

Kapitel 7 | Das Mikroklima waldfreier Standorte in der subalpinen, alpinen und subnivalen Stufe in Obergurgl

Lea Hartl, Rüdiger Kaufmann, Nikolaus Schallhart, Brigitta Erschbamer

Zusammenfassung

Im Juli 2000 wurden im Rahmen des ökologischen Langzeit-Messprogramms in Obergurgl neun waldfreie Standorte von der subalpinen (1964 m Meereshöhe) über die alpine bis zur subnivalen Stufe (2793 m Meereshöhe) ausgewählt und mit Datenloggern ausgestattet. Gemessen wurden Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in 2 m Höhe, sowie Bodentemperatur und -feuchte in 10 cm Tiefe. Das absolute Minimum der Lufttemperatur betrug $-30,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ am höchstgelegenen Standort. Das absolute Minimum der Bodentemperatur wurde im Bereich der Gurgler Heide auf 2255 m Meereshöhe gemessen ($-11,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dieser Standort wies auch die kürzeste Schneedeckendauer auf. Während der 11-jährigen Messperiode wurden die neun Standorte in Obergurgl signifikant früher schneefrei; sie aperten im Schnitt um 1,2 Tage pro Jahr früher aus.

Abstract

In July 2000, nine treeless monitoring sites were established and equipped with data loggers in the vicinity of Obergurgl from the subalpine zone (1964 m a.s.l.) to the alpine and the subnival zone (2793 m a.s.l.) as part of the ecological long-term monitoring project. Measured parameters were air temperature and relative air humidity 2 m above the ground as well as soil temperature and –moisture in 10 cm depth. The absolute minimum of the air temperature amounted to $-30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ at the highest altitude. The absolute minimum of the soil temperature was monitored at the Gurgler Heide at 2255 m a.s.l. ($-11.2\text{ }^{\circ}\text{C}$). The lowest number of days with snow cover was also found at this site. During the timeframe of 11 years the snow melt date in spring has significantly shifted forwards by approximately 1.2 days per year.

Einleitung

Die Atmosphäre der Erde ist ein hochkomplexes, dynamisches System, in dem unzählige verschiedene Prozesse gleichzeitig stattfinden. Diese Prozesse unterscheiden sich in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausdehnung sehr stark, so reicht etwa das Spektrum der atmosphärischen Raumskalen von millimetergroßen Dissipationswirbeln bis hin zu Phänomenen von der Größenordnung des Erdumfangs (Kuttler 2009). Gebräuchlich ist eine Untergliederung in makro-, meso- und mikroskalige Prozesse, wobei sich die Mikro-Skala auf eine räumliche Ausdehnung von wenigen Millimetern bis zu circa 2 Kilometern bezieht (Kraus 2004). In der Ökologie spricht man von „Mikroklima“, wenn es um Messungen von der Bodenoberfläche bis zu einer Höhe von 2 Metern geht (Cernusca 1976). Im Gebirge schwanken die klimatologischen Bedingungen aufgrund topographischer Gegebenheiten kleinräumig oft sehr stark (Fischer 2010, Scherrer & Körner 2010), daher ist hier ein gutes Verständnis des Mikroklimas für viele Forschungsbereiche von besonders großer Bedeutung. So ist beispielsweise bei Sukzessionsstudien in Gletschervorfeldern und generell bei ökologischen Untersuchungen im Gebirge (Erschbamer 2001, Kaufmann 2001, Koch & Erschbamer 2010, Erschbamer & Mayer 2011) eine möglichst genaue Kenntnis der lokal gegebenen klimatologischen Parameter essentiell. Insgesamt bestimmen Exposition, Hangneigung

und Horizontabschattung die Lufttemperatur, die Schneeverteilung und damit die Vegetation. Letztere Faktoren wiederum verändern die bodennahen Feuchtigkeitsverhältnisse und die Albedo der Oberfläche. So ergibt sich ein komplexes meteorologisches System mit vielen unterschiedlichen Aspekten.

In Obergurgl betreibt die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) seit 1953 im Bereich des Universitätszentrums Obergurgl eine Klimastation¹, die eine wertvolle Datenbasis für verschiedene wissenschaftliche Studien liefert. Seit 1999 wird hier ein teilautomatisches Wettererfassungssystem (TAWES) betrieben. Die Daten dieser Station werden im Kapitel 1 von Kuhn et al. in diesem Band vorgestellt.

In den 1950er Jahren führten Aulitzky und Turner im Raum Obergurgl zahlreiche mikroklimatische Untersuchungen durch (Aulitzky 1954, 1955a, 1955b; Turner 1958). Auch im Zuge von glaziologischen Studien wurden Überlegungen zum Kleinklima angestellt (Hoinkes & Rudolph 1961). Die Bedeutung der Bodentemperatur für das Pflanzenwachstum erkannte bereits Aulitzky (1961). Anhand von Bodentemperaturmessungen über und unter der Waldgrenze zeigte er „kleinstandörtliche“ Unterschiede und die Abhängigkeit von der Schneebedeckung auf (Aulitzky 1961, 1962a, 1962b). Im Rahmen des Man and Biosphere-Projekts (MAB; Moser 1975, Patzelt 1987) wurden in den 1970er Jahren detaillierte Untersuchungen der Energiebilanz auf der Hohen Mut und in

1 Die Klimastation der ZAMG wurde von 1953 bis 2011 von der Alpinen Forschungsstelle Obergurgl betreut.

einer Wiese bei Obergurgl durchgeführt (Rott 1979, 1987; Staudinger 1987). Dieses Messprogramm endete jedoch mit der Beendigung des MAB-Projekts.

Die Idee eines ökologischen Langzeit-Messprogrammes in Obergurgl wurde ab Mitte der 1990er Jahren vorangetrieben und es entstanden Mikroklimastationen auf der 1923er und 1971er Moräne des Rotmoosferner-Gletschervorfeldes. Obergurgl wurde als einer der alpinen Standorte für das internationale Long-Term Ecosystem Research Programme (LTER, http://131.130.57.239/LTER_cms/index.php) nominiert. Das Gebiet zählt heute zur österreichischen LTER/LTSER-Plattform Tyrolean Alps (LTSER = Long-Term Socio-economic and Ecosystem Research).

Im Jahr 2000 bot das ökologische Langzeit-Monitoring-Projekt in Obergurgl (Kaufmann 2005) die Möglichkeit, das Messprogramm auszubauen. Von der subalpinen bis zur subnivalen Stufe wurden repräsentative, baumfreie Pflanzenbestände ausgewählt, in denen Vegetation und Fauna über längere Zeiträume hinweg beobachtet werden sollten. Ziel war es, in den ausgewählten Flächen kurzfristige Fluktuationen, aber auch tiefer greifende ökologische Veränderungen als Folge von Nutzungs- und Klimaänderung aufzudecken (Kaufmann 2005, Mayer et al. 2009). An allen Monitoring-Standorten wurden Datenlogger installiert, um Luft- und Bodentemperaturen sowie Luft- und Bodenfeuchtigkeit zu messen. Damit sollte eine mikroklimatische Charakterisierung der Standorte über die Jahre hinweg möglich werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Mikroklima-Daten dieser Messreihen zu präsentieren und Unterschiede zwischen den Standorten aufzuzeigen. Anhand der Bodentemperaturen wurden Einschnei- und Ausaperungsdatum und in der Folge die Anzahl der Tage mit geschlossener Schneedecke an den einzelnen Standorten ermittelt. Auf Grund des Höhengradienten und der unterschiedlichen Vegetation an den einzelnen Standorten wurden große Unterschiede erwartet.

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet mit insgesamt neun Standorten erstreckt sich von 1964 m bis 2793 m Meereshöhe (Abb. 1, Tab. 1). Die Standorte umfassen die für das innere Ötztal typischen Höhenstufen von der subalpinen zur alpinen und subnivalen Stufe. Die potentielle Waldgrenze ist in Obergurgl bei 2300 m Meereshöhe anzusetzen, die aktuelle Waldgrenze liegt bei rund 1900 - 2200 m. Es wurden ausschließlich aktuell waldfreie Flächen ausgewählt. In der subalpinen Stufe wurden drei Standorte eingerichtet, die von einer zwergstrauchreichen Weideausschlussfläche (Standort 1, Wuchshöhe ca. 27 cm; Abb. 2) über eine ca. 15 cm hohe Zwergstrauchheide (Standort 2, Abb. 2) knapp oberhalb der Ortschaft Obergurgl zu einer niederliegenden, ca. 8 cm hohen Flechtenheide (Standort 3, Abb. 2) im Bereich der Gurgler Heide reichen. Die Standorte 4a (Abb. 2), 5, 7 und



Abb. 1: Schematische Karte des Untersuchungsgebietes und Position der Standorte 1-8

Tab. 1: Beschreibung der Standorte des ökologischen Monitoring-Projektes in Obergurgl, an denen seit dem Jahr 2000 mikroklimatische Messungen durchgeführt werden (Liste der dominanten Arten: Roland Mayer)

Standort	Lokalität	Meereshöhe	Exposition	Vegetationstyp	Dominante Arten
1	Obergurgl Weideausschluss	1.964 m	NNW	zwergras- reicher Rasen	<i>Agrostis capillaris</i> , <i>Nardus stricta</i> , <i>Anthoxanthum alpinum</i> , <i>Mutellina adonidifolia</i> , <i>Potentilla aurea</i>
2	Obergurgl Rumsoppen	2.039 m	NW	<i>Vaccinium</i> - Zwergras- heide	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>V. myrtillus</i> , <i>V. gaultherioides</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Calluna vulgaris</i>
3	Gurgler Heide	2.255 m	NW	<i>Loiseleuria</i> - Flechtenheide	<i>Loiseleuria procumbens</i> , <i>Cetraria islandica</i> , <i>Cladonia arbuscula</i> , <i>Vaccinium gaultherioides</i>
4a	Rotmoostal	2.295 m	SW	alpiner Rasen	<i>Nardus stricta</i> , <i>Carex sempervirens</i> , <i>Potentilla aurea</i> , <i>Homogyne alpina</i> , <i>Deschampsia cespitosa</i>
4b	Gletschervorfeld 1858er Moräne	2.291 m	SW	Initialrasen	<i>Kobresia myosuroides</i> , <i>Poa alpina</i> , <i>Trifolium pallescens</i> , <i>Anthyllis vulneraria ssp. alpicola</i>
5	Schönwieskopf	2.314 m	S	alpiner Rasen	<i>Nardus stricta</i> , <i>Mutellina adonidifolia</i> , <i>Scorzoneroide helvetica</i> , <i>Geum montanum</i>
6	Skipiste Festkogel	2.374 m	NW	Skipistenrasen	<i>Festuca rubra</i> agg., <i>Poa alpina</i> , <i>Polytrichum juniperinum</i> , <i>Gnaphalium supinum</i>
7	Hohe Mut Bärenhoppet	2.593 m	SW	alpiner Rasen	<i>Carex curvula</i> , <i>Avenula versicolor</i> , <i>Scorzoneroide helvetica</i> , <i>Phyteuma hemisphaericum</i>
8	Kirchenkogel	2.793 m	SSW	alpiner Rasen	<i>Festuca pumila</i> , <i>Kobresia myosuroides</i> , <i>Campanula scheuchzeri</i> , <i>Oxytropis lapponica</i>



Abb. 2: Fotos der Standorte: Standort 1, zwergstrauchreiche Weidefläche in Obergurgl (oben links); Standort 2, Zwergstrauchheide Rumsoppen (oben rechts); Standort 3, Gurgler Heide (Flechtenheide, unten links); Standort 4a, alpiner Rasen im Rotmoostal (unten rechts) (Fotos: Roland Mayer)

8 (Abb. 3) repräsentieren die alpinen Rasen, wobei die ersten beiden (4a – Rotmoostal, 5 – Schönwieskopf) noch im potentiellen Waldgrenzökoton liegen, aber in historischer Zeit nie bewaldet waren. Standort 7 verdeutlicht den typischen Krummseggenrasen der alpinen Stufe über saurem Ausgangsgestein und Standort 8 die Grenze der geschlossenen alpinen Rasen am Abhang des Kirchenkogels. Die Standorte 4b (1858er Moräne im Rotmoostal, Abb. 3) und 6 (Skipiste Festkogel, Abb. 3) können als Sonderstandorte gewertet werden, da beide noch keine geschlossene Vegetation aufweisen. Standort 4b unterliegt der Primärsukzession und weist bereits einen Initialrasen mit *Kobresia myosuroides* auf (Nagl

& Erschbamer 2010). Standort 6 ist eine kontinuierlich gestörte Skipistenfläche, die durch Pistenpräparierung, aber auch jährliche Ansaat und Düngung beeinflusst wird (Mayer & Erschbamer 2009).

Methodik

Zur Messung der Lufttemperatur und -feuchte wurden HOBO Pro Datenlogger (Onset Computer Corporation Inc., Pocasset, MA) mit Strahlungsschutz an 2 m hohen Masten platziert. Die Messgenauigkeit der Sensoren



Abb. 3: Fotos der Standorte: Standort 4b, Initialrasen auf der 1858er Moräne im Gletschervorfeld des Rotmoosferners (oben links); Standort 5, alpiner Rasen am Schönwieskopf (oben rechts); Standort 6, Skipiste Festkogel (unten links); Standort 7, Krummseggenrasen auf der Hohen Mut (unten rechts); Standort 8, Rasen am Abhang des Kirchenkogels (ganz unten links) (Fotos: Roland Mayer)

beträgt bei der Temperatur $\pm 0,25^\circ\text{C}$, bei der relativen Luftfeuchte $\pm 3\%$. Eichungen wurden nicht durchgeführt, da die Messgenauigkeit für das ökologische Langzeit-Monitoring als ausreichend betrachtet wurde. Am Standort 6 hängt der Datenlogger an einer Liftstütze, am Standort 7 an der Forscherhütte auf der Kuppe der Hohen Mut (Bärenhoppet). Der Sensor für Bodentemperatur und -feuchtigkeit befindet sich innerhalb des

Weidezaunes (Abb. 3). Für den Standort 4a fehlen die Lufttemperatur-Messungen, da der Mast mit dem Datenlogger bereits im ersten Jahr einer Lawine zum Opfer fiel. Für diesen Standort existieren daher nur die Bodentemperaturen. Als Ersatz wurde ab 2001 auf der 1858er Moräne des Rotmoosferner Gletschervorfeldes ein Mast für die Messungen in 2 m Höhe aufgestellt (Standort 4b, Abb. 3). Hier wurden erst ab 2010 Bodentemperaturen

gemessen, die auf Grund der geringen Zeitspanne in dieser Arbeit nicht wiedergegeben werden.

Für die Bodentemperatur und -feuchte kamen HOBO Datenlogger mit Temperaturfühlern und kapazitiven Feuchtesensoren (Eigenentwicklung, Cyclobios, Innsbruck) in 10 cm Bodentiefe zum Einsatz. Die Messgenauigkeit des Temperaturfühlers beträgt hier $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Das Messintervall betrug in der Luft 30 Minuten, im Boden während der ersten Hälfte der Messperiode 2 Stunden, dann 2,5 Stunden. Die Bodenwerte wurden während der Datenaufbereitung durch Spline-Interpolation einheitlich auf ein 2 Stunden-Intervall gebracht. Die Messreihen aller Logger wiesen auf Grund verschiedener technischer Probleme einige Datenlücken auf. Diese wurden im Folgenden nicht interpoliert, sondern von der Auswertung ausgeschlossen. Die Bodenfeuchte-Daten werden hier nicht dargestellt, da es sich um unkalibrierte Sensorsignale in Volt handelt, die zwar die Dynamik der Bodenfeuchte des Messpunktes wiedergeben, aber keinen Vergleich des Wassergehaltes zwischen den Standorten erlauben.

Für die Periode 2000 – 2011 wurden Monatsmittel und Monatsextremwerte der Luft- und Bodentemperatur, Mittelwerte der Luft- und Bodenfeuchte, sowie die durchschnittliche Anzahl frostfreier Tage pro Monat berechnet. Ein Tag wurde als frostfrei gewertet, wenn keine Werte unter 0°C gemessen wurden (= Thawing Degree Days, TDD; Molau & Mølgaard 1996).

Um mögliche standortspezifische Besonderheiten besser sichtbar zu machen, wurden

über die gesamte Messperiode gemittelte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Bodentemperatur berechnet. Die Temperaturabnahme mit der Höhe wurde für die Monatsmittelwerte der Lufttemperatur mit Hilfe von einfachen Regressionen im Programm EXCEL berechnet.

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit den Programmen SPSS 18.0 und STATISTICA 10. Mit Hilfe von Mittelwertvergleichen wurde getestet, ob sich die Standorte hinsichtlich Monatsmittel und Temperaturextreme unterscheiden. Verwendet wurden dazu die Werte für die Vegetationszeiten der Messperiode (Juni bis September).

Ausgehend von der Annahme, dass eine genügend mächtige Schneedecke den Boden so isoliert, dass sich eine weitgehend konstante Bodentemperatur im Bereich 0°C bis $-0,5^\circ\text{C}$ einstellt, wurde untersucht, an welchen Tagen an den einzelnen Standorten eine Isolation des Bodens durch Schneebedeckung vorliegt. Die Bodentemperatur wurde mit einem gleitenden, zentrierten Mittel über 24 Stunden geglättet. Änderte sich die geglättete Bodentemperatur innerhalb von drei Messintervallen (6 Stunden) nicht, wurde angenommen, dass Schnee den Einfluss der Lufttemperatur dämpfte und dass eine geschlossene Schneedecke vorlag. Um gemeinsame Trends über die Jahre für alle Standorte in den so ermittelten Schneebedeckungsdaten zu untersuchen, wurde eine Kovarianzanalyse für die Variablen Ausaperungsdatum und Schneedeckendauer durchgeführt. Als Kovariable wurden die Jahre (2001-2011) definiert, als zufällige Effekte die Standorte.

Ergebnisse

Lufttemperatur

Das insgesamt wärmste Jahr war 2008 mit einer Jahresmitteltemperatur von 1,2 °C (Mittel über alle Standorte), gefolgt von 2007 mit 1,1 °C. Am kältesten war es 2010 mit einem Jahresmittel von nur -0,8 °C. Der kälteste Monat der Messperiode war der Februar 2005 mit -12,4 °C.

Die Jahresmittel der Lufttemperatur, berechnet über die gesamte Messperiode, variieren zwischen 2,5 °C (Standort 1) und -1,9 °C (Standort 8, Tab. 2). Betrachtet man die Monatsmittel (Abb. 4; Tab. A1 im An-

hang), so zeigt sich der Höhengradient mit den höchsten Temperaturen am Standort 1 und den niedrigsten am Standort 8. Regressionen verdeutlichen die Temperaturabnahme mit der Höhe: im Jänner beträgt die Abnahme 0,4 °C pro 100 Höhenmeter (Abb. 5). Die Monate Oktober bis Dezember sind gleichläufig. Der steilste Gradient ergibt sich für Mai (rund 0,7 °C pro 100 Höhenmeter, Abb. 5). Mehr als 0,6 °C pro 100 Höhenmeter sind es auch für die Monate Juni und Juli. In den restlichen Monaten beträgt die Temperaturabnahme 0,5 - 0,6 °C pro 100 Höhenmeter.

Vergleicht man die Monatsmittel der Vegetationszeit (Juni-September), sind Standort 1 und Standort 8 signifikant verschieden ($p = 0,024$). Zwischen Standort 2 und Stand-

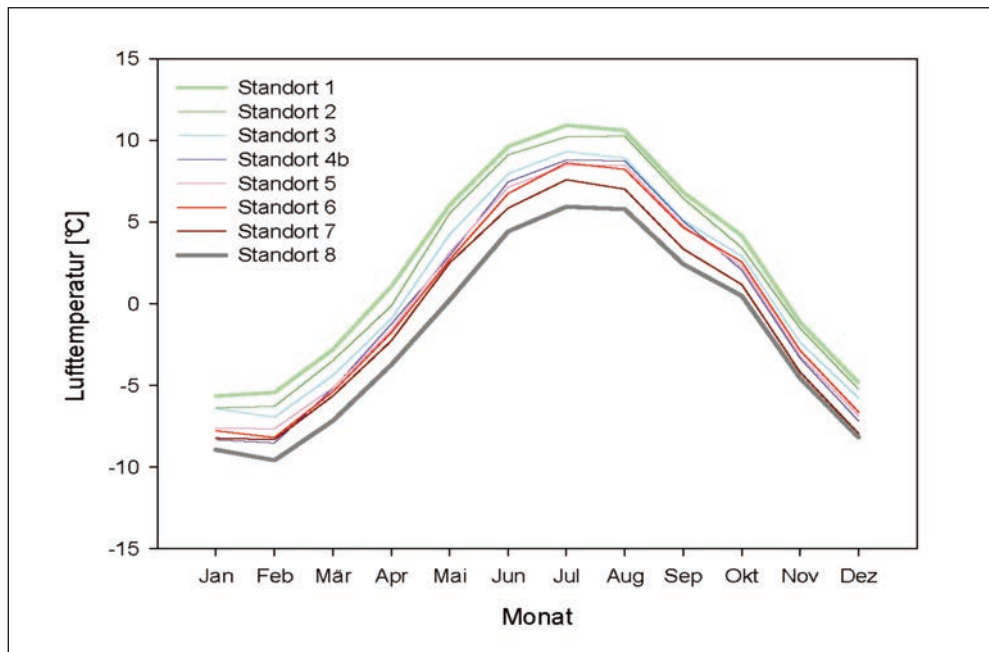


Abb. 4: Monatsmittel der Lufttemperatur, gemittelt über den Untersuchungszeitraum 2000-2011, an den einzelnen Standorten

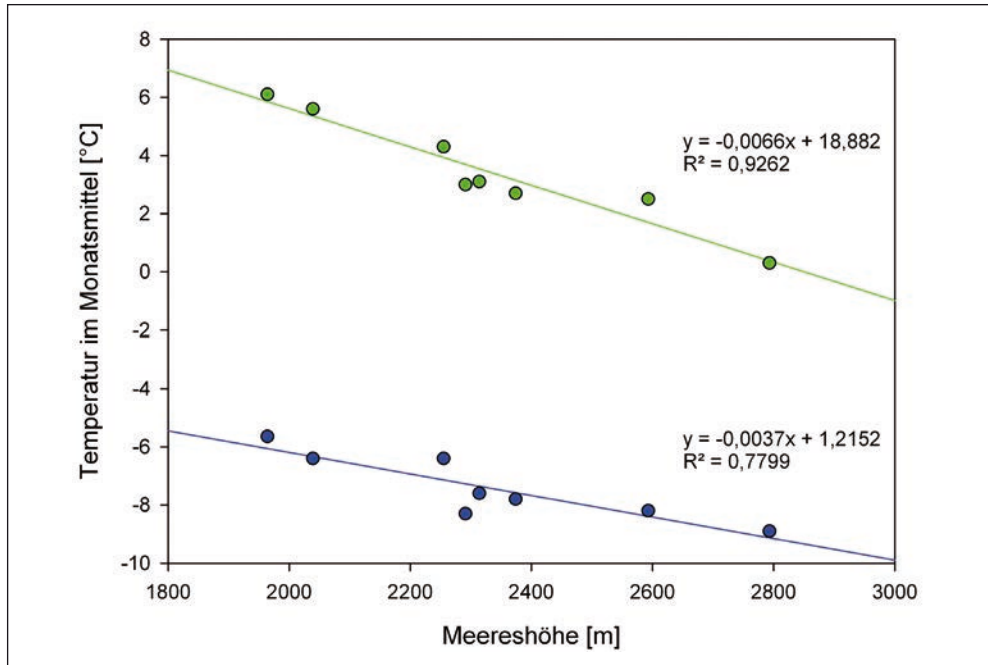


Abb. 5: Regressionen der Lufttemperatur (Monatsmittel) an den einzelnen Standorten für die Monate Mai (grün) und Jänner (blau) und die entsprechenden Regressionslinien

Tab. 2: Jahresmittelwerte der Luft- (a) und Bodentemperatur (b), absolute Maxima und Minima für den Untersuchungszeitraum 2000-2011 an den verschiedenen Standorten und Datum, an dem der jeweilige Extremwert gemessen wurde

a) Lufttemperatur					
Standort	Mittelwert	Maximum	Datum Maximum	Minimum	Datum Minimum
1	2,5	24,6	23.07.09	-23,0	28.02.05
2	1,8	29,3	21.07.10	-23,7	28.02.05
3	1,0	24	15.07.05	-24,5	28.02.05
4b	0,1	21,9	05.08.03	-29,1	28.02.05
5	0,2	23,6	25.07.06	-26,0	28.02.05
6	0,1	21	04.08.03	-25,9	28.02.05
7	-0,7	23,8	15.07.05	-25,7	18.12.09
8	-1,9	18,9	08.07.02	-30,0	28.02.05

b) Bodentemperatur					
Standort	Mittelwert	Maximum	Datum Maximum	Minimum	Datum Minimum
1	3,8	16,2	01.08.01	-0,7	24.12.04
2	3,4	14,2	05.08.03	-0,7	02.03.03
3	2,0	14,2	16.07.10	-11,2	02.01.08
4a	4,1	16,3	27.07.06	-1,2	23.01.02
5	4,2	18,0	01.08.01	-0,7	29.01.06
6	2,6	18,3	16.07.10	-4,9	17.01.02
7	2,4	14,5	01.08.01	-3,9	15.02.06
8	2,8	17,5	05.08.03	-10,1	15.02.09

ort 8 kann ein schwach signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p = 0,057$). Hinsichtlich der Monatsmaxima (Tab. A1 im Anhang) fällt der Standort 8 eindeutig mit signifikant niedrigeren Werten während der Vegetationszeit auf im Vergleich zu den Standorten 1, 2, 3 und 7 ($p < 0,05$).

Abb. 6 zeigt den über die Messperiode gemittelten, halbstündlich berechneten Tagesgang der Lufttemperatur an den einzelnen Standorten. Im Mittel beträgt die Tagesamplitude 4 °C; die größte Amplitude hat Standort 1 mit 5,5 °C, die geringste Standort 8 mit nur 2,8 °C. Das Tagesmaximum der Lufttemperatur wurde zwischen 14:00 und 14:30 Uhr (UTC+1) erreicht, lediglich Standort 4b fiel deutlich erkennbar aus diesem Muster heraus. Hier stellte sich das Tagesmaximum bereits um 13:00 Uhr ein.

Die höchste Temperatur der Messperiode wurde mit 29,3 °C an Standort 2 am 21.7.2010 gemessen (Tab. 2). Das absolute Minimum der Messperiode wurde mit -30 °C an Standort 8 am 28.2.2005 gemessen. An diesem Tag

wurde, mit Ausnahme von Standort 7, an allen Loggern das Minimum der Messperiode erreicht (Tab. 2).

Luftfeuchte

Die Monatsmittel der relativen Feuchte, über die Messperiode gemittelt, weisen für alle Standorte ein absolutes Minimum um den Jahreswechsel auf, deutliche sekundäre Minima im Juni und Oktober, sowie ein Maximum zwischen Juli und September und weitere, sekundäre Maxima im späten Frühjahr (April-Mai) und im November (Abb. 7). In den Wintermonaten war Standort 8 mit einem Abstand der trockenste. Analog zum über die Messperiode gemittelten Tagesgang der Lufttemperatur zeigt Abb. 6 den Tagesgang der relativen Feuchte an den verschiedenen Standorten. Das nächtliche Maximum trat zwischen 22 Uhr (Standort 8) und 0 Uhr (Standorte 1 und 6) ein.

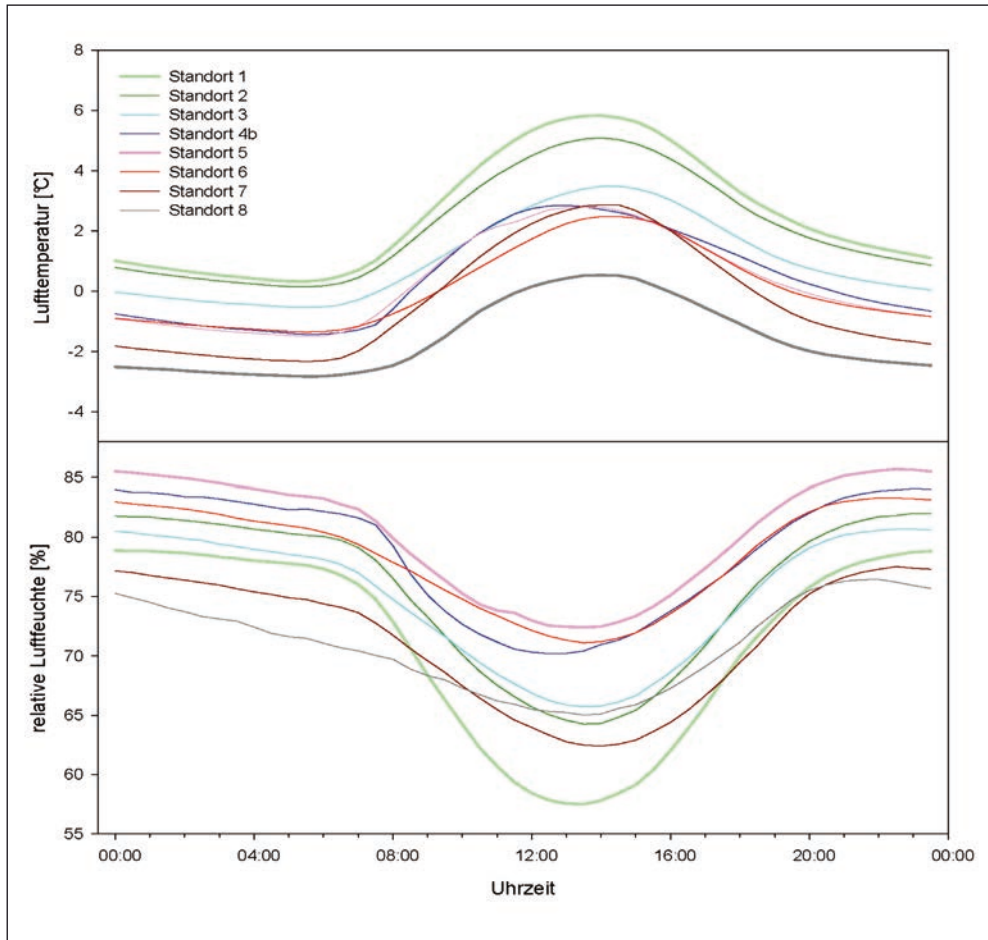


Abb. 6: Oben – Tagesgänge (UTC+1) der Lufttemperatur, gemittelt über den Untersuchungszeitraum 2000-2011, an den einzelnen Standorten. Unten – Tagesgänge (UTC+1) der Luftfeuchtigkeit

Bodentemperatur

Wie bei der Lufttemperatur wurden auch im Boden im Januar und Februar die kältesten, im Juli und August die wärmsten Temperaturen gemessen (Tab. A1 im Anhang). Das Tagesminimum der Bodentemperatur wurde zwischen 8:00 und 10:00 Uhr erreicht (Abb.

8), d.h. 2,5-4,5 Stunden nach dem Minimum der Lufttemperatur, das Maximum zwischen 18:00 und 20:00 Uhr, d.h. 3,5-5,5 Stunden nach dem Maximum der Lufttemperatur. Standort 8 zeigt mit 2,1 °C eine wesentlich größere Temperaturamplitude als die übrigen Standorte, die sich zwischen 0,5 und 1,2 °C täglicher Schwankung bewegen (Abb. 8).

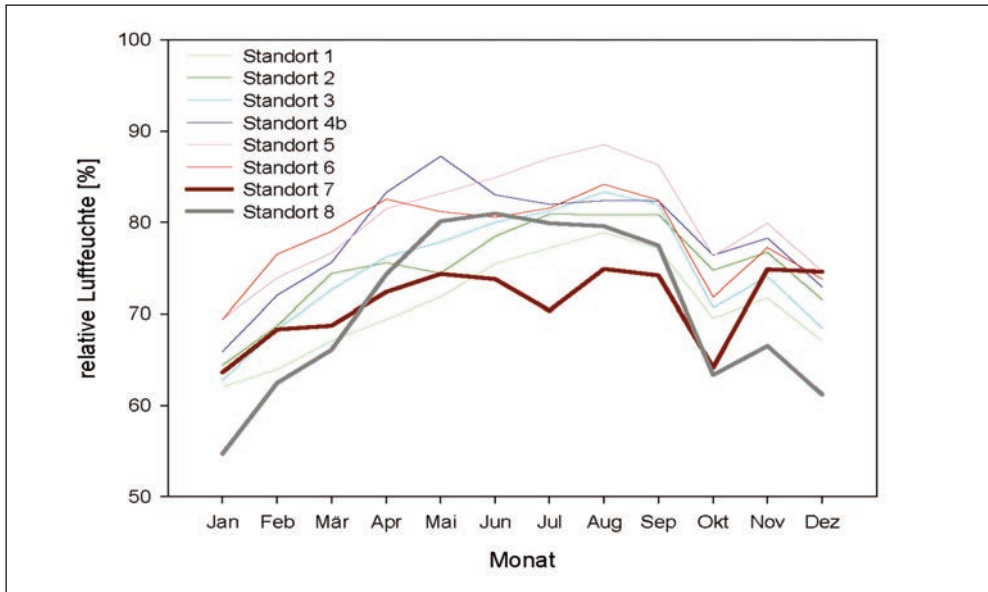


Abb. 7: Monatsmittel der relativen Luftfeuchte, gemittelt über den Untersuchungszeitraum 2000-2011, an den einzelnen Standorten

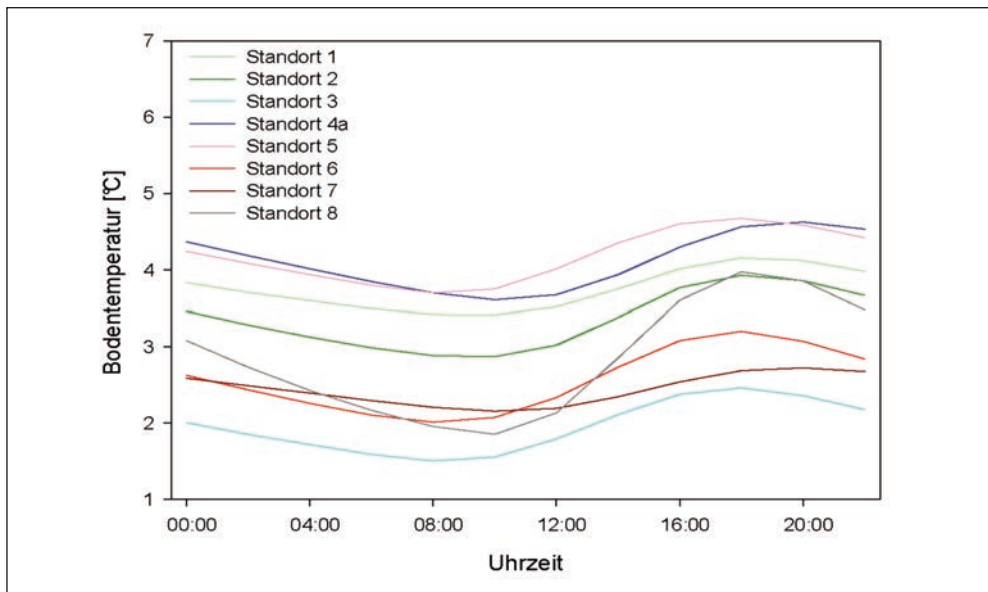


Abb. 8: Durchschnittliche Tagesgänge (UTC+1) der Bodentemperatur an den verschiedenen Standorten, gemittelt über die gesamte Messperiode

Bodentemperaturunterschiede zwischen den Standorten ergeben sich hinsichtlich der monatlichen Minima: am Standort 3 sinkt die Temperatur am tiefsten ab. Signifikante Unterschiede der Bodentemperaturminima wurden zwischen diesem Standort und den Standorten 1, 2, 4 und 5 festgestellt.

Schneebedeckung

Abb. 9 zeigt am Beispiel von Standort 1 den Verlauf der Bodentemperatur während der Messperiode, wobei jene Werte markiert sind, bei denen angenommen wird, dass eine Isolation durch Schnee vorliegt. Über alle Jahre und Logger gemittelt liegt nach diesen Krite-

rien im Untersuchungsgebiet an ca. 126 Tagen im Jahr Schnee. Der Winter 2006/2007 war der schneearmste, 2003/2004 der schneereichste der Messperiode (Tab. 3).

Insgesamt hat sich der Zeitpunkt der ersten Schneebedeckung während der Messperiode nicht erkennbar nach vorn oder hinten verschoben (Tab. 3). Die geringste Schneedeckendauer kann am Standort 3 festgestellt werden. Hier liegt durchschnittlich an 53 Tagen im Jahr Schnee. Es folgt Standort 8, der an durchschnittlich 67 Tagen Schneebedeckung aufweist. Am Standort 7 liegt mit durchschnittlich 166 Tagen am längsten Schnee. Die übrigen Standorte pendeln zwischen 137 (4a), 138 (1), 142 (5), 146 (6) und 151 Tagen (2).

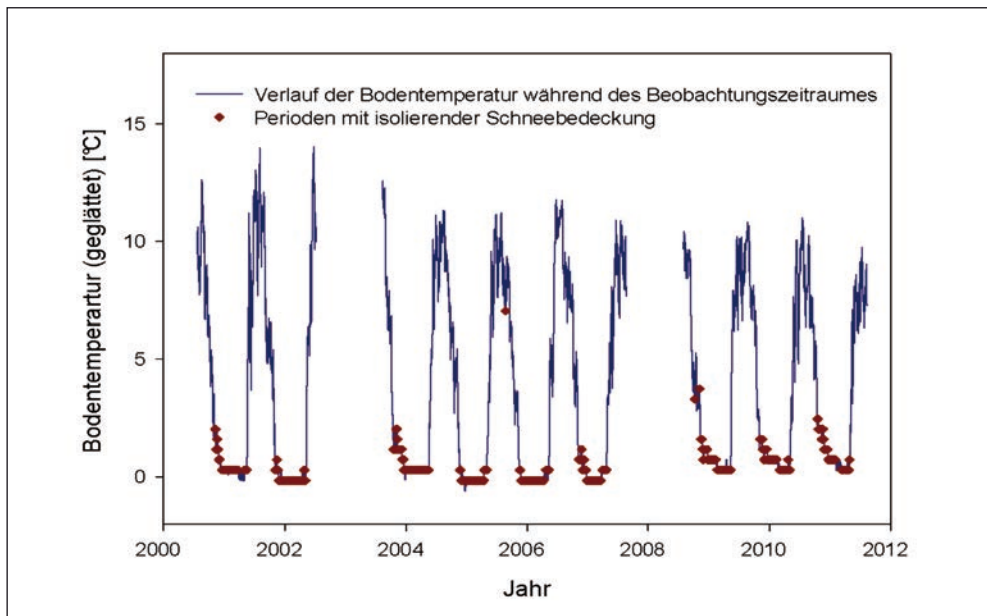


Abb. 9: Geglättete Bodentemperatur (blaue Kurve) an Standort 1 während der gesamten Messperiode. Die roten Symbole markieren jene Perioden, an denen eine absolute konstante Bodentemperatur den Einfluss einer isolierenden Schneedecke anzeigt

Tab. 3: Erster Tag mit geschlossener Schneedecke (Einschneidatum, ED), Anzahl der Tage mit geschlossener Schneedecke (Schneedeckendauer, SDD) und letzter Tag mit geschlossener Schneedecke (Ausperungdatum, AD) an den verschiedenen Standorten in den Wintern 2000/2001 bis 2010/2011. Die angeführten Daten wurden aus der Bodentemperatur an den jeweiligen Standorten ermittelt. Wenn sich die geglättete Bodentemperatur innerhalb von drei Messintervallen (6 Stunden) nicht änderte, wurde der Einfluss einer isolierenden Schneedecke angenommen. Da in der Periode zwischen ED und AD die geschlossene Schneedecke meist mehrmals abschmolz und neu gebildet wurde, entspricht SDD in der Regel nicht der Anzahl der Tage zwischen ED und AD

Winter	Standort 1		Standort 2		Standort 3		Standort 4a		Standort 5		Standort 6		Standort 7		Standort 8	
	ED	SDD	ED	SDD	ED	SDD	ED	SDD	ED	SDD	ED	SDD	ED	SDD	ED	SDD
2000 2001	05. Nov 16. Mai	122	10. Okt 21. Mai	156	08. Okt 15. Mai	157	10. Okt 20. Mai	160	04. Nov 26. Mai	151	08. Okt 07. Jun	177	10. Okt 04. Jun	152	26. Jul 29. Mai	191
2001 2002	04. Nov 06. Mai	143	14. Okt 15. Mai	120	08. Nov 10. Mai	21	18. Nov 05. Mai	128	10. Nov 22. Mai	163	29. Okt 01. Jun	119	10. Sep 13. Jun	176	10. Nov 15. Mai	64
2002 2003	keine Daten		28. Sep 30. Apr	137	01. Okt 29. Apr	74	28. Sep 27. Apr	139	02. Okt 01. Mai	106	27. Sep 27. Apr	148	30. Sep 27. Mai	188	27. Sep 15. Apr	138
2003 2004	18. Okt 17. Mai	176	12. Okt 28. Mai	173	22. Okt 23. Mai	59	11. Okt 27. Mai	159	11. Okt 07. Jun	158	09. Okt 16. Jun	169	10. Okt 18. Jun	158	09. Okt 10. Mai	80
2004 2005	22. Nov 03. Mai	134	13. Nov 11. Mai	163	17. Nov 19. Apr	9	11. Nov 29. Apr	118	14. Nov 19. Mai	174	18. Okt 24. Mai	96	18. Okt 30. Jun	131	09. Nov 22. Apr	24
2005 2006	23. Aug 12. Mai	143	13. Nov 17. Mai	179	keine Daten		05. Okt 02. Mai	135	17. Nov 17. Mai	124	10. Okt 08. Jun	139	09. Okt 09. Jun	146	08. Okt 14. Apr.	10
2006 2007	08. Nov 24. Apr	131	06. Nov 24. Apr	148	05. Nov 20. Apr	12	10. Nov 12. Apr	104	23. Nov 23. Apr	122	25. Nov 10. Mai	81	07. Nov 20. Mai	128	08. Nov 07. Apr	34
2007 2008	keine Daten		keine Daten		21. Okt 07. Mai	25	keine Daten		keine Daten		keine Daten		04. Okt 01. Jun	158	keine Daten	
2008 2009	06. Okt 11. Mai	150	11. Nov 18. Mai	122	24. Okt 20. Mai	104	16. Nov 13. Mai	167	15. Nov 09. Mai	148	01. Nov 28. Mai	173	11. Okt 27. Mai	190	09. Nov 03. Jun	30
2009 2010	04. Nov 02. Mai	129	15. Okt 08. Mai	162	24. Okt 20. Mai	64	06. Nov 08. Mai	132	16. Okt 16. Mai	143	15. Okt 06. Jun	179	19. Okt 08. Jun	199	17. Okt 20. Mai	59
2010 2011	17. Okt 28. Apr	114	20. Okt 30. Apr	119	17. Okt 20. Apr	67	29. Sep 25. Apr	152	19. Okt 03. Mai	131	29. Sep 23. Mai	181	01. Okt 05. Jun	205	01. Okt 27. Mär	35

An den einzelnen Standorten war der Ausaperungszeitpunkt sehr unterschiedlich ($p < 0,001$). Im Schnitt aperte Standort 7 als letzter aus und Standort 8 als erster. Das Datum der Ausaperung verschob sich pro Jahr um 1,2 Tage, d.h. die Flächen aperten mit der Zeit signifikant ($p = 0,008$) früher aus (Kovarianzanalyse: Test der kovariaten Variable Jahr, Standort als zufälliger Faktor). Dieser Trend war bei den Standorten 6 und 7 am wenigsten und bei Standort 8 am stärksten ausgeprägt. Für die Schneedeckendauer ließ sich keine signifikante Veränderung über die Jahre feststellen ($p = 0,30$).

Diskussion

Es ist allgemein bekannt, dass die mittlere Jahrestemperatur mit der Höhe abnimmt (Körner 2003), wobei in den Zentralalpen eine durchschnittliche Abnahme von $0,6\text{ °C}$ pro 100 Höhenmeter charakteristisch ist (Nagy & Grabherr 2009). In unserer Studie zeigte sich, dass diese höhenbedingte Temperaturabnahme im Verlauf des Jahres zwischen $0,4$ und $0,7\text{ °C}$ pro 100 Höhenmeter variiert. Auf die saisonalen Unterschiede hat beispielsweise Rolland (2003) hingewiesen. Seine Metaanalyse über zahlreiche Standorte in Norditalien und Tirol belegte ebenfalls höhere Werte im Sommer. Sowohl Monatsmittel als auch -maxima der Lufttemperatur waren am Abhang des Kirchenkogels (Standort 8) vor allem während der Vegetationsperiode si-

gnifikant niedriger als an den meisten anderen Standorten.

Die Grundfrage für ökologische Studien ist allerdings, ob die in 2 m Höhe zur Charakterisierung der Wetterbedingungen gemessenen Temperaturen genügend Aussagekraft haben für die Dynamik der Vegetation. Mehrere Studien haben in jüngster Zeit immer wieder darauf verwiesen, dass Lufttemperaturen der meteorologischen Standardstationen mit Vorsicht interpretiert werden sollten (Larcher & Wagner 2009, 2010; Scherrer et al. 2011, Graae et al. 2012) und dass eigentlich das Bioklima gemessen werden müsste. Unter Bioklima versteht man das für die Pflanze relevante Mikroklima von der Oberkante des Pflanzenbestandes bis hinunter zu den Wurzelspitzen (Cernusca 1976). Graae et al. (2012) schlussfolgern, dass für Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels vor allem Bodenoberflächentemperaturen heranzuziehen sind und nicht die Temperaturen in 2 m Höhe. In zahlreichen ökologischen Studien werden die Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe bevorzugt, um Strahlungsfehler auszuschließen (Körner et al. 2003).

Die Wuchsform der Pflanzen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Temperaturen an der Bodenoberfläche und im Boden. Polsterpflanzen und Spaliersträucher heizen sich im Vergleich zur Lufttemperatur untertags sehr stark auf (Larcher 2012). Dies gilt selbst für schwach bewachsene Flächen wie jene auf der 1971er Moräne des Rotmoosferner-Gletschervorfeldes (Erschbamer, Kapitel 8 in diesem Band). Hochwüchsige Pflanzen, wie beispielsweise Bäume, schatten den Boden naturge-

mäß stärker ab. In ihrem Wurzelbereich herrschen mitunter niedrigere Temperaturen als in der baumfreien alpinen Rasenstufe (Körner et al. 2003, Körner 2007). Für Obergurgl können dazu keine Aussagen getroffen werden, da im hier vorgestellten Monitoring-Projekt keine Waldstandorte untersucht wurden.

Nachts wirkt die Oberfläche des Bewuchses als wichtigste abstrahlende Fläche, daher verliert der Boden weniger Wärme (Tindall 1999). Standort 1, der die größte tägliche Amplitude der Lufttemperatur zeigt, befindet sich in einer Weideausschlussfläche mit Zwergsträuchern, die durchschnittlich 27 cm Wuchshöhe erreichen und eine hohe Gesamtedeckung aufweisen (Roland Mayer, unpubl.). Hier wurden dementsprechend geringe Schwankungen der Bodentemperatur festgestellt. An den Standorten 6 (Skipiste Festkogel) und 8 (Kirchenkogel) findet sich dagegen ein sehr niedriger, offener Pflanzenbewuchs, der das Signal der Lufttemperatur nur geringfügig dämpft. Da die Wärmeleitfähigkeit des Bodens vor allem von der Bodenart und dem Wassergehalt des Bodens abhängt (Tindall 1999), wäre eine bodenkundliche Erfassung der Standorte wünschenswert, um die Daten der Bodentemperaturen besser interpretieren zu können. Außerdem sei auf die Energiebilanzmessungen von Rott (1979, 1987) und Staudinger (1987) verwiesen, die während des MaB-Projektes (Patzelt 1987) den Krummseggenrasen auf der Hohen Mut mit einer Mähwiese in Obergurgl verglichen hatten. Die Unterschiede wurden ganz klar auf die Vegetation, die Lage der Flächen und auf die Höhendifferenz zurückgeführt.

Neben den topographischen und bodenkundlichen Gegebenheiten wirkt sich vor allem auch die Exposition ausschlaggebend auf die Bodentemperaturen aus (Nagy & Grabherr 2009): im europäischen GLORIA-Projekt (www.gloria.ac.at) wiesen nordexponierte Gipfelhänge durchwegs kältere Böden auf als jene der übrigen Expositionen. Nachdem die beschriebenen Standorte nicht nach dem Kriterium Exposition ausgewählt wurden und daher nicht alle Expositionen in gleicher Höhenlage vorliegen, können wir hier keine Aussagen treffen.

Hinsichtlich Bodentemperaturminima konnten signifikante Unterschiede je nach Vegetationstyp festgestellt werden. Dabei fällt die Gurgler Heide (Standort 3) im Vergleich zu Standorten mit höherer Zwergstrauchvegetation (1, 2) bzw. auch im Vergleich zum alpinen Rasen am Schönwieskopf (5) durch signifikant tiefere Minima auf. Das extreme Milieu der *Loiseleuria*-Flechtenheide wird damit deutlich. Von Messungen am Patscherkofel wissen wir, dass ein typischer *Loiseleuria*-Bestand im Winter völlig schneefrei geblasen werden kann und daher Bestandestemperaturen von -10 bis +30 °C in den Monaten Jänner bis März wechseln können (Cernusca 1976, Körner 2003). Die Gurgler Heide weist unter allen Monitoring-Standorten die geringste Dauer der Schneedecke auf. Die *Vaccinien*-Zwergstrauchheide (Standort 2) hat im Gegensatz dazu eine dreimal so lange Schneedeckendauer. Die Notwendigkeit eines Schneeschatzes für diesen Pflanzenbestand ist hinlänglich bekannt (Cernusca 1976, Körner 2003, Nagy & Grabherr 2009, Neuner & Ha-

cker 2012), da die dominanten Arten (*Vaccinium myrtillus*, *Rhododendron ferrugineum*) als chionophil (Schneeschildkröten) einzustufen sind.

Eine ähnlich kurze Schneedecke wie die *Loiseleuria*-Flechtenheide auf der Gurgler Heide weist nur noch der alpine Rasen an den Abhängen des Kirchenkogels (Standort 8) auf. Die hier dominierende *Kobresia myosuroides* ist typisch für windgefegte Standorte mit geringem Schneeschutz (Reisigl & Keller 1987). Die Ausaperung erfolgt hier am frühesten: so war der Hang z.B. 2011 bereits Ende März schneefrei. Kantenlagen (Standort 3) oder Steilhänge (Standort 8) sind, unabhängig von der Exposition, jene Bereiche, die am schnellsten ausapern.

Bezüglich der Schneebedeckung ist zu betonen, dass der Datenlogger für die Bodentemperatur auf der Hohen Mut (Standort 7) im Schatten eines Holzzaunes liegt. Hier dürfte vor allem der Zauneffekt für das frühe Einschneide- und späte Ausaperungsdatum und die lange Schneedeckendauer verantwortlich sein. Auf Skipisten wird allgemein angenommen, dass die Schneedeckendauer infolge der Schneekomprimierung durch Pistenpräparierung und -befahrung verlängert wird. Während der Messperiode zeigten sich im Bereich des Standorts 6 (Skipiste Festkogel) allerdings keine großen Abweichungen zu vergleichbaren Standorten der höheren Zwergstrauchheide (Standort 2) oder des alpinen Rasens am Schönwieskopf (Standort 5).

Allgemein ist zu bemerken, dass die Ausaperung im Gegensatz zum Datum der ersten Schneebedeckung kaum durch einzelne Nie-

derschlagsereignisse beeinflusst wird und daher allgemeine Trends besser wiedergibt. Das immer frühere Ausaperungsdatum ist für die Pflanzenwelt von großer Bedeutung und auch für den Skitourismus in Obertauern von einiger Relevanz. Um dieses Ergebnis weiter zu interpretieren, wären Schneehöhenmessungen wünschenswert. Regionale Klimamodelle (Christensen et al. 2007) prognostizieren besonders in den Wintermonaten eine Erwärmung, was die Schneebedeckung weiter reduzieren dürfte. Über die Auswirkungen auf die einzelnen Pflanzenbestände kann derzeit nur spekuliert werden (Erschbamer 2007, Thuiller 2007, Nagy & Grabherr 2009, Rammig et al. 2010, Gottfried et al. 2012, Pauli et al. 2012). Umso bedeutsamer erscheint es, das ökologische Langzeit-Monitoring-Projekt weiterhin aufrecht zu erhalten, um empirische Daten für künftige Modelle zu generieren.

Literatur

- Aulitzky, H. (1954) Über mikroklimatische Untersuchungen an der oberen Waldgrenze zum Zwecke der Lawinenvorbeugung. *Wetter und Leben*, 6. Jg, Heft 5-6: 93-98.
- Aulitzky, H. (1955a) Die Bedeutung meteorologischer und kleinklimatischer Unterlagen für Aufforstung im Hochgebirge. *Wetter und Leben*, 7. Jg, Heft 8-11: 241-252.

- Aulitzky, H. (1955b) Über die lokalen Windverhältnisse einer zentralalpinen Hochgebirgs-Hangstation. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* 6 (4): 353-373.
- Aulitzky, H. (1961) Die Bodentemperaturverhältnisse einer zentralalpinen Hanglage beiderseits der Waldgrenze; I. Teil. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Serie B* 10: 445-532.
- Aulitzky, H. (1962a) Die Bodentemperaturverhältnisse einer zentralalpinen Hanglage beiderseits der Waldgrenze; II. Teil. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Serie B* 11: 301-362.
- Aulitzky, H. (1962b) Die Bodentemperaturverhältnisse einer zentralalpinen Hanglage beiderseits der Waldgrenze. III. Teil. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Serie B* 11: 363-376.
- Cernusca, A. (1976) Bestandesstruktur, Bioklima und Energiehaushalt von alpinen Zwergstrauchbeständen. *OEcolog. Plant.* 11: 71-102.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. & Whetton, P. (2007) Regional Climate Projections. In: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (Hg.) *Climate Change 2007*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, NY, USA, S. 847-940.
- Erschbamer, B. (2001) Responses of some Austrian glacier foreland plants to experimentally changed microclimatic conditions. In: *Fingerprints of Climate Change*, Walther G.-R., Burga C.A. & Edwards, P.J. (Hg.) Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, S. 263-279.
- Erschbamer, B. (2007) Winners and losers of climate change in a central alpine glacier foreland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 39: 237-244.
- Erschbamer B. & Mayer R. (2011) Can successional species groups be discriminated based on their life history traits? A study from a glacier foreland in the Central Alps. *Plant Ecology & Diversity* 4: 341-351.
- Fischer, A. (2010) Klima und Gletscher in Obergurgl. In: *Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl*, Koch E.-M. & Erschbamer B. (Hg.) *Alpine Forschungsstelle Obergurgl 1*, Innsbruck university press, Innsbruck, S. 53-72.
- Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhaltkatsi, M., Barancok, P., Benito Alonso, J.L., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Fernández Calzado, M.R., Kazakis, G., Krajci, J., Larsson, P., Mallaun, M., Michelsen, O., Moiseev, D., Moiseev, P., Molau, U., Merzouki, A., Nagy, L., Nakhutsrishvili, G., Pedersen, B., Pelino, G., Puskas, M., Rossi, G., Stanisci, A., Theurillat, J.-P., Tomaselli, M., Villar,

- L., Vittoz, P., Vogiatzakis, I. & Grabherr, G. (2012) Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change* 2/2: 111-115.
- Graae, B.J., De Frenne, P., Kolb, A., Brunet, J., Chabrierie, O., Verheyen, K., Pepin, N., Heinken, T., Zobel, M., Shevtsova, A., Nijs, I. & Milbau, A. (2012) On the use of weather data in ecological studies along altitudinal and latitudinal gradients. *Oikos* 121: 3-19.
- Hoinkes, H. & Rudolph, R. (1961) Variations in the Mass-Balance of Hintereisferner (Oetzal Alps), 1952-1961, and their Relation to Variations of Climatic Elements. Extract of publication no. 58 of the I.A.S.H. Commission of Snow and Ice, S. 16 - 28.
- Kaufmann, R. (2001) Invertebrate succession on an alpine glacier foreland. *Ecology* 82: 2261-2278.
- Kaufmann, R. (2005) Langzeit-Ökosystem Monitoring im Alpenen Raum. Endbericht 2000-2005. Auftraggeber: Land Tirol. Abteilung Umweltschutz, Innsbruck.
- Koch, E.-M. & Erschbamer, B. (2010) Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl. Alpine Forschungsstelle Obergurgl 1, innsbruck university press, Innsbruck.
- Körner, Ch. (2003) *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. 2nd ed., Springer, Berlin, Heidelberg.
- Körner, Ch. (2007) Climatic treelines: conventions, global patterns, causes. *Erdkunde* 61, H. 4: 316-324.
- Körner, Ch., Paulsen, J. & Pelaez-Riedl, S. (2003) A bioclimatic characterisation of Europe's alpine areas. In: *Alpine Biodiversity in Europe*, Nagy L., Grabherr G., Körner Ch. & Thompson D.B.A. (Hg.), Springer, Berlin, S. 13-28.
- Kraus, H. (2004) *Die Atmosphäre der Erde*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 10-13.
- Kuttler, W. (2009) *Klimatologie*. Schönigh, Paderborn.
- Larcher, W. (2012) Bioclimatic temperatures in the High Alps. In: *Plants in Alpine Regions. Cell Physiology of Adaption and Survival Strategies*, Lütz, C. (Hg.), Springer, Wien, New York, S. 21-27.
- Larcher, W. & Wagner, J. (2009) High mountain bioclimate: temperatures near the ground recorded from the timberline to the nival zone in the Central Alps. *Contrib. Nat. Hist.* 12: 857-874.
- Larcher, W. & Wagner, J. (2010) Temperatures in the life zones of the Tyrolean Alps. *Österr. Akademie der Wissenschaften, Sitzungsber. Abt. I* 213: 31-51.
- Mayer, R. & Erschbamer, B. (2009) Die Vegetation von Schipisten im Vergleich zur angrenzenden Vegetation im inneren Ötztal (Zentralalpen, Nordtirol). *Zoolog.-Bot. Ges. Österreich* 146: 139-157.
- Mayer, R., Kaufmann, R., Vorhauser, K. & Erschbamer, B. (2009) Effects of grazing exclusion on species composition

- in high-altitude grasslands of the Central Alps. *Basic and Applied Ecology* 10: 447-445.
- Molau, U. & Mølgaard, P. (1996) The ITEX manual. Danish Polar Center, Copenhagen, Denmark.
- Moser, W. (1975) Program on Man and the Biosphere, MAB-6 Obergurgl (Austria). Report 1975.
- Nagl, F. & Erschbamer, B. (2010) Vegetation und Besiedlungsstrategien. In: Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl, Koch, E.-M. & Erschbamer, B. (Hg.), Alpine Forschungsstelle Obergurgl 1, Innsbruck university press, Innsbruck, S. 121-143.
- Nagy, L. & Grabherr, G. (2009) The Biology of Alpine Habitats. Oxford Univ. Press, New York.
- Neuner, G. & Hacker, J. (2012) Ice formation and propagation in alpine plants. In: Plants in Alpine Regions. Cell Physiology of Adaption and Survival Strategies, Lütz, C. (Hg.), Springer, Wien, New York, S. 163-174.
- Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhaltkatsi, M., Benito Alonso, J.L., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Fernández Calzado, R., Ghosn, D., Holten, J., Kanka, R., Kazakis, G., Kollár, J., Larsson, P., Moiseev, D., Moiseev, P., Molau, U., Molero Mesa, J., Nagy, L., Pelino, G., Puscas, M., Rossi, G., Stanisci, A., Syverhuset, A. O., Theurillat, J.-P., Tomaselli, M., Unterluggauer, P., Villar, L., Vittoz, P. & Grabherr, G. (2012) Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science* 336/6079: 353-355.
- Patzelt, G. (1987) MaB-Projekt Obergurgl. Veröff. Österr. MaB-Progr. Bd. 10, Univ. Verlag Wagner, Innsbruck.
- Ramming, A., Jonas, T., Zimmermann, N.E. & Rixen, C. (2010) Changes in alpine plant growth under future climate conditions. *Biogeosciences* 7: 2013-2024.
- Reisigl, H. & Keller, R. (1987) Alpenpflanzen im Lebensraum. Alpine Rasen, Schutt- und Felsvegetation. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York.
- Rolland, C. (2003) Spatial and seasonal variations of air temperature lapse rate in alpine regions. *Journal of Climate* 16: 1032-1046.
- Rott, H. (1979) Vergleichende Untersuchungen der Energiebilanz im Hochgebirge. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A* 28: 211-232.
- Rott, H. (1987) Die Energiebilanzmessungen an den Stationen Hohe Mut und Obergurgl-Wiese. In: MaB-Projekt Obergurgl, Patzelt, G. (Hg.), Veröff. Österr. MaB-Progr. Bd. 10, Univ. Verlag Wagner, Innsbruck, S. 147-159.
- Scherrer, D. & Körner, C. (2010) Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *Journal of Biogeography* 38: 406-416.
- Scherrer, D., Schmid, S. & Körner, C. (2011) Elevational species shifts in a warmer climate are overestimated when based on weather station data. *Int. J. Biometeorol.* 55: 645-654.

- Staudinger, M. (1987) Verdunstungsbestimmung während der Vegetationsperiode durch Energiebilanzmessungen. In: MaB-Projekt Obergurgl, Patzelt, G. (Hg.), Veröff. Österr. MaB-Progr. Bd. 10, Univ. Verlag Wagner, Innsbruck, S. 161-172.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B., Sykes, M.T. & Prentice, I.C. (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. PNAS 102: 8245-8250.
- Tindall J.A. (1999) Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Turner, H. (1958) Über das Licht- und Strahlungsklima einer Hanglage der Ötztaler Alpen bei Obergurgl und seine Auswirkung auf das Mikroklima und auf die Vegetation. Arch. Met. Geoph. Biokl. 8 (3-4): 273-325.

Nikolaus Schallhart
Alpine Forschungsstelle Obergurgl
Universität Innsbruck
Gaisbergweg 3, 6456 Obergurgl
Klaus.Schallhart@uibk.ac.at

Brigitta Erschbamer
Institut für Botanik
Universität Innsbruck
Sternwartestr. 15, 6020 Innsbruck
Brigitta.Erschbamer@uibk.ac.at

Verzeichnis der AutorInnen

Lea Hartl
Alpine Forschungsstelle Obergurgl
Universität Innsbruck
Gaisbergweg 3, 6456 Obergurgl
Lea.Hartl@student.uibk.ac.at

Rüdiger Kaufmann
Institut für Ökologie
Universität Innsbruck
Technikerstraße 25, 6020 Innsbruck
Ruediger.Kaufmann@uibk.ac.at

L. Hartl, R. Kaufmann, N. Schallhart, B. Erschbamer

Das Mikroklima waldfreier Standorte in der subalpinen, alpinen und subnivalen Stufe in Obergurgl

Tab. A1: Monatsmittel, -maxima, -minima und Anzahl der frostfreien Tage (TDD) in 2 m Höhe (Lufttemperatur) und in 10 cm Bodentiefe (Bodentemperatur), gemittelt über den Untersuchungszeitraum 2000-2011

Standort	Monat	Lufttemperatur				Bodentemperatur			
		Mittel	Max	Min	TDD	Mittel	Max	Min	TDD
1	J	-5,6	9,3	-21,1	0,9	0,2	0,7	-0,2	19,3
	F	-5,4	8,4	-23,0	0,5	0,2	0,8	-0,2	17,8
	M	-2,8	11,2	-23,0	2,2	0,1	0,8	-0,3	19,5
	A	1,1	15,7	-17,1	8,7	0,2	3,8	-0,3	21,5
	M	6,1	21,7	-7,2	23,1	3,4	14,3	-0,2	29,5
	J	9,6	24,1	-4,8	27,6	8,3	16,0	2,5	30,0
	J	10,9	24,6	-0,8	30,7	9,5	15,7	6,1	31,0
	A	10,6	24,4	-1,0	30,5	9,6	16,2	5,9	31,0
	S	6,8	22,7	-5,8	23,6	7,2	13,1	2,9	30,0
	O	4,2	21,3	-13,9	21,0	4,0	9,0	1,1	31,0
	N	-1,1	14,1	-16,8	7,5	1,4	5,8	-0,2	27,9
	D	-4,8	7,5	-21,6	2,0	0,4	1,3	-0,7	21,3
2	J	-6,4	7,4	-21,5	6,0	-0,1	0,4	-0,6	15,3
	F	-6,3	6,9	-23,7	5,4	-0,2	0,4	-0,7	9,8
	M	-3,5	9,6	-23,0	7,0	-0,2	0,4	-0,7	8,7
	A	-0,1	13,2	-17,6	9,8	-0,2	6,8	-0,6	6,5
	M	5,6	21,6	-7,6	22,9	3,0	12,3	-0,7	19,8
	J	9,1	23,7	-5,2	27,8	8,2	14,0	1,2	30,0
	J	10,2	29,3	-0,8	30,5	9,4	14,1	3,8	31,0
	A	10,3	23,6	-1,4	30,5	9,1	14,2	4,1	31,0
	S	6,5	22,0	-5,9	29,5	6,3	11,7	2,0	30,0
	O	3,4	21,1	-14,5	30,5	3,0	9,1	0,2	31,0
	N	-1,5	14,7	-16,8	10,5	0,6	6,3	-0,7	22,9
	D	-5,2	7,0	-22,1	6,4	0,1	0,8	-0,7	19,2

Standort	Monat	Lufttemperatur				Bodentemperatur			
		Mittel	Max	Min	TDD	Mittel	Max	Min	TDD
3	J	-6,4	7,0	-22,4	3,6	-2,5	0,4	-11,2	2,8
	F	-6,9	7,3	-24,5	2,6	-2,7	-0,1	-10,6	2,4
	M	-4,4	10,8	-22,8	3,5	-1,7	0,8	-10,7	4,6
	A	-0,9	13,9	-18,6	6,9	-0,1	4,2	-2,9	12,9
	M	4,3	20,0	-7,4	19,7	2,0	10,1	-0,7	21,6
	J	8,0	22,5	-7,1	25,4	6,5	12,5	-0,6	29,5
	J	9,3	24,1	-1,8	28,9	8,4	14,1	3,7	31,0
	A	8,9	22,3	-2,4	29,6	8,6	13,3	3,2	31,0
	S	5,1	20,5	-6,7	21,3	5,2	11,0	0,8	30,0
	O	2,9	19,3	-15,1	19,5	2,0	8,2	-1,6	25,8
	N	-2,4	11,7	-18,2	6,1	-0,6	4,6	-5,9	6,3
	D	-5,8	6,6	-22,5	2,4	-2,1	0,3	-10,0	3,6
4a	J					0,0	0,8	-1,2	16,9
	F					0,0	0,3	-0,7	15,0
	M					0,0	0,8	-0,7	17,5
	A					0,4	10,0	-0,7	20,6
	M					3,9	12,9	-0,2	27,6
	J					8,6	15,3	1,1	30,0
	J					10,7	16,3	5,0	31,0
	A					10,7	16,1	5,4	31,0
	S					7,7	13,0	2,4	30,0
	O					4,3	9,8	0,7	31,0
	N					1,2	5,7	-0,2	27,3
	D					0,3	1,2	-0,7	19,6
4b	J	-8,3	6,5	-25,2	5,7				
	F	-8,5	5,4	-29,1	5,1				
	M	-5,2	9,3	-26,8	5,7				
	A	-1,2	10,3	-21,8	7,3				
	M	3,0	16,7	-9,3	17,3				
	J	7,5	20,6	-7,0	25,5				
	J	8,8	21,5	-2,6	28,5				

Standort	Monat	Lufttemperatur				Bodentemperatur			
		Mittel	Max	Min	TDD	Mittel	Max	Min	TDD
	A	8,8	21,9	-3,4	29,4				
	S	5,1	19,8	-10,3	21,7				
	O	2,1	18,0	-19,6	16,7				
	N	-3,3	9,8	-20,8	5,0				
	D	-7,2	7,6	-27,9	4,6				
5	J	-7,6	7,1	-24,0	0,1	0,1	0,8	-0,7	16,9
	F	-7,6	9,3	-26,0	0,0	0,0	0,8	-0,7	14,3
	M	-5,2	12,4	-25,0	0,2	0,1	0,3	-0,2	15,5
	A	-1,6	12,3	-20,0	2,9	0,1	10,2	-0,3	12,4
	M	3,1	16,6	-10,6	14,5	2,9	13,7	-0,3	17,9
	J	7,2	20,1	-7,4	23,3	9,0	16,8	-0,2	29,3
	J	8,5	23,6	-2,9	27,9	10,9	17,5	2,9	31,0
	A	8,5	21,0	-3,6	28,8	11,1	18,0	4,5	31,0
	S	4,8	19,7	-8,0	19,6	8,2	13,3	2,8	30,0
	O	2,3	17,4	-17,5	16,4	4,4	9,8	1,1	31,0
	N	-3,2	10,5	-19,6	3,5	1,4	5,9	-0,1	29,8
	D	-6,9	7,2	-24,8	0,3	0,4	1,3	-0,7	23,0
6	J	-7,8	7,3	-23,2	3,2	-1,1	0,0	-4,9	2,8
	F	-8,2	5,5	-25,9	2,5	-1,2	-0,1	-3,9	2,5
	M	-5,4	8,9	-23,6	3,2	-0,9	-0,1	-3,4	2,8
	A	-1,8	12,2	-18,2	5,5	-0,4	-0,1	-1,1	2,7
	M	2,7	16,5	-10,6	16,2	0,3	13,3	-0,7	5,3
	J	6,8	20,5	-7,8	23,3	7,4	16,4	-0,6	25,6
	J	8,6	21,0	-2,7	28,6	10,5	18,3	3,3	31,0
	A	8,2	21,0	-3,3	28,5	9,8	16,5	2,5	31,0
	S	4,7	19,8	-7,0	22,4	5,4	12,2	0,2	30,0
	O	2,6	17,5	-15,9	20,3	1,3	9,2	-0,7	21,5
	N	-2,8	10,5	-19,6	7,2	-0,5	4,6	-3,4	3,5
	D	-6,6	5,7	-23,2	3,5	-0,8	-0,1	-3,9	2,8

Standort	Monat	Lufttemperatur				Bodentemperatur			
		Mittel	Max	Min	TDD	Mittel	Max	Min	TDD
7	J	-8,2	8,4	-24,2	8,7	-0,5	0,4	-2,5	0,1
	F	-8,3	9,1	-23,8	7,6	-1,1	-0,1	-3,9	0,0
	M	-5,6	10,4	-24,1	8,5	-1,2	-0,1	-3,9	0,0
	A	-2,3	14,7	-21,5	9,1	-0,6	-0,1	-2,0	0,0
	M	2,5	20,0	-10,3	17,0	0,0	6,7	-0,7	1,8
	J	5,9	22,4	-9,0	23,0	4,8	13,0	-0,2	23,4
	J	7,6	23,8	-4,4	26,2	9,2	14,1	1,2	31,0
	A	7,0	21,9	-5,1	26,3	9,4	14,5	2,8	31,0
	S	3,4	19,8	-10,5	17,9	6,1	11,8	0,7	30,0
	O	1,2	15,8	-19,5	12,2	2,2	7,9	0,3	31,0
	N	-4,2	11,3	-21,1	5,3	0,5	2,5	-0,2	24,7
	D	-7,9	6,6	-25,7	7,4	0,1	0,8	-0,7	12,9
8	J	-8,9	7,3	-25,4	5,9	-3,0	0,3	-8,4	2,8
	F	-9,6	8,5	-28,0	5,2	-3,1	-0,1	-10,1	2,5
	M	-7,2	10,3	-24,6	5,8	-1,5	4,8	-7,9	2,8
	A	-3,7	12,8	-22,0	6,5	1,2	13,1	-1,5	9,5
	M	0,3	13,7	-12,6	12,7	4,5	15,8	-0,2	25,4
	J	4,4	16,4	-10,0	21,4	8,1	16,4	0,7	30,0
	J	6,0	19,0	-6,0	23,8	9,3	17,3	2,5	31,0
	A	5,8	18,6	-6,3	23,5	9,0	17,5	2,0	31,0
	S	2,4	16,0	-9,4	17,1	6,5	14,9	1,4	30,0
	O	0,5	14,5	-17,6	13,5	3,6	11,4	0,2	31,0
	N	-4,5	10,8	-20,4	7,5	0,4	6,6	-2,5	19,7
	D	-8,2	10,6	-25,9	5,6	-1,5	0,3	-6,9	5,0