

# Kapitel 5 | Meteorologische Bedingungen und Strahlungsverhältnisse am Blockgletscher Äußeres Hochebenkar

Lea Hartl, Andrea Fischer

## *Zusammenfassung*

Der Einfluss des Klimas auf Gletscher und Blockgletscher ist in deren Energiebilanz zusammengefasst. Diese zeigt die verschiedenen Energieflüsse, die zwischen einer Oberfläche und der Atmosphäre bestehen. Die Strahlungsparameter spielen dabei eine große Rolle. Die Strahlungsbilanz setzt sich zusammen aus langwelliger (thermischer) Strahlung und kurzwelliger Sonnenstrahlung. Anhand von Daten der automatischen Wetterstation im Äußeren Hochebenkar für das Jahr 2012 werden mikroklimatische Parameter sowie die unterschiedlichen Strahlungsflüsse dargestellt. Der wärmste Monat 2012 war mit einer Mitteltemperatur von 9 °C der August. Die Jahresmitteltemperatur der Luft betrug -0,6 °C, während das Jahresmittel der Bodentemperatur in 15 cm Tiefe mit 0,7 °C leicht positiv ausfiel. Die Strahlungsbilanz ist durch die langwelligeren Strahlungsparameter dominiert, solange der Boden schneebedeckt ist und ein großer Teil der kurzwelligeren Strahlung reflektiert wird. Nach der Schneeschmelze steigt der Einfluss der kurzwelligeren solaren

Strahlung auf die Gesamtstrahlungsbilanz. Weitere Untersuchungen und das Fortführen bestehender Messreihen sind wichtig, um zu verstehen, wie sich Änderungen in der Energiebilanz auf den Blockgletscher auswirken.

## *Abstract*

The cryosphere is strongly influenced by climate. The various fluxes of energy that occur between the atmosphere and the surface of a glacier or rock glacier comprise the energy balance of that surface. The energy balance determines how much energy is available for melting processes within the glacier or rock glacier. Apart from thermal and ground fluxes, the dominant components of the energy balance are incoming and outgoing long and shortwave radiation, the so called radiation balance. Unlike blue-ice glaciers, rock glaciers are covered by a thick layer of debris, which protects, to a large degree, the ice-rich permafrost core from the influence of solar radiation. Using data gathered by the automatic weather

station at the rock glacier Äußeres Hochebenkar, temperature and radiation parameters are discussed for the year 2012.

The warmest month in 2012 was August, with a monthly mean of 9 °C. The yearly mean of the air temperature was slightly negative at -0.6 °C, while the yearly mean of the ground temperature was slightly positive at 0.7 °C. The ground temperature showed no diurnal variation until mid-May, when snow melt occurred. Ground temperatures under the mid-winter snowpack were partially negative, suggesting the presence of permafrost.

To show the influence of different cloud conditions on the radiation balance, five exemplary days of summer and winter 2012 are discussed. The incoming shortwave radiation was strongly dependant on the type and amount of clouds present. Generally, incoming short wave radiation decreased with increasing cloud cover, but a few small cumulus clouds can reflect shortwave radiation so that the incoming global radiation is higher than it would be in clear sky conditions. In summer, about 20 % of incoming short wave radiation is reflected at the surface. Incoming longwave radiation depends mainly on the amount of water vapour and cloud cover, as can be seen when comparing the peak values of longwave radiation with peaks in relative humidity. The net radiation balance is dominated by shortwave, solar radiation by day and the longwave components by night. In winter, the presence of snow has a strong influence on the radiation balance, since solar radiation is reflected to a large degree. Over the year, incoming shortwave radiation increases between

the winter and summer solstice and decreases again accordingly. Incoming longwave radiation reaches maximum values in August, when temperatures and humidity are also at their yearly peak. As long as the ground is snow covered, the longwave components dominate the radiation balance. The net radiation balance is negative in January, February, March, November and December, with November being the most negative month of 2012 with a net radiation balance of -34 W/m<sup>2</sup>. The overall radiation balance for 2012 is positive at 346 W/m<sup>2</sup>.

Äußeres Hochebenkar rock glacier receives very little solar radiation in winter due to geometric effects of the surrounding terrain. In the winter months the sun rises above the peaks of the Hochebenkamm only for a short amount of time. Small surface variations on the rock glacier have a very small effect on incoming radiation, compared to the shading due to Hochebenkamm. In summer the influence of the surrounding terrain is smaller and minor variations in exposition and steepness on the rock glacier surface have a larger effect. To further investigate how the components of the energy and radiation balance affect the permafrost core of the rock glacier, and in consequence the dynamic of the rock glacier, it would be desirable to carry out geophysical measurements and drill a core at Hochebenkar rock glacier. It is essential that existing time series are continued.

## 1. Einleitung

Blockgletscher unterliegen, wie auch Eisgletscher- und Permafrostphänomene, den Einflüssen des Klimas. Zwischen der Atmosphäre und der Kryosphäre finden Energieflüsse statt, die sich je nach Wetter und klimatischen Bedingungen ändern (Abb. 1). Wenn man alle eingehenden Energieflüsse gegen alle ausgehenden aufrechnet, spricht man von der Energiebilanz. Durch die Regeln der Energieerhaltung ist die Energiebilanz im Mittel stets ausgeglichen, obwohl es im Tages- und Jahresverlauf zu starken Schwankungen kommt. Die Sonne spielt für die Energiebilanz eine dominante Rolle: Wenn am Tag bei klarem

Wetter im Frühjahr die Schneedecke in der Sonne schmilzt, ist die Energiebilanz an diesem Punkt in diesem Moment positiv, Energie aus der Atmosphäre wird in die Schneedecke transportiert und führt dort zur Schmelze. Nachts hingegen friert die aufgeweichte Schneedecke wieder fest – die Oberfläche gibt Wärmestrahlung an die Atmosphäre ab und die Energiebilanz wird negativ. In der Kryosphäre sind besonders Schmelzprozesse stark durch die Energiebilanz beeinflusst. Während bei Gletschern die Sonne direkt auf das schmelzende Eis scheint, ist das gefrorene Material in einem Blockgletscher meist von einer dicken, frostfreien Schuttschicht geschützt. Eine sehr dünne Schuttbedeckung (wenige Zentimeter) auf dem Eis wirkt sich förderlich

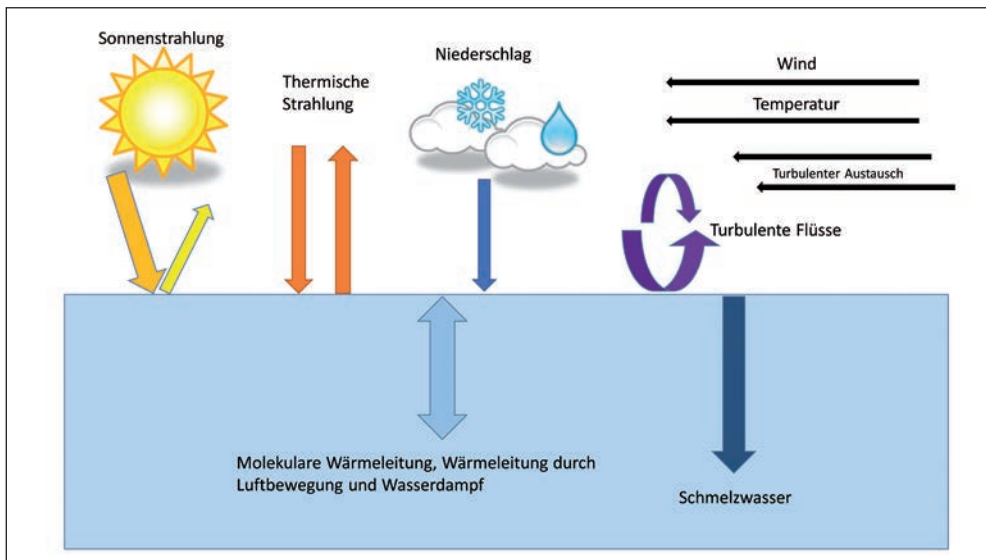


Abb. 1: Die wichtigsten Energieflüsse an einer Gletscheroberfläche, adaptiert nach Oerlemans (2010). Die Strahlungsflüsse machen den größten Teil des Energieumsatzes aus. Der Energiefluss durch Niederschlag ist je nach Temperatur zur Oberfläche hin- oder von ihr weggerichtet, wie auch die turbulenten Flüsse. Mit Ausnahme des Energietransports durch versickerndes oder abfließendes Schmelzwasser sind die Energieflüsse innerhalb des Gletschers klein im Vergleich zu jenen zwischen der Atmosphäre und dem Gletscher.

auf die Ablation aus. Dickerer Schutt hingegen verlangsamt das Schmelzen, wobei die Schmelzraten mit zunehmender Schuttstärke asymptotisch abnehmen (Mihalcea et al. 2006, Nicholson & Benn 2006). Der Blockgletscher im äußeren Hochebenkar weist Schuttdicken von mehreren Metern auf (Hartl et al. 2014), dadurch ist das sommerliche Schmelzen gegenüber einem Gletscher stark reduziert.

Die Energiebilanz setzt sich zusammen aus dem fühlbaren und latenten Wärmestrom, dem Bodenwärmestrom und den lang- und kurzwelligigen Strahlungskomponenten (Oerlemans 2001). Der Energiefluss an der Oberfläche ( $E$ ) kann auf folgende Weise ausgedrückt werden:

Formel 1:

$$E = S_{in} (1 - \alpha) + L_{in} + L_{out} + G + H_s + H_l$$

wobei  $S_{in}$  die einfallende, kurzwellige Sonnenstrahlung bezeichnet und  $\alpha$  die Albedo. Die Albedo gibt an, welcher Anteil der eintreffenden Strahlung an der Oberfläche reflektiert wird und kann Werte zwischen 0 (keine Reflexion, Strahlung wird vollständig absorbiert) und 1 (Strahlung wird vollständig reflektiert) annehmen.  $\alpha$  ist abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche und der Wellenlänge der eintreffenden Strahlung. So absorbieren bestimmte Materialien (z.B. Schnee) beispielsweise langwellige Strahlung, reflektieren aber im kurzwelligen Bereich. Der erste Term auf der rechten Seite von Formel 1 beschreibt also sowohl die einfallende, als auch die reflektierte Sonnenstrahlung.  $L_{in}$  ist die einfallende thermische, langwellige Strahlung,

$L_{out}$  die ausgehende langwellige Strahlung.  $G$  ist der Bodenwärmestrom, der sich auf einer Gletscheroberfläche aus jener Energie zusammensetzt, die durch Wärmeleitung (im Eis/Gestein) und Konvektion (in Hohlräumen) herbeigeführt wird bzw. entweicht.  $H_s$  ist der Fluss sensibler Wärme und  $H_l$  ist der Fluss latenter Wärme.  $H_s$  und  $H_l$  lassen sich als turbulente Wärmeflüsse zusammenfassen.

Bereits in den 1970er Jahren wurden im Rahmen des Man and Biosphere (MaB) Projekts Obergurgl umfangreiche Energiebilanzmessungen durchgeführt, bei denen ein Messstandort in einer Wiese knapp außerhalb von Obergurgl auf 1.960 m mit einem Standort auf der Hohen Mut (2.560 m) verglichen wurde (Staudinger 1978, 1987; Rott 1979; Patzelt 1987). Der Höhenunterschied, sowie Unterschiede in Sonneneinstrahlung und Schneebedeckung, und die damit zusammenhängende, unterschiedliche Vegetation an den Standorten beeinflussen die Energiebilanz und das Mikroklima beider Standorte. Durch den niedrigwüchsigen Pflanzenbewuchs auf der Hohen Mut sind die Tagesgänge der Bodentemperatur und der Strahlungstemperatur der Oberfläche dort stärker ausgeprägt als auf der Wiese bei Obergurgl. Die Tagessummen der kurzwelligen, solaren Einstrahlung liegen auf der Hohen Mut 10 % bis 15 % über jenen am Standort Wiese, bedingt durch die stärkere Horizontabschirmung und die etwas größere atmosphärische Extinktion am tiefer gelegenen Standort (Rott 1979).

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das Mikroklima und die Strahlungsbilanz im Bereich des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar

zu erfassen, um damit einen Vergleich zu den oben erwähnten Messstandorten in Obergurgl zu haben und die Besonderheiten am Blockgletscher aufzeigen zu können.

Luftdruck, Lufttemperatur- und feuchte in 2 m Höhe (unventiliert, unbeheizt), Sommer-niederschlag, Schnee- und Bodentemperaturen (ca. 15 cm Tiefe) sowie Schneehöhe. Die Daten werden als 10 Minuten-Summen bzw. -Mittelwerte gespeichert.

## 2. Methoden

Am 12. Oktober 2010 wurde auf 2.620 m Meereshöhe neben dem orographisch rechten Rand des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar eine automatische Wetterstation installiert. Die Station misst Windgeschwindigkeit und -richtung, eingehende und ausgehende langwellige und kurzwellige Strahlung,

### Berechnung der Strahlungsbilanz

Die Strahlungsterme der Energiebilanz (Formel 1) bilden die Strahlungsbilanz ( $Q$ , Formel 2). Sie zeigt die Energieflüsse, die durch an der Oberfläche eintreffende und von ihr ausgehende elektromagnetische Strahlung entstehen. Man unterscheidet zwischen der kurzwelligen Sonnenstrahlung, die zu 99 % in einem Wel-

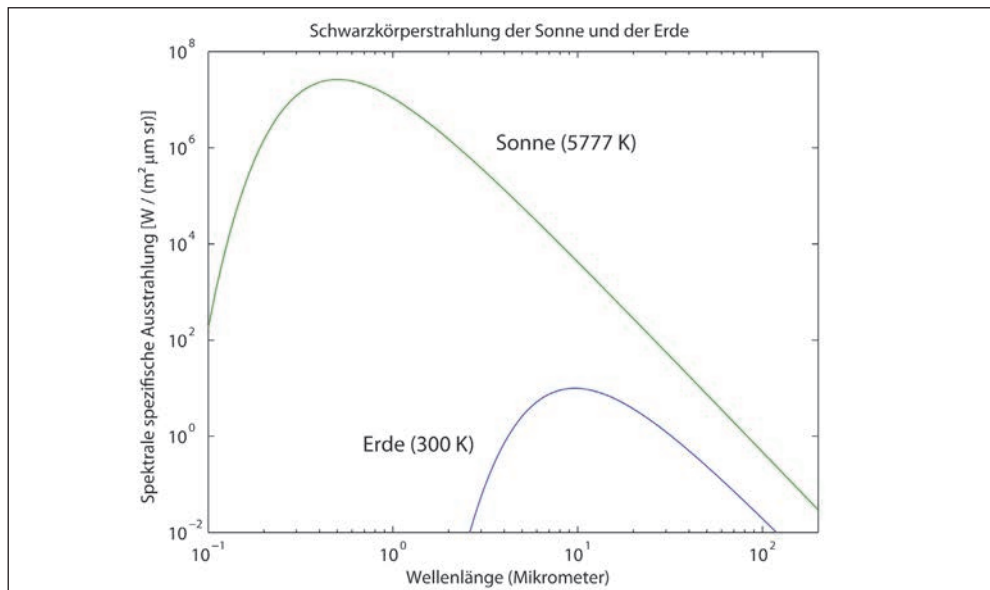


Abb. 2: Planck'sches Strahlungsspektrum für die effektive Strahlungstemperatur der Sonne (5777 Kelvin; grüne Kurve) und der Erde (300 Kelvin; blaue Kurve), in doppeltlogarithmischer Darstellung. Auf Grund der höheren effektiven Temperatur liegt das Strahlungsmaximum der Sonne bei kürzeren Wellenlängen als jenes der Erde.

lenlängenbereich von 0,22 bis 4 Mikrometern liegt, und langwelliger, atmosphärischer oder thermischer Strahlung, die zu 99 % Wellenlängen zwischen 4 und 100 Mikrometern aufweist (Abb. 2, Kraus 2000). Die eintreffende kurzwellige Strahlung wird weiter unterteilt in einen direkten und einen diffusen Anteil. Letzterer ist jene Sonnenstrahlung, die nicht auf direktem Weg zur Oberfläche gelangt, sondern zunächst an Wolken oder atmosphärischen Partikeln gestreut, gebrochen, reflektiert oder absorbiert und reemittiert wird. Der Anteil an diffuser Strahlung beträgt bei wolkenlosen Bedingungen typischerweise 15 %. Bei bedeck-

tem Himmel liegt er bei bis zu 85 %, wobei der genaue Wert stark von der Art der Wolken abhängt (Oerlemans 2001).

$$\text{Formel 2: } Q = S_{in} + S_{ref} + L_{in} + L_{out}$$

$Q$  ist die Strahlungsbilanz,  $S_{ref}$  ist der Anteil der Sonnenstrahlung, der an der Oberfläche reflektiert wird und kann auch ausgedrückt werden als:

$$\text{Formel 3: } S_{ref} = S_{in} \cdot \alpha$$

Für die restliche Notation siehe Formel 1.

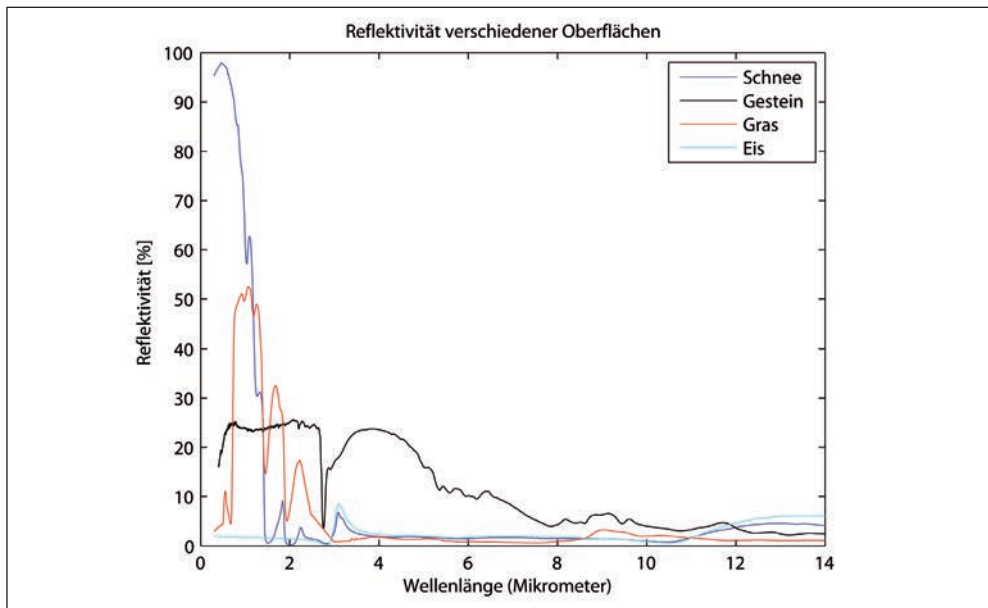


Abb. 3: Spektrale Signaturen von Schnee (dunkelblau), Eis (hellblau), Gestein (Glimmerschiefer: schwarz) und Gras (rot), nach Baldrige et al. (2009). Daten aus ASTER Spectral Library, California Institute of Technology. Dargestellt ist die Reflektivität in Prozent abhängig von der Wellenlänge in Mikrometern. Schnee reflektiert kurzwellige Strahlung zu annähernd 100 % und absorbiert stark im langwelligeren Bereich. Eis reflektiert in allen Wellenlängen unter 10 % der Strahlung. Glimmerschiefer, das Gestein, welches auch im Äußeren Hochebenkar verbreitet vorkommt, reflektiert unter 20 % der Gesamtstrahlung. Gras reflektiert ca. 50 % der kurzwelligen Strahlung und absorbiert, ähnlich wie Schnee, stark in langen Wellenlängen.

Für die kurzwellige Strahlungsbilanz ist entscheidend, wieviel die Oberfläche reflektiert. Schnee und insbesondere Neuschnee hat eine sehr hohe Albedo und reflektiert fast 100 % der kurzwelligen Strahlung, das Gesteinsmaterial an der Blockgletscheroberfläche hingegen absorbiert große Teile davon (Abb. 3). Die langwellige Einstrahlung wird kaum reflektiert und auch von Schnee weitgehend absorbiert. Bei bedecktem Himmel und hoher Luftfeuchtigkeit erreicht auf Grund des Wasserdampfes in der Atmosphäre mehr langwellige Strahlung die Oberfläche, während die kurzwellige Einstrahlung durch eine Wolkendecke in den meisten Fällen vermindert wird. Je nach Art der Wolken und dem Bedeckungsgrad ändert sich deren Einfluss auf die kurzwellige Bilanz. In seltenen Fällen kann die solare Einstrahlung durch Reflexionseffekte an Wolken kurzfristig auch zunehmen. Zusätzlich beeinflussen geometrische Effekte, wie die Abschattung der Sonne durch das Gelände und die geographische Breite, die Strahlungsbilanz.

### 3. Ergebnisse

#### Temperaturen im Äußeren Hochebenkar 2012

Mit einer Mitteltemperatur von 9 °C war der August im Jahr 2012 der wärmste Monat (Tab. 1). Die Jahresmitteltemperatur betrug -0,6 °C. Das Jahresmittel der Bodentemperatur in 15 cm Tiefe war mit 0,7 °C hingegen leicht positiv. Die Bodentemperatur zeigt bis in den Juni keinen Tagesgang (Abb. 4), was auf das Vorhandensein einer isolierenden Schneedecke hinweist. Nach der Schneeschmelze nähert sich die Bodentemperatur der mittleren Lufttemperatur an, wobei die Tagesamplituden der Bodentemperatur deutlich geringer sind. Die Tagesextremwerte der Bodentemperatur treten gegenüber jenen der Lufttemperatur zeitlich verzögert auf (Abb. 4). Von Januar bis April liegt die Bodentemperatur trotz Schneedecke deutlich unter dem Gefrierpunkt (Tab. 1), was auf Permafrost hindeuten kann (Haeberli 1973). Bis in den August hinein sind die Schwankungen der Bodentemperatur gegenüber der Lufttemperatur gedämpft.

Tab. 1: Monatsmittel der Luft- und Bodentemperatur in °C an der automatischen Wetterstation im Äußeren Hochebenkar für das Jahr 2012. Die Messung der Bodentemperatur war ab September fehlerhaft.

2012	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
T Luft	-8,6	-12,3	-3,7	-3,2	1,3	6,6	7,6	9,0	4,8	1,5	-1,8	-8,4
T Boden	-5,7	-5,3	-2,6	-1,2	0,4	5,5	10,4	11,4	-	-	-	-

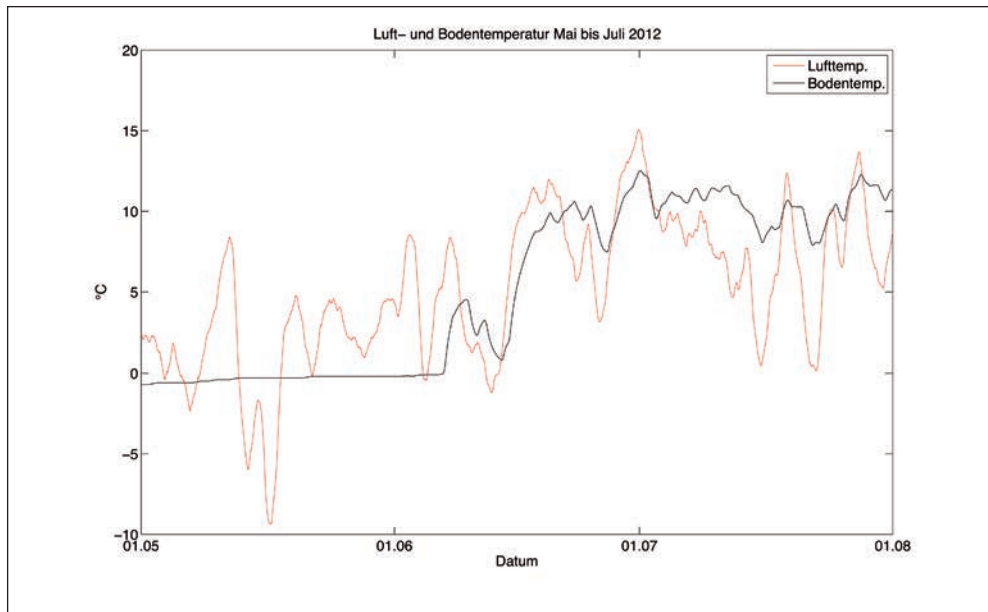


Abb. 4: Die Luft- und Bodentemperatur an der automatischen Wetterstation im Äußeren Hochebenkar von Mai bis Ende Juli 2012 als gleitendes Mittel über 24 Stunden. Bis zur Schneeschmelze zeigt die Bodentemperatur nur geringe Schwankungen. Danach steigt die Bodentemperatur und erreicht ähnliche Werte wie die Lufttemperatur, allerdings mit geringeren Tagesamplituden und einem zeitlichen Versatz.

## Strahlung

Exemplarisch werden die Strahlungsparameter (Abb. 5a), sowie die relative Feuchte und die Luft- und Bodentemperatur (Abb. 6a) während 5 Sommertagen (5. bis einschließlich 9. August 2012) betrachtet. Die kurzwellige Einstrahlung erlaubt qualitative Rückschlüsse auf den Bewölkungszustand. Der Verlauf der Einstrahlung am 5., 6. und 9. August legt nahe, dass der Himmel an diesen Tagen teilweise bewölkt war, wobei die Einstrahlung besonders am Nachmittag stark abfiel, was auf im Tagesverlauf zunehmende Bewölkung hinweist. Die Bilder der automatischen Kamera

am Gegenhang (Abb. 7) zeigen, dass 5. und 6. August von eher konvektiver Bewölkung geprägt waren, wobei am 6. nachmittags auch etwas Regen fiel. Am 9. August war die Bewölkung schichtförmig, was auf Fronteinfluss hindeuten kann. Der 7. August hingegen war weitgehend heiter oder wolkenlos und der Tagesgang der eintreffenden kurzwelligen Strahlung verlief ungestört. Der 8. August zeigte maximale Einstrahlungswerte über jenen des weitgehend wolkenlosen Vortages. Das ist darauf zurückzuführen, dass einzelne, kleine Wolken sehr viel Sonnenstrahlung reflektieren können, was sich in der Gesamteinstrahlung positiv niederschlägt (Oerlemans 2010).



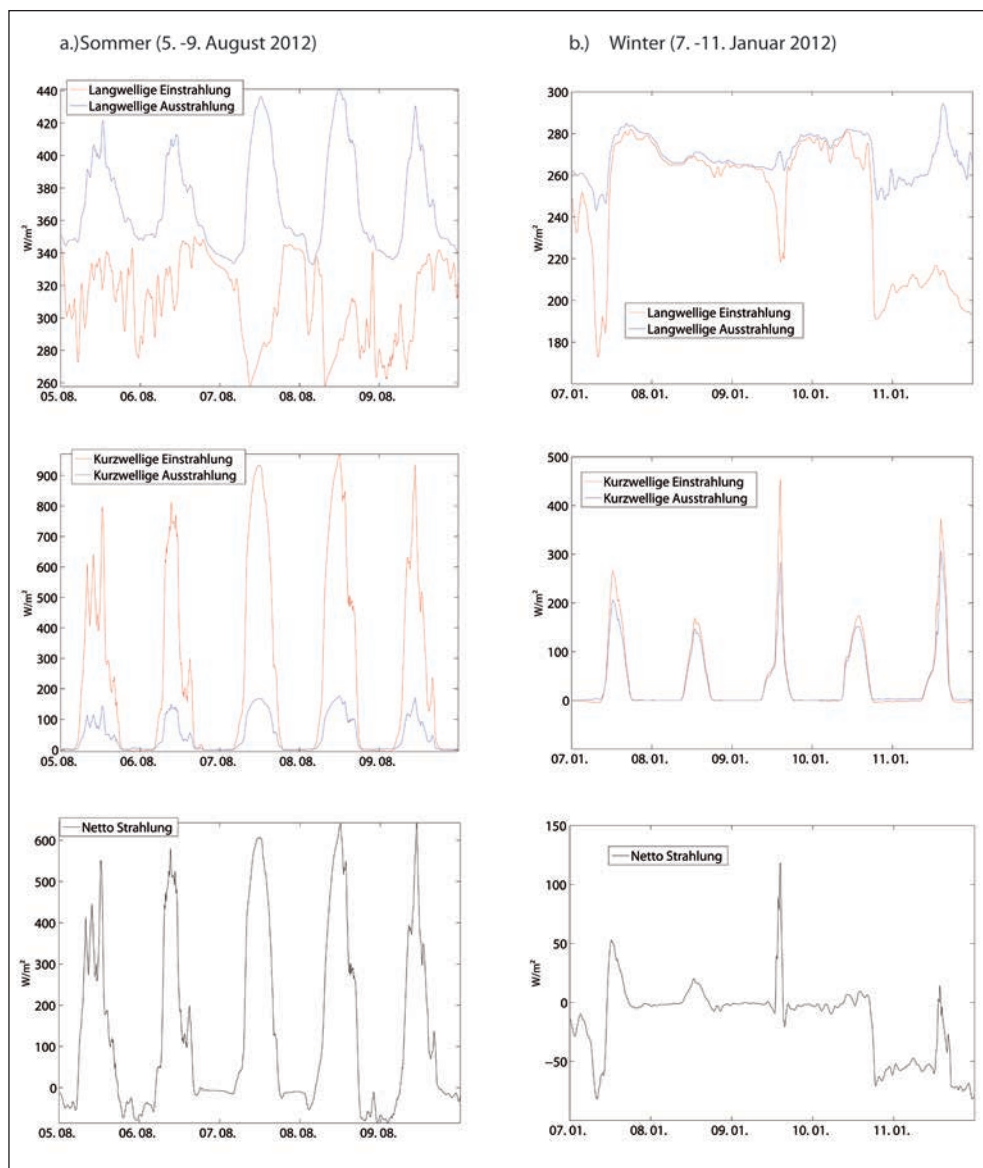


Abb. 5: Die langwelligen und kurzwelligen Strahlungsparameter in Watt pro Quadratmeter ( $W/m^2$ ), sowie die Gesamtstrahlungsbilanz am Standort Äußeres Hochebenkar an jeweils fünf exemplarisch ausgewählten Tagen im Sommer (5.-9. August, Abb. 5a) und Winter (7.-11. Januar, Abb. 5b) 2012

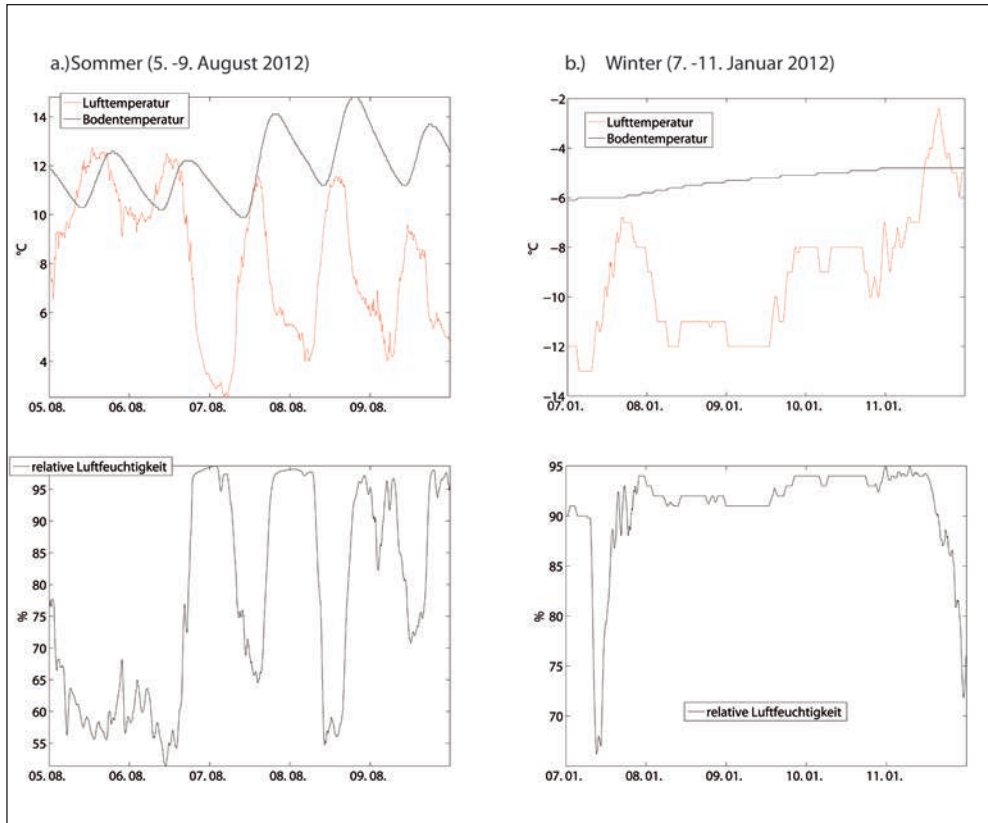


Abb. 6: Relative Luftfeuchtigkeit, sowie Luft- und Bodentemperatur an den in Abb. 5 dargestellten Sommer- (a) und Wintertagen (b)

Die reflektierte kurzwellige Strahlung betrug knapp 20 % der eintreffenden Strahlung. Das entspricht einer Albedo von 0,2.

Die Schwankungen der eintreffenden langwelligen Strahlung sind weit geringer als jene der solaren Einstrahlung und hängen maßgeblich von Wolken und Wasserdampf in der Atmosphäre ab. Dementsprechend korrelieren Extreme der relativen Feuchte mit Extremen der langwelligen Einstrahlung. Variationen der langwelligen Ausstrahlung sind in erster Linie durch Variationen der Bodentemperatur be-

dingt. Es ist zu erkennen, dass die langwellige Ausstrahlung am 7. und 8. August mit steigender Bodentemperatur zunahm. Die Lufttemperatur nahm im Gegensatz zur Bodentemperatur an diesen Tagen ab. Die Luft zwischen dem Messgerät und dem Boden beeinflusst die Messungen, daher sieht man in der langwelligen Ausstrahlung auch eine Korrelation mit der Lufttemperatur. Die Summe der Strahlungsflüsse ist tagsüber durch die kurzwellige Bilanz geprägt, während in der Nacht die langwellige Strahlung ausschlaggebend ist.

Die Lufttemperatur (Abb. 6a) zeigte an allen Tagen einen deutlichen, einstrahlungsbedingten Tagesgang, wobei an den ersten beiden abgebildeten Tagen die nächtliche Auskühlung durch Bewölkung verringert wurde und die Tagesamplitude entsprechend gedämpft war. In der zweiten Tageshälfte des 6. August sank

die Temperatur deutlich, während die Luftfeuchtigkeit stark anstieg (Regen). Der darauffolgende Tag verlief sehr sonnig (Abb. 7).

Abb. 5b und 6b zeigen analog zu Abb. 5a und 6a fünf wechselnd bewölkte Wintertage (7. bis einschließlich 10. Januar 2012). Da der Boden schneebedeckt war, ist der Anteil der reflektier-

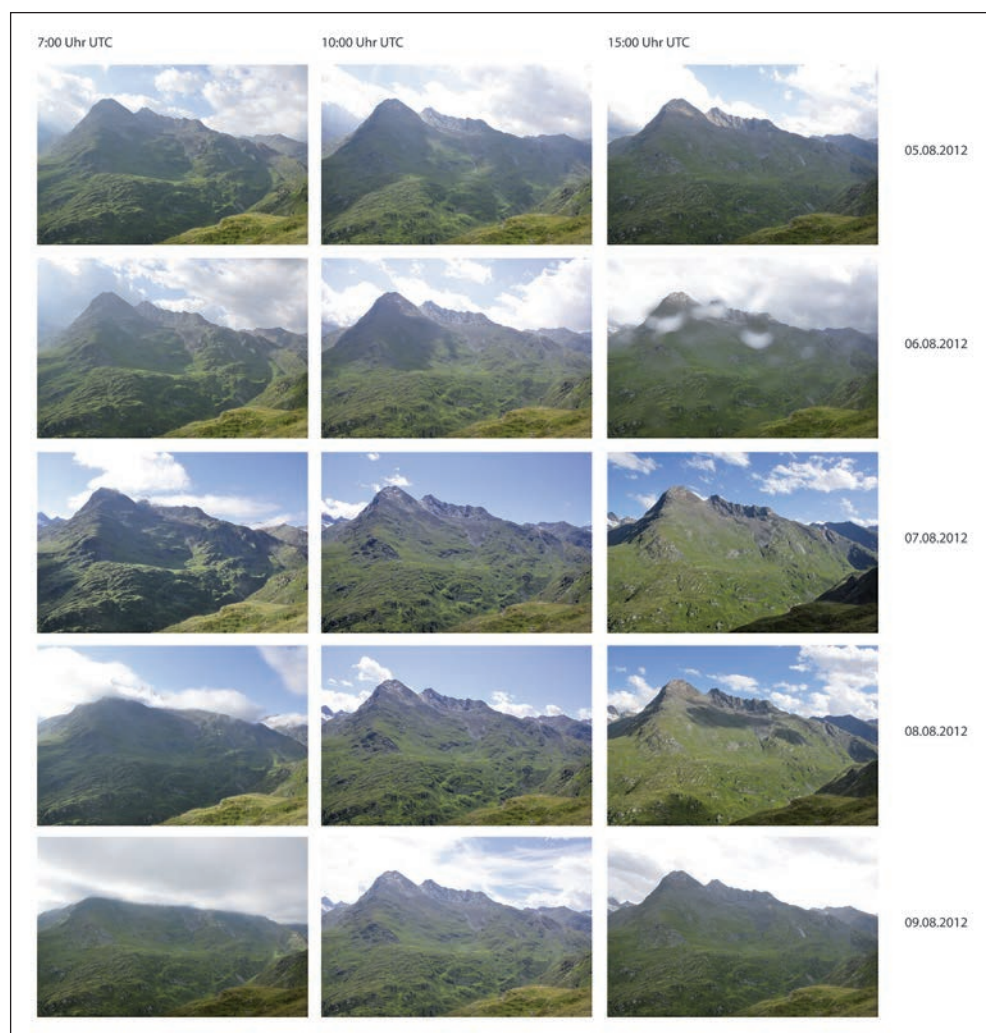


Abb. 7: Bilder der automatischen Kamera mit Blick auf das Äußere Hochebenkar an den in Abb. 5 und 6 gezeigten Sommertagen. Pro Tag wurden drei Bilder aufgenommen, jeweils um 7, 10 und 15 Uhr UTC.

ten kurzwelliger Strahlung wesentlich höher als im Sommer. Dabei fällt auf, dass die Albedo an bewölkten Tagen höher ist, als an Tagen mit weitgehend klarem Himmel. So lag die Albedo am weniger bewölkten 9. Januar bei rund 0,6, während sie am Tag darauf bei bedecktem Himmel auf über 0,8 anstieg. Der Anstieg der Albedo war durch Neuschnee bedingt (Klima-beobachtung der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik für den Standort Obergurgl: 3 cm Neuschnee am 9.1.2012 bzw. 8 cm Neuschnee am 10.1.2012). Die Strahlungseigenschaften von Wolken können einen ähnlichen Effekt hervorrufen: Wolken wirken wie eine Art Filter für Strahlung im nahen Infrarotbereich (ca. 0,8 bis 3 Mikrometer). Schnee kann Strahlung in diesen Wellenlängen nicht so stark reflektieren wie Strahlung im sichtbaren Bereich (Wiscombe & Warren 1980, Kuipers Munneke et al. 2011). Wenn die schlechter reflektierbare Strahlung wolkenbedingt fehlt, steigt also die Albedo über den gesamten Wellenlängenbereich.

Ist der Himmel im Winter bedeckt, ist die langwellige Strahlungsbilanz nahe Null. Sobald es jedoch aufklart, sinkt die eintreffende langwellige Strahlung rapide, während die Ausstrahlung der Schneeoberfläche unverändert weitergeht. Dadurch wird die langwellige Strahlungsbilanz deutlich negativ. Die Gesamt-Strahlungsbilanz aus langwelliger und kurzwelliger Strahlung ist im Winter bei Schneebedeckung vor allem durch die langwellige Komponente dominiert, da die kurzwellige Bilanz durch die hohe Albedo stets relativ ausgeglichen ist. Der positive Ausschlag am 9. Januar korreliert mit dem Maximum der

kurzwelligen, solaren Strahlung, während die meisten anderen Extreme mit Schwankungen der langwelligen Strahlung zusammenhängen. Auch der Strahlungs-Jahresgang von 2012 macht deutlich, wie sehr die Schneedecke die Strahlungsbilanz beeinflusst. Ist der Boden im Winter schneebedeckt, wird die einfallende kurzwellige Strahlung (Abb. 8) größtenteils reflektiert (die Ausstrahlung erreicht nur wenig geringere Werte als die Einstrahlung). Im Frühjahr sinkt die Albedo auf Grund von zunehmender Verschmutzung des Schnees und es wird mehr Sonnenstrahlung absorbiert (Kurve der Ausstrahlung im Jahresgang entspricht nicht mehr dem Verlauf der Einstrahlung, Abb. 8). Während der Boden immer mehr ausapert, fällt der Anteil der reflektierten Strahlung rapide bis er bei einem Wert wenig über Null stagniert, bis wiederum im Herbst erneut Schnee fällt. Die solare Einstrahlung nimmt zwischen Winter- und Sommersonnenwende zu und fällt danach wieder bis zur nächsten Wintersonnenwende. Die Kurve ist nicht symmetrisch: Während die Einstrahlung im Frühjahr vergleichsweise schnell zunimmt, fällt sie im Herbst durch Abschattungseffekte wesentlich gemäßigter ab. Die langwellige Einstrahlung und Abstrahlung erreichen ihr Maximum im August, wenn auch Lufttemperatur, -feuchte und Bodentemperatur am höchsten sind (Abb. 4, Abb. 9). Die Gesamtstrahlungsbilanz ist durch die langwellige Bilanz dominiert, solange der Boden schneebedeckt ist (Abb. 10). Zu allen anderen Zeiten überwiegt der Einfluss der kurzwelligen Strahlung. Im Januar, Februar, März, November und Dezember ist die Strahlungsbilanz nega-

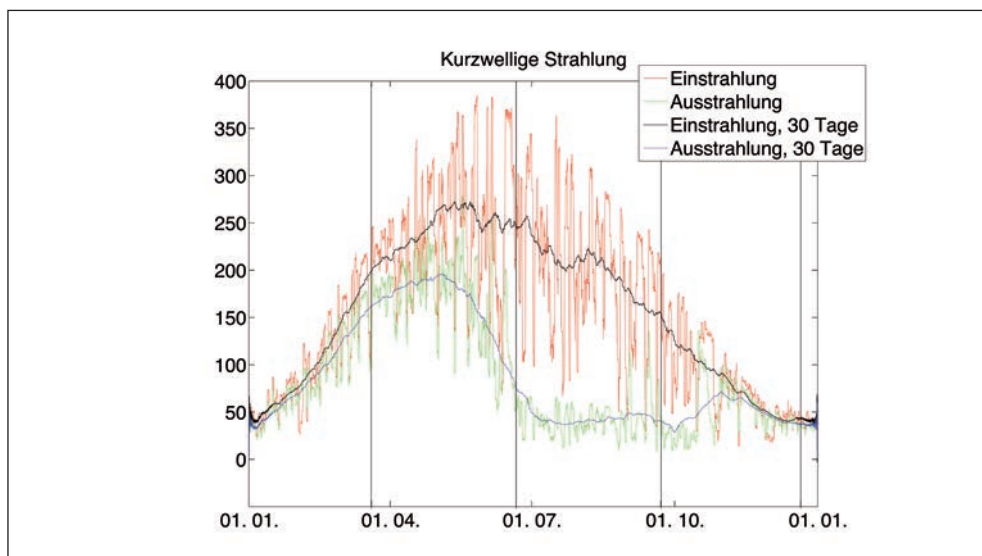


Abb. 8: Die kurzwelligen Strahlungsparameter in  $\text{W}/\text{m}^2$  im Jahr 2012 an der automatischen Wetterstation im Äußeren Hochebenkar. Rot: Kurzwellige Einstrahlung; Grün: Kurzwellige Ausstrahlung; Schwarz: Kurzwellige Einstrahlung (gleitendes Mittel über 30 Tage); Blau: Kurzwellige Ausstrahlung (gleitendes Mittel über 30 Tage). Sommer- und Wintersonnenwende, sowie das Datum der Tag- und Nachtgleiche (Equinox) sind schwarz eingezeichnet.

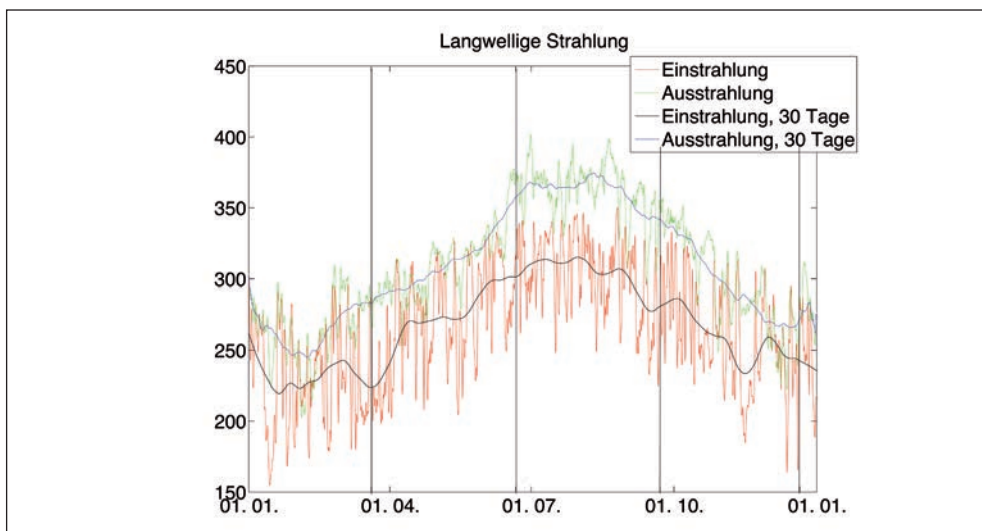


Abb. 9: Die langwelligen Strahlungsparameter in  $\text{W}/\text{m}^2$  im Jahr 2012 an der automatischen Wetterstation im Äußeren Hochebenkar. Rot: Langwellige Einstrahlung; Grün: Langwellige Ausstrahlung; Schwarz: Langwellige Einstrahlung (gleitendes Mittel über 30 Tage); Blau: Langwellige Ausstrahlung (gleitendes Mittel über 30 Tage)

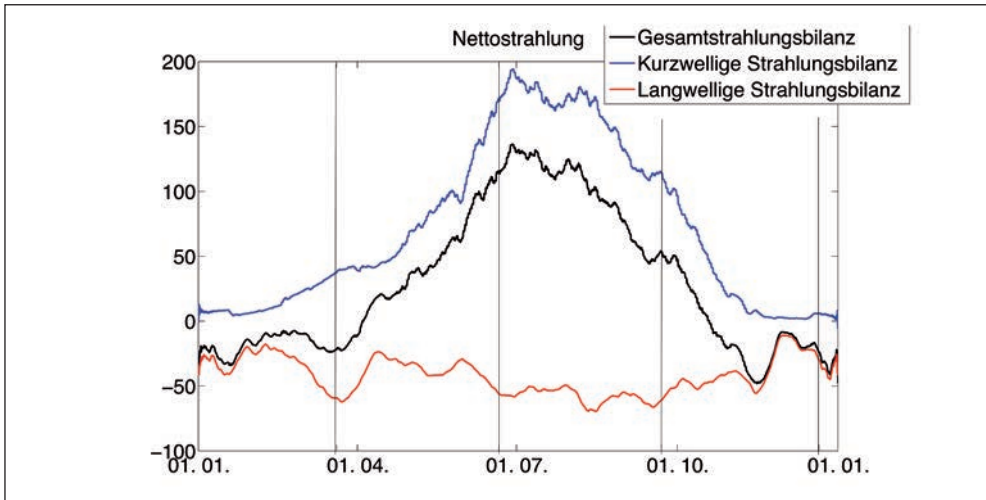


Abb. 10: Die langwellige (rot), kurzwellige (blau) und Gesamtstrahlungsbilanz (schwarz) in  $W/m^2$  im Jahr 2012 an der automatischen Wetterstation im Äußeren Hochebenkar, jeweils als gleitendes Mittel über 30 Tage). Sommer- und Wintersonnenwende, sowie das Datum der Tag- und Nachtgleiche sind schwarz eingezeichnet.

tiv. Tab. 2 zeigt die Monatsmittel der kurz- und langwelligen Strahlung 2012, sowie die Nettostrahlung in  $W/m^2$ .

### Geometrische Effekte

Die Abschattungseffekte der umliegenden Berge wirken sich im Winter stärker aus, da die Sonne tiefer steht. Am Tag der Wintersonnenwende liegt die Einstrahlung fast auf der gesamten Fläche des Blockgletschers lediglich zwischen 100 und 300 Wattstunden pro  $m^2$  [ $Wh/m^2$ ], da ein Großteil des Blockgletschers zu dieser Zeit den ganzen Tag im Schatten des Hochebenkamms liegt. Kleinräumige Geländeformationen an der Blockgletscheroberfläche fallen kaum ins Gewicht. Lediglich ein kleiner Bereich im unteren Teil des Block-

gletschers erreicht höhere Werte, da die Sonne nachmittags für eine Weile in der Hauptachse des Tals steht und nicht durch den Kamm verdeckt wird (Abb. 11).

Im Sommer spielen kleinräumige Variationen in der Exposition, etwa an Spalten und Furchen in der Oberfläche des Blockgletschers, eine deutlichere Rolle. Die Sonne steht so hoch, dass sie nur in den Morgenstunden durch den Hochebenkamm verdeckt wird. Fläche und in südliche Richtungen geneigte Geländeformationen erhalten während fast des gesamten Tages direkte solare Strahlung. Nach Norden geneigte Bereiche hingegen erhalten deutlich weniger Strahlung. Besonders deutlich ist dieser Effekt am nördlichen Rand des Blockgletschers zu sehen, wo die Einstrahlung an der relativ scharfen Kante auf wenigen Metern um über  $2000 Wh/m^2$  abfällt (Abb. 12).

Tab. 2: Monatsmittel der unterschiedlichen Strahlungskomponenten an der automatischen Wetterstation im Äußeren Hochebenkar in  $W/m^2$  für das Jahr 2012. KWein: eintreffende kurzwellige Strahlung. KWaus: ausgehende (reflektierte) kurzwellige Strahlung. KW: Nettobilanz der kurzwelligen Strahlung. LWein: eintreffende langwellige Strahlung. LWaus: ausgehende langwellige Strahlung. LW: Nettobilanz der langwelligen Strahlung. Gesamt: Gesamtsumme der kurz- und langwelligen Bilanz.

Monat	KWein	KWaus	KW	LWein	LWaus	LW	Gesamt
Januar	58	50	8	229	264	-35	-27
Februar	103	92	11	233	252	-19	-8
März	192	157	35	231	284	-53	-18
April	232	187	45	264	296	-32	13
Mai	265	178	87	276	314	-38	49
Juni	251	94	157	301	350	-49	108
Juli	208	38	170	313	364	-52	118
August	205	41	164	306	370	-64	100
September	157	45	111	285	343	-58	53
Oktober	103	49	54	272	317	-45	9
November	68	61	7	247	288	-42	-35
Dezember	42	39	3	244	266	-22	-19
	Kurzwellige Strahlungsbilanz 852			Langwellige Strahlungsbilanz -509			Gesamtstrahlungsbilanz 343

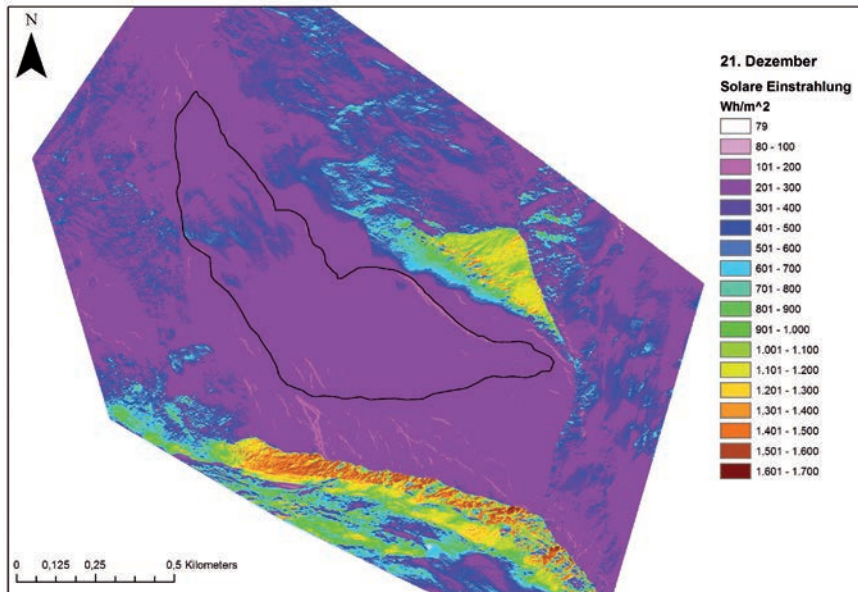


Abb. 11: Solare Einstrahlung im Äußeren Hochebenkar am 21. Dezember 2012 (Wintersonnenwende) in Wh/m<sup>2</sup>. Der Umriss des Blockgletschers ist in schwarz eingezeichnet.

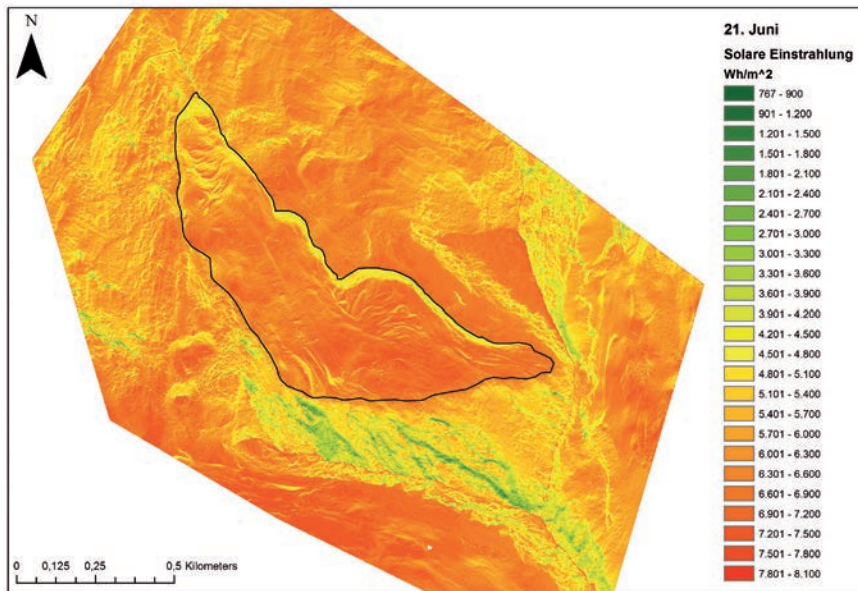


Abb. 12: Solare Einstrahlung im Äußeren Hochebenkar am 21. Juni 2012 (Sommersonnenwende) in Wh/m<sup>2</sup>. Der Umriss des Blockgletschers ist in schwarz eingezeichnet.



## 4. Diskussion

---

Die Strahlungsbilanz bildet in der Kryosphäre den dominanten Teil der Energiebilanz und ist ausschlaggebend für den Schmelzprozess. Verglichen mit Gletschern ähnlicher Exposition und Größe reicht der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar in deutlich tiefere Höhenlagen hinab (Lambrecht & Kuhn 2007; Abermann et al. 2011, 2013) und weist zudem beachtliche Bewegungsausmaße auf (Kapitel 7 in diesem Buch). Grund dafür ist die Tatsache, dass der eisreiche Permafrostkern des Blockgletschers von einer dicken Schuttschicht bedeckt ist, die das Abschmelzen des Eises durch solare Einstrahlung in den Sommermonaten stark verringert.

Messungen am Murtèl Blockgletscher in der Schweiz legen nahe, dass auch laterale, advective Energieflüsse innerhalb der Schuttbedeckung für die Energiebilanz eines Blockgletschers eine Rolle spielen, da unter Umständen Luft in der durchlässigen Schuttschicht zirkulieren kann und so die Temperatur beeinflusst (Mittaz et al. 2000). Die Strahlungsflüsse sind die dominante Komponente der Energiebilanz und machen gegenüber dem Bodewärmestrom und den turbulenten Flüssen den größten Anteil aus (Mittaz et al. 2000, Hoelzle et al. 2001). Auch bei Gletschern spielt die Strahlung in Abhängigkeit von der Höhenlage gegenüber den anderen Komponenten der Energiebilanz eine übergeordnete Rolle. Am Hintereisferner (Höhenbereich ca. 3.700–2.400 m) wird die im Sommer für das Schmelzen verfügbare Energie zu 90 % aus

Strahlung gewonnen (Greuell & Oerlemans 1989).

Der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar erhält allerdings durch seine schattige Lage wenig Energie durch direkte Sonneneinstrahlung. Besonders in den Wintermonaten kann die tief stehende Sonne kaum über den Hochebenkamm steigen.

Weitere Untersuchungen sind nötig, um zu erfassen, wie sich die einzelnen Komponenten der Energiebilanz auf den eisreichen Permafrostkern des Blockgletschers auswirken und welchen Einfluss Änderungen im Energie- und Strahlungshaushalt auf die Dynamik des Blockgletschers haben. Wünschenswert wären geophysikalische Messungen und Bohrungen, die Aufschluss über die inneren Strukturen des Blockgletschers geben können. Ebenso scheint es sehr erstrebenswert, dass regelmäßige, bestehende Messungen weitergeführt werden.

Der Standort Äußeres Hochebenkar bietet dank der langjährigen Messreihen zur Bewegung des Blockgletschers und der Fülle an anderen existierenden Daten eine wertvolle Möglichkeit, um den Einfluss klimatischer Veränderungen auf das Permafrostphänomen Blockgletscher zu untersuchen.

## Literatur

---

- Abermann, J., Kuhn, M. & Fischer, A. (2011) Climatic controls of glacier distribution and glacier changes in Austria. *Annals of Glaciology* 52 (59): 83-90.

- Abermann, J., Kuhn, M., Lambrecht, A. & Hartl, L. (2013) Gletscher in Tirol, ihre Verteilung und jüngsten Veränderungen. In: Koch, E. & Erschbamer, B. (eds), Klima, Wetter, Gletscher im Wandel. Alpine Forschungsstelle Obergurgl 3, Innsbruck university press, Innsbruck, 49-67.
- Baldrige, A. M., Hook, S.J., Grove, C.I. & Rivera, G. (2009) The ASTER Spectral Library Version 2.0. Remote Sensing of Environment 113: 711-715.
- Greuell, W. & Oerlemans, J. (1989) Energy balance calculations on and near Hintereisferner (Austria) and an estimate of the effect of greenhouse warming on ablation. Glacier Fluctuations and Climatic Change, Glaciology and Quaternary Geology 6: 305-323.
- Haerberli, W. (1973) Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 9: 221-227.
- Hartl, L., Fischer, A. & Klug, C. (2014) Combining ground penetrating radar and numerical modelling to estimate thickness and volume of Hochebenkar rock glacier. Unveröff. Manuskript.
- Hoelzle, M., Mittaz, C., Etzelmüller, B. & Haerberli, W. (2001) Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: an overview of current developments. Permafrost and Periglacial Processes 12: 53-68.
- Kraus, H. (2000) Die Atmosphäre der Erde. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Kuipers Munneke, P., Reijmer, C.H. & van den Broeke, M.R. (2011) Assessing the retrieval of cloud properties from radiation measurements over snow and ice. International Journal of Climatology 31(5): 756-769.
- Lambrecht, A. & Kuhn, M. (2007) Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. Annals of Glaciology 46: 177-184.
- Mihalcea, C., Mayer, C., Diolaiuti, G., Lambrecht, A., Smiraglia, C. & Tartari, G. (2006) Ice ablation and meteorological conditions on the debris covered area of Baltoro glacier, Karakoram, Pakistan. Annals of Glaciology 43 (1): 292-300.
- Mittaz, C., Hoelzle, M. & Haerberli, W. (2000) First results and interpretation of energy-flux measurements over Alpine permafrost. Annals of Glaciology 31: 275-280.
- Nicholson, L. & Benn, D.I. (2006) Calculating ice melt beneath a debris layer using meteorological data. Journal of Glaciology 52(178): 463-470.
- Oerlemans, J. (2001) Glaciers and Climate Change. Swets and Zeitlinger BV, Lisse, The Netherlands.
- Oerlemans, J. (2010) The microclimate of valley glaciers. Utrecht Publishing & Archiving Services, Universiteitsbibliotheek Utrecht, Utrecht.
- Patzelt, G. (ed) (1987) MaB-Projekt Obergurgl. Veröffentlichungen des Österreichischen MaB-Programms 10. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.

- Rott, H. (1979) Vergleichende Untersuchungen der Energiebilanz im Hochgebirge. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A 28: 211-232.
- Staudinger, M. (1978) Die Strahlungsbilanz zweier hochalpiner Stationen während der Vegetationsperiode. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt Zürich 40: 236-239.
- Staudinger, M. (1987) Verdunstungsbestimmung während der Vegetationsperiode durch Energiebilanzmessungen In: Patzelt, G. (Hg), MaB Projekt Oberurgl. Veröffentlichungen des Österreichischen MaB-Programms, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, 161-172.
- Wiscombe, W.J. & Warren, S.G. (1980) A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow. Journal of the Atmospheric Sciences 37(12): 2712-2733.

## Verzeichnis der Autorinnen

---

Lea Hartl  
Universität Innsbruck  
Institut für Geographie  
Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich  
Lea.Hartl@student.uibk.ac.at

Österreichische Akademie der Wissenschaften  
Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung  
Technikerstr. 25, 6020 Innsbruck, Österreich

Andrea Fischer  
Österreichische Akademie der Wissenschaften  
Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung  
Technikerstr. 25, 6020 Innsbruck, Österreich  
Andrea.Fischer@oeaw.ac.at

Universität Innsbruck  
Institut für Geographie  
Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich