

4.7 400 Jahre Feldforschung am Vernagtferner (Ötztal, Österreich)

HEIDI ESCHER-VETTER

400 Jahre Feldforschung am Vernagtferner (Ötztal, Österreich): Der Artikel zeigt am Beispiel des Vernagtferners in den Ötztaler Alpen, Österreich, Methoden und Ergebnisse zur Analyse des Verhaltens eines Alpengletschers. Das Vorstoßen und Zurückgehen des Vernagtferners wird seit dem Jahr 1601 mit zunehmender zeitlicher und räumlicher Präzision dokumentiert und analysiert. Frühe Bilddokumente (1601 bis 1844), räumlich hoch aufgelöste Karten seit 1889, Massenbilanzuntersuchungen mit der glaziologischen Methode seit 1964 und meteorologisch-hydrologische Registrierungen und Modellierungen seit 1974 liefern mit zunehmender zeitlicher Auflösung ein konsistentes Bild von den ständig wachsenden Verlusten dieses Gletschers seit mehr als 30 Jahren.

400 years of field research on Vernagtferner (Oetztal Alps, Austria): In this article, methods and results are presented for the analysis of the behaviour of an alpine glacier, the Vernagtferner, Oetztal Alps, Austria. Since 1601, the advances and retreats of Vernagtferner are documented and analysed with rising temporal and spatial precision. Early pictorial documents (from 1601 to 1844), high-resolution maps since 1889, mass balance investigations with the glaciological method since 1964 and meteorological-hydrological records and models since 1974 deliver, with increasing temporal resolution, a consistent pattern of the continual ice loss of this glacier over more than 30 years.

Im Jahr 2013 jährte sich die Gründung der Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zum fünfzigsten Mal. Aus diesem Anlass wurde ein Symposium veranstaltet und eine Zusammenstellung der bedeutendsten Fakten und Forschungsarbeiten am Vernagtferner in einem Themenband der Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie (Band 45/46, 2013) veröffentlicht. Der folgende Artikel basiert auf ausgewählten Forschungs- und Beobachtungsergebnissen, die in dem Themenband zusammengestellt wurden. Er zeigt am Beispiel des Vernagtferners, wie Beobachtungen, Kartierungen und unterschiedliche Messverfahren das Verhalten des Gletschers mit ständig steigender zeitlicher Auflösung über einen Zeitraum von mehr als vierhundert Jahren widerspiegeln.

Beobachtungen und Messungen

Der Vernagtferner (46° 52' N, 10° 49' E) liegt im inneren Ötztal, am Ende des Rofentals im Gebiet des Weißkamms, einem sehr stark vergletscherten Gebiet in den Ostalpen. Seine Vorstoß- und Rückzugsphasen sind bereits seit 1601 dokumentiert, da er während der sog. 'Kleinen Eiszeit' (siehe auch BÖSE Kap. 2.3 in diesem Band) immer wieder aus dem Vernagtal in das Rofental vorstieß und dort mit seinen Eismassen einen Damm bildete, der das Schmelzwasser der oberhalb liegenden Gletscher zu einem See aufstaute. Die Ausbrüche dieser Gletscherseen verursachten erhebliche Überschwemmungen und Verwüstungen in den talauswärts liegenden Regionen, also im Ötztal und teilweise sogar im Inntal. Deshalb wurden die jeweiligen Seebildungen von der Bevölkerung ebenso wie den kirchlichen und staatlichen Organisationen sehr genau beobachtet und mit unterschiedlichen Methoden dokumentiert.

Die Manuskriptkarte von Abraham Jäger vom 9. Juli 1601 (NICOLUSSI 2013) ist in einem Bericht an Kaiser Rudolf II enthalten, sie stellt wahrscheinlich das früheste Dokument eines Gletschers dar. Sie zeigt den Eisdamm und den mit Eisbergen bedeckten aufgestauten See dahinter; sie wird im Tiroler Landesmuseum Ferdinandeum verwahrt. Auch vom nächsten Hochstand (15. Mai 1678) ist eine derartige Karte überliefert. Der dritte Vorstoß des Gletschers im Sommer 1772 ist in dem 'Atlas Tyrolensis' der 'Bauernkartographen' Peter Anich und Blasius Hueber dokumentiert (BRUNNER 2013). Diese erstellten eine Gesamtaufnahme der Grafschaft Tirol zwischen 1760 und 1770. *Abb. 4.7-1* zeigt einen Ausschnitt mit der Verteilung der Eismassen im Rofental, *Abb. 4.7-2* den auch hier wieder aufgestauten See (WALCHER 1773). Dieser wurde von Joseph Walcher, SJ, Professor für Mechanik in Wien, in seinem Buch 'Von den Eisbergen in Tyrol' dargestellt, er zeigt die beim Vorstoß entstandenen Eistürme, welche die Zunge des Gletschers bilden. Der letzte Vorstoß bis ins Rofental ereignete sich im Jahr 1845 und ist in einem Gemälde aus dem Jahr 1844 von Thomas Ender, dem Kammermaler von Erzherzog Johann wiedergegeben (*Abb. 4.7-3*). Deutlich ist die mächtig aufgewölbte Zunge des Gletschers zu erkennen, ein typisches Zeichen für einen vorstoßenden Gletscher. Auf Grund der häufig sehr schnell erfolgenden Vorstöße wurde der Vernagtferner in die Kategorie der surgenden Gletscher eingeordnet (BRUNNER 2013, NICOLUSSI 2013).

All diese (und noch einige weitere, hier nicht erwähnte (WEBER 2013)) Dokumente bildeten eine wichtige Grundlage für die wissenschaftliche Gletscherforschung, die am Vernagtferner mit der Herausgabe der Karte von 1889 durch Sebastian FINSTERWALDER (1897) beginnt (*Abb. 4.7-4*). Hier wurde zum ersten

Mal ein Gesamtgletscher mit Hilfe der Messtisch-photogrammetrie, dem ersten operablen photogrammetrischen Messverfahren kartiert (BRUNNER 2013). Die Karte liegt im Maßstab 1:10.000 vor, der Höhenlinienabstand beträgt 10 m, sie gilt als Prototyp einer modernen Hochgebirgskarte (BRUNNER 2013). An sie schlossen sich weitere Vermessungen in den Jahren 1912, 1938, 1954 und 1969 an, die zunächst mit terrestrischer Photogrammetrie, ab 1969 mit Luftbildphotogrammetrie durchgeführt wurden. Diese Karten bilden die Grundlage für die Beschreibung der Veränderungen der Gletscherfläche mit der geodätischen Methode, die auf dem Vergleich der in mehrjährigem Abstand vorliegenden Karten basiert und die mittlere Höhenänderung der Gletscheroberfläche für den jeweiligen Zeitraum liefert. Weitere Kartenaufnahmen erfolgten durch die Kommission für Glaziologie (vgl. nächster Absatz) in den Jahren 1979, 1982, 1990, 1999 und 2006, wobei die letzte eine sog. Kompositkarte darstellt, die aus Satelliten- und Luftbildern zusammengesetzt ist. Die immer schnellere Abfolge der Aufnahmen ist zum einen durch die eingesetzte Technik möglich, zum andern durch das rasante Schwinden der Eismassen erforderlich. Da am Vernagtferner im Jahr 1966 auch die Eisdicke mit der Methode der Refraktionsseismik ermittelt wurde (MILLER 1972), kann zusätzlich die absolute Änderung des Eisvolumens ermittelt werden (vgl. Abb. 4.7-5).

Die dritte Phase der Vernagtforchung beginnt im Jahr 1962 mit der Gründung der Kommission für Glaziologie (seit 2010 Kommission für Erdmessung und Glaziologie) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und den Ermittlungen der Massenänderung mit der direkten glaziologischen Methode. Als zentralalpiner Gletscher weist der Vernagtferner deutlich getrennte Akkumulations- und Ablationsphasen auf, die typischerweise von Oktober bis April (Akkumulation) und von Mai bis September (Ablation) dauern, im Gegensatz zu den Gletschern des Himalaya, bei denen Akkumulation auch im Sommer auftritt (vgl. MAYER & LAMBRECHT Kap. 4.5 in diesem Band). Zur Bestimmung der Bilanz werden die Massengewinne durch festen Niederschlag im Winter den Massenverlusten im Sommer, vor allem durch Schmelze gegenübergestellt. Die winterliche Akkumulation wird dabei durch zahlreiche Aufnahmen der Dichte in Schneeprofilen an charakteristischen Stellen des Gletschers und eine möglichst große Anzahl von Schneehöhenmessungen bestimmt (ESCHER-VETTER et al. 2009), während das Abschmelzen im Sommer, also die Ablation, mit Hilfe von in das Eis eingebohrten sog. Pegelstangen ermittelt wird.

Seit 1964 liegen – getrennt für Sommer und Winter – die Werte der Massenbilanz des Gletschers in 50 m Höhenstufen lückenlos vor (MAYER et al. 2013), sie



Abb. 4.7-1: Auszug aus dem »Atlas Tyrolensis« von PETER ANICH & BLASIVS HUEBER (1774) mit dem Gebiet des Rofentals und der Lage des Gletschersees unterhalb der Zunge des Vernagtferners (Text »Vernagt Thal«).

stellen damit eine wichtige Zeitreihe des Gletschers mit zeitlich höherer Auflösung dar, als sie die geodätische Methode mit typischen Abständen von 10 Jahren liefern kann. Der an der Universität Zürich angesiedelte »World Glacier Monitoring Service« (s. auch PAUL Kap. 4.1 in diesem Band) veröffentlicht regelmäßig die jährlichen Massenbilanzwerte ebenso wie die mit der geodätischen Methode bestimmten Volumenänderungen des Vernagtferners. (www.wgms.ch)

Eine weitere zeitliche Verdichtung der Messungen wurde mit dem Bau der Pegel- und Klimastation Vernagtbach im Jahr 1973 erreicht. Diese erschließt ein Einzugsgebiet von 11,44 km² Größe, das damals zu 81% vergletschert war. An der Pegelstation in 2.640 m NN wird der Gesamtabfluss des Gletschers registriert (ESCHER-VETTER & REINWARTH 2013). Seit 1974

liegen alle meteorologischen Parameter, welche die Schmelzwasserproduktion des Gletschers im Sommer bestimmen (vgl. PRASCH Kap. 3.2 in diesem Band), in stündlicher Auflösung vor. Sie umfassen alle Komponenten der kurz- und langwelligen Strahlungsbilanz, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und -richtung. Ganzjährige Registrierungen wurden vor allem durch die Verbesserung der Registriertechnik mit Festwertspeichern (Modas 12 Datenlogger, Fa. NES) seit 1985 möglich. Mit der Einführung von Campbell-Datenloggern im Jahr 2001 erfolgte die Registrierung in noch höherer zeitlicher Auflösung (10 bzw. 5 Minuten) (ESCHER-VETTER & SIEBERS 2013).

Die hydrologischen Messungen umfassen neben dem Abfluss vor allem den Niederschlag, daneben auch



Abb. 4.7-2: Kupferstich »Der Rofener Eissee am 16. August 1772« von Joseph Walcher (1773). Walcher liefert hierzu folgende Erklärung: »gesehen von der Position D in der Zwerchwand. A: Der See mit auf ihm treibenden Eisbergen, B: der Rofenberg, C: der Neusberg, E: der Eisdamm, bestehend aus riesigen Eisblöcken, F: der Hochvernagtferner, G: das Vernagtthal, aus dem das Eis in das Rofental floss, H,I: Plattekogel, K: Fluchtkogel, L: Kösselwand, M: Guslarberg, N: Hintereisferner, O: Hochjochferner, P: Steinmann, S: Rofental«.



Abb. 4.7-3: Ölgemälde »Fernak-Ferner bei Fend im Öztal«, 1844 von Thomas Ender.

Größen wie Schneehöhe oder Wassertemperatur. Mit den Zeitreihen von Niederschlag, Abfluss und Verdunstung kann die hydrologisch-meteorologische Methode zum Einsatz kommen, welche die Eisvorratsänderung aus der hydrologischen Bilanz ermittelt und eine zeitlich hoch aufgelöste Analyse der Schmelzwasserproduktionsprozesse beinhaltet. Für den Zeitraum 1976 bis 1985 wurde dabei die Schmelzwasserproduktion mit einem physikalisch basierten Energiebilanzmodell bestimmt, das auf den Registrierungen an der Pegelstation basiert (MOSEER et al. 1986, ESCHER-VETTER & OERTER 2013). Dieses wurde später zu einem Schmelzwasserproduktions- und Abflussmodell erweitert (ESCHER-VETTER 2000, WEBER 2008).

Zur Rekonstruktion der Wasserbilanz für frühere Zeiträume kamen auch konzeptionelle Modelle zum Einsatz, die geringere Anforderungen an vorliegende Daten stellen, da sie i.d.R. auf Tageswerten von Lufttemperatur, Niederschlag und Abfluss basieren (BRAUN et al. 2013, MAYR & HAGG 2013).

Alle Messwerte der Pegelstation Vernagtbach sind in der frei zugänglichen Datenbank www.pangaea.de gespeichert und können von dort heruntergeladen werden (ESCHER-VETTER et al. 2012, ESCHER-VETTER

et al. 2014). Hier finden sich auch die zwischen 1968 und 1987 an der Station Gletschermitte aufgezeichneten, ersten meteorologischen Zeitreihen im Vernagtgebiet (WEBER & ESCHER-VETTER 2014), sie umfassen Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit und Niederschlag, wenn auch nur für kurze Perioden vor allem während der Sommermonate.

Seit 1976 ist an der dritten Station im Vernagtgebiet (»Station Schwarzkögele«) eine Kamera installiert, die von 1976 bis 2009 einmal am Tag im Sommer den größten Teil der Gletscherfläche fotografierte und damit das Ausaperungsgeschehen ebenso wie sommerliche Neuschneefälle mit schwarzweißen Analogbildern dokumentierte. Seit 2010 erfolgen die Aufnahmen mit einer Digitalkamera mehrmals am Tag und ganzjährig. Die unbearbeiteten Originalaufnahmen sind unter www.glaziologie.de abgelegt (vgl. Abb. 4.7-10).

Die modernste Bestimmung der Massenbilanz wird am Vernagtferner seit 2010 eingesetzt. Mit dieser gravimetrischen Methode steht ein Verfahren zur Verfügung, das Schwerefeldänderungen unmittelbar mit Massenänderungen verknüpft und damit als einziges die Schmelzvorgänge direkt erfassen kann (GERLACH 2013). Allerdings ist dieses Verfahren mit erheblichen logistischen Herausforderungen verbunden und kann deshalb nicht routinemäßig eingesetzt werden.

Ausgewählte Ergebnisse

Abb. 4.7-5 zeigt die Entwicklung der Gletscherfläche und der Eismasse seit der ersten Kartenaufnahme im Jahr 1848. Die Zeitreihen basieren auf den photogrammetrischen Aufnahmen des Gletschers seit 1889, Volumen und Fläche für das Jahr 1848 wurden unter der Annahme hochgerechnet, dass ähnliche eisdynamische Bedingungen

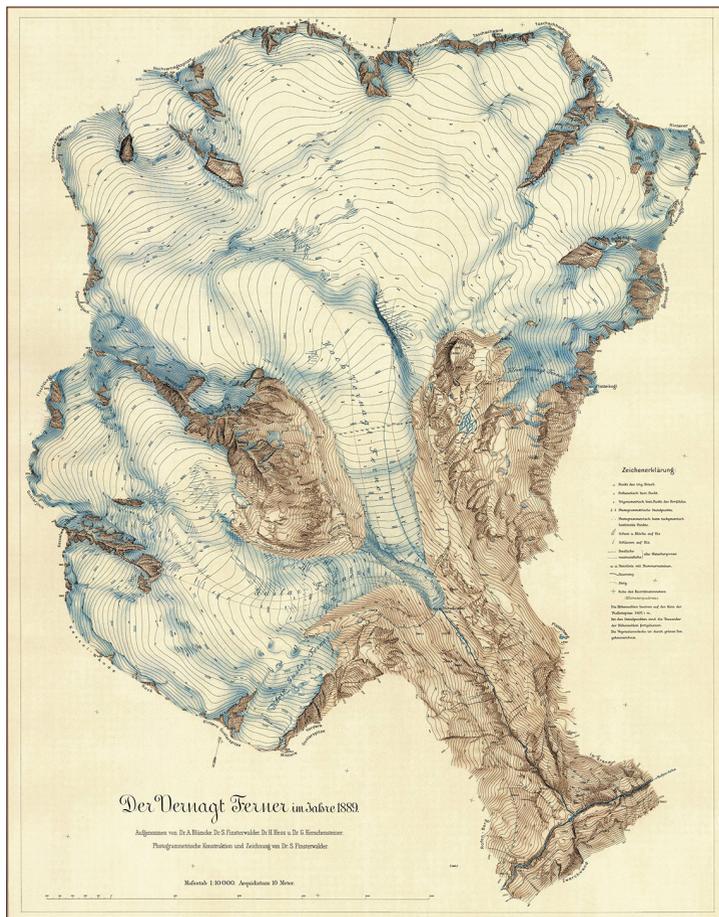


Abb. 4.7-4: Der Vernagt Ferner im Jahre 1889, aufgenommen von Dr. A. Blümcke, Dr. S. Finsterwalder, Dr. H. Hess und Dr. G. Kerschensteiner. Photogrammetrische Konstruktion und Zeichnung von Dr. S. Finsterwalder.

herrschaften wie in der Zeit 1889-1932 (MAYER & RUMMEL 2013). Seit 1889 schrumpfte die Fläche von 11,6 km² auf 7,92 km² (2010), inzwischen (2013) liegt sie bei 7,36 km². Der Eismassenverlust seit 1889 beläuft sich auf 385×10⁹ kg, das sind rund 64% der Ausgangsmasse. Die Zahlenwerte der Gletscherfläche des Vernagtferners belegen, dass dieser Gletscher immer noch zu den großen Alpengletschern zu rechnen ist, da mehr als 90% der über 5.000 Gletscher in den europäischen Alpen kleiner als 1 km² sind; hierzu zählen auch die fünf bayerischen Gletscher an der Zugspitze und im Berchtesgadener Gebiet. Die Grafik zeigt, dass es Phasen mit größeren Verlusten gab, so z.B. zwischen 1912 und 1954, daneben aber auch Zeiträume mit Volumengewinnen, vor allem zwischen 1954 und 1980. Diese Massenzuwächse (vgl. Abb. 4.7-8) sind möglicherweise eine Folge der sog. ‚Globalen Verdunklung‘, einer Abnahme der direkten Sonnenstrahlung durch einen erhöhten Aerosolgehalt der Atmosphäre, die auch zu

einem leichten Temperaturrückgang von 0,2 K zwischen 1950 und 1970 führte (BRAUN et al. 2013). In der Folge wurde die Ablation der Gletscher verringert, was nicht nur am Vernagtferner, sondern an der Mehrzahl der Alpengletscher in letzter Konsequenz zu einem Massengewinn führte.

Wie bereits erwähnt, konnte das absolute Eisvolumen des Gletschers durch die Kenntnis des Gletscherbettes berechnet werden. Nach der flächenmäßig nicht so hoch aufgelösten Erfassung in den 1960er Jahren durch MILLER (1972) erfolgte eine Neubestimmung mit Hilfe einer Radarvermessung im April 2007. Abb. 4.7-6 zeigt die Karte der Eisdicke für diesen Zeitpunkt (Mayer, persönliche Mitteilung). Man erkennt die deutliche Variation von wenigen Metern im Zungenbereich bis hin zu mehr als 80 m in den hochgelegenen Firngebieten.

Die Eisdickenverteilung von 2007 verdeutlicht im Vergleich z.B. mit der Gletscherkarte von 1889 (Abb.

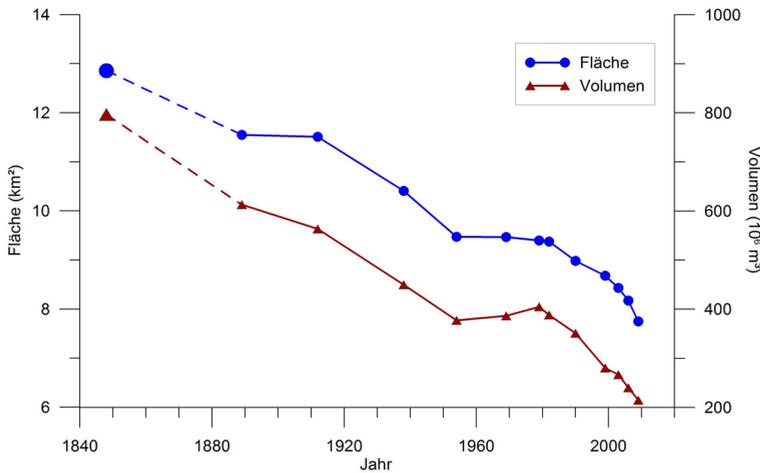


Abb. 4.7-5: Flächen- und Volumentwicklung des Vernagtferners seit 1848.

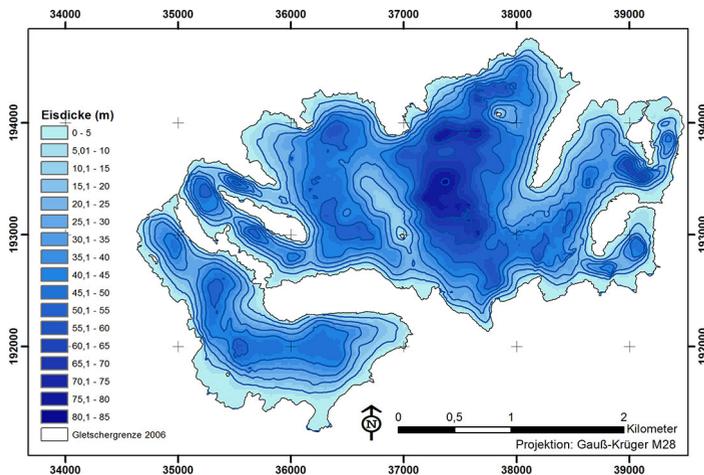


Abb. 4.7-6: Eisdicke des Vernagtferners auf der Basis der Radarvermessung vom April 2007 (in den Gletschergrenzen von 2006).

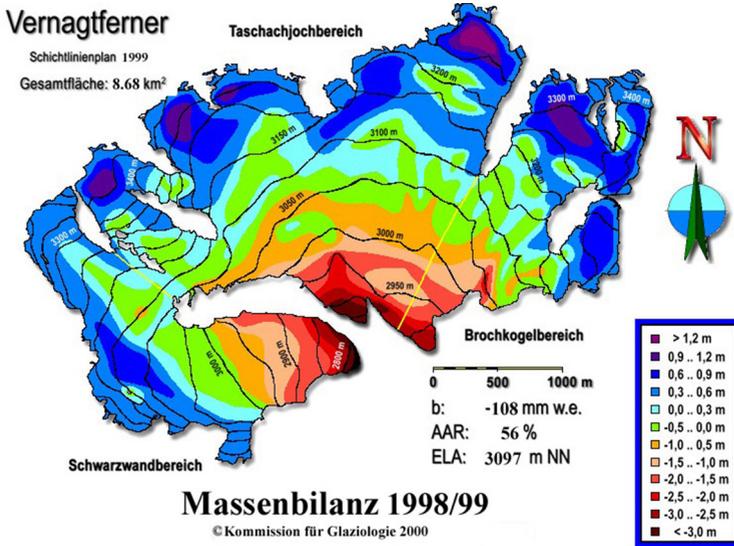


Abb. 4.7-7: Karten der spezifischen Massenbilanz des Vernagtferners für die Jahre 1998/99 (7a) und 2010/11(7b).

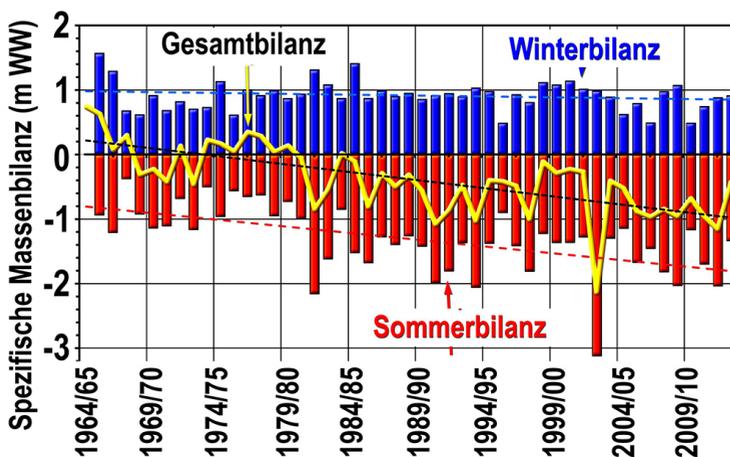
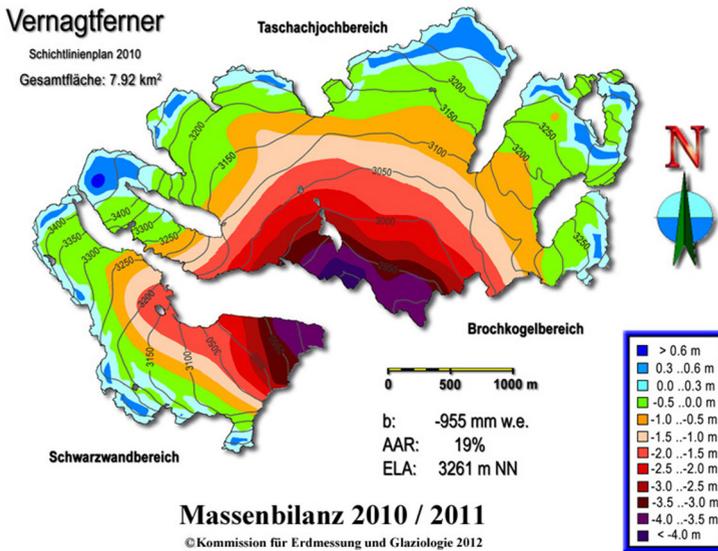


Abb. 4.7-8: Massenbilanzreihe des Vernagtferners für den Zeitraum 1964/65 bis 2012/13. Blaue Balken: Winterbilanz, rote Balken: Sommerbilanz, gelbe Linie: Jahresbilanz. Für alle drei Größen sind auch die linearen Trendlinien eingezeichnet.

4.7-4), welche Gebiete des Gletschers von Massenverlusten am stärksten betroffen waren. Diese Massenverluste führten 2006 zu einer Teilung des Gletschers in den westlichen Schwarzwandteil einerseits und den zentralen und östlichen Taschachjoch- und Brochkogelteil andererseits. Diese Trennung ist deutlich beim Vergleich von *Abb. 4.7-7a* und *-7b* zu erkennen, welche die Flächenverteilung der spezifischen Massenbilanz für die Jahre 1998/1999 (*Abb. 4.7-7a*) und 2010/2011 (*Abb. 4.7-7b*) zeigt, jeweils bestimmt mit der glaziologischen Methode. Die größten Flächenverluste treten im tiefer gelegenen Teil des Gletschers auf, da hier in allen Jahren die Massenverluste am größten sind. Während im Bilanzjahr 1998/99 nur im untersten Zungenbereich Ablationswerte von mehr als 3 m w.e. gemessen wurden, betragen sie in Haushaltsjahr 2010/11 mehr als 4 m w.e.. Ebenso liegen die Rücklagen im Akkumulationsgebiet 1998/99 bei mehr als 1 m w.e., 2010/11 nur noch bei 0,6 m w.e.. Daraus folgte eine Gesamtmassenbilanz von -0,108 m w.e. für 1998/99, aber von -0,955 m w.e. für 2010/11 (vgl. *Abb. 4.7-8*). Das Verhältnis von Akkumulationsfläche zu Gesamtgebiet (AAR) lag 1998/99 bei 56%, 2010/11 bei 19%, 2013/14 wiederum bei 57%. Dieser An-

stieg ist auf die Anpassung der Gletscherfläche – 8,68 km² im Jahr 1999, 7,36 km² im Jahr 2014 – an die veränderten Klimabedingungen zurückzuführen, da Gletscher immer versuchen, im Gleichgewicht mit dem Klima zu existieren. Damit verkleinert sich ihre Fläche als Folge von langjährigen Massenverlusten, die Linie mit ausgeglichener Massenbilanz (ELA, equilibrium line altitude) verlagert sich in größere Meereshöhen und das Verhältnis von Akkumulations- zu Gesamtfläche vergrößert sich wieder.

Die Karten der spezifischen Massenbilanz in *Abb. 4.7-7* zeigen das Ergebnis der Messungen bzw. -verluste am Ende des Haushaltsjahres. Integriert man über alle Werte, so erhält man die mittlere Bilanz für die Gletscherfläche. In *Abb. 4.7-8* sind diese Werte für die gesamte Messreihe des Vernagtferners seit 1964/65 als gelbe Linie angegeben. Die blauen Balken zeigen die winterliche Akkumulation, während die sommerliche Ablation als Differenz zwischen Gesamtbilanz und Akkumulation berechnet wird.

Abb. 4.7-8 kann man entnehmen, dass die winterlichen Akkumulationswerte nur eine geringe Variation aufweisen mit einem sehr schwach abnehmenden Trend, während die Variation im Sommer von Ablationswerten bei 0,4 m w.e. (1967) bis zu mehr als 3 m w.e. (2003) reicht. Die positivste Gesamtbilanz wurde mit +0,75 m w.e. im Jahr 1964/65, also im ersten Jahr der Messungen ermittelt, während 2002/2003 mit -2,1 m w.e. die höchste negative Bilanz der ganzen Serie aufweist. Das bedeutet, dass im Mittel über die ganze Gletscherfläche mehr als 2 m Eis ab-

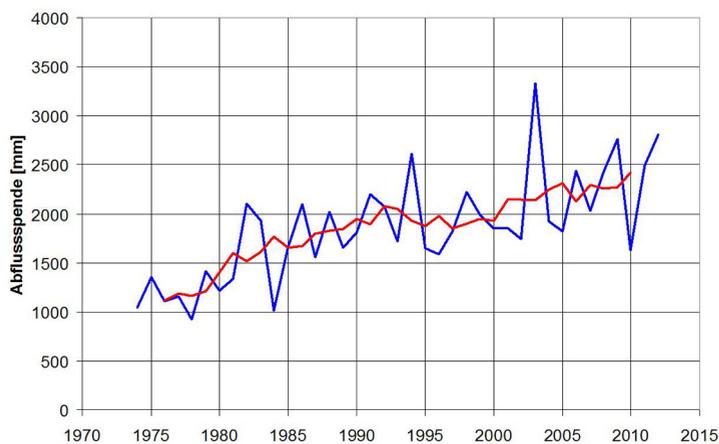


Abb. 4.7-9: Summen der Abflussspenden für die Monate Mai – Oktober (blau) und fünfjähriges gleitendes Mittel (rot) an der Pegelstation Vernagtbach, Ötztal, Österreich (2.640 m NN).

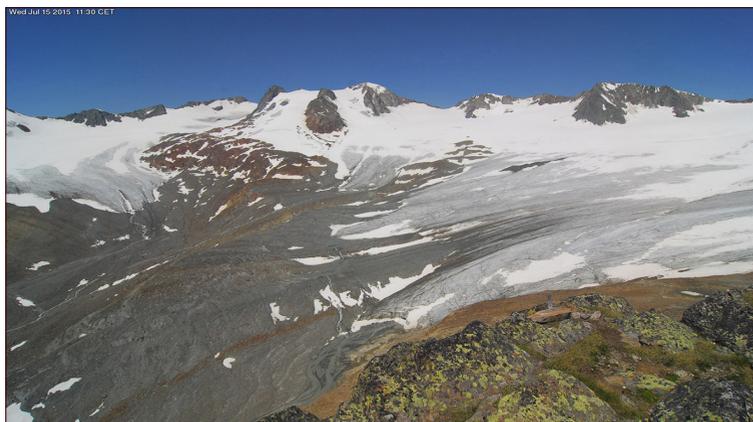


Abb. 4.7-10: Digitale Aufnahme des Vernagtferners vom Standort Schwarzkögele aus (15. Juli 2015)

geschmolzen sind; in den extremsten Lagen betrug der Verlust mehr als 5 m! Diese Zeitreihe belegt, dass die Massenbilanz des Vernagtferners nicht von den winterlichen Schneefällen, also der Akkumulation gesteuert wird, sondern von den Schmelzverlusten im Sommer dominiert wird. Mit zunehmendem Verlust der Schneebedeckung in den höheren Lagen des Gletschers steigt das Absorptionsvermögen der (dunkleren) Eisoberfläche für Sonnenstrahlung und damit die Abschmelzung, da bei alpinen Gletschern der Strahlungsumsatz etwa 70% der Schmelzwasserproduktion bewirkt. Dagegen tragen Energiegewinne über die turbulenten Flüsse, vor allem durch positive Lufttemperaturen nur etwa zu 30% zur Gesamtschmelze bei. Allerdings regelt die Lufttemperatur auch die Art des Niederschlags, so dass mit steigenden Temperaturwerten der Niederschlag immer häufiger als Regen fällt und damit nicht mehr seine Schutzfunktion durch die höhere Albedo des Neuschnees ausübt (vgl. PRASCH Kap. 3.2 in diesem Band).

Unter www.glaziologie.de sind neben allen Tabellen der Massenbilanzen seit 1964/65 auch Angaben zur Höhererstreckung des Vernagtferners für ausgewählte Jahre zu finden. Der niedrigste (höchste) Punkt der Gletscherfläche lag 1979 bei 2.747 (3.633) m NN, im Jahr 2006 erstreckte sich der Gletscher von 2.790 m NN bis zu 3.598 m NN. Diese Werte verdeutlichen, dass inzwischen auch die höchst gelegenen Teile des Gletschers von den Flächen- und Massenverlusten betroffen sind.

Die Eismassenverluste führten zu dem Anstieg der Schmelzwasserproduktion, wie ihn die Abflussregistrierungen der Pegelstation Vernagtbach zeigen. In *Abb. 4.7-9* sind die Summen der Abflussspenden für die Monate Mai bis Oktober für den Zeitraum 1974 bis 2012 dargestellt. Diese unterscheiden sich nur wenig von den Werten für das ganze Jahr, da rund 98% des Gesamtabflusses des Vernagtferners in diesem Zeitraum registriert wird (MOSER et al. 1986). Dieser Jahresgang des Abflusses ist typisch für ein stark vergletschertes Einzugsgebiet, es übt deshalb einen ausgleichenden Effekt auf die Wasserführung alpiner Flüsse aus (vgl. PRASCH Kap. 3.2 in diesem Band).

Für den Vernagtferner haben sich die Abflüsse seit Beginn der Registrierungen 1974 bis 2011 nahezu verdoppelt. Der niedrigste Wert trat mit 930 mm im Sommer 1978 auf, im Extremjahr 2003 strömten 3.340 mm durch das Gerinne der Pegelstation und damit mehr als dreieinhalb Mal so viel Wasser wie 1978. Aber nicht nur die Gesamtmengen, auch die jahreszeitliche Verteilung des Abflusses hat sich verändert. So stieg der Anteil des Juniwertes am Gesamtabfluss Mai-Oktober von 8% im Jahr 1974 auf 18% im Jahr 2013, was den stärksten Anstieg für alle Monate bedeutet. Dagegen gehen die Anteile am jährlichen Gesamtabfluss für die

Monate Juli, August und vor allem September zum Teil erheblich zurück.

Ein weiteres Charakteristikum des Gletscherabflusses ist seine große Amplitude im Tagesgang. Auch diese hat sich über die vier Dekaden der Registrierungen am Vernagtferner deutlich erhöht, was in erster Linie durch den Anstieg der Maximalwerte bedingt ist. Die höchsten Werte im Tagesgang treten am frühen Nachmittag auf und lagen z.B. 1978 bei 2 bis 4 m³/s. Dagegen wies der 6. Juli 2003 ein Maximum von 15,3 m³/s (Fünf-Minuten-Mittel) und damit mehr als fünfmal so hohe Werte wie 1978 auf! Die Spitzenwerte sind dabei mitunter auf das Zusammentreffen von Starkniederschlägen und hoher Schmelzwasserproduktion zurückzuführen, was mehrmals zur Folge hatte, dass das Messgerinne erweitert werden musste um die Wassermassen zu fassen.

Der Anstieg der Amplitude ist eine Folge der schwindenden Firn- und Schneeaufgabe auf dem Gletscher. Solange die Eisfläche von einer mehrere Meter dicken Schneeschicht bedeckt ist, muss das Schmelzwasser erst durch diese Auflage sickern, bevor es – zeitverzögert – auf dem wasserundurchlässigen Eis abfließen kann. Mit steigendem Verlust dieser Pufferschicht gelangt das Schmelzwasser aber immer schneller zum Abfluss und erhöht damit die Spitzenwerte. Der Abfluss wird mit einem linearen Speichermodell auf der Basis der im Stundenschritt auf einem 100 m Raster vorliegenden Schmelzwassermengen berechnet. Dieses berücksichtigt die charakteristischen Verweilzeiten des Wassers in den verschiedenen mächtigen Firn- und Schneeaufgaben und die Laufzeiten von der Eisoberfläche bis zur Pegelstation Vernagtbach. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Stundenwerten des registrierten Abflusses.

Mit abnehmender Gletscherfläche werden aber die Schmelzwassermengen ebenfalls abnehmen, der Beitrag des Eisschmelzwassers zum Abfluss an den weiter flussabwärts liegenden Pegeln wird geringer werden. Ob der Zeitpunkt für den höchsten Abfluss (»peak-water«, vgl. MÖLG Kap. 4.9 in diesem Band) am Vernagtferner bereits erreicht oder schon überschritten ist, werden die Registrierungen der nächsten Jahre zeigen.

Erste Ergebnisse der gravimetrischen Methode, die auf Messungen entlang eines Profils über die Schwarzwandzunge basieren, zeigen, dass sie sehr gut mit den aus der Geometrie abgeleiteten Schwereeffekten übereinstimmen. Deshalb sollen diese Untersuchungen intensiviert und weitergeführt werden.

Ausblick

Die hier geschilderten Forschungsergebnisse aus dem Vernagtgebiet zeigen die Entwicklung der Eismassen

in dieser Hochgebirgsregion seit den ersten Vorstößen des Gletschers in der kleinen Eiszeit. Während in den ersten 250 Jahren fast periodisch Massengewinne auftraten, die zum Teil zu massiven Flächen- und Volumenzunahmen bis hin zu Surge-Ereignissen führten, dominieren seit der Mitte des 19. Jh. die Verluste. Die zunehmende Intensivierung der wissenschaftlichen Arbeiten an diesem »Laborgletscher« zunächst durch Mitglieder – hier sind vor allem Sebastian und Richard Finsterwalder zu nennen –, später durch Mitarbeiter der Kommissionen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften führte zu immer detaillierteren Erkenntnissen über die Zusammenhänge zwischen Gletscher und Klima, welche die Basis für eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung bilden. Damit stellt der Vernagtferner als einer der wahrscheinlich am besten untersuchten Gletscher der Erde ein eindringliches Beispiel für die Auswirkungen des globalen Klimas auf lokale (z.B. Gletschermassenbilanz) und regionale Prozesse (z.B. Abfluss aus Gebirgsregionen) dar. Mit einer Photographie des Gletschers vom Sommer 2015 (*Abb. 4.7-10*) sollen die hier dargestellten Methoden und Ergebnisse abgerundet werden.

Literatur:

- ANICH, P. & B. HUEBER (1774): Atlas Tyrolensis. Faksimiledruck (Kinzl, H. Hrsg.), Wagner (1974), Innsbruck, 23 Blätter.
- BRAUN, L. N., T. ELLENRIEDER & M. WEBER (2013): Datenanalyse und Modellierungen konzeptioneller Art zur empirischen Bestimmung der Wasserbilanz im Einzugsgebiet des Vernagtferners für die Jahre 1895 bis 2011. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 143-168.
- BRAUN, L. N., O. REINWARTH & M. WEBER (2013): Der Vernagtferner als Objekt der Gletscherforschung. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 85-104.
- BRUNNER, K. (2013): Karten und Ansichten des Vernagtferners seit 1600. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 235-257.
- ESCHER-VETTER, H. (2000): Modelling meltwater production with a distributed energy balance method and runoff using a linear reservoir approach: results from Vernagtferner, Oetztal Alps, for the ablation seasons 1992 to 1995. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 36, 119-150.
- ESCHER-VETTER, H., M. KUHN & M. WEBER (2009): Four decades of winter mass balance of Vernagtferner and Hintereisferner, Austria: methodology and results. *Annals of Glaciology* 59 (59), 87-95.
- ESCHER-VETTER, H., H. OERTER, O. REINWARTH, L. N. BRAUN & M. WEBER (2012): Hydrological and meteorological records from the Vernagtferner Basin – Vernagtbach station, for the years 1970 to 2001. doi: 10.1594/PANGAEA.775113.
- ESCHER-VETTER, H., L. N. BRAUN & M. SIEBERS (2014): Hydrological and meteorological records from the Vernagtferner Basin - Vernagtbach station, for the years 2002 to 2012. doi:10.1594/PANGAEA.829530.
- ESCHER-VETTER, H. & H. OERTER (2013): Das Energiebilanz- und Abflussmodell PEV – frühe Modellansätze, Erweiterungen und ausgewählte Ergebnisse. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 129-142.
- ESCHER-VETTER, H. & O. REINWARTH (2013): Meteorologische und hydrologische Registrierungen an der Pegelstation Vernagtbach – Charakteristika und ausgewählte Trends. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 117-128.
- ESCHER-VETTER, H. & M. SIEBERS (2013): Vom Registrierstreifen zur Satellitenübertragung – zur Entwicklung der Mess- und Aufzeichnungstechnik an der Pegelstation Vernagtbach. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 105-116.
- FINSTERWALDER, S. (1897): Der Vernagtferner – seine Geschichte und seine Vermessung in den Jahren 1888 und 1889. *Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins*, Bd. 1, H. 1, Verlag des DuÖAV, Graz, 112 S., 2 Karten.
- GERLACH, CH. (2013): Gravimetrie und deren Potential für eine unabhängige Bestimmung der Massenbilanz des Vernagtferners. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 281 – 293.
- MAYER, CH., H. ESCHER-VETTER & M. WEBER (2013): 46 Jahre glaziologische Massenbilanz des Vernagtferners. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 219-234.
- MAYER, CH. & R. RUMMEL (2013): Quo vadis, Vernagtferner? Perspektiven für die zukünftige Forschung. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 351-358.
- MAYR, E. & W. HAGG (2013): Abflussmodellierung am Vernagtferner – warum auch einfache Modelle von detaillierten Beobachtungsdaten profitieren. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 169-183.
- MILLER, H. (1972): Ergebnisse von Messungen mit der Methode der Refraktionsseismik auf dem Vernagt- und Guslarferner. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 8 (1-1): 27-41.
- MOSER, H., H. ESCHER-VETTER, H. OERTER, O. REINWARTH & D. ZUNKE (1986): Abfluss in und von Gletschern. *Ges. f. Strahlen- und Umweltforschung, München (GSF). Institut für Radiohydrometrie, GSF-Bericht 41/86, Teil 1* (408 S.), hdl:10013/epic: 38511.
- NICOLUSSI, K. (2013): Die historischen Vorstöße und Hochstände des Vernagtferners 1600 – 1850 AD. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 9-23.
- WALCHER, J. (1773): *Nachrichten von den Eisbergen in Tyrol. Kurzböcken*, Wien, 96 S., 5 Bildtafeln.
- WEBER, M. (2008): Mikrometeorologische Prozesse bei der Ablation eines Alpengletschers. *Bayerische Akademie der Wissenschaften, Abhandlungen der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse, Neue Folge*, H. 177; 258 S. Und 40 Tafeln.
- WEBER, M. (2013): Dokumentation der Veränderungen des Vernagtferners anhand von Fotografien. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 45/46, 49-84.
- WEBER, M. & H. ESCHER-VETTER (2014): Meteorological records from the Vernagtferner basin - Gletschermitte Station, for the years 1968 to 1987. doi:10.1594/PANGAEA.832562.

Kontakt:

Dr. Heidi Escher-Vetter
Bayerische Akademie der Wissenschaften
heidi@escher-vetter.de

Escher-Vetter, H. (2015): 400 Jahre Feldforschung am Vernagtferner (Ötztal, Österreich). In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 146-154. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi: 10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.22