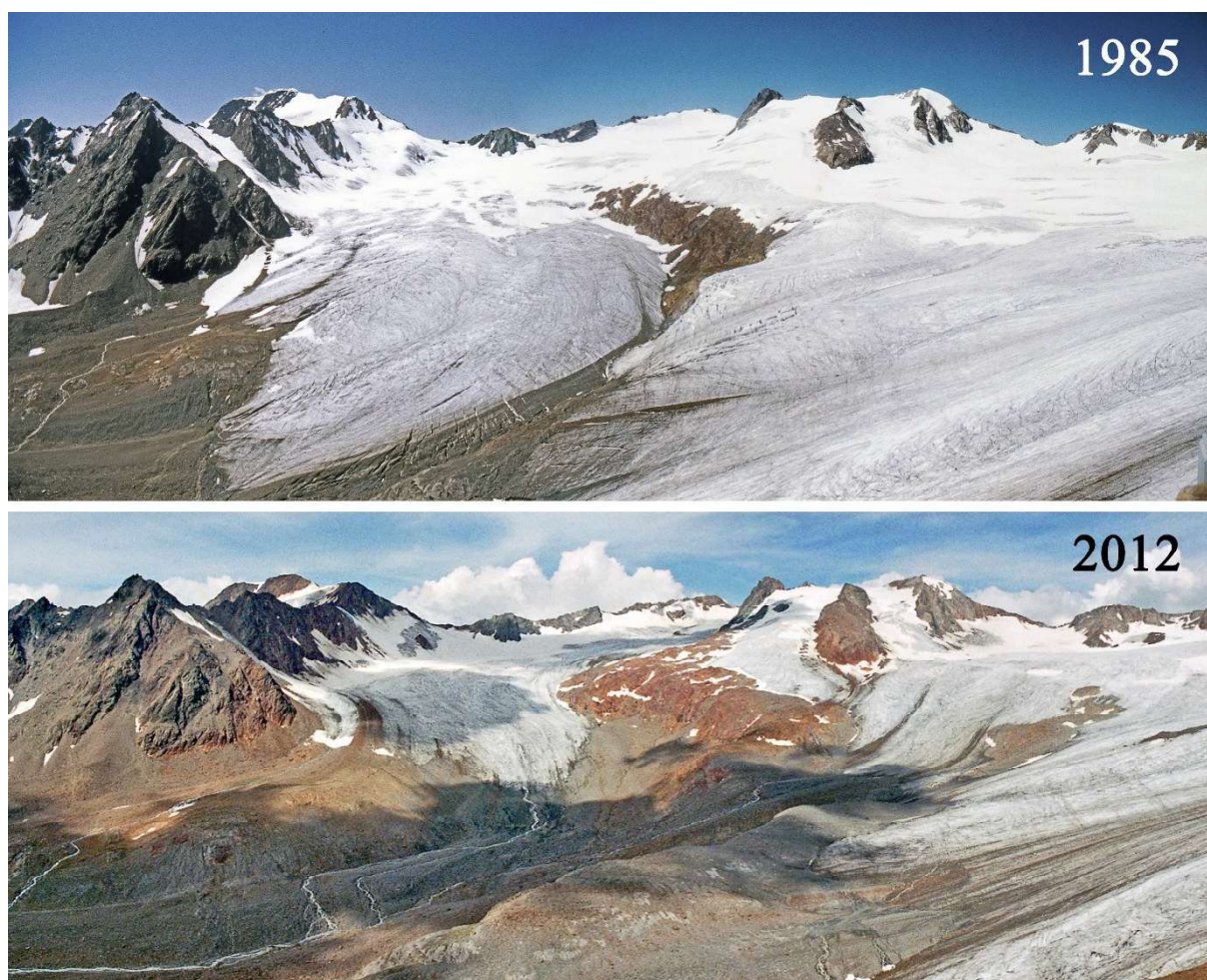


**Abb. 4:** Aerosolkonzentrationen von Schadstoffen in Eisbohrkernen am Fiescherhorn (Berner Oberland, ca. 3900 m ü.NN), nach Jenk et al. (2007). Einfärbung durch M. Weber.



Ob diese These weiter Bestand hat, ist gegenwärtig immer noch Gegenstand der Forschung. Modelltheoretische Untersuchungen zeigen, dass nur etwa ein Drittel der beobachteten Schwankungen der Globalstrahlung mit der anthropogenen Änderung des Aerosolgehalts der Luft erklärt werden können (LIEPERT 2002). Es ist auch nicht ganz klar, warum diese Einflüsse ausgerechnet in der „sauberen Luft“ in den Bergen derartige Bedeutung erlangt haben soll. Messungen an Bergstationen zeigen in den Alpen zwar durchaus einen Anstieg der Aerosole mit den anthropogenen Emissionen, die Konzentrationen sind aber sehr viel niedriger als im Flachland und werden über Ferntransporte herangetragen.

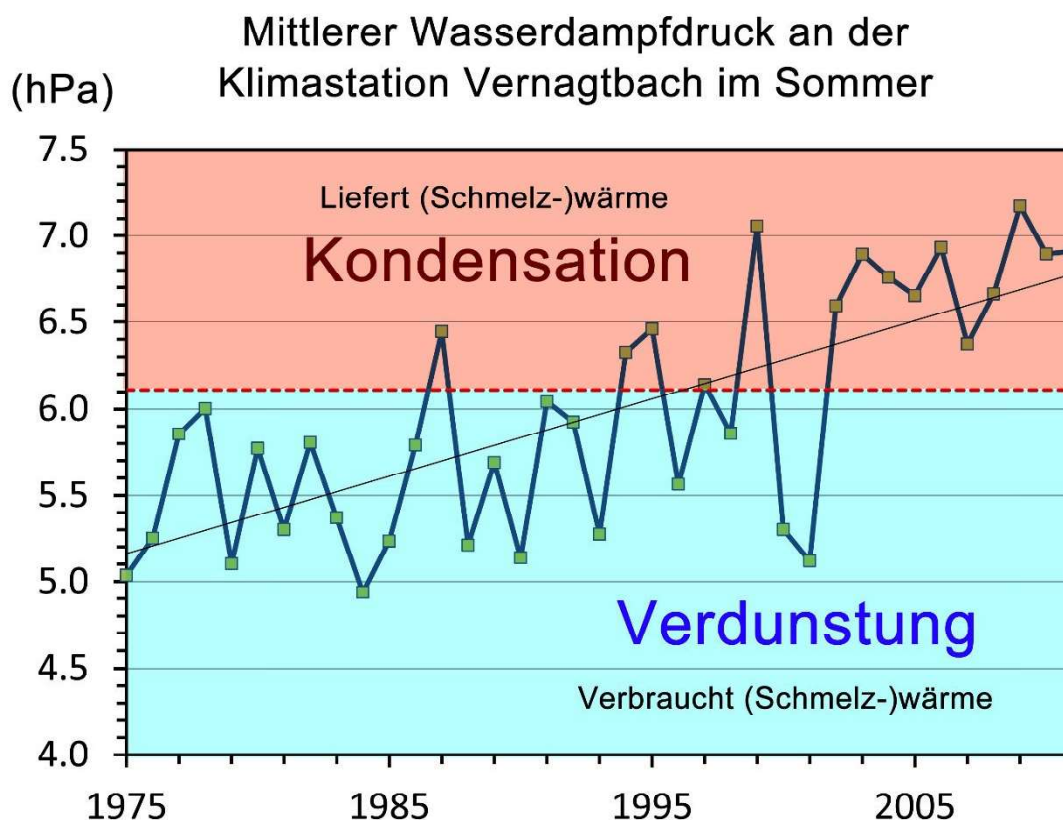
Abbildung 5 zeigt für den Vernagtferner die eisfrei werdenden Flächen, welche den Energiehaushalt im Bereich des Gletschers radikal verändern, denn immer größer werdende Flächenanteile absorbieren solare Strahlung ohne Schmelze. Dadurch wird mit der deutlich höheren Oberflächentemperatur die langwellige Ausstrahlung erhöht, und es werden immer größere Mengen an fühlbarer Wärme über den turbulenten Wärmestrom in die Luft abgegeben, welche zu einer höheren Temperatur in der Umgebung des Gletschers führen. Dies führt zu einer verstärkten Ablation, durch die weitere Flächen freigeschmolzen werden.



**Abb. 5:** Veränderungen im Umfeld des Vernagtferners zwischen 1985 und 2012 unten. Deutlich sichtbar ist die Zunahme an eisfreien Felsflächen, die in mehrfacher Weise den Strahlungshaushalt im Bereich des Gletschers verändern. (Foto oben: M. Weber, unten: M. Siebers).

### Erhöhung des Wasserdampfgehaltes der Luft verursacht Kondensation

Eine weitere Verstärkung der Schnee- und Eisschmelze kann auf die generelle Zunahme des Wasserdampfdruckes in der Luft während der Sommermonate zurückgeführt werden. Abb. 6 zeigt den partiellen Wasserdampfdruck an der Pegelstation Vernagtbach seit Beginn der Messungen im Jahre 1975 bis heute. Bis Ende der 1990iger Jahre waren die mittleren Werte für Juni, Juli, August und September generell unter dem Schwellenwert 6.1 hPa, was dem Sättigungsdampfdruck an der schmelzenden Schnee- bzw. Eisoberfläche entspricht, deren Temperatur ja bekannter Weise 0 °C nicht überschreiten kann. Damit überwiegen in dieser ersten Phase Verdunstungsbedingungen mit entsprechender Reduktion der Schmelzenergie. Seit ca. 2000 treten generell höhere Dampfdrucke auf, primär über die höhere Lufttemperatur, mit Werten deutlich über 6.1 hPa, damit herrschen seit bald 2 Dekaden Kondensationsbedingungen vor, mit zusätzlicher Schmelzenergie, welche über die Kondensation des Wasserdampfes über der schmelzenden Schnee- und Eisoberflächen freigesetzt wird. Damit werden gegenüber den früheren Bedingungen die Schmelzraten um bis zu 30 % erhöht.

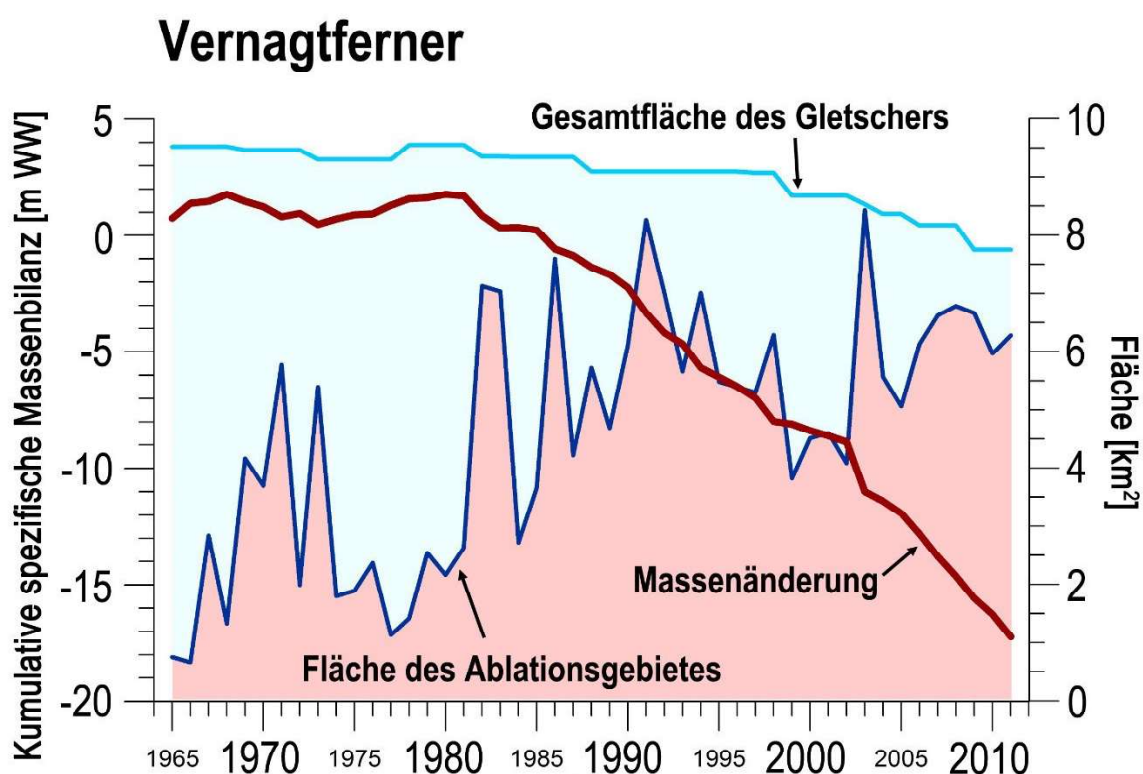


**Abb. 6:** Mittlerer Wasserdampfdruck an der Klimastation Vernagtbach im Sommer. Der Sättigungsdampfdruck an der schmelzenden Schnee- und Eisoberfläche beträgt 6.1 hPa. Liegt der Wasserdampfdruck darunter (bis Ende der 1990er Jahre), herrschen Verdunstungsbedingungen vor mit einer Reduktion der Schmelzwärme. Liegt der Wasserdampfdruck über diesem Schwellenwert, wird zusätzliche Schmelzwärme durch Kondensation freigesetzt.

## Verkleinerung der Nährgebiete der Gletscher

In der Glaziologie teilt man die Gletscherfläche in zwei Bereiche: Der Bereich oberhalb der Gleichgewichtslinie, wo die Akkumulation die Schmelze überwiegt, wird als Nährgebiet bezeichnet. Dort werden quasi die Einnahmen des Gletschers generiert. Visuell kann man diesen Bereich mit den hellen Firnflächen in Abb. 5 gleichsetzen. Der Bereich darunter ist das Zehrgebiet, in dem die Schmelze überwiegt.

Mit den Massenverlusten seit ca. 1980 ist das Nährgebiet des Vernagtferners (Abb. 7, hellblau) zugunsten des Zehrgebietes nach den ausgeglichenen bis positiven Jahren zuvor stark verkleinert worden. Dies ging mit einer drastischen Vergrößerung des Ablationsgebietes (Abb. 7, rot), gekennzeichnet durch die eher dunkle Eisoberfläche in Abb. 5, einher. Durch die Verminderung des Nährgebietes nahmen die Massengewinne der Gletscher stark ab, während die Ausgaben auf Kosten der Ressourcen überproportional anstiegen, da die Verluste pro Flächeneinheit mehr als das Doppelte betragen als der Masseneintrag. Deshalb waren Massengewinne nur in der Zeit vor 1980 möglich, als das Nährgebiet noch mehr als zwei Drittel der Gesamtfläche einnahm.



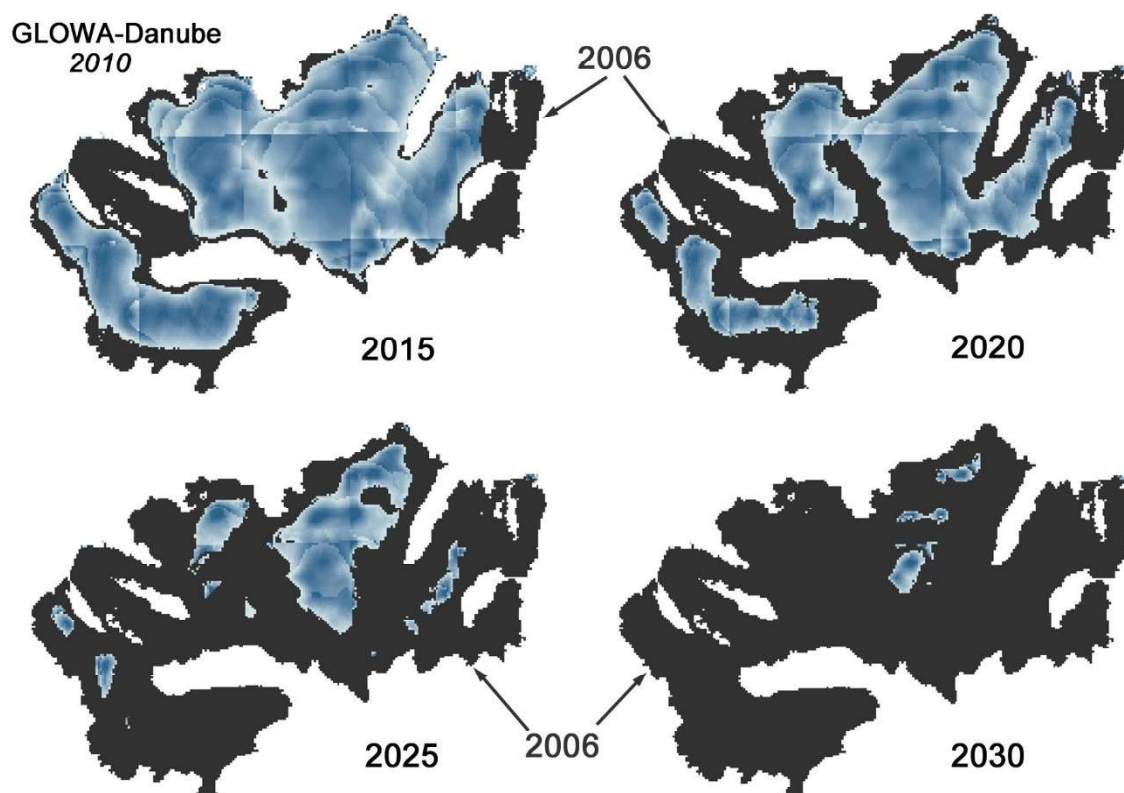
**Abb. 7:** Verkleinerung des Nährgebietes durch Wachstum des Ablationsgebietes und generellem Flächenverlust des Gletschers (rechte Achse) im Vergleich zu den kumulativen spezifischen Massenbilanz des Vernagtferners, welche bis ca. 1980 ausgeglichene bis positive Werte aufwies, danach nur noch negative (rote Kurve, linke Achse in m Wassersäule).



Mit der Abnahme der Eisreserven kam es zum Erlahmen der Eisbewegung, wodurch die Gletscherfront beschleunigt nach oben verlagert wurde. Da die Kammlinie eine fixe obere Begrenzung bildet, ergibt sich zwangsläufig die immer schnellere Abnahme der Gesamtfläche des Gletschers (Abb. 7), wodurch die Größe des Nährgebietes weiter verkleinert wird. Ohne Einnahmen kann der Gletscher jedoch auf Dauer nicht mehr länger existieren und wird verschwinden.

### Die zukünftige Entwicklung des Vernagtferners

Bereits vor der Jahrtausendwende wurde in mehreren Ansätzen versucht, die zukünftige Entwicklung des Vernagtferners auf der Basis der verfügbaren Modelle zu prognostizieren und zu visualisieren. Manche Bilder der damaligen Ergebnisse sind gegenwärtig noch im Internet zu finden. Seitdem sind gut 20 Jahre vergangen und man muss erkennen, dass die frühen Versuche nicht die Realität wiedergeben. Die immer noch wahrscheinlichste Prognose wurde 2010 in einer Diplomarbeit (MAROWSKY 2010) auf der Basis der Ergebnisse von detaillierten Modellrechnungen im Rahmen des Verbundprojektes GLOWA-Danube ([www.glowa-danube.de](http://www.glowa-danube.de); MAUSER & PRASCH 2016) durchgeführt. Diese Studie verwendete physikalisch basierte Modelle zur Berechnung der hydrologischen Prozesse auf den Landoberflächen sowie Generatoren zur Erzeugung detaillierter Klimaszenarien auf der Grundlage der Ergebnisse der Simulationen regionaler Klimamodelle. In Abb. 8 werden vier Phasen der Prognose der Gletscherentwicklung von 2015 bis 2030 gezeigt. Inzwischen liegt diese Studie mehrere Jahre zurück, so dass eine erste Bewertung ihrer Güte möglich ist.



**Abb. 8:** Prognose der zukünftigen Entwicklung des Vernagtferners anhand einer komplexen, auf detaillierten Szenarien gegründeten Modellrechnung im Rahmen des Projektes GLOWA-Danube aus dem Jahre 2010. Die topografischen Daten und die Eisdicken wurden 2006 erhoben und waren im Bereich der Hochvernagtspitze (links) und des Hinteren Brochkogel (rechts) unvollständig. (Nach MAROWSKY 2010).



Der Startzeitpunkt der Rechnung ist 2006. Das zugrundeliegende Szenario ist relativ extrem. Es wird von einer Zunahme der Lufttemperatur um 5.2 °C bis zum Jahre 2100, sowie einer Zunahme der Winterniederschläge um 7 % und einer Abnahme der Sommerniederschläge um 31 % ausgegangen. Die tatsächliche Entwicklung ist bislang weniger dramatisch. Dennoch war der reale Gletscherrückgang im Jahr 2015 bereits weiter fortgeschritten als im Modell prognostiziert. Die markante apere Felsenzone in der Mitte des Gletschers ist bereits 2012 in Abb. 5 (unten) erkennbar. Die aktuellen Aufnahmen der Webcam (<http://geo.badw.de/vernagtferner-digital/webcam.html>) zeigen, dass die Ausdehnung in der Prognose 2020 bereits erreicht bzw. sogar überholt ist. Die Ursache liegt vor allem in einer ungenügenden Berücksichtigung der Rückkoppelungsmechanismen im Modell. Hervorzuheben ist hier vor allem das lokale Nachdunkeln des Eises und die entstehende Schuttbedeckung.

Somit ist die zuvor gezeigte weitere Entwicklung des Vernagtferners mit dem Zerfall der bestehenden Zungen binnen der nächsten 20 Jahre sehr wahrscheinlich. Die Erfahrung an anderen Gletschern zeigt, dass das endgültige Abschmelzen der letzten Eisrelikte insbesondere wegen der immer dickeren Schuttbedeckung sehr viel mehr Zeit in Anspruch nehmen wird. Letzte unscheinbare Spuren des Vernagtferners in der Größenordnung von einigen Hektar Fläche könnten somit auch noch im Jahre 2050 zu finden sein.

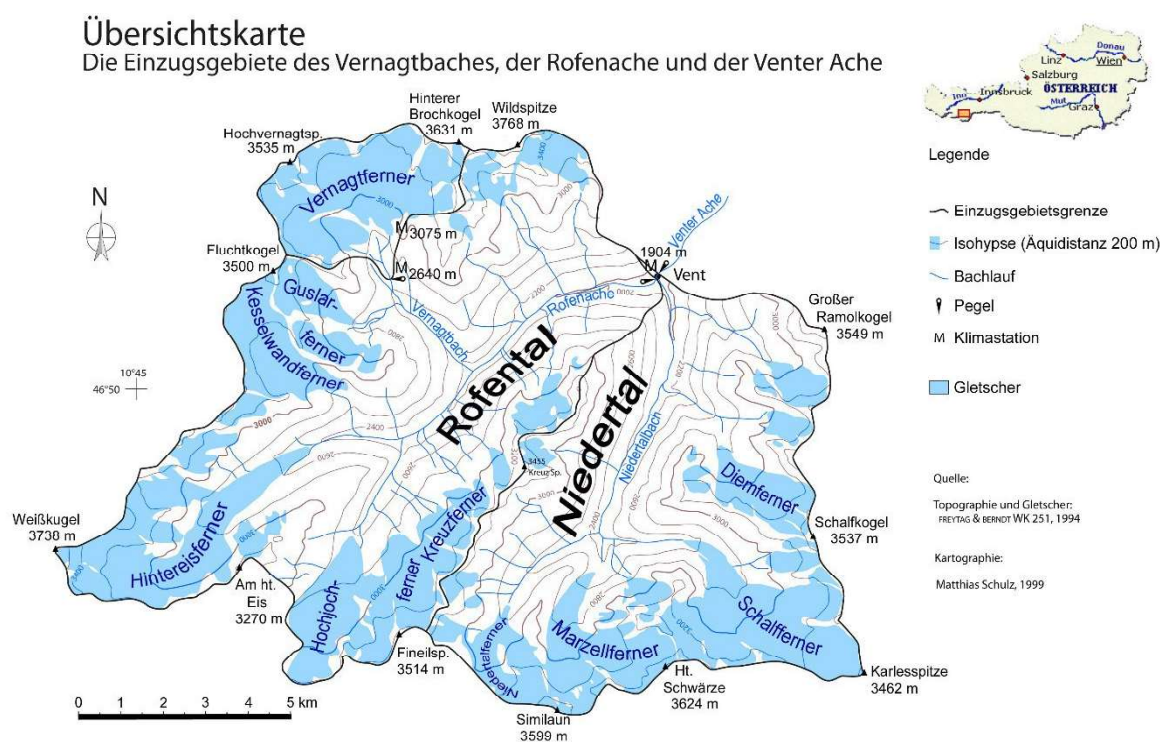
### **Folgen des Gletscherschwundes für die Wasserspenden aus vergletscherten Gebieten**

Selbstverständlich sind mit dem Verlust der Gletscherflächen erhebliche Folgen für die Bergwelt verbunden, die nicht nur gefühlt sind oder allein Touristen und Bergsportler betreffen. Auf diesen Problemkreis soll jetzt hier im Detail nicht eingegangen werden, dagegen auf die bedeutsame Funktion der Gletscher als natürlicher Speicher im alpinen Wasserhaushalt.



**Abb. 9:** Die von der Bayerischen Akademie der Wissenschaften betriebene Pegelstation (rechts) und Klimastation Vernagtbach (links) im Vorfeld des Vernagtferners auf 2635 m Höhe. Im Hintergrund die 3535 m hohe Hochvernagtspitze.

Die Glazialabflüsse des Vernagtferners werden seit 1974 an der bislang am höchsten gelegenen Pegelstation der Ostalpen auf 2635 m gemessen (Abb.9). Deren Einzugsgebiet (Abb. 10) mit einer Fläche von 11.4 km<sup>2</sup> war 1990 noch zu 79 % vergletschert, gegenwärtig weist es noch ca. 60 % Gletscherfläche aus. Abb. 9 zeigt die Monatsmittelwerte des dort gemessenen Abflusses für den Zeitraum ab Beginn der Messungen 1974 bis 1980 und die anschließenden drei Dekaden bis 2010. Der Jahresgang ist typisch für ein glaziales Abflussregime, denn das hauptsächliche Abflussgeschehen findet in den Sommermonaten Juni bis September statt. Während in den 1970er Jahren die mittleren monatlichen Abflüsse im Juli und August bei ca. 1.5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> lagen, verdoppelten sie sich in den darauf folgenden Dekaden, parallel dazu sind die Abflüsse im Juni wegen der früher einsetzenden Schneeschmelze von ca. 0.5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> auf ca. 2 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> angestiegen. Dieser Anstieg in der Wasserspense ist die direkte Folge der Massenverluste des Gletschers.



**Abb. 10:** Schematische Karte des Einzugsgebiets der Venter Ache am Pegel Vent mit einigen seiner Teileinzugsgebiete und den darin befindlichen Gletscherflächen, gelegen im hinteren Ötztal in Österreich. Oben das Einzugsgebiet der Pegelstation Vernagtbach auf 2635 m mit einer Fläche von 11.4 km<sup>2</sup>. Der Vernagtbach mündet in die Rofenache, deren Abfluss bei einer Gesamtfläche des Einzugsgebietes von 98 km<sup>2</sup> am Pegel Rofenache in Vent gemessen wird. Die blauen Flächen zeigen die Ausdehnung der Gletscher im Jahre 1994. (Aus BRAUN & ESCHER-VETTER 2013)

Der Abfluss veränderte sich nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ. Durch den Rückgang des Nährgebietes bei gleichzeitigem Anwachsen des Zehrgebietes verlor der Gletscher zunehmend die Fähigkeit, das gebildete Schmelzwasser oder auf die Gletscherfläche auftreffenden Regen für eine gewisse Zeit lang zu speichern. Dies war vor allem in den ursprünglich dicken Firnschichten im Nährgebiet der Fall, während das Wasser auf dem Blankeis unmittelbar abfließt. Durch das Erlahmen der Eisbewegung veränderte sich auch das Abflussverhalten auf und innerhalb des Eiskörpers dramatisch. Weniger Risse und Spalten lassen das Wasser unmittelbar an der Oberfläche abfließen, im Innern bildeten sich große Kanalsysteme mit hoher Kapazität hin zu den Gletscherfronten, die über große Mühlen mit der Oberfläche verbunden sind. Diese wurden früher durch die Eisbewegung immer wieder zerstört und mussten in jeder Ablationsperiode wieder neu gebildet werden. Unter diesen Bedingungen wurden die Abflussspitzen immer höher. Lagen die Spitzenabflüsse in den 1980er-Jahren noch bei  $6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , wurden ab Ende der 1990er Jahre das doppelte und Spitzen bis nahezu  $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  beobachtet. Diese traten vor allem auf, wenn sich der Abfluss aus Starkniederschlägen und hohe Schmelze überlagerten. Solche Situationen führten zu häufigeren Hochwasserereignissen im Tal, die zusätzliche Sicherungsmaßnahmen notwendig machten.

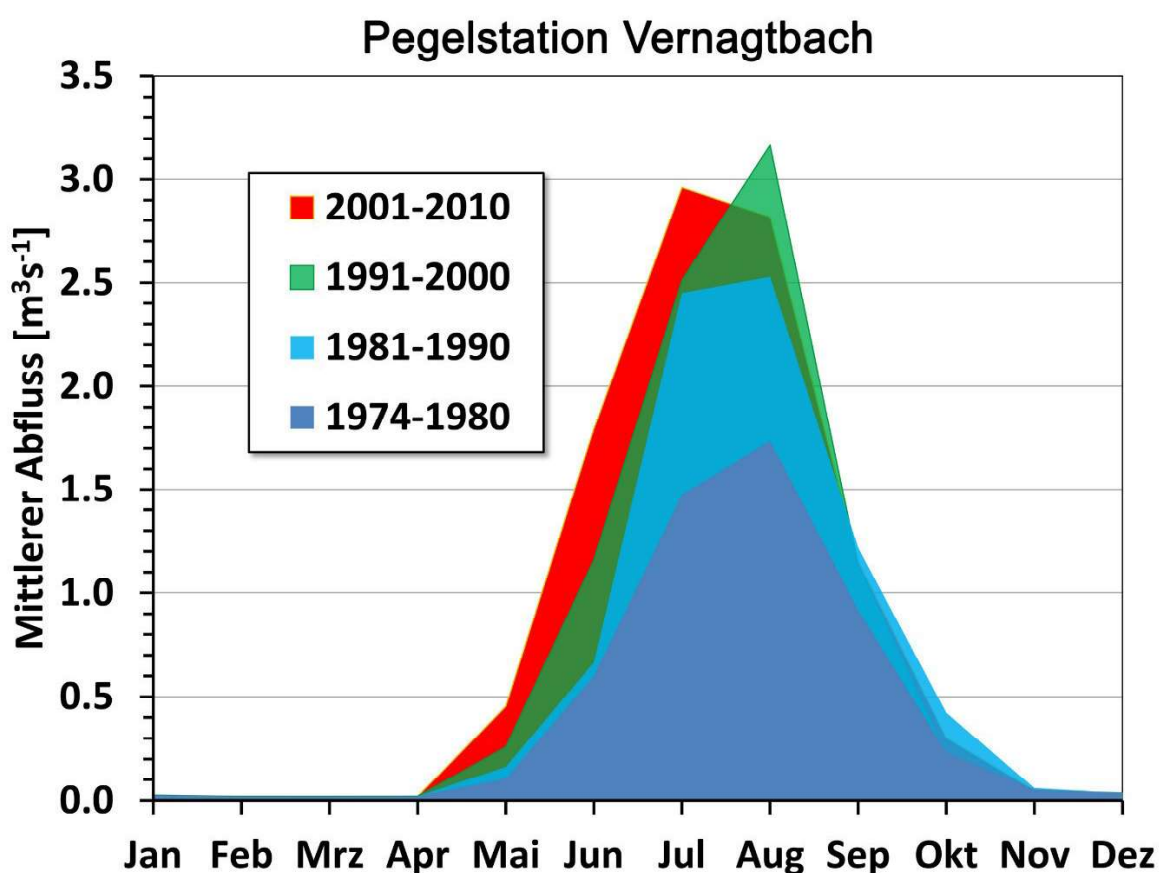


Abb. 11: Mittlere monatliche Gletscherabflüsse des Vernagtferners an der Pegelstation Vernagtbach zwischen 1974 und 2010.



Mit der Abnahme und der Verlagerung der Gletscherflächen in höhere Lage werden die Abflüsse zwangsläufig wieder zurückgehen. Am Vernagtferner dürfte das Maximum sogar bereits überschritten sein, wie es auch in der Abb. 11 bereits angedeutet ist.

Die zukünftige Entwicklung der Gebirgsabflüsse muss mittels komplexer hydrologischer Modelle untersucht werden, die nicht nur die Entwicklung sämtlicher Gletscher berechnen, sondern auch die potentiellen Veränderungen der Schneebedeckung und der Regenspende bis hin zu den aktiven Eingriffen des Menschen in den Wasserhaushalt prognostizieren. Derartige modelltheoretische Untersuchungen wurden im Rahmen des bereits erwähnten Verbundprojekt Glowa-Danube im Einzugsgebiet der Oberen Donau bis zum Pegel Passau-Achleiten (siehe auch Abb. 13) mit dem physikalisch basierten Modellverbund DANUBIA – PROMET – SURGES durchgeführt (MAUSER & PRASCH 2016; MAUSER & BACH 2009). Gerechnet wurde innerhalb des 77000 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiets auf einem 1x1 km<sup>2</sup> – Raster. Für die Vergangenheit dienten auf das Raster interpolierte meteorologische Daten der operationellen Wetterdienste, für die Zukunft wurden kontinuierliche Datensätze generiert, die aus den Ergebnissen regionaler Klimamodelle mit einem größeren Rechengitter auf das feinere Raster skaliert wurden.

Auf diese Weise konnten nicht nur die Abflusshöhen an nahezu jedem Ort im Gewässersystem berechnet werden, sondern auch die Anteile aus Gletscherschmelze, Schneeschmelze und Regen. Das Untersuchungsgebiet deckte das gesamte Einzugsgebiet des alpinen Inn und der Salzach als Gebirgszuflüsse zur Donau ab. Dabei werden die Wasserspenden aller Gletscher im Inn-Einzugsgebiet, ca. 550 an der Zahl, inklusive der Veränderungen der Gletscherflächen selbst berücksichtigt. Im Detail wurde darüber in WEBER et al. (2009) und WEBER et al. (2010) berichtet.

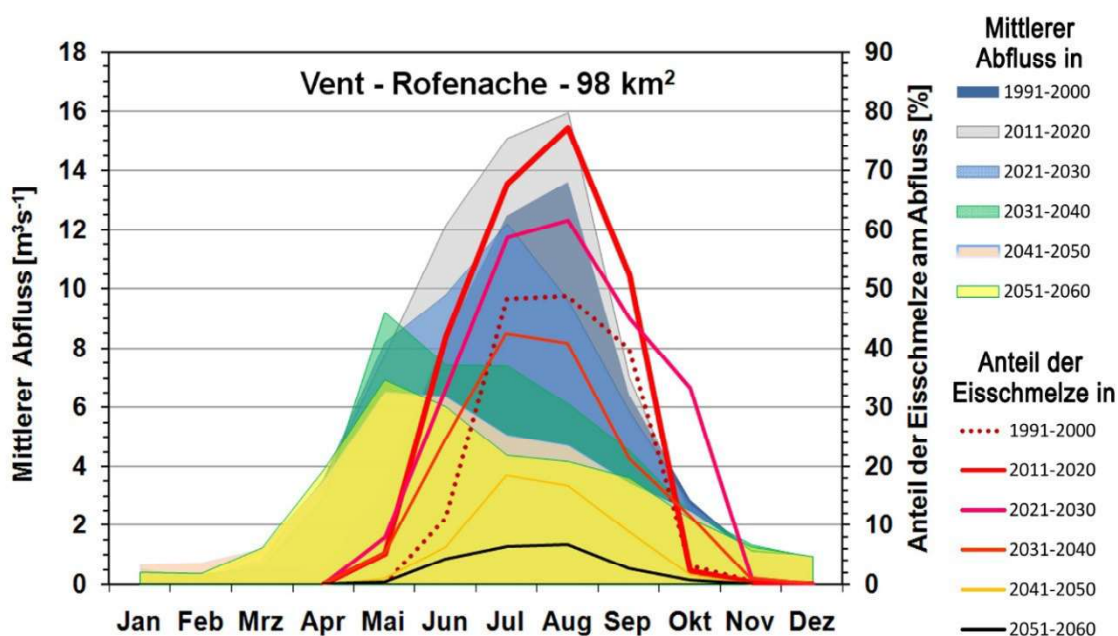
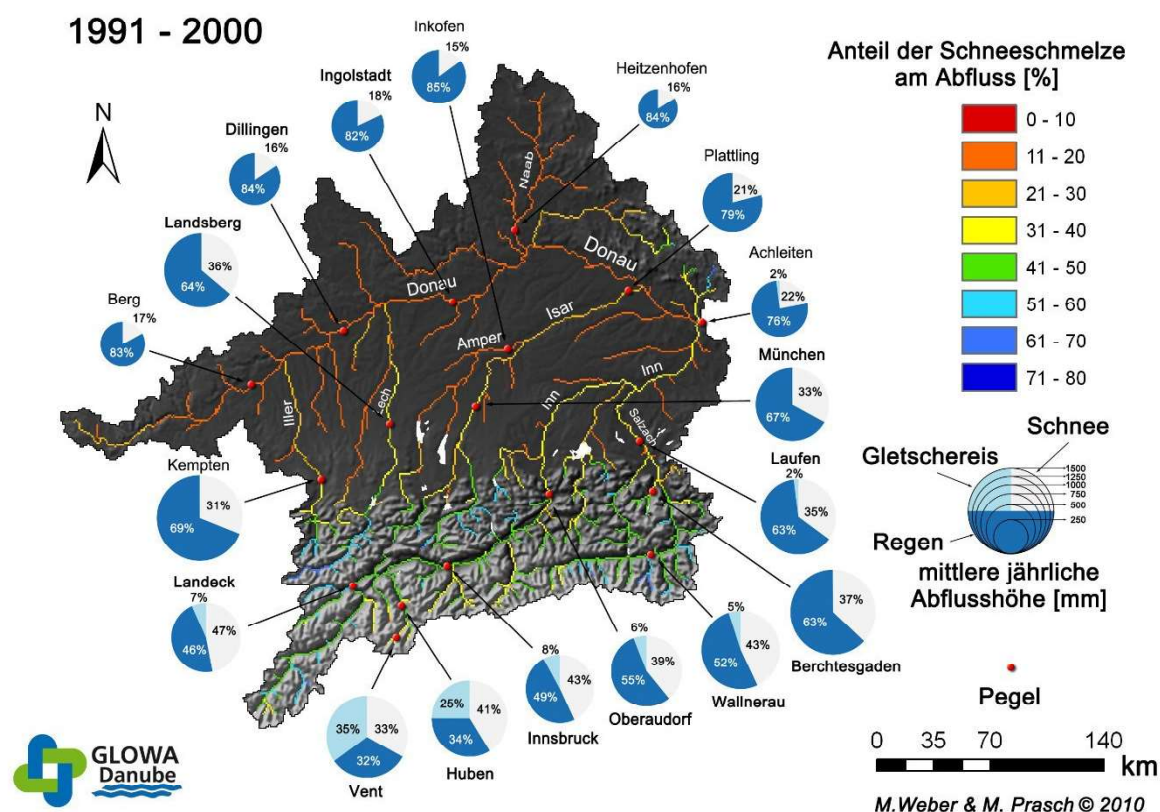


Abb. 12: Mittlere Abflüsse und Anteile der Eisschmelze am Pegel Rofenache / Vent in den Dekaden 1991-2000 bis 2051-2060.



Da die Einzugsgebiete für die Berechnung der Abflüsse eine Mindestgröße haben müssen, gibt es für die Pegelstation Vernagtbach keine direkten Ergebnisse. Deshalb zeigt Abb. 12 eine zur Abb. 11 vergleichbare Darstellung für das unterhalb des Vernagtbachs gelegene Einzugsgebiet der Rofenache (Abb. 910). Neben den dekadischen Monatsmittelwerten der Abflüsse werden zusätzlich die prozentualen Anteile der Eisschmelze angegeben. Demnach fällt eine nennenswerte Gletscherspende nur von Mai bis Oktober an. Im Zuge der weiteren Klimaerwärmung kann sie noch weiter zulegen und im August in der aktuellen Dekade ihren maximalen Beitrag von 75% des Gesamtabflusses erreichen. In den folgenden Dekaden geht der Anteil der Gletscherschmelze drastisch zurück, wobei sie früher einsetzt und später endet. Ab Mitte des 21. Jahrhunderts beträgt der Anteil der Wasserspende von den Gletschern selbst in diesem ursprünglich sehr stark vergletscherten Kopfeinzugsgebiet in den Öztaler Alpen im Monat August mit der maximalen Eisschmelze weniger als 10%. Dabei wandelt sich das Abflussregime zunehmend vom glazial geprägten in ein nivales Regime um, dessen dreiecksförmiger Jahresgang durch das Maximum der Schneeschmelze im Mai bestimmt wird. Dadurch wird die sommerliche Wasserführung mehr als halbiert.

Die Auswirkung des Klimawandels auf die zukünftige Wasserführung des Einzugsgebietes der oberen Donau bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts kann dem Vergleich der Abb. 13 und 14 entnommen werden. Hier wird der Anteil der Schneeschmelze am Abfluss in den Flüssen und für ausgewählte Pegel die mittleren jährlichen spezifischen Abflusshöhen (in mm) und deren Aufteilung in die Anteile aus der Schmelze von Gletschereis bzw. Schnee und Regen in Form eines Kuchendiagramms angegeben. Die Abflusshöhe entspricht der Fläche der Scheibe. Bereits in Abb. 13, welche die Verhältnisse in der vergangenen Dekade 1991 bis 2000 wiedergibt, wird die Bedeutung des Gebirges als „Wasserschloss“ für das Umland deutlich. Flüsse, deren Quellgebiet im Gebirge liegt, haben eine deutlich höhere Wasserführung als die mit einem vergleichbar großen Einzugsgebiet außerhalb des Gebirges. In der Regel entstammt das meiste Wasser den Regenfällen, innerhalb des Gebirges zu mehr als einem Drittel aber auch der Schneeschmelze. Dies gilt auch für die Pegel im Flachland, sofern die Flüsse aus dem Gebirge zufließen. Die haben in der Regel auch eine deutlich höhere Wasserführung als die mit einer Quelle im Tiefland. Bei Flüssen ohne Gebirgsanschluss beträgt der Anteil der Schneeschmelze meist um die 15%, entsprechend groß ist der Anteil aus Niederschlägen in Form von Regen.

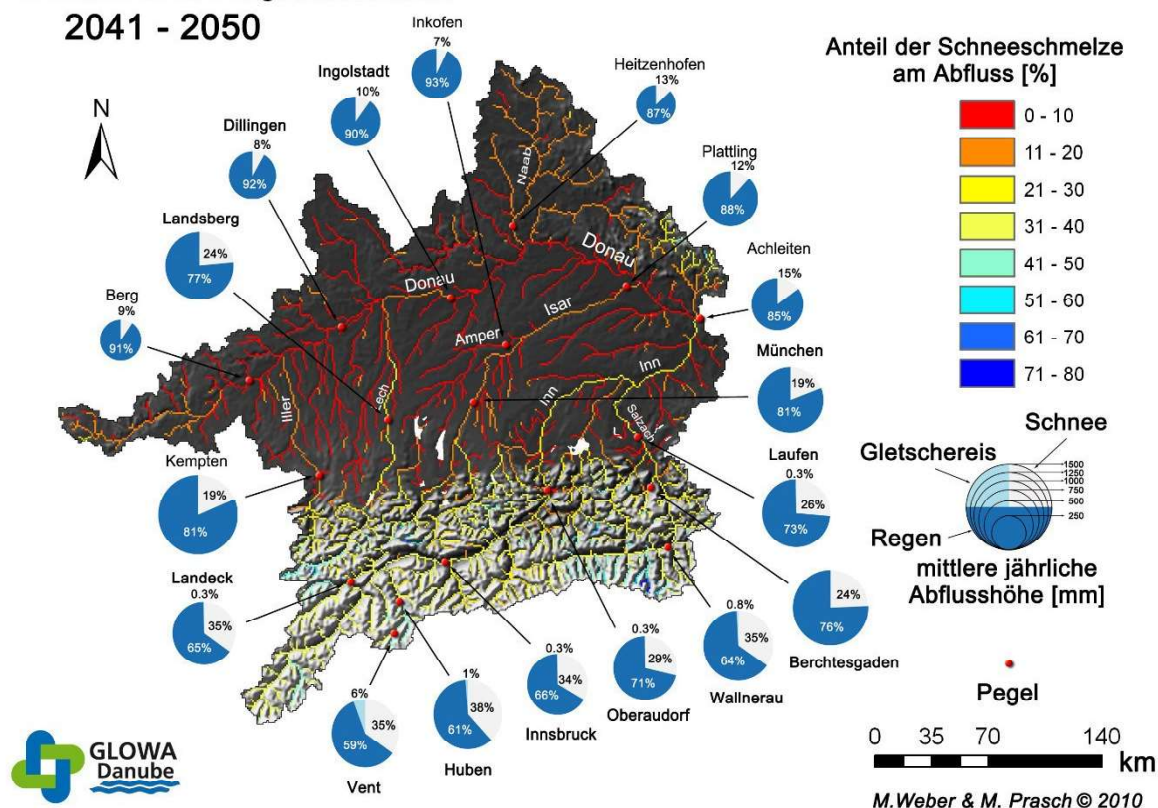


**Abb. 13:** Mittlere jährliche Anteile der Schneeschmelze in den Flüssen im Einzugsgebiet der Donau, definiert durch den Pegel Passau-Achleiten für die Dekade 1991-2000. Zusätzlich werden an ausgewählten Pegelstellen die jährlichen spezifischen Abflusshöhen sowie ihre Quellanteile nach Regen, Schnee- und Gletscherschmelze in Form von Kuchendiagrammen angegeben. Es handelt sich um Resultate einer hydrologischen Modellrechnung auf der Basis von Beobachtungsdaten.

Der Glazialabfluss ist eigentlich nur im Bereich der stark vergletscherten Kopfeinzugsgebiete und am Oberlauf von Inn und Salzach von Bedeutung. Von über 35% in den oberen Einzugsgebieten nimmt der Anteil der Eisschmelze flussabwärts rasch auf wenige Prozentpunkte ab. Das hat seine Ursache in der überproportionalen Zunahme des Flächenanteils der Quellgebiete mit Schneeschmelze und Regen. Am Pegel Achleiten/Oberösterreich unterhalb der Einmündung des Inn in die Donau beträgt der Anteil der Gletscherschmelze im Jahresdurchschnitt weniger als 2%. Selbst in heißen trockenen Sommermonaten wird ein Anteil von 10% nicht überschritten. Folglich beschränkt sich die Bedeutung der Gletscher als Quelle für den Wasserhaushalt auf den inneralpinen Bereich.

Deswegen wird sich außerhalb der Alpen auch nach dem weitgehenden Verschwinden der Gletscher nicht sehr viel am Wasserhaushalt ändern, wie man der Abb. 14 entnehmen kann, welche die mittlere Situation während der Dekade 2041 bis 2050 wiedergibt. Gletscherschmelze entspringt nur noch den höchst gelegenen Einzugsgebieten im Ötztal oder dem Zillertal. Der Anteil aus der Schneeschmelze bleibt proportional in etwa erhalten, der Anteil aus Regen nimmt dagegen zu.

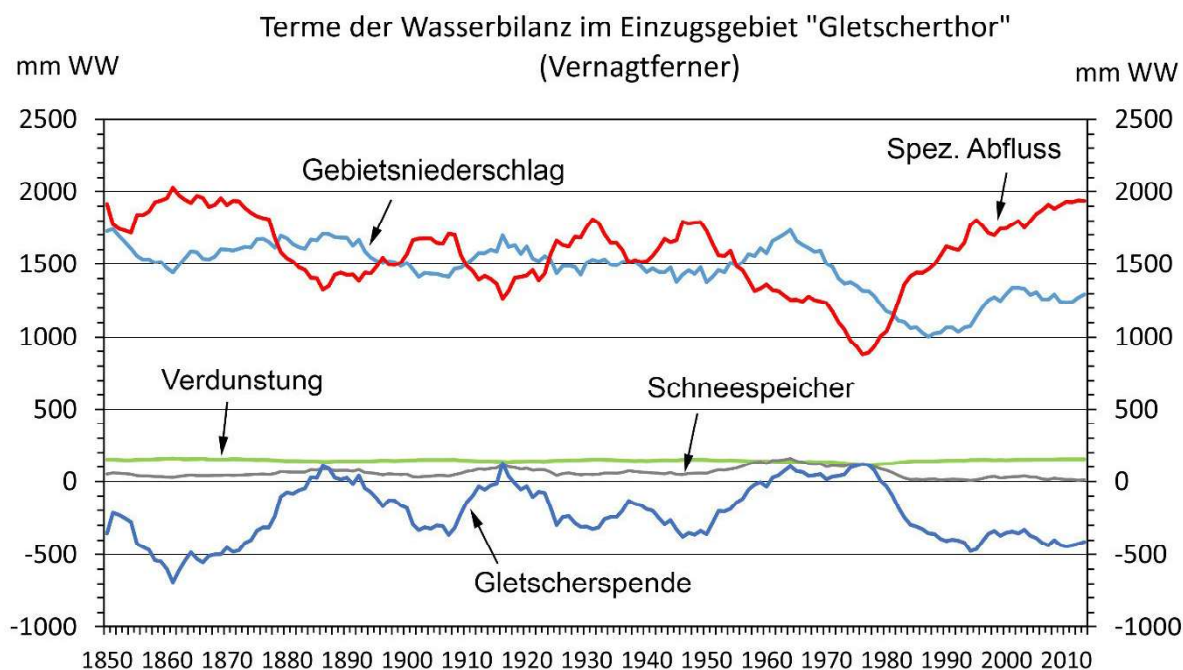
**Szenario REMO regional baseline  
2041 - 2050**



**Abb. 14:** Dieselbe Darstellung wie in Abb. 18, nur berechnet unter Verwendung eines Szenarios nach den Ergebnissen des regionalen Klimamodells REMO für die Dekade 2041 bis 2050.

Die zukünftig in den Kopfeinzugsgebieten fehlende Eisschmelze wird nicht ersetzt, wodurch sich dort die Wasserführung drastisch verringert. Im Alpenvorland fällt sie jedoch kaum ins Gewicht, da dort die Anteile bereits zuvor von untergeordneter Rolle waren und der Abfluss vorwiegend dem Niederschlag in Form von Regen und Schnee entstammt. Es nimmt in der Zukunft auch die Bedeutung der Schneeschmelze im Verhältnis zum Regenniederschlag weiter ab. Dennoch müssen die Landstriche entlang der Flüsse mit Anschluss an das Gebirge auch weiterhin nicht unter Wassermangel leiden, denn die Funktion des „Wasserschlosses Alpen“ bleibt auch unter den veränderten Klimabedingungen erhalten. Auch dort muss temporär mit einem Rückgang des Wasserangebots gerechnet werden, dies ist aber den Veränderungen durch höhere Verdunstung in einer wärmeren Atmosphäre und den zu erwartenden längeren Trockenperioden geschuldet. Diese eigentlich gute Nachricht gilt allerdings nur für Klimate des humiden Typs wie am Nordrand der Alpen. In ariden Regionen hätte der Gletscherschwund wesentlich gravierendere Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.

Bleibt zum Abschluss noch die vielleicht spannende Frage, ob die Abflüsse in der Zeit nach dem Ende der *Kleinen Eiszeit* mit den vergleichsweise riesigen Gletscherflächen höher waren als heute? Diese Frage ist insofern für die Praxis schwierig zu beantworten, denn das Einzugsgebiet des Gletscherbachs am Gletschertor hatte damals völlig andere Grenzverläufe als heute und war zudem deutlich größer. Außerdem vereinigten sich einige heute getrennt betrachtete Gletscherflächen und damit deren Abflüsse



**Abb. 15:** Komponenten der Wasserbilanz für das hypothetische Einzugsgebiet „Gletscherthor“, ca. 1200 m unterhalb der heutigen Pegelstation Vernagtbach auf etwa 2500 m Höhe gelegen. Die Fläche beträgt ferner 15.6 km<sup>2</sup>. Die Berechnung erfolgt jährlich für den Zeitraum 1845 bis 2013 mit dem konzeptionellen Modell HBV-ETH9 auf der Basis der Rekonstruktion von Temperatur und Niederschlag wie in Abb. 4. Die Reihen der jährlichen Resultate sind mit einem Tiefpassfilter über 9 Jahre geglättet. Näheres siehe GLEISBERG (2015).

Eine modelltheoretische Antwort auf die gestellte Frage ist aber durchaus möglich. In Abb. 15 sind die jährlichen Komponenten der Wasserbilanz eines hypothetischen Einzugsgebiets mit dem Vernagtferner von 1850 bis 2013 angegeben. Diese wurde mit einem konzeptionellen hydrologischen Modell auf der Basis von Tageswerten der Lufttemperatur und Niederschlag berechnet. Von Interesse sind an dieser Stelle die rote Kurve des spezifischen Abflusses und die blaue Kurve der Gletscherspende, welche den Verlusten oder Gewinnen aus der Massenbilanz normiert auf die Einzugsgebietsgröße entspricht. Folglich ist die gegenwärtige Gletscherspende in Abbildung 20 kleiner als die weiter oben angegebene spezifische Massenbilanz, die nur auf die Gletscherfläche bezogen wird. Insofern waren die spezifischen Massenverluste in der Erwärmungsphase nach der *Kleinen Eiszeit* ähnlich hoch wie heute. Dasselbe gilt auch für den spezifischen Abfluss, der damals mit maximal ca. 2000 mm in etwa vergleichbar war mit dem heute gemessenen, der aber von einer nur etwa halb so großen Fläche generiert wird. Nach 1880 war der spezifische Abfluss für gut 80 Jahre weitestgehend auf einem einheitlichen Niveau um die 1500 mm, bis er 1974 mit unter 1000 mm auf den niedrigsten Wert seit dem Ende des letzten großen Gletschervorstoßes sank. Dies war zufällig exakt der Zeitpunkt, zu dem die Pegelstation Vernagtbach errichtet wurde und den Messbetrieb aufnahm. Seit dieser Zeit hat der Abfluss nur noch zugenommen und hat mit der halben Fläche heute wieder das Niveau von 1850 erreicht.



## Fazit und Ausblick

Durch das Aufzehren der Eisreserven seit dem Anfang der 1980iger Jahre sind die Abflussmengen aus den vergletscherten Gebieten überdurchschnittlich hoch, und werden wohl bald durch die Verminderung der Gletscherflächen geringer ausfallen. Abflussberechnungen für die kommenden Jahrzehnte zeigen unter allen untersuchten Szenarien einen beschleunigten Gletscherschwund, und schon in den kommenden Jahrzehnten ein starker Rückgang in den Kopfeinzugsgebieten der Alpen. Außerhalb der Alpen wird die fehlende Eisschmelze kaum Wirkung zeigen, da wir im nördlichen Teil der Alpen und Tiefländer zu einem humiden Klimatyp gehören, welcher wohl auch in Zukunft wesentliche Niederschläge aufweist, welche das Abflussgeschehen steuern.

## Literatur

BÖHM, R. & HIEBL, J. (2013): Lange instrumentelle Klimazeitreihen für den Vernagtferner. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 45/46 (2011/2012): 203-218.

BRAUN, L. & ESCHER-VETTER, H. (2013): Gletscherforschung am Vernagtferner. Themenband zum fünfzigjährigen Gründungsjubiläum der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. 45/46 (2011/2012), 1-381 & 2 maps. Zugang zu allen Beiträgen im Doppelband 45/46; siehe [http://www.hochgebirgsforschung.de/Download/ZGG45462013/zgg\\_45\\_46\\_2013.pdf](http://www.hochgebirgsforschung.de/Download/ZGG45462013/zgg_45_46_2013.pdf).

ESCHER-VETTER, H. (2005): Glaciers bear witness to climate change. Weather catastrophes and climate change - Is there still hope for us? Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft - Munich Re, Knowledge Series, Bestellnummer 302-04221, p 114-121.

FINSTERWALDER, R.; RENTSCH, H. (1981): Zur Höhenänderung von Ostalpengletschern im Zeitraum 1969-1979. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 16 (1980) 1, 111-115 & 1 plate & 1 map suppl.

GLEISBERG, E. (2015): Berechnung der Terme der Wasserbilanz im Einzugsgebiet des Vernagtferners für die Jahre 1845 - 2013 mit dem hydrologischen Modell HBV3-ETH9. Bachelorarbeit, LMU München, Fakultät für Geowissenschaften, Department für Geographie, 81 p.

JENK, T. M.; GÄGgeler, H. W.; PALMER, A.; BRÜTSCH, S.; SCHWIKOWSKI, M. (2007): Air pollution records from the Fiescherhorn ice core 2002. S. 23 in: Gäggeler, H. W.; Schwikowski, M.; Blattmann, A. (Eds.) Annual report 2006, Paul Scherrer Institut, Labor für Radio- und Umweltchemie - Laboratory of Radiochemistry and Environmental Chemistry, January 2007, 77 S.

LIEPERT, B. (2002): Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. Geophysical Research Letters, Vol. 29, No. 10, 1421, 10.1029/2002GL014910, 2002.

MAROWSKY, K. (2010): Die Validierung des Gletschermodells SURGES am Beispiel von Vernagtferner sowie Nördlichem und Südlichem Schneeferner. Diplomarbeit, Kath. Univ. Eichstätt-Ingolstadt, 147 S.

MAUSER, W. & H. BACH (2009): PROMET – a physical hydrological model to study the impact of climate change on the water flows of medium sized, mountain watersheds. *Journal of Hydrology*, 376: 362-377.

MAUSER, W. & PRASCH, M. (Editors) (2016): *Regional Assessment of Global Change Impacts - The Project GLOWA-Danube*, ISBN 978-3-319-16750-3 Springer, Berlin, 670 p.

MAYER, C.; ESCHER-VETTER, H.; WEBER, M. (2013): 46 Jahre glaziologische Massenbilanz des Vernagtferners. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 45/46 (2011/2012), p 219-234.

OHMURA, A. (2013): Global Dimming und Brightening: Einfluss der Globalsonnenstrahlung auf den Massenhaushalt von Gletschern. Symposium der Kommission für Erdmessung und Glaziologie "50 Jahre Gletscherforschung", München 14.-15. März 2013, Präsentation 32 Blatt.

WEBER, M., L. BRAUN, W. MAUSER & M. PRASCH (2009): Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, Nr. 86: 1-29.

WEBER, M., L. BRAUN, W. MAUSER & M. PRASCH (2010): Contribution of rain, snow – and icemelt in the upper Danube discharge today and in the future. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 33(2): 221-230.

WEBER, M. (2013): Dokumentation der Veränderungen des Vernagtferners. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Bd. 45/46 (2011/2012), pp. 49-84.

**Anschrift der Verfasser:**

**Dr. Ludwig Braun**

Ehemals Bayerische Akademie der Wissenschaften – Erdmessung und Glaziologie  
Alfons-Goppel-Str. 11  
D-80539 München  
Deutschland

**Dr. Markus Weber**

Technische Universität München  
Photogrammetrie & Fernerkundung  
c/o Bayerische Akademie der Wissenschaften – Erdmessung und Glaziologie  
Alfons-Goppel-Str. 11  
D-80539 München  
Deutschland