

125 Jahre Klima- und Gletscherforschung auf dem Sonnblick

Von Reinhard BÖHM †, Ingeborg AUER & Wolfgang SCHÖNER

Zusammenfassung

Das hochalpine Sonnblick-Observatorium auf einem exponierten Gipfel des Alpenhauptkamms ist das einzige meteorologische Gipfelobservatorium der Erde, das in mehr als 3000 m Höhe ununterbrochen seit nun schon 125 Jahren aktiv ist. Der Artikel nimmt dieses Jubiläum zum Anlass, einige Highlights aus zwei der vier dort im Vordergrund stehenden Forschungsbereichen zu skizzieren. Die gezeigten und diskutierten Beispiele behandeln Langzeit-Klimaaspekte und deren damit eng verbundenen typischen Klimafolgen auf die hochalpine Gletscherwelt der Region.

Abstract

The high elevation Sonnblick observatory, situated at an exposed peak of the main crest of the European Alps, is the only environmental and climate summit observatory of the world above 3000 m asl. which has continuously been active since more than 125 years. We take the opportunity of this unique anniversary to outline some of the highlights within two of the four principle Sonnblick research topics. The shown examples deal with the long-term monitoring aspects of climate variability and change and with one of their impacts, those on the glaciers of the region.

Schlüsselworte

Wissenschaftsgeschichte, Klimavariabilität, Langzeitmonitoring, Klimafolgen, Gletscher, Massenbilanzen

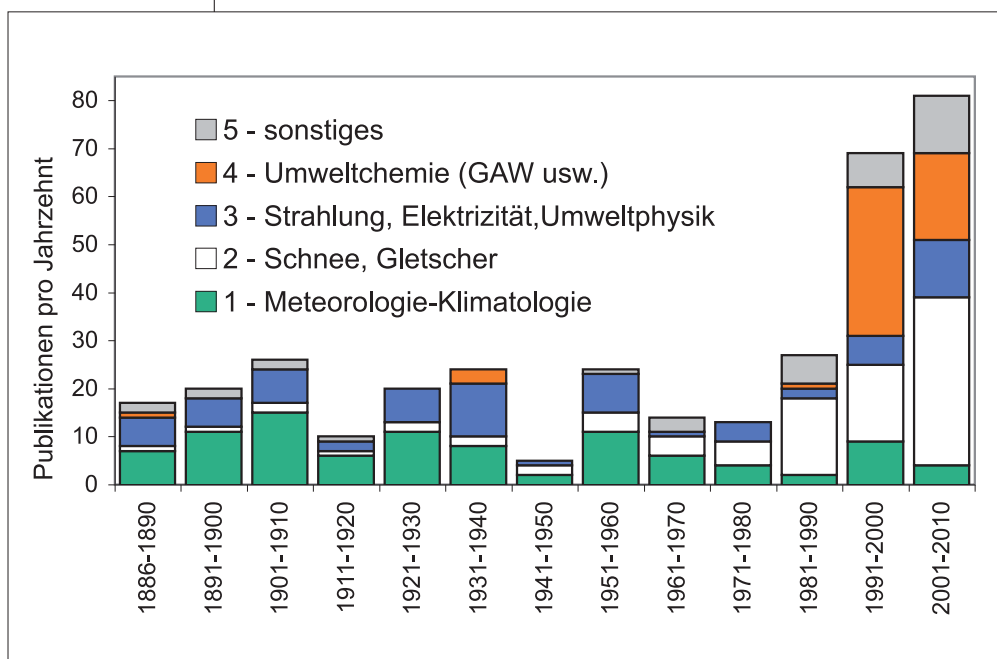
Abb. 1:
Das Observatorium auf dem Tauerngipfel des Sonnblicks, gesehen vom Wurtenkees im Mölltal im Mai 2007.
Foto: G. Weyss



Einleitung

Seit September 1886 wird auf dem Sonnblick in den Hohen Tauern ein Observatorium betrieben, das in seiner Art weltweit einzigartig ist. Es bedeutet gerade heute, in Zeiten des globalen Wandels, einen unschätzbaren Vorteil, dass die vom renommierten Meteorologen Julius Hann erdachte und vom Praktiker und Goldbergwerksbetreiber Ignaz Rojacher realisierte Wetterwarte bis heute besteht. Trotz einer Reihe von Krisen in wirtschaftlichen Notzeiten – und obwohl mit dem Sonnblick vergleichbare Observatorien auch in wirtschaftlich potenteren Ländern wie Frankreich (Pic du Midi) oder Großbritannien (Ben Nevis) aus der Gründerzeit der Bergobservatorien im 19. Jahrhundert nicht so lange überdauert haben – steht auf dem Sonnblick seit den 1980er Jahren nun ein wesentlich erweitertes Umweltobservatorium, das auch modernen Ansprüchen der Umweltwissenschaften Genüge leistet. Es hat sich nun neben der auf dem Sonnblick immer schon betriebenen meteorologischen und glaziologischen Forschung auch die physikalisch-chemische Umweltforschung hier oben etabliert. Oft wird dabei aus einem Forschungsprojekt ein nachhaltiges Umweltmonitoring, und Nachhaltigkeit ist ja eine notwendige Voraussetzung für viele Fragen der Umweltwissenschaften. Damit bei der gegebenen starken Kurzfristvariabilität des Klimas ein signifikanter Trend erkennbar wird, sind ausreichend lange Zeitreihen die Voraussetzung, wie wir in der Folge sehen werden. Es können hier nur stichprobenartig einige Beispiele aus der Sonnblickforschung gezeigt werden. Außerdem werden wir uns auf die beiden großen Themen Klima- und Gletschervariabilität beschränken. Wer sich in die hier angerissenen und skizzierten Themen und in die Geschichte des Sonnblick-

Abb. 2:
Wissenschaftliche
Publikationen mit
Sonnblick-Bezug
in den Jahrzehnten
seit der Gründung
des Observatoriums.



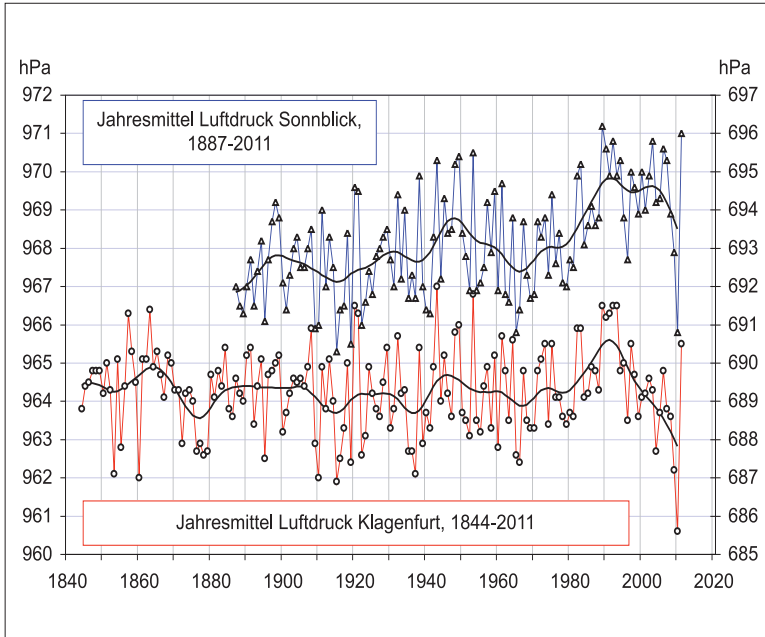


Abb. 3: Zeitreihen der Jahresmittel des Luftdrucks auf dem Sonnblick (3106 m) und in Klagenfurt (450 m). Gezeigt sind die einzelnen Jahreswerte sowie die geglätteten Verläufe (Gauß-Tiefpassfilter, Filterweite 20 Jahre). Datenquelle: HISTALP Datenbank der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) – <http://www.zamg.ac.at/histalp>

Observatoriums weiter vertiefen will, dem sei das neue Sonnblickbuch (Böhm et al., 2011) empfohlen.

Wie es um die wissenschaftliche „Ernte“ auf dem Sonnblick generell bestellt ist, das können wir hier nur in der komprimierten Form der Abb. 2 wiedergeben. Gezeigt wird die Zahl der wissenschaftlichen Publikationen pro Jahrzehnt, zugeordnet zu den vier Hauptthemen der Sonnblickforschung. Mehr als 300 Artikel waren es, die wir in der wissenschaftlichen Fachliteratur gefunden haben. Neben dieser an sich erfreulichen Publikationsanzahl ist es vor allem die zeitliche Entwicklung mit einem Aufblühen der Sonnblick-Forschung genau zu dem Zeitpunkt, als der großzügige Neubau samt der damit verbundenen verbesserten Infrastruktur aus der historischen hölzernen Wetterwarte das moderne Umweltobservatorium gemacht hat, von dem zu Recht auch in Zukunft interessante und relevante Beiträge zur Forschung erwartet werden können.

Klimawandel

Die Sonnblickzeitreihen, die nun schon 125 Jahre „alt“ geworden sind, geben uns eine einmalige Gelegenheit, das Klima und seine Änderungen in der Hochgebirgsatmosphäre in hoher zeitlicher Auflösung zu studieren. Neben der Länge der Klimareihen kommt noch hinzu, dass die Beobachtungen nahezu lückenlos sind und nur wenige einschneidende Veränderungen an der Station selbst passiert sind. Inhomogenitäten, die durch Instrumentenwechsel oder deren Verlegung, Automatisierung oder den Neubau der Gipfelgebäude am Sonnblick entstanden sind, wurden mit Hilfe statistischer Methoden entfernt. In Venema et al., 2012, wird ein Überblick über die gängigsten Homogenisierungsmethoden gegeben.

Die Sonnblick-Zeitreihen repräsentieren das von Oberflächeneffekten wenig gestörte atmosphärische Klimasignal der mittleren Troposphäre – beinahe ein Drittel der gesamten Masse der Atmosphäre liegt in 3100 m Seehöhe bereits unterhalb des Messpunktes. Der Vergleich der Zeitreihen des Luftdruckes vom Sonnblick (blau) und von Klagenfurt (rot) in Abb. 3 bestätigt diese Tatsache. 964.3 hPa beträgt das langjährige Mittel des Luftdrucks über die 125 Sonnblickjahre 1887– 2011 in Klagenfurt (Seehöhe 450 m), während es auf dem Sonnblick nur noch 693.1 hPa sind. Bei beiden Zeitreihen erkennt man jedoch auch langfristige Trends und darüber gelagerte dekadische Variationen. Am auffälligsten ist der langfristig steigende Trend zwischen den 1910er Jahren und dem Hauptmaximum der 1990er Jahre.

Auf diesen Luftdrucktrend, der sich allerdings in jüngster Zeit umgekehrt hat, werden wir noch zu sprechen kommen. Vorerst wollen wir darauf hinweisen, dass der Anstieg des Luftdrucks an der Hochgebirgsstation Sonnblick signifikant stärker war als in Klagenfurt. Zwischen dem dekadischen Minimum um 1915 und dem Hauptmaximum um 1992 beträgt die Zunahme in Klagenfurt 1.9 hPa, auf dem Sonnblick 2.7 hPa. Der Grund dafür ist, dass sich die zwischen den beiden Messpunkten gelegene Luftsäule durch ihre Erwärmung ausgedehnt und die Luftmassen darüber angehoben hat. Somit kam immer mehr Luft oberhalb des Sonnblicks zu liegen, während dieser Effekt an der tief gelegenen Station Klagenfurt nicht zum Tragen kam. Man kann die unterschiedlichen Luftdrucktrends an Berg- und an Talstationen somit dazu benutzen, die Erwärmung der dazwischen befindlichen Luftsäule zu berechnen. Böhm und Auer, 1998, haben das für die vier langen hochalpinen Klimazeitreihen (Sonnblick, Villacher Alpe, Zugspitze, Säntis) und acht aus den Tälern und Becken des Großraums Alpen durchgeführt. Das Ergebnis war eine genaue Übereinstimmung der aus den Luftdruckunterschieden berechneten und den direkt gemessenen Temperaturreihen.

Dieses Ergebnis überrascht Meteorologen zunächst nicht, da ihnen das Konzept der „relativen Topographien“ der Druckfelder als Mittel zur Berechnung der Lufttemperatur gut bekannt ist. Warum das in der aktuellen Klimadebatte wichtig ist, ist die damit gegebene Möglichkeit, ohne jede Thermometermessung (und deren zahlreiche mögliche Verfälschungen durch z. B. urbane Effekte) den Erwärmungstrend des 20. Jahrhunderts auch quantitativ und genau zu bestätigen. Das oft gehörte Argument, die Erwärmung sei lediglich das Resultat der zunehmenden Urbanisierung der Erde, ist nicht stichhaltig. Offenbar haben wir mit unseren Bemühungen, die Zeitreihen zu „homogenisieren“, das heißt die früheren Messungen mit dem aktuellen Zustand der Messstationen vergleichbar zu machen, gute Ergebnisse erzielt (Auer et al., 2001, Auer et al., 2007, Böhm et al., 2010). Die „Backgroundlage“ in großer Höhe der hochalpinen Stationen wie das Sonnblick-Observatorium ist also nicht nur für die Umweltchemie ein enormer Vorteil, sondern auch für Fragen des Klimawandels.

Für Fragen über die Luftströmungen und ihres Einflusses auf Wetter und Klima – z. B. auf den Niederschlag – sind aus dem gerade gezeigten Grund die Zeitreihen von Hochgebirgsstationen weniger brauchbar. Hier müssen Tieflandstationen wie die Station Klagenfurt herangezogen werden. Abb. 3 macht deutlich, wie eng die Niederschlagssummen

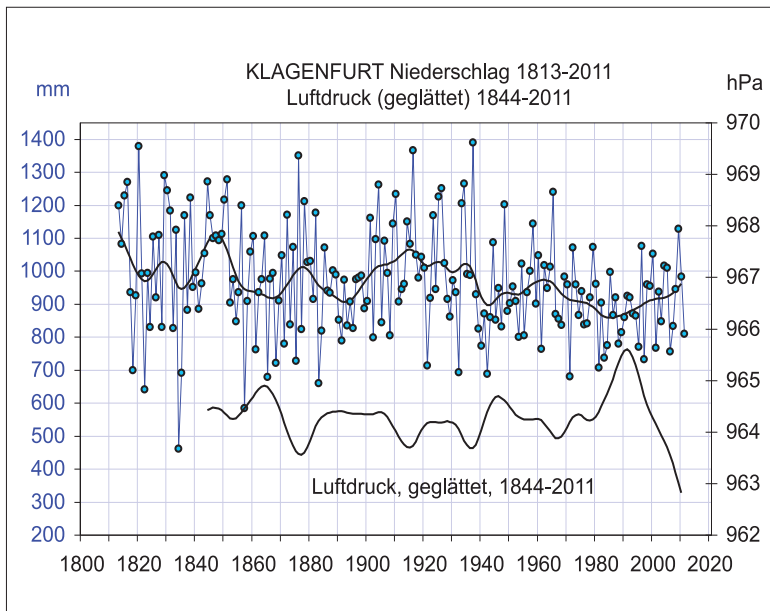


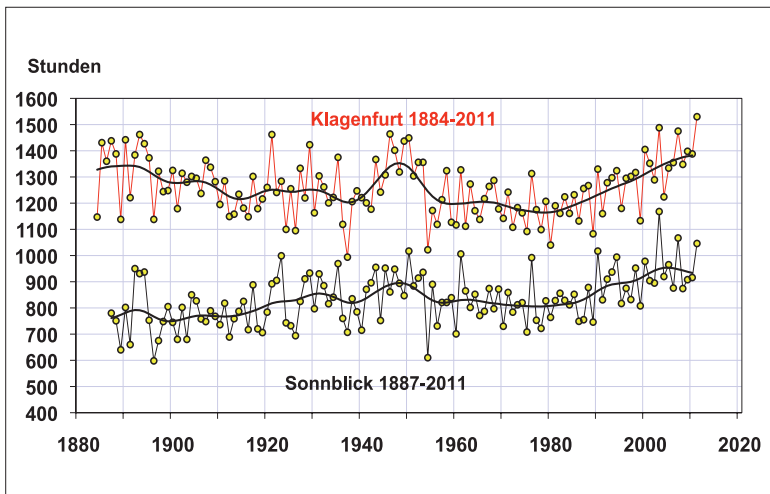
Abb. 4:
Zeitreihen der
Jahressummen des
Niederschlages in
Klagenfurt und des
geglätteten Verlaufs
des Luftdrucks.
Alles weitere wie in
Abb. 2.

mit dem Luftdruck verknüpft sind. Die 20-jährig geglätteten Verläufe des Niederschlages und des Luftdrucks sind „antikorreliert“ – höherer Niederschlag entspricht tieferem Luftdruck und vice versa. Aber auch der in Kärnten im 20. Jahrhundert über Jahrzehnte hinweg zu beobachtende ständige Trend zu mehr Trockenheit entsprach einem analogen Trend zu höherem Luftdruck, Ausdruck einer stetigen leichten Nordwärtsverlagerung des Subtropenhochs. Die bereits erwähnte radikale Trendwende des Luftdrucks seit den 1990er Jahren verursachte allerdings eine ebenfalls merkbare Wende zu „wieder mehr Niederschlag“ – nicht nur in Klagenfurt, sondern in ganz Kärnten und Südost-Österreich. Ob es sich dabei um ein dekadisches feuchteres „Zwischentief“ handelt oder um etwas Längerfristiges, wird die Zukunft zeigen. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung dazu sind in diesem schwierig zu behandelnden Übergangsgebiet zwischen mediterranen und nördlichen Einflüssen noch widersprüchlich.

Kommen wir nun nach dem Niederschlag, der trotz seiner Wichtigkeit für die Landwirtschaft eher zur Kategorie „Schlechtwetter“ gezählt wird, zu dem, was wir landläufig unter „Schönwetter“ verstehen. Die Zahl der Sonnenscheinstunden ist unter den gemessenen Klimaelementen dasjenige, das als Maßzahl dafür zur Verfügung steht. Gerade in Kärnten besteht in dieser Hinsicht eine hohe Dichte an langen Zeitreihen, die bis in die 1880er Jahre zurückreichen, die Zeit, in der sich der „Campbell-Stokes-Sonnenscheinautograph“ als standardisiertes Messgerät in den Klimamessnetzen zu etablieren begann. Zwei der sechs österreichischen Sonnenscheinreihen, die bis ins 19. Jahrhundert zurückreichen, stammen aus Kärnten (Klagenfurt und die Kombireihe Obir-Villacher Alpe) und der Sonnblick selbst liegt nur einige Meter nördlich der Kärntner Landesgrenze.

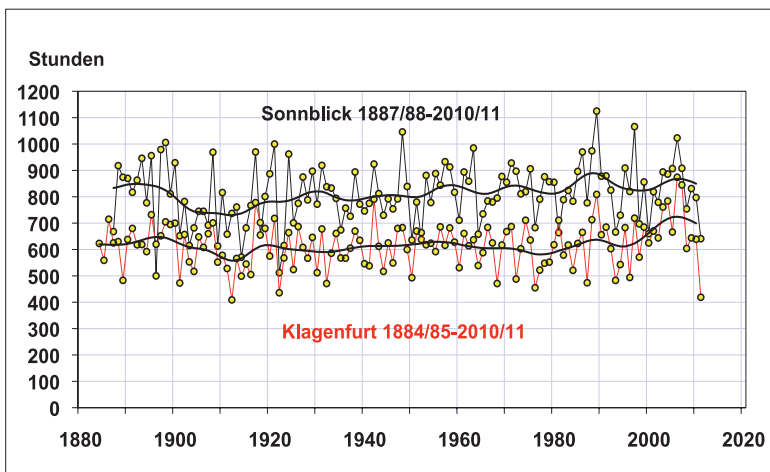
528 *Böhm et al.: 125 Jahre Klima- und Gletscherforschung auf dem Sonnblick*

Abb. 5:
Zeitreihen der Zahl
der Sonnenschein-
stunden im Frühling
und Sommer (März
bis August) in
Klagenfurt und auf
dem Sonnblick.
Alles weitere wie in
Abb. 2.



Das Zeitreihenpaar Sonnblick–Klagenfurt in den beiden Abbildungen 5 und 6 eignet sich gut, gerade die in Kärnten so ausgeprägten jahreszeitlichen Unterschiede der Hochlagen zu den Tal- und Beckenlagen zu visualisieren. Im Mittel über die 125 Sonnblickjahre (1887–2011) beträgt die Zahl der Sonnenscheinstunden von März bis August in Klagenfurt 1258 Stunden gegenüber lediglich 833 Stunden auf der Alpenhauptkammstation Sonnblick, die gerade im Sommer viel konvektive Bewölkung aufweist und auch noch stärker von Nordstaulagen beeinflusst ist, gegen die Klagenfurt gut abgeschirmt ist. Im Herbst und Winter hingegen (September bis Februar) dreht sich das Verhältnis um. 812 Stunden scheint im Durchschnitt die Sonne am „Sonn“blick, und das trotz der viel kürzeren Tageslänge. Dem stehen nur 616 Stunden im hochnebelbedeckten Kaltluftsee des Klagenfurter Beckens im Herbst und Winter gegenüber. Vor allem im wärmeren Jahresabschnitt erkennt

Abb. 6:
Zeitreihen der Zahl
der Sonnenschein-
stunden im Herbst
und Winter (Sep-
tember bis Februar)
in Klagenfurt und
auf dem Sonnblick.
Alles weitere wie in
Abb. 2.



man deutliche Trends mit sonnenscheinreichen Zeitabschnitten in Klagenfurt im späten 19. Jahrhundert, um 1950 und in den aktuellen Jahrzehnten. Auf dem Sonnblick und auch auf allen anderen Hochgebirgsstationen der Alpen fehlt der sonnige frühe Abschnitt, während das Maximum um die Jahrhundertmitte, der Rückgang in den 1960er und 1970er Jahren und der scharfe Anstieg des Schönwetters in den aktuellen drei Jahrzehnten hier ebenfalls vorhanden ist. Weniger ausgeprägt sind die Herbst/Winter-Trends, obwohl gerade im Tiefland der Anstieg der letzten Jahrzehnte ebenfalls zu sehen ist.

Dass es bei der Sonnenstrahlung nicht nur auf die vertikalen Unterschiede ankommt, zeigt die Zeitreihe der Jahressummen von Sonnblick und Villacher Alpe in Abb. 7. 1979 Stunden Sonnenschein gibt es im 125-jährigen Mittel auf der weiter südlich gelegenen Villacher Alpe gegenüber nur 1649 auf dem Alpenhauptkammgipfel Sonnblick. Eindrucksvoll sind die absoluten Zahlen der Zunahme der Sonnenscheindauer im Gebirge. Vom Hauptminimum um 1910 mit nur 1496 Stunden hat auf dem Sonnblick die Sonnenscheindauer bis zum aktuellen Maximum in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts um 322 Stunden auf nun 1818 Stunden zugenommen, auf der Villacher Alpe sind die entsprechenden Zahlen 1823 und 2161 Stunden mit einer Zunahme von 338 Stunden. Allein in den drei Jahrzehnten seit 1980 war der Gewinn an Sonne im Hochgebirge und auch im Tiefland Kärntens (und auch Österreichs) rund 200 Stunden. Dieser Trend zu mehr „Schönwetter“ sollte sich als Werbebotschaft in der wichtigen Wirtschaftssparte Fremdenverkehr durchaus stärker verwenden lassen – 200 Stunden mehr Schönwetter ist ein wohl schlagendes Argument.

Dass die Sonnenscheinreihen nicht nur für derartige praktische Anwendungen interessant sind, sondern generell viel mit den eigentlichen Antrieben der globalen und der regionalen Klimavariabilität zu tun haben, ist klar. Die Sonne ist der Energielieferant für das Erdklima. Etwas mehr als 1360 Watt/m² kommen an der Außenseite der Erdatmosphäre an kurzwelliger Strahlung an. Langfristig ist diese „Solarkonstante“ allerdings, wie der Name schon sagt, sehr stabil. Sie schwankt nur um wenige

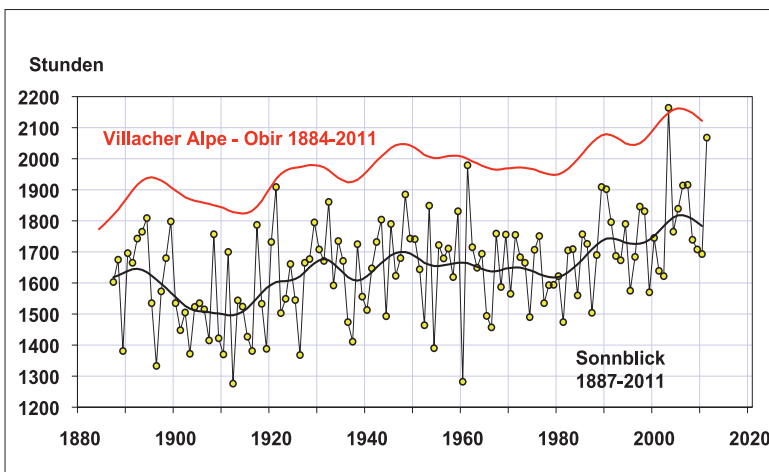
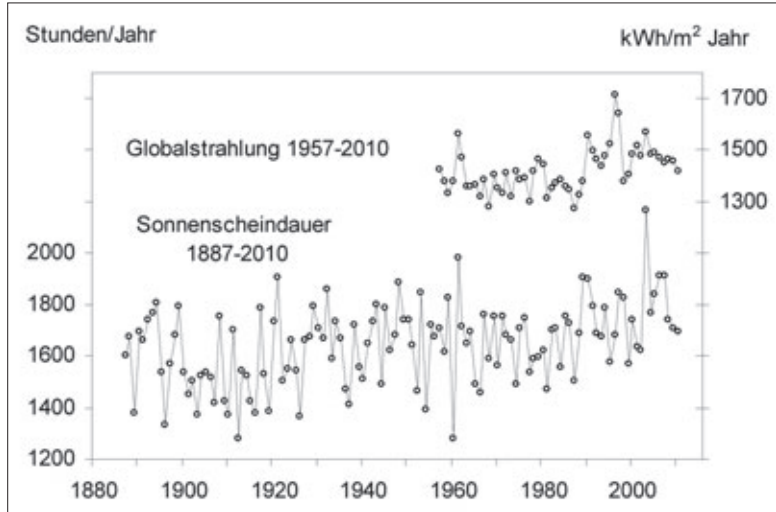


Abb. 7: Zeitreihen der Zahl der jährlichen Sonnenscheinstunden auf dem Sonnblick und auf der Villacher Alpe (diese nur geglättet). Alles weitere wie in Abb. 2. Die Station Villacher Alpe verwendet in ihrem ersten Teil Messungen der Station Obir, die auf den Standort Villacher Alpe umgerechnet wurden.

Abb. 8:
Globalstrahlung
(seit 1957)
und
Sonnenscheindauer
(seit 1887) auf dem
Sonnblick – Zeitrei-
hen der Jahressum-
men (Quelle: Böhm
et al., 2011).



Watt/m², im Elfjahresrhythmus und auch in längeren Zyklen bzw. Trends. Trotzdem waren diese geringen Variationen der global gemittelten Sonnenstrahlung zusammen mit den von Vulkanen ausgestoßenen Aerosolen der Hauptantrieb aller natürlich verursachten Klimaschwankungen bis etwa 1950. Erst dann begannen über die anthropogenen Treibhausgase durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs und die menschlich eingebrachten Aerosole (Luftverschmutzung) die anthropogenen Klimaantriebe die Oberhand über die natürlichen zu gewinnen.

Mit den langen Zeitreihen der Sonnenscheindauer haben wir ein gutes regionales „Proxy“ für die Sonne als Energiequelle zur Hand. Direkte Messungen der Solarenergie begannen systematisch erst viel später. Auf dem Sonnblick gibt es seit dem internationalen Geophysikalischen Jahr 1957 eine ununterbrochene Messreihe der „Globalstrahlung“, die sich aus der direkten Sonnenstrahlung und aus der indirekten Streustrahlung aus der Atmosphäre zusammensetzt – beide im sogenannten „sichtbaren Fenster“ des elektromagnetischen Spektrums. Abb. 8 zeigt die Ähnlichkeit, aber nicht die absolut identischen Verläufe von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung auf dem Sonnblick.

Zum Schluss des Abschnitts über den Klimawandel seien endlich diejenigen Klimareihen gezeigt und diskutiert, die meist als „der Klimawandel“ gelten, die der Lufttemperatur. Abb. 9 zeigt die langfristigen Verläufe der auf dem Sonnblick gemessenen Lufttemperatur für die Jahres- und die Halbjahresmittel. Dargestellt sind nicht nur die Einzeljahre und die, wie bei den anderen Klimaelementen 20-jährig geglätteten Kurven, sondern auch die linearen Trends über die gesamten Zeitreihen. Letztere betragen +0.14 °C/Dekade (Jahresmittel) bzw. +0.15 (Sommerhalbjahr) und +0.13 (Winterhalbjahr). Vor allem in der warmen Jahreszeit sind mehrere signifikante Abweichungen vom linearen Erwärmungstrend sichtbar: Zwei kürzere Zeitabschnitte um 1912 (kühl) und um 1945 (warm) und zwei längere mit der zu kühlen Periode von 1955 bis 1980 und der selbst gegenüber dem langfristigen Erwärmungstrend zu warmen aktuellen Periode. Das ergibt zusammen eine deutlich zweigeteilte

Erwärmung mit einem ersten Schub bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts und einem zweiten, der um 1980 einsetzte.

Wir haben anderswo argumentiert (z. B. AUER & BÖHM, 2010, aber auch IPCC, 2007, Kapitel 2), dass der erste dieser beiden Erwärmungsschübe, der auch in der global gemittelten Temperaturkurve sichtbar ist (vergl. etwa Kap. 3 von IPCC, 2007), zum größten Teil auf natürliche Klimaantriebe zurückgeht (solar und vulkanische Aerosole), der zweite zum größten Teil auf menschlich verursachte (anthropogene Aerosole und Treibhausgase). In der Abbildung haben wir dem mit einer entsprechenden Einfärbung des Hintergrundes Rechnung getragen.

In den 125 Sonnblickjahren seit 1887 hat sich also die Temperatur hier oben um $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht, um denselben Betrag wie auch alle anderen über 100 Langzeitstationen des Großraums Alpen, egal in welcher Seehöhe, ob in einer Stadt gelegen, in einem inneralpinen Becken oder an der Mittelmeerküste. Diese regionale Erwärmung ist etwa doppelt so stark wie die mittlere globale Erwärmung in diesem Zeitraum (AUER et al., 2007). Wir haben in AUER et al., 2009, ausführlicher argumentiert, dass an dieser regional stärkeren Erwärmung zum größten Teil die hier in Abb. 3 gezeigte langfristige Luftdruckzunahme mit der damit verbundenen Zunahme der Sonnenscheindauer (Abb. 7 und 8) ursächlich beteiligt ist. Dabei handelt es sich allerdings um eine Hypothese, deren

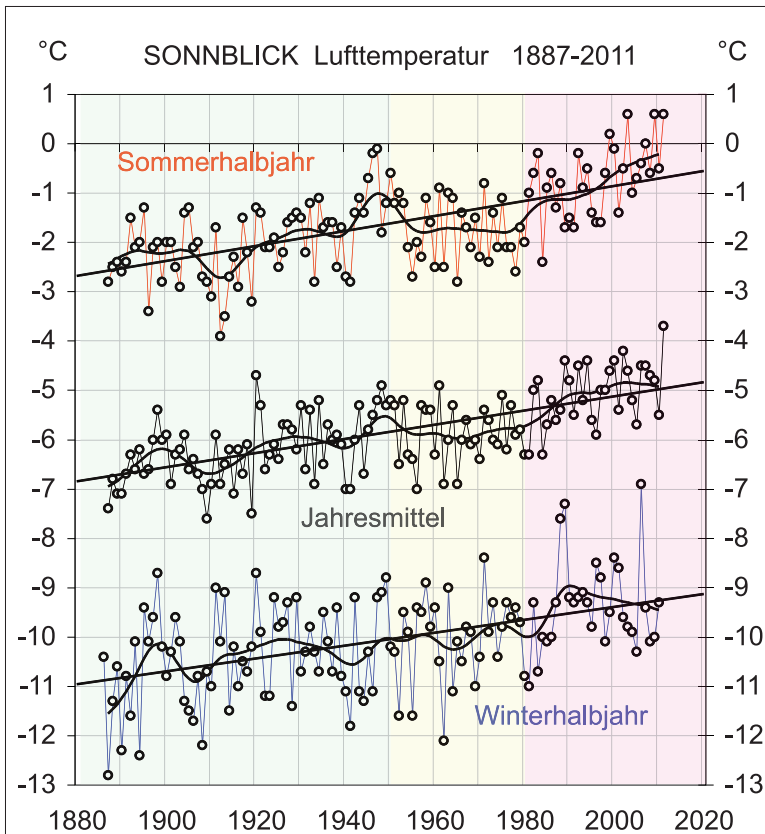


Abb. 9: Zeitreihen der Lufttemperatur auf dem Sonnblick für das Sommerhalbjahr (April–September), das Winterhalbjahr (Oktober–März) und das Jahr. Farblich unterlegt sind die im Text diskutierten drei Zeitabschnitte mit vorherrschend natürlichem (grün), anthropogenen Aerosol gesteuertem (gelb) und anthropogenen Treibhausgas gesteuertem Klimaantrieb (rot). Alles weitere wie in Abb. 2.

Verifizierung erst einer neuen Generation von regionalen Klimamodellen vorbehalten sein wird, die die dazu nötige räumliche Auflösung und die adäquate Modellphysik haben werden. Gerade die gezeigten ganz aktuellen Entwicklungen mit stark rückläufigem Luftdruck bei gleichzeitig weiterhin steigender sommerlicher Sonnenscheindauer und Lufttemperatur mögen zur Vorsicht bei (vor)schnellen Hypothesen warnen. Dass dabei auch die jahreszeitlichen Unterschiede zu beachten sind, führen die markanten Trendunterschiede zwischen dem ungebrochenen Erwärmungstrend des Sommerhalbjahres und dem auf hohem Niveau stagnierenden bis leicht rückläufigen des Winterhalbjahres vor Augen.

Da gerade in den regionalen Ausformungen des Klimawandels und da ganz besonders im klimatologisch sehr komplexen Alpenraum die Klimamodellierung noch Probleme hat, ist es immer der „Reality Check“ der Messdaten, der das letzte Wort hat. Und in Anbetracht der in diesem Abschnitt gezeigten hohen Kurzfristvariabilität des Klimas sind gerade lange und unter sehr ungestörten Bedingungen erarbeitete Zeitreihen wie die des Sonnblicks von größtem Wert. Der Klimawandel war in den frühen 1980er Jahren, als die Entscheidung für einen großzügigen Ausbau des Observatoriums fiel, noch nicht im Vordergrund der öffentlichen Debatte. In den drei Jahrzehnten seither hat sich auch aus dieser neuen Herausforderung heraus die doch größere Investition in unsere hochalpine Forschungsplattform als sinnvoll erwiesen. Nun steht der Klimawandel, den wir in diesem Abschnitt mit Hilfe von Sonnblickreihen besprochen haben, im Mittelpunkt des Interesses. Eine der Folgen des Klimawandels, die Veränderungen der Gletscher, sei im nächsten Abschnitt als typisches Hochgebirgsthema des zweiten Sonnblick-Forschungsschwerpunktes herausgegriffen.

Gletscherwandel

Bereits zehn Jahre nach der Gründung des Observatoriums waren es Albrecht Penk und seine beiden Mitarbeiter Forster und Machacek, die erstmals nicht nur auf dem Gipfelobservatorium selbst Forschungen anstellten, sondern in einem expeditionsartigen Unternehmen die Gletscherflächen um den Sonnblick zum Gegenstand ihrer Untersuchungen machten (Penck, 1897). Neben der exakten Kartierung der Gletscherzungen von Goldbergkees, Kleinfleißkees und Wurtenkees im Maßstab 1:10.000 markierten sie die ersten Vorlandmessmarken. Damit setzten sie den Anfangspunkt für das seither regelmäßig durchgeführte Gletschermonitoring in der Goldberggruppe. A. E. Forster setzte mit seinen Fotos ebenfalls einen ersten Fixpunkt. Die immer wieder angefertigten Nachfolgeaufnahmen sind in der Zwischenzeit zu einem digitalen Fotoarchiv angewachsen, das die Klimawandelfolge des Gletscherschwundes zu visualisieren erlaubt. Dass dieser nicht immer stetig vor sich geht, mögen hier die vier Beispiele aus dem Kleinfleißtal zeigen, die das zunächst stetige, im September 2002 jedoch plötzliche radikale Verschwinden einer ganzen Gletscherzunge zeigt. Der damalige Eissturz hatte das Zungenende um mehr als 160 m zurückverlegt und das nun deutlich höher gelegene Gletscherende ist seither stabil und zeigt im Gegensatz zur Mehrzahl der anderen österreichischen Gletscher keinen Längenverlust mehr.



Heftige „nichtlineare“ Ereignisse wie das vom 8. September 2002 vermitteln, dass die Beziehung Klima–Gletscher nicht so einfach ist, wie man vermuten könnte. Erst am Ende der vereinfacht so darstellbaren Wirkungskette Energiebilanz → Massenbilanz → Eisdynamik steht der Vorstoß oder der Rückzug der Zungenfront eines Gletschers. Er reagiert dort zeitverzögert und im Extremfall (siehe oben) ganz ohne Zusammenhang zum Klima. Seit den 1980er Jahren wird im Sonnblickgebiet auf den drei Gletschern, die schon Penck und Kollegen vermessen haben, das aufwändige Massenbilanzmonitoring betrieben, und zwar sowohl für die Winterbilanz als auch für die Jahresbilanz. Insgesamt 65 Massenbilanzierungen wurden seither vorgenommen, 29 für das Wurtenkees (WUK), 23 für das Goldbergkees (GOK) und 13 für das Kleinfließkees (FLK). Da vor allem die Winterbilanzierung sehr arbeitsintensiv ist (siehe Fotos Abb. 14 und 15), wird sie über längere Zeiträume hindurch auch international nur selten durchgeführt, obwohl dadurch dem Zusammenspiel und der jahreszeitlichen Abfolge von (in unserem Klimagebiet) winterlicher Akkumulation (Massenzuwachs) und sommerlicher Ablation (Abschmelzen) den Klimavariationen nachgegangen werden kann.

Abb. 10 bis 13:
Der Rückgang der Zunge des Kleinfließkeeses in den letzten Jahrzehnten. Die Fotos wurden von einem konstanten, im Gelände markierten Standort aus aufgenommen.
Foto 10 (l. o.):
September 1963,
Foto 11 (r. o.):
September 1999,
Foto 12 (l. u.):
September 2002,
wenige Tage nach dem Eissturz,
Foto 13 (r. u.):
September 2007.
Alle Fotos: R. Böhm

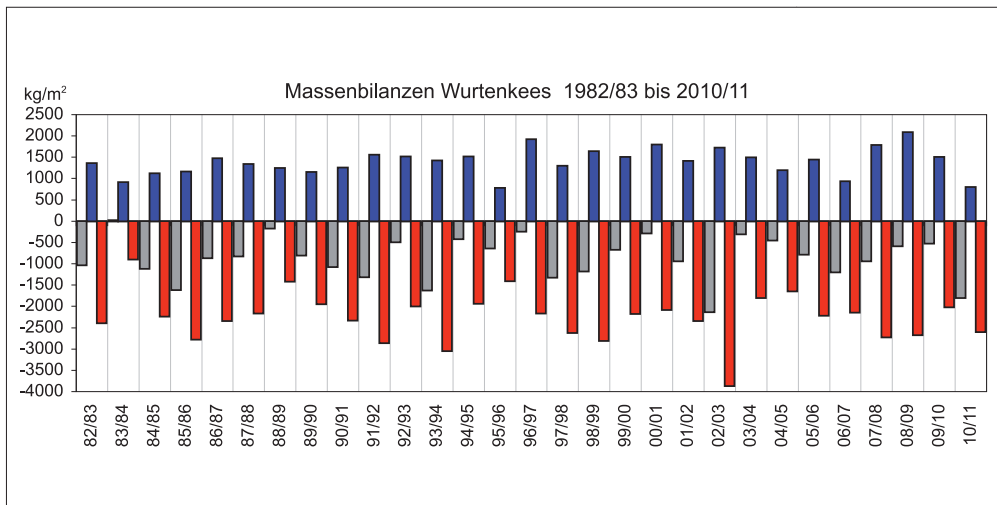
Abb. 14:
Messung von
Schneedichte und
Schneetemperatur
in einem Schneeschacht, der die im
Lauf des Winters
akkumulierte Winterschneedecke
umfasst. In 10–20-
cm-Segmenten wird
ein geschlossenes
Profil der Massen-
bilanz an diesem
Punkt des Gletschers erarbeitet.
Rund zehn derartige
Profile werden pro
Gletscher gegraben.
An zwei Profilen
werden zusätzlich
Schicht für Schicht
Schneeproben zur
chemischen Analyse
entnommen.
Foto aufgenommen
am 1. 5. 2009 von
W. Schöner.



Aus dem umfangreichen Datenmaterial, das in beinahe 30 Jahren Massenbilanzierung bisher angefallen ist, kann hier nur Weniges herausgegriffen werden. Abb. 16 zeigt die mit 29 Jahren längste Massenbilanzreihe der Alpen mit getrennter Winter- und Sommerbilanzierung, die für das Würtenkees. Abb. 17 enthält die mittleren Netto-Jahresbilanzen für alle drei Gletscher des Sonnblickgebiets im Vergleich für jedes vorhandene Bilanzjahr, Abb. 18 vergleicht die Mittelwerte von Winter-, Sommer- und Netto-Jahresbilanz für die 13 aktuellen Jahre, für die von allen drei Gletschern Daten vorliegen.

Abb. 15:
Unterwegs auf dem
Gletscher mit dem
400-MHz-Georadar.
Dieses Radar erlaubt
es, die Dicke der
Winterschneedecke
an vielen Punkten
des Gletschers zu
messen. Mit diesen
Tiefenprofilen werden
die in den Schneeschächten
ergrabenen Massen-
bilanzen interpoliert
und später zu Karten
der Winterbilanz
verarbeitet. Solche
Karten werden
regelmäßig in den
Jahresberichten des
Sonnblick-Vereines
veröffentlicht.
Foto aufgenommen
am 1. 5. 2009 von
G. Weyss.





Die Zeitreihen des Beispielgletschers Würtenkees (Abb. 16) zeigen, dass die negativen Sommerbilanzen in den letzten 29 Jahren mit einer Ausnahme (1983/84) die winterliche Akkumulation deutlich übertroffen haben. Der Gletscher verlor somit kontinuierlich an Masse, und zwar im Mittel über die Gletscherfläche um -871 kg/m^2 pro Jahr (was einem Wasseräquivalent von -871 mm Wassersäule entspricht). In Summe waren das 25 m Wasseräquivalent oder, als Eis ausgedrückt, rund 28 m Eisdickeverlust. Die Zeitreihe des Würtenkees zeigt auch geringere Schwankungen der Winterbilanzen von Jahr zu Jahr und stärkere der Sommerbilanzen. Eine Trendanalyse für alle drei Gletscher erbrachte geringfügig steigende Winterbilanzen, geringfügig negativer werdende Sommerbilanzen und in Summe eine ebenfalls leicht negativer werdende Netto-Massenbilanz. Alle drei Trends sind jedoch gegenüber der starken

Abb. 16: Die Zeitreihe der mittleren jährlichen Gletschermassenbilanzen für das Würtenkees vom Bilanzjahr 1982/83 bis 2010/11. Winterbilanz (bw, 1. 10. bis 30. 4.) in Blau, Sommerbilanz (bs, 1. 5. bis 30. 9.) in Rot, Netto-Jahresbilanz ($b = bw + bs$) in Grau. Daten: Gletscherdatenbank der ZAMG.

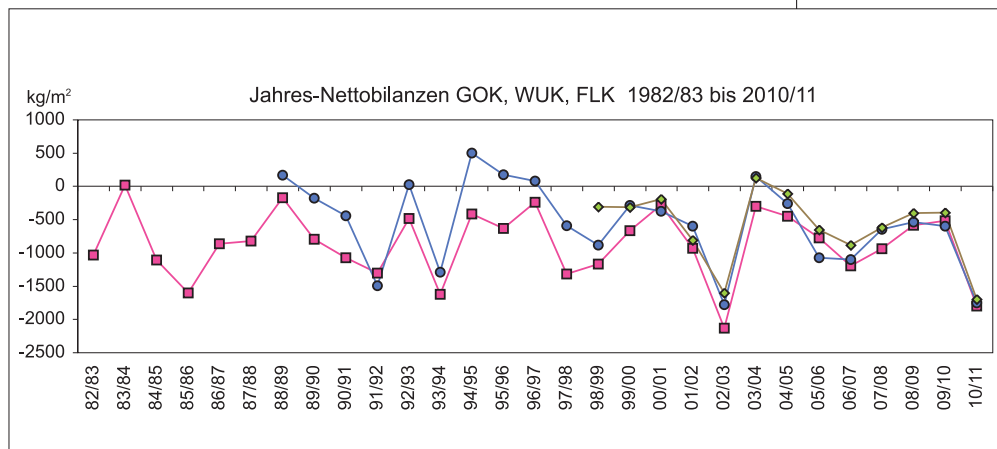


Abb. 17: Zeitreihen der mittleren Netto-Jahresbilanzen der drei Gletscher des Sonnblickgebiets. Grün: Kleinfließkees (FLK), blau: Goldbergkees (GOK), pink: Würtenkees (WUK). Daten wie für Abb. 8.

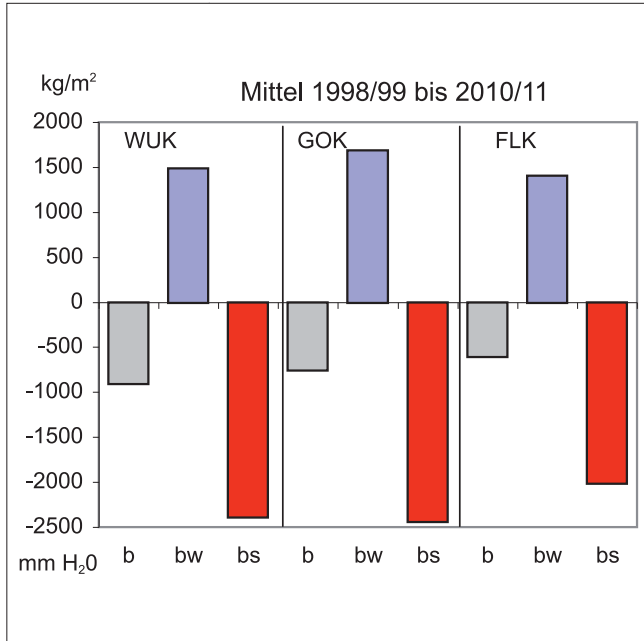


Abb. 18:
Über den gemeinsamen Zeitraum 1998/99 bis 2010/11 gemittelte Winter- (blau), Sommer- (rot) und Netto-Jahresbilanzen (grau) für die drei Gletscher des Sonnblickgebiets GOK, WUK und FLK. Daten wie für Abb. 8.

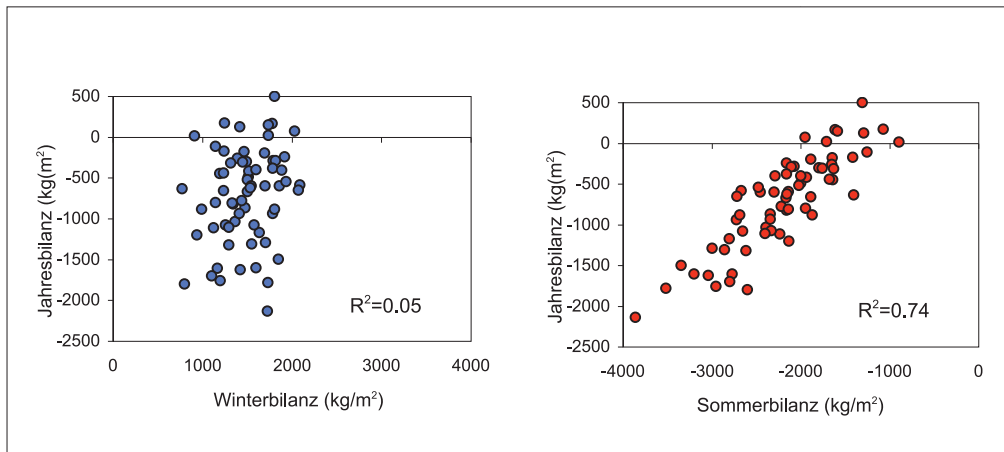
mittleren Bilanzniveaus für die allen drei Gletschern gemeinsame 13-jährige Stichprobe getrennt für Sommer- und Winterbilanz nachvollzogen werden. Es wird hier deutlich, dass alle drei Gletscher sich zurzeit (noch) nicht im Gleichgewicht mit der im Abschnitt 2 diskutierten Klimaentwicklung befinden. Am ehesten hat das durch die Hinaufverlagerung seiner Gletscherzunge noch das Kleinfleißkees geschafft, das mit seiner durchschnittlichen Jahresbilanz von -606 mm deutlich günstiger bilanziert als das Wurtenkees mit seinen -905 mm Wasseräquivalent – und das obwohl die durchschnittliche Winterakkumulation des Kleinfleißkeeses mit $+1407$ mm die geringste der drei Gletscher ist. Hier schneidet mit $+1685$ mm das Goldbergkees am günstigsten ab. Die Sommerablation ist bei Goldbergkees und Wurtenkees in den aktuellen 13 Jahren mit rund -2400 mm sehr ähnlich, beim Kleinfleißkees mit nur rund -2000 mm markant gletscherfreundlicher. In Bezug auf die sommerlichen Massenverluste war die Ähnlichkeit von Goldbergkees und Wurtenkees vor der aktuellen Vergleichsperiode aller drei Gletscher nicht gegeben. In den Bilanzjahren 1989/90 bis 1998/99 war die Sommerbilanz des Wurtenkeeses mit -2170 mm deutlich negativer als die -1947 mm des Goldbergkeeses. Offenbar war das Wurtenkees, wie auch die regelmäßigen Gletscherfotos belegen, damals bereits im Sommer weitestgehend frei von Altschnee und Firndecken, die die Abschmelzraten der Gletscher durch ihre höhere Albedo verringern, während das Goldbergkees damals noch zahlreiche mehrjährige Firnschichten besaß. In der Zwischenzeit ist dieser Unterschied viel geringer geworden, und auch das Goldbergkees präsentiert sich in der Sommersaison meist sehr aper und mit geringer Albedo.

Die letzten der hier in Abb. 19 gezeigten Ergebnisse des Massenbilanzmonitorings im Sonnblickgebiet führen am deutlichsten vor

Variabilität von Jahr zu Jahr weit unterhalb jeglicher Signifikanzschränke.

Der Vergleich der Zeitreihen der Netto-Jahresbilanzen der drei Gletscher in Abb. 9 lässt erkennen, dass die jährlichen Variationen der drei Gletscher ähnlich verlaufen, jedoch auf einem im Mittel unterschiedlichen Niveau – am negativsten bilanziert im Schnitt das Wurtenkees, am positivsten das Kleinfleißkees, zwischen den beiden das Goldbergkees. Insgesamt tritt das oben gesagte auch hier deutlich zu Tage: kein signifikanter Trend, weitaus überwiegende negative Bilanzen und eine starke Variabilität von Jahr zu Jahr.

In Abb. 10 können die



Augen, dass die in die Winterbilanzierung investierte Arbeit sinnvoll ist. Die Streuungsdiagramme der Korrelation zwischen der Winter- und der Sommerbilanz mit der jeweiligen Jahresbilanz spricht eine deutliche Sprache: Die Nettojahresbilanz der drei Gletscher war in den letzten drei Jahrzehnten beinahe ausschließlich von der sommerlichen Abschmelzung verursacht, während die winterliche Schneeakkumulation so gut wie keine Rolle spielte. Die Bestimmtheitsmaße von 0.05 für den Zusammenhang Winter- zu Jahresbilanz bzw. von 0.74 für den der Sommer mit der Jahresbilanz erlauben es durch eine Stichprobe von 65 Einzelwerten diese Aussage auch quantitativ zu untermauern. Es kommt also für die Massenbilanz eines Gletschers so gut wie nicht darauf an, wie schneereich ein Winter war, sondern lediglich wie warm und damit strahlungsreich der Sommer. Nur deshalb funktionieren die in der Glaziologie gern verwendeten einfachen Modellierungen der Gletschermassenbilanz über sommerliche Temperatursummen, in denen nicht nur die hier gezeigte Dominanz der Sommerwitterung ausgenutzt wird, sondern auch die in Abschnitt 2 gezeigte enge Korrelation der hochalpinen Sommertemperatur mit der Sonnenstrahlung. Denn genau genommen ist es ja die Strahlungsbilanz eines Gletschers, die zum größten Teil seine Massenbilanz steuert und nicht die Temperatur.

Ausblick

Für die kommenden Jahrzehnte erwarten wir zwar einen weiteren Temperaturanstieg, der aber nicht notwendigerweise weiter parallel zu einer Zunahme der Sonnenscheindauer einhergehen wird, da er immer stärker durch den anthropogenen Treibhauseffekt verursacht wird. Deshalb ist, wie wir nicht zuletzt mit dem hier an einigen Beispielen vorgeführten Klima- und Gletschermonitoring im Sonnblickgebiet zeigen konnten, Vorsicht geboten bei der unkritischen Übernahme von zurzeit gegebenen Zusammenhängen wie dem zuletzt besprochenen zwischen Sommertemperatur und Gletschermassenbilanz. Ein Weiterführen der Forschungs- und vor allem der langfristig angelegten Monitoring-Aktivitäten eines hochalpinen Observatoriums wie dem auf dem Sonnblick ist dafür eine notwendige Voraussetzung.

Abb. 19: Streuungsdiagramme (Scatterplots) des Zusammenhangs zwischen der Winterbilanz (linkes Diagramm, blau) und der Sommerbilanz (rechtes Diagramm, rot) mit der Netto-Jahresbilanz für alle 65 für die drei Gletscher des Sonnblickgebiets seit 1982/83 erarbeiteten Massenbilanzen. Angegeben sind auch der Bestimmtheitsgrad (R^2). Daten wie für Abb. 8.



Abb. 20: Das Sonnblick-Observatorium in seinem Originalzustand im Gründungsjahr 1886 auf einem Stich von Heilmann. Vor dem noch erhaltenen Steinturm und dem östlich anschließenden kleinen Holzhaus, das bis in die frühen 1980er-Jahre überdauerte, dominiert der große Blitzableiter, dessen ebenfalls sichtbare „Erdung“ hunderte Meter weit über den Gletscher bis in den damals „Blitzsee“ genannten Brettsee im obersten Kärntner Zirknitztal geführt wurde, um im nicht leitenden Permafrost eine Erdung zustande zu bringen.

Da nicht nur die hier gezeigten Beispiele, sondern auch zahlreiche andere aus den Bereichen Umweltchemie und Umweltphysik auf dem Sonnblick wesentliche Beiträge zum Stand der Umweltforschung geliefert haben und noch weiter liefern werden, steht dem Observatorium nach den erfolgreichen vergangenen 125 Jahren wohl auch eine ebenso erfolgreiche Zukunft offen. Vielleicht steht unserem „Labor über den Wolken“ sogar irgendwann wieder eine ähnlich radikale Erweiterung „ins Haus“ wie die, die beim Vergleich der letzten beiden Fotos dieses Artikels deutlich wird. An mangelnden Forschungsthemen in Zeiten des Umwelt- und Klimawandels wird es nicht scheitern.



Ohne den Einsatz und die wertvolle Arbeit der auf dem Sonnblick tätigen „Wetterwarte“, wie sie früher genannt worden sind, wäre der Betrieb eines derartigen Observatoriums undenkbar. Auch in den Zeiten von automatischen Sensoren sind eine dauernde Betreuung des Geräteparks und zusätzliche menschliche Beobachtungen unverzichtbar. Wir wollen daher auf diesem Weg allen Sonnblick-Wetterwarten der 125-jährigen Geschichte des Observatoriums dafür danken.

Stellvertretend widmen wir unseren Artikel den beiden Kärntnern, die mit Abstand am längsten auf dem Sonnblick gearbeitet haben und im Jahr 2012 in den verdienten Ruhestand getreten sind:

Unsere Widmung gilt den zwei Mölltalern Friedl Wallner (Wetterwart von 1972–2012) und Hans Lindler (1975–2012).

Abb. 21:
Das moderne Sonnblick-Observatorium im April 2010, gesehen von Nordwesten. Links im Bild der Neubau aus den 1980er Jahren mit dem 1995 dazu gekommenen 25 m hohen Windmessturm, in der Mitte der erhaltene historische Steinturm und rechts im Bild das Zittelhaus des Alpenvereins. Ebenso sichtbar sind die Lisenen der Neuverankerung und Sanierung des durch auftauenden Permafrost gefährdeten Gipfelaufbaus in den Jahren 2002 und 2003.
Foto: C. Schober

LITERATUR

- AUER, I. & R. BÖHM (2010): Klimawandel in den Hohen Tauern. Abschnitt A in Auer, Pretenthaler, Böhm & Proske (Hrsg.): Zwei Alpentäler im Klimawandel. Innsbruck university press, 1–82.
- AUER, I., R. BÖHM & W. SCHÖNER (2009): The importance of high quality regional scientific information in coping with global climate change. In: Climate Sense. A WMO-Publication for WCC-3 in Geneva, 31 Aug.–4 Sep 2009, Tudor-Rose, Leicester, UK, 179–183.
- AUER, I. & 30 COAUTHORS (2007): HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760–2003. *International Journal of Climatology* 27: 17–46.
- AUER, I., R. BÖHM & W. SCHÖNER (2001): ALOCLIM-Austrian Long-term Climate 1767–2000. Multiple Instrumental Climate time series from Central Europe. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik* 25: 1–147.
- BÖHM, R., I. AUER & W. SCHÖNER (2011): Labor über den Wolken – die Geschichte des Sonnblick-Observatoriums. 380 Seiten. – Böhlau Verlag, Wien–Köln, Weimar.
- BÖHM R., P. D. JONES, J. HIEBL, D. FRANK, M. BRUNETTI & M. MAUGERI (2010): The early instrumental warm-bias: a solution for long central european temperature series 1760–2007. *Climatic Change* 101: 41–67.
- BÖHM, R., I. AUER, W. SCHÖNER & M. HAGEN (1998): Long alpine barometric time series in different altitudes as a measure for 19th/20th century warming. *Proceedings of the 8th Conference on Mountain Meteorology*, in Flagstaff, Arizona. AMS, Boston, pp. 72–76.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 996 Seiten.
- PENCK, A. (1897): Gletscherstudien im Sonnblickgebiete. *Zeitschrift des D. u. O. Alpenvereins* 28: 52–71.
- SONNBLICK VEREIN (ab 1893): *Jahresberichte des Sonnblick Vereines*, Wien, Eigenverlag.
- VENEMA V. & 30 COAUTHORS (2012): Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Climate of the Past* 8: 89–115. www.clim-past.net/8/89/2012.

Anschrift der AutorInnen

Dr. Reinhard Böhm †,
Dr. Ingeborg Auer,
Dr. Wolfgang
Schöner,
alle:
Zentralanstalt für
Meteorologie und
Geodynamik,
Abteilung Klima-
forschung,
Hohe Warte 38,
A-1190 Wien,
Tel.: +43 (0)1 36026
Website: <http://www.zamg.ac.at>
E-Mail:
reinhard.boehm@zamg.ac.at
ingeborg.auer@zamg.ac.at
wolfgang.schoener@zamg.ac.at

Dr. Reinhard Böhm ist am 8. Oktober 2012 völlig unerwartet auf „seinem“ Sonnblick verstorben. Die Klimaforschung in Österreich hat damit einen seiner tiefsten und unkonventionellsten Wissenschaftler verloren. Vielen war er ein großes Vorbild und stets ein interessierter Gesprächspartner. Er verstand es immer wieder, seine Zuhörer mit seiner Begeisterung für die Forschung in der Klimatologie und Glaziologie anzustecken und komplexe Themen populärwissenschaftlich zu präsentieren, trotzdem aber seriös zu bleiben. Sein Werk lebt in zahlreichen Publikationen fort.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Carinthia II](#)

Jahr/Year: 2012

Band/Volume: [202_122](#)

Autor(en)/Author(s): Böhm Reinhard, Auer Ingeborg, Schöner Wolfgang

Artikel/Article: [125 Jahre Klima- und Gletscherforschung auf dem Sonnblick 523-540](#)