

Kapitel 8 | Mikroklima und Biotemperaturen auf der 1971er Moräne des Rotmoosferner-Gletschervorfeldes (Obergurgl, Ötztal)

Brigitta Erschbamer

Zusammenfassung

Seit dem Jahr 1996 wird im Gletschervorfeld des Rotmoosfers (Obergurgl, Ötztal) der Jahresverlauf der Bodenoberflächentemperatur auf unbewachsenem Moränenboden des Gletscherstandes 1971 untersucht. Während der Vegetationsperiode wird zusätzlich eine Mikroklimastation betrieben, wobei Luft- und Bodentemperaturen, Luftfeuchtigkeit und Temperaturen in Pflanzenpolstern gemessen werden. Der vorliegende Artikel präsentiert die Datenreihen von 1996 bis 2011 (Mikroklimastation) bzw. von 1998 bis 2011 (Bodenoberflächentemperaturen). Die Dauer der Vegetationszeit im Verlauf der Untersuchungsjahre, Temperaturextreme und -mittelwerte werden dargestellt und mögliche Auswirkungen auf die Entwicklungsstadien der Pflanzen diskutiert.

Abstract

The glacier foreland of the Rotmoosferner is one of the long-term ecological research sites in Obergurgl (Ötztal, Tyrol, Austria). Since

1996, soil surface temperatures are measured the year round on bare ground moraines of the glacier stage 1971. Air and soil temperatures, air humidity and temperatures of plant cushions are recorded during the growing season. Furthermore, the duration of the growing season, temperature extremes and – means are shown and possible effects on plants are discussed. Data from 1996 till 2011 are presented.

1. Einleitung

Gletschervorfelder werden als „unwirtliche“ Lebensräume eingestuft, da die abiotischen Bedingungen als ungünstig für die Ansiedelung von Pflanzen erachtet werden. Zu diesen ungünstigen Bedingungen zählen unter anderen die niedrigen Temperaturen. Kalt muss jedoch nicht gleich kalt für die Pflanze sein (Körner & Larcher 1988), denn Pflanzentemperaturen weichen oft sehr stark von den meteorologischen Standard-Temperaturmessungen der

Umgebungsluft ab (Larcher & Wagner 2009). Entscheidend für die Pflanze sind ihre Wuchsform und -höhe und die Standortparameter, wie z.B. Exposition, Hangneigung, Horizontüberhöhung und damit der Strahlungsgenuss des Wuchsortes. In der Ökologie verwendet man den Begriff „Bioklima“ für den Pflanzenrelevanten Bereich des Mikroklimas, d.h. den Bereich, der von der Bestandsoberfläche bis zu den Wurzeln reicht (Cernusca 1976). In geschlossenen Beständen ist das Bioklima stabiler, wärmer und feuchter (Larcher 2012) als es die Werte der meteorologischen Stationen sind, die in der Regel Standardmessungen in 2 m Höhe durchführen. Die offenen Bestände eines Gletschervorfeldes weisen extremere Verhältnisse auf mit niedrigeren Minima und höheren Maxima (Larcher & Wagner 2009). Das Bioklima wurde vor allem in der Zwergstrauchheide des Zentralalpenraumes studiert (Cernusca 1976, Larcher & Wagner 2004). Körner et al. (2003) verglichen europaweit die Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe vom Waldgrenzbereich mit jenen der alpinen Räsen. Baumbestände wiesen dabei im Vergleich zu alpinen Räsen während der Vegetationszeit eine kühtere Bodentemperatur auf. Larcher & Wagner (2009, 2010) und Larcher (2012) geben einen Überblick über die Verhältnisse entlang des Höhengradienten von der Waldgrenze zur Gletscherregion. Interessant sind dabei vor allem die bioklimatischen Extremwerte, denn sie erlauben eine Abschätzung der Frost- und Hitzeeffekte, die begrenzend für das Pflanzenleben am Standort sein können (Larcher 2012).

Im Gletschervorfeld können Fröste auch im Sommer auftreten. Die Pflanzen können also jederzeit in ihrer empfindlichsten Phase während des Wachstums geschädigt werden (Taschler et al. 2004, Taschler & Neuner 2004, Neuner et al. 2013, Wagner et al. 2013). Daneben ist in den spärlich besiedelten Gletschervorfeldflächen an sommerlichen Schönwettertagen aber auch eine beträchtliche Erwärmung der Pflanzenorgane, der Bodenoberfläche und des Bodens zu erwarten (Neuner & Buchner 2012), sodass sogar Hitzeschäden auftreten können (Buchner & Neuner 2003). Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Biotemperaturen in jungen Moränen eines Gletschervorfeldes im Ötztal zu erfassen und sie mit der meteorologischen Standardmessung in 2 m Höhe vor Ort zu vergleichen. Langzeit-Datenreihen sollen mit dieser Arbeit verfügbar gemacht werden. Anhand der Extremwerte wird abgeschätzt, in wie weit Gletschervorfeldpflanzen in ihrer Entwicklung gefährdet sein könnten.

2. Untersuchungsgebiet

Die Messstation befindet sich in 2400 m Meereshöhe auf der orographisch rechten Talseite des Gletschervorfeldes im Rotmoostal, Obergurgl, Ötztal ($46^{\circ}49'43,1''$ N, $11^{\circ}2'32,54''$ E), auf der Moräne des Gletscherstandes 1971 (Abb. 1, vgl. auch Abb. 1 in Koch & Kaufmann 2010). Es handelt sich um eine



Abb. 1: Untersuchungsgebiet im Gletschervorfeld des Rotmoosfners (Obergurgl, Ötztal, Tirol) auf der Moräne des Gletscherstandes 1971 (Foto: Brigitta Erschbamer 2012)

ebene Fläche, die von einer Pioniervegetation bestimmt wird. *Saxifraga aizoides*, *Saxifraga oppositifolia*, *Artemisia genipi*, *Linaria alpina* und *Poa alpina* sind als bedeutendste Arten zu nennen (Raffl et al. 2006, Nagl & Erschbamer 2010). Die Gesamtdeckung der Vegetation beläuft sich auf weniger als 15 %.

Das Untersuchungsgebiet zählt zum Langzeit-Untersuchungsprogramm der Alpinen Forschungstelle Obergurgl und ist damit eine Lokalität der Long-Term Ecosystem Research (LTER) Plattform Tyrolean High Alps.

3. Methodik

Im Zuge des Gletschervorfeldprojektes im Rotmoostal (Nagl & Erschbamer 2010) wurde von der Autorin im Zeitraum von 1996 bis 2011 jeweils in der Vegetationsperiode ein Datenlogger (Grant Squirrel Series 1250, Grant Instruments, Cambridge, England) betrieben, der insgesamt 10 Messkanäle aufwies. Diese Messkanäle umfassten sechs Sensoren für Bodentemperaturen (Pt-Sensoren), zwei für Lufttemperaturen und zwei für Luftfeuchtigkeit. Lufttemperatur und -feuchtigkeit wurden in 2 m und in 50 cm Höhe oberhalb

der Bodenoberfläche gemessen, die Bodentemperaturen in 10 cm Bodentiefe. Die weiteren Pt-Sensoren wurden in Pflanzenpolstern von *Saxifraga aizoides* und *Saxifraga oppositifolia* angebracht, sodass sie komplett durch Sprosse und Blattmasse bedeckt waren. In der vorliegenden Arbeit werden die Lufttemperaturen, die Bodentemperatur in 10 cm Tiefe und die Temperaturen in *Saxifraga oppositifolia*-Polstern an einem grobkörnigen Standort (Geröll von rund 10 cm Durchmesser) und an einem sandigen Standort angegeben. Folgende Abkürzungen werden verwendet: 200 cm Luft, 50 cm Luft, *Saxi*-Geröll, *Saxi*-Sand, 10 cm Boden. Die Messzeit des Grant Squirrel-Datenloggers entspricht nicht exakt der schneefreien Zeit. Es wurde jedoch versucht, die Station möglichst rasch nach der Schneeschmelze in Betrieb zu setzen. Das Messintervall betrug eine Stunde.

Im Zuge des Experimentes zu den Auswirkungen von erhöhten Temperaturen auf Gletschervorfeldpflanzen (Erschbamer 2007) wurden seit 1996 an diesem Standort ganzjährig auch Bodenoberflächentemperaturen mit Hilfe von Optic StowAway- bzw. Tidbit-Datenloggern (TBI32-20+50; Onset Computer Corporation, Inc., Pocasset, MA, USA) gemessen. Als Strahlungsschutz wurden Aluminiumkappen verwendet, die freien Luftdurchzug erlaubten. Das Abtastintervall betrug 15 Minuten. In den Jahren 1996 und 2007 war die Datenregistrierung teilweise unterbrochen, sodass die meisten Klimaparameter nicht berechnet werden konnten. In den übrigen Jahren waren nur kleinere Datenlücken von weniger als einem Tag bzw. einigen

wenigen Tagen aufgetreten. Die kurzen Zeiträume wurden bei der Ermittlung der Mittelwerte vernachlässigt.

Die Auswertung der Daten erfolgte mit den Programmen EXCEL und SPSS 18.0 für MS Windows. Jahres-, Monats- bzw. Tagesmittelwerte, absolute Maxima und Minima werden angegeben. Die potentiell mögliche Vegetationszeit wurde nach Molau & Mølgaard (1996) als „growing degree days“ (GDD) definiert, d.h. Tage mit Tagesmittelwerten über 2 °C. Als Indikator für Schneefreiheit/Schneeschmelze wurden Tagesmittelwerte von über 0 °C gewertet („thawing degree days“ – TDD, Molau & Mølgaard 1996). Für den Trend über die Jahre hinweg wurde das Bestimmtheitsmaß R² berechnet.

4. Ergebnisse

Temperaturen und Luftfeuchtigkeit in den Vegetationsperioden 1996-2011

Mittelwerte, absolute Maxima und Minima der Temperatur während der Vegetationsperiode sind in Tab. 1 dargestellt. In 2 m Höhe betrugen die mittleren Lufttemperaturen während der Vegetationsperiode rund 7,0 ± 0,7 °C, in 50 cm Höhe 7,15 ± 0,6 °C. In den *Saxifraga*-Polstern und in 10 cm Bodentiefe wurden signifikant höhere Temperaturen gemessen ($p \leq 0,05$). Die Mittelwerte betrugen dabei im Pflanzenpolster auf Geröll 8,99 ± 0,6 °C, auf Sand 9,5 ± 0,8 °C und im Boden

Tab. 1: Mittelwerte, absolute Maxima und Minima während der Vegetationsperiode im Gletschervorfeld des Rotmoosferners (1971er Moräne) in den Jahren 1996 – 2011. Die Messungen der Lufttemperaturen erfolgten in 200 cm und 50 cm Höhe, die Bestandstemperaturen in *Saxifraga oppositifolia*-Polstern auf Geröll bzw. Sand und die Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe

Jahr		200 cm Luft	50 cm Luft	Saxi-Geröll	Saxi-Sand	10 cm Boden
	Mittel	6,04	6,47	9,27	9,19	8,74
1996	Max	18,3	19,7	28,8	29,8	21,5
6.6.-3.9.	Min	-4,5	-4,6	0,1	-0,3	0,9
	Mittel	7,48	7,45	8,80	9,70	7,95
1997	Max	18,5	17,8	26,3	24,5	20,6
23.7.-30.9.	Min	-2,6	-2,6	-0,5	0,6	0,7
	Mittel	6,57	6,57	8,46	9,99	7,71
1998	Max	20,9	20,2	31,8	27,9	21,6
1.7.-30.09.	Min	-6,7	-6,2	-1,9	0,4	-0,1
	Mittel	7,13	7,39	8,79	8,93	8,21
1999	Max	16,7	17,9	31,9	26,8	17,6
14.7.-30.9.	Min	-0,9	-0,7	0	0	1,4
	Mittel	6,60	7,01	9,14	10,57	8,68
2000	Max	18,7	20,2	31	27,1	19,3
17.6.-6.9.	Min	-3,1	-3,1	-0,3	0,6	0,7
	Mittel	6,09	6,38	8,41	8,04	7,96
2001	Max	19,3	20,7	30,3	27,8	18,9
30.6.-21.9.	Min	-5,2	-5,1	-1,3	-1,3	0,2
	Mittel	6,42	6,51	8,68	8,63	7,77
2002	Max	16,2	17,2	29,1	26,7	19,2
4.7.-23.9.	Min	-3,8	-3,9	-1	-1,2	0,5
	Mittel	8,42	8,54	10,89	10,11	9,87
2003	Max	19,6	21,2	33,8	30,1	21,7
6.6.-30.9.	Min	-3,2	-3,2	-0,3	-0,8	1,1
	Mittel	7,00	7,30	8,73	9,40	7,91
2004	Max	16,2	18	33,3	26,9	21,3
15.7.-29.9.	Min	-5,1	-4,9	-0,9	0,2	0,1
	Mittel	6,92	7,04	8,56	9,25	8,64
2005	Max	19,2	20,5	36,1	34	23,5
12.6.-25.9.	Min	-4,3	-4,6	-1,6	-0,4	1,6

Jahr		200 cm Luft	50 cm Luft	Saxi-Geröll	Saxi-Sand	10 cm Boden
	Mittel	7,65	7,98	9,32	10,44	9,35
2006	Max	18,2	20,1	35,8	31,2	22,3
24.6.-27.9.	Min	-3,2	-3,4	-0,5	0,6	1,6
	Mittel	6,57	7,01	8,79	10,18	8,90
2007	Max	16,3	18,2	28,1	26,5	19,2
20.6.-15.7.	Min	-2,1	-1,9	0	0,8	2,2
	Mittel	6,83	6,97	9,01	9,19	8,61
2008	Max	18,5	19,4	30,1	28,6	19,6
10.6.-26.9.	Min	-8	-7,9	-3,4	-2,3	0,6
	Mittel	7,98	7,73	9,45	10,23	9,07
2009	Max	19,3	18,2	24,3	27,5	19,2
27.6.-30.9.	Min	-3,3	-3,4	0,4	0,5	1,8
	Mittel	6,31	6,63	9,15	8,16	8,11
2010	Max	19,9	22,4	37,2	39,7	22,3
3.7.-30.9.	Min	-5,8	-6,1	0,3	-3	0,4
	Mittel	7,74	7,49	8,42	9,46	8,60
2011	Max	20,9	19,7	31,2	28,6	20,8
24.6.-30.9.	Min	-4,6	-4,6	-1,1	0,4	0,4

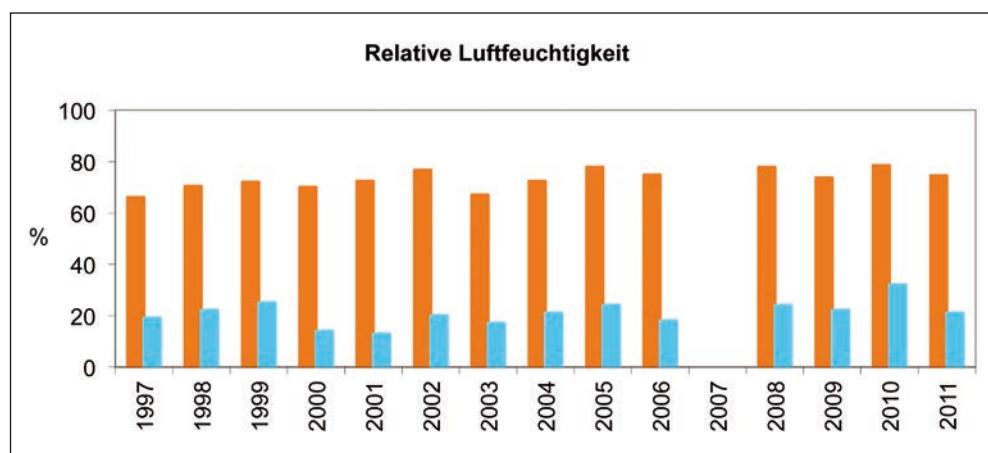


Abb. 2: Relative Luftfeuchtigkeit in %, gemessen während der Vegetationsperiode im Gletschervorfeld des Rotmoosferrns (1971er Moräne) in 200 cm Höhe; rot = Mittelwerte, blau = mittlere Minima

$8,5 \pm 0,6$ °C. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) waren auch zwischen dem Sand-Standort und den Bodentemperaturen zu vermerken. Das absolute Maximum wurde mit 39,7 °C am Sand-Standort erreicht (2010), während die Lufttemperatur zu diesem Zeitpunkt nur maximal 19,9 °C erreichte. Das absolut höchste Maximum der Lufttemperatur betrug 20,9 °C im Sommer 2011. Die absoluten Minima in der Vegetationszeit lagen in den *Saxifraga*-Polstern zwischen -3,4 und -3,0 °C, in 2 m Höhe betrug das absolute Minimum allerdings -8,0 °C (2008). Der Frost reichte in der Vegetationszeit kaum in den

Boden hinein, hier betrug das absolute Minimum nur -0,1 °C.

Die Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe reichten von 65 bis 79 % (Abb. 2), das absolute Minimum betrug 13 %, die absoluten Maxima erreichten 98 % bzw. 100 %.

Bodenoberflächentemperaturen

Die mittlere Jahrestemperatur, berechnet über die Periode von 1998-2011, betrug an der Bodenoberfläche 2,2 °C (Tab. 2), mit einer

Tab. 2: Mittlere Monatstemperaturen, absolute Maxima und Minima 1998-2011 an der Bodenoberfläche im Bereich der 1971er Moräne des Gletschervorfeldes

1998-2011	Mittel	Max	Min
Jänner	-1,3	0	-7,0
Februar	-1,2	-0,1	-4,7
März	-0,9	0,1	-3,9
April	-0,5	0,1	-1,7
Mai	0,3	23,6	-3,1
Juni	6,0	31,6	-3,7
Juli	9,2	35,4	-1,7
August	9,7	36,1	-1,1
September	5,5	32,6	-3,4
Oktober	1,3	28,3	-7,4
November	-0,9	12,3	-10,5
Dezember	-0,6	22,2	-4,6
Jahr	2,2		
<i>Extremwerte</i>		36,1	-10,5
		(2011)	(2001)

Schwankungsbreite von 1,3 °C (1998) und 4,7 °C (2010, Abb. 3). Das absolute Maximum betrug im Sommer 2011 36,1 °C (am 20. August), das absolute Minimum resultierte mit -10,5 °C (Tab. 2) am 24. November 2001. Der absolut tiefste Wert während der gesamten Untersuchungszeit wurde mit -11,5 °C im Jahre 1997 (am 29. Oktober) an der Bodenoberfläche registriert. In den

Sommermonaten Juli und August wurden Mittelwerte von 9,2 °C und 9,7 °C erreicht (Tab. 2). Die tiefsten Temperaturen wurden jeweils im Jänner, Oktober und November gemessen. Frost konnte allerdings in jeder Jahreszeit beobachtet werden: Im Juli und August beispielsweise lagen die absoluten Minima bei -1,7 °C bzw. -1,1 °C.

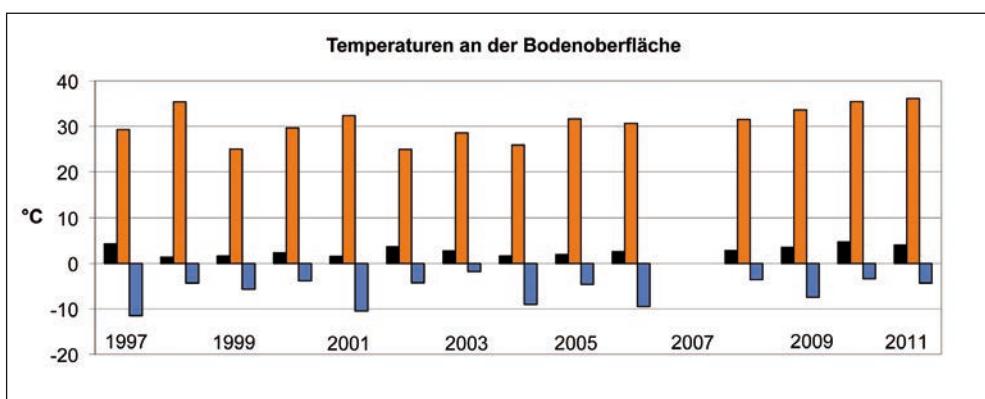


Abb. 3: Temperaturen an der Bodenoberfläche auf der 1971er Moräne des Gletschervorfeldes: Jahresmittel (schwarz), absolute Maxima (orange) und Minima (blau) in den Jahren 1997-2011. Für 2007 liegen nur teilweise Daten vor, daher können hier keine Werte angegeben werden

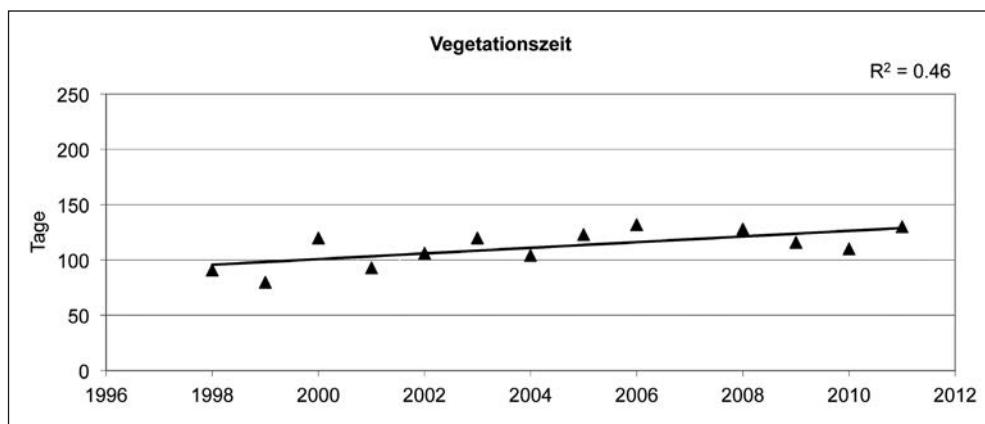


Abb. 4: Vegetationszeit in Tagen (Tage mit Mittelwerten von > 2 °C) von 1997-2011 mit Trendlinie (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,46$)

Dauer der Vegetationszeit

Die Vegetationszeit (GDD, Tagesmittel > 2 °C) dauerte im Durchschnitt 112 ± 16 Tage, wobei über die Untersuchungsperiode hinweg ein leicht ansteigender Trend zu erkennen ist ($R^2 = 0,46$; Abb. 4). Die schneefreie Zeit (TDD, Tagesmittel > 0 °C) betrug im Durchschnitt 137 ± 38 Tage, wobei vor allem in einigen Jahren eine lange schneefreie Zeit bis in den November festzustellen war. Die Zeit der Ausaperung im Frühjahr/Frühsommer (Abb. 5) war sehr unterschiedlich (Tab. 3). Die frühesten Ausaperungstermine konnten in den Jahren 2000, 2003, 2005, 2007, 2008 und 2011 beobachtet werden. In diesen Jahren waren die Untersuchungsflächen bereits ab Mai schneefrei. Der absolut früheste Beginn der Vegetationsperiode war 2007 bereits ab 12. Mai mit Tagesmitteltemperaturen von

Tab. 3: Beginn der Vegetationsperiode in den Jahren 1998-2012 auf der 1971er Moräne des Gletschervorfeldes

Jahr	Beginn Vegetationsperiode
1998	27. Juni
1999	29. Juni
2000	23. Mai
2001	30. Juni
2002	10. Juni
2003	31. Mai
2004	30. Juni
2005	27. Mai
2006	7. Juni
2007	12. Mai
2008	31. Mai
2009	13. Juni
2010	9. Juni
2011	25. Mai
2012	2. Juni



Abb. 5: Ausaperungsmuster im Rotmoostal, von der Liebener Rippe aus betrachtet. Deutlich zu sehen ist die Lawine von den Seelenkögeln herab, die Jahr für Jahr unterhalb der Versuchsfläche der 1971er Moräne eine sehr späte Ausaperung bewirkt (Foto: Eva-Maria Koch, 09.07.09)

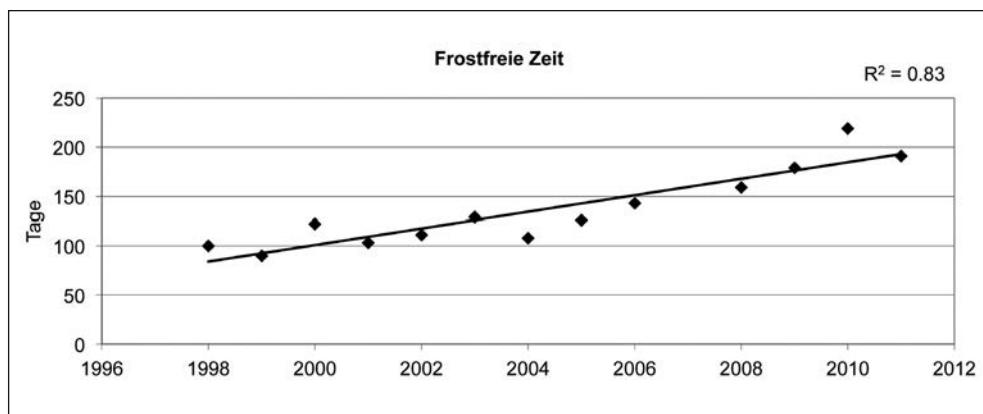


Abb. 6: Frostfreie Zeit in Tagen (Tage mit Mittelwerten von $> 0^{\circ}\text{C}$) von 1997-2011 mit Trendlinie (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,83$)

$> 2^{\circ}\text{C}$ (Tab. 3). Insgesamt ergab sich auch hinsichtlich schneefreier Zeit ein ansteigender Trend über den gesamten Messzeitraum ($R^2 = 0,83$, Abb. 6).

Einige typische Jahresgänge der Bodenoberflächentemperaturen sind in den Abb. 7 und 8 dargestellt. Die winterliche Schneedecke bewirkte in der Regel eine Bodenoberflächentemperatur von knapp unter 0°C bis unter -2°C . Tiefere Temperaturen waren im Un-

tersuchungszeitraum eher selten. Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 7 für die Winterperiode 2001-2002, für welche Tagesmittelwerte von bis zu $-10,5^{\circ}\text{C}$ berechnet wurden.

Zwischen Bodenoberflächen- und Lufttemperaturen in 2 m Höhe bestehen höchst signifikante Unterschiede ($p < 0,0001$). Die Unterschiede hinsichtlich Tagesmittelwerte sind in Abb. 9 für die Sommermonate 2000, 2005 und 2010 dargestellt.

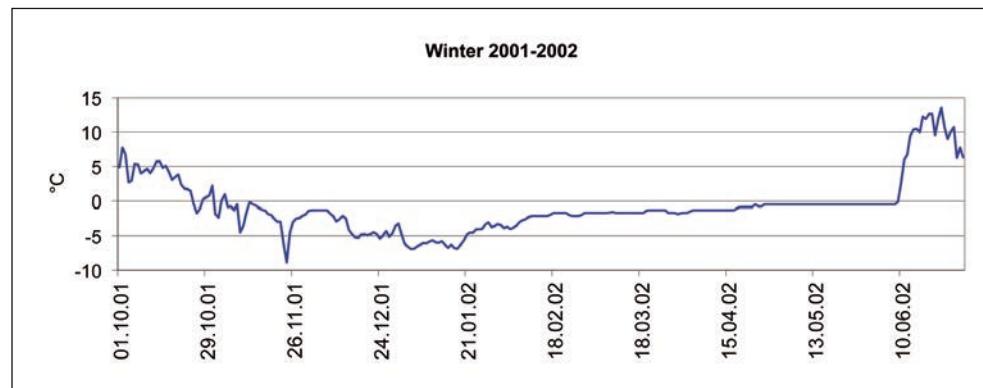


Abb. 7: Bodenoberflächentemperaturen in der Winterperiode 2001-2002 und im Juni 2002. Angegeben sind die Tagesmittelwerte

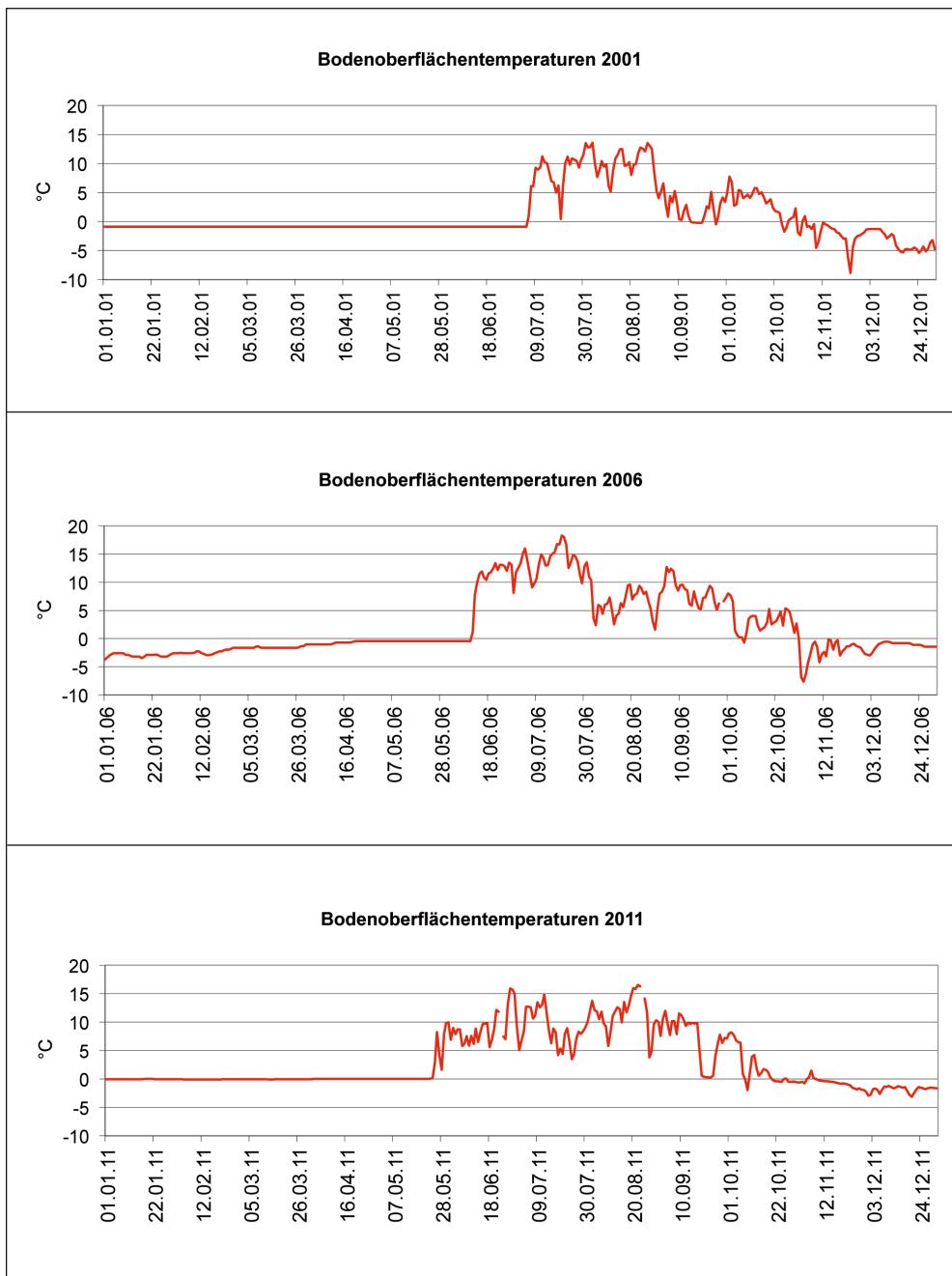


Abb. 8: Bodenoberflächentemperaturen der Jahre 2001, 2006 und 2011 auf der 1971er Moräne im Gletschervorfeld des Rotmoosferrners. Angegeben sind die Tagesmittelwerte

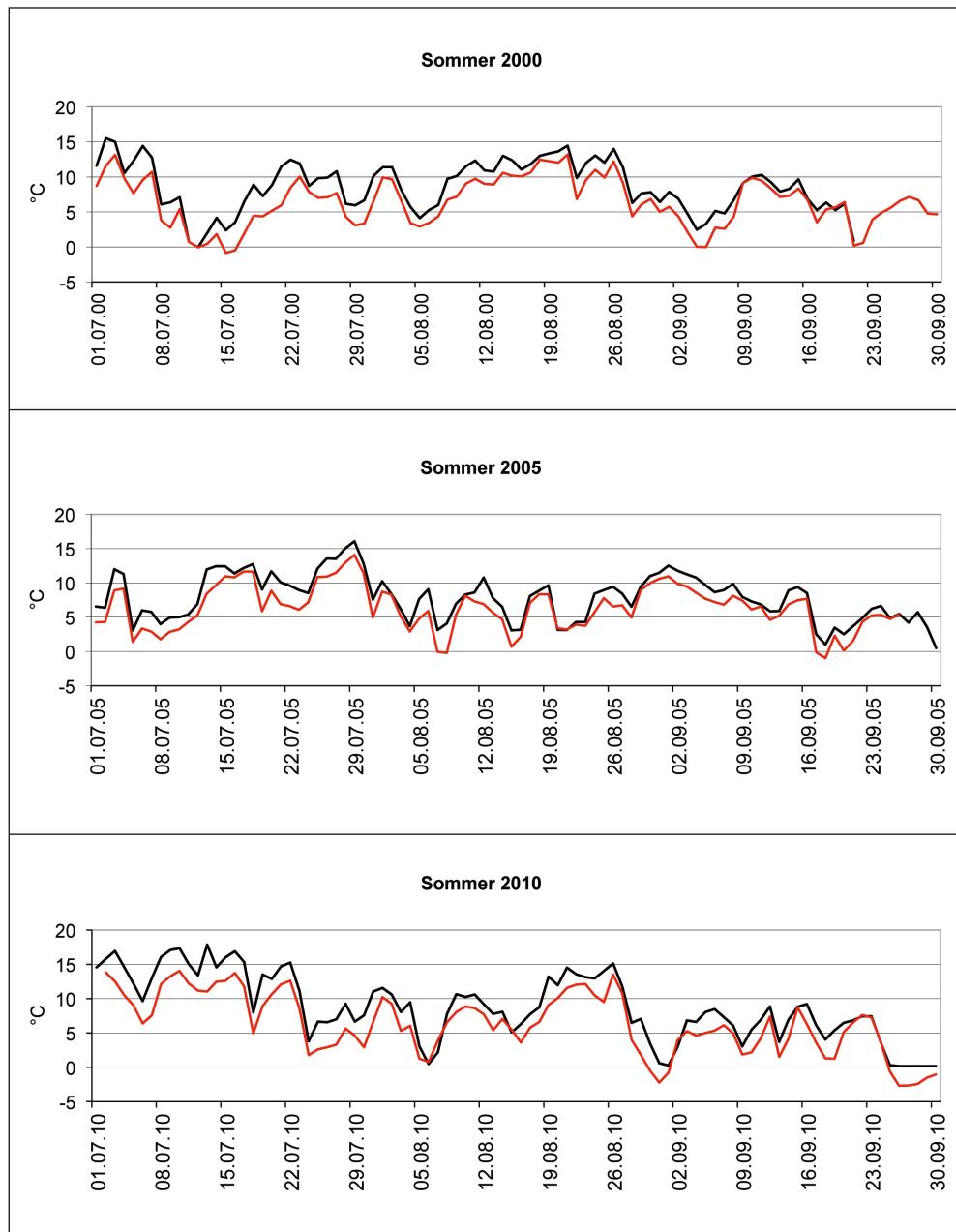


Abb. 9: Verlauf der Lufttemperatur in 2 m Höhe (rot) und der Bodenoberflächentemperatur (schwarz) auf der 1971er Moräne im Gletschervorfeld des Rotmoosferrns für die Monate Juli, August, September 2000, 2005 und 2010

5. Diskussion

Wie erwartet gab es höchst signifikante Unterschiede zwischen den Luft- und Bodenoberflächentemperaturen bzw. den Luft- und Bodentemperaturen, ebenso wie auch zwischen den Luft- und Pflanzentemperaturen. Auf die höhere Erwärmung der Pflanzenorgane, der Bodenoberfläche und des Bodens wurde bereits vielfach hingewiesen (Körner 2003; Larcher & Wagner 2009, 2010; Larcher 2012; Neuner & Buchner 2012). Die Topographie und die Eigenschaften des Substrates (z. B. Körnigkeit, Porenanteil, Lagerungsdichte, Wassergehalt; Scheffer/Schachtschabel 1992) bzw. die Struktur der Vegetation und ihre ökophysiologischen Besonderheiten bestimmen dabei die Variabilität und die Spanne der Temperaturunterschiede (Graham et al. 2012). Die sandige Bodenoberfläche bewirkt offensichtlich eine stärkere Erwärmung des *Saxifraga oppositifolia*-Polsters im Vergleich zu jenem auf grobkörnigem Material. Die Steine, zwischen denen letzterer wuchs, ließen wohl eine intensivere Luftbewegung im Polster zu. Allerdings waren die Unterschiede zwischen grob- und feinkörnigem Vorkommen von *Saxifraga oppositifolia* statistisch nicht signifikant. Bei allen Temperaturdaten ist zu bedenken, dass die Messergebnisse bereits über sehr kurze Distanzen – im Meterbereich (Scherrer & Körner 2011), teilweise sogar schon im Zentimeterbereich (Graham et al. 2012) – stark variieren können.

Vergleicht man die Lufttemperaturen in 2 m Höhe im Gletschervorfeld des Rotmoos-

fers mit jenen des Patscherkofel-Gipfelbereichs (2247 m Meereshöhe), so sind die Mittelwerte am Patscherkofel (Zeitraum 1995-2009, Larcher & Wagner 2010) im Juli und August um 0,7 °C bis 0,9 °C höher als im Gletschervorfeld. Im Vergleich dazu sind die Lufttemperaturen am Mittelbergferner (Ötztaler Alpen, 2850 m Meereshöhe; Larcher & Wagner 2010) im Juli und August um 2,2 °C bzw. 1,9 °C kälter als im Gletschervorfeld des Rotmoosferners. Diese Unterschiede zu niedriger bzw. höher gelegenen Stationen entsprechen sehr gut der Temperaturabnahme mit der Höhe, die durchschnittlich 0,60 °C bis 0,65 °C pro 100 Höhenmeter ausmacht (Franz 1979).

Für das untersuchte Gletschervorfeld im Rotmoostal konnten verhältnismäßig lange Vegetationszeiten von durchschnittlich mehr als 3 Monaten beobachtet werden. Im Vergleich dazu wurden aus dem Gletschervorfeld des Schaufelferners im Stubaital auf 2880 m Meereshöhe nur 5 Wochen bis 2 Monate Vegetationszeit angegeben (Larcher et al. 2010). Unter einer winterlichen Schneedecke von mehr als 50 cm sinkt die Temperatur selten unter -5 °C ab (Aulitzky et al. 1982, Sakai & Larcher 1987). Dies zeigte sich auch im Gletschervorfeld des Rotmoosferners. Stärkere Fröste mit mittleren Minima an der Bodenoberfläche von -4 °C bis -6 °C traten im Gletschervorfeld des Rotmoosferners öfters im Spätherbst und in der ersten Winterhälfte bei noch geringer bis fehlender Schneedecke auf. Im Spätwinter war das Gebiet meist schneedeckt, die Temperaturen lagen dann knapp unter 0 °C.

Das Mikroklima hängt ganz wesentlich von der Strahlung am Standort ab (Körner et al. 2003): Längere Besonnung führt zu höheren Temperaturen und einer längeren Vegetationsperiode, aber auch zu stärkeren Frösten, wenn die Schneedecke fehlt. So konnten beispielsweise Körner et al. (2003) auf der Hohen Mut in 2592 m Meereshöhe im Jahr 1999 eine Vegetationsperiode von 160 Tagen ermitteln und für das Jahr 2000 ein absolutes Minimum von -15,2 °C in 10 cm Bodentiefe messen (Jänner 2000). Auf der 1971er Moräne im Gletschervorfeld des Rotmoosfners dauerte die Vegetationsperiode im Jahr 1999 ca. 100 Tage. Das absolute Minimum der Temperatur an der Bodenoberfläche betrug im Gletschervorfeld im Jänner 2000 nur -3,9 °C.

Während der Vegetationsperiode gab es immer wieder einzelne Frostereignisse und es stellt sich die Frage nach der Gefährdung der Pflanzen. Die Frostresistenz der Pflanzen variiert sehr stark je nach Lebensform (Taschler & Neuner 2004) und ist abhängig vom Entwicklungsstadium der Pflanze (Marcante et al. 2012, Ladinig et al. 2013, Neuner et al. 2013). Marcante et al. (2012) zeigten, dass vor allem Keimlinge und Jungpflanzen eine geringe Frostresistenz aufweisen und bereits bei -2,5 °C zugrunde gehen (die Resistenz wurde als LT₅₀ bestimmt, d.h. nach einer Expositionszeit von 4 Stunden waren 50 % der Proben letal geschädigt). Für Keimlinge der Pionierarten und deren Jungpflanzen (z.B. *Saxifraga aizoides*, *Oxyria digyna* und *Artemisia genipi*) könnten demnach die gemessenen Frostereignisse in der Vegetationszeit bereits letal gewesen sein, ebenso für *Poa alpina*-

Keimlinge. Eine adulte *Poa alpina*-Pflanze ist hingegen ziemlich frostresistent (LT₅₀: -9,8 °C ± 2,7 °C). Die Sensitivität der Entwicklungsstadien von alpinen Pflanzen gegenüber Frost ist jedoch artspezifisch. So weisen beispielsweise adulte Pflanzen von *Saxifraga aizoides* und *Oxyria digyna* eine geringere Frostresistenz auf im Vergleich zu ihren Keimlingen (Marcante et al. 2012). Außerdem tolerieren die vegetativen Organe der alpinen Pflanzen um 2-5 °C niedrigere Fröste im Vergleich zu den reproduktiven Teilen (Neuner et al. 2013, Ladinig et al. 2013).

Hinsichtlich Hitzeschäden scheint es zumindest in den vergangenen Jahren keine Gefährdung gegeben zu haben. Die untersuchten Entwicklungsstadien der Gletschervorfeldarten wiesen wesentlich höhere Hitzeresistenzen auf (z.B. LT₅₀: + 46,2 °C für Keimlinge; Silvia Marcante, unpubl. Daten) im Vergleich zu den absoluten Maxima, die während der Untersuchungszeit an der Bodenoberfläche (36,1 °C) oder in den Pflanzenpolstern (39,7 °C) gemessen wurden. Hitzeschäden können allerdings in alpinen Habitaten auftreten und wurden beispielsweise an Blättern von *Minuartia recurva* (Buchner & Neuner 2003) und *Saxifraga paniculata* (Neuner et al. 1999-B16) nachgewiesen.

Insgesamt betrachtet zählt die Temperatur zu den primären Faktoren, welche die Besiedelung im Gletschervorfeld beeinflussen. Allerdings zeigten die Arbeiten von Erich Schwienbacher (unpubl. Daten des FWF-Projektes P19090) und Erschbamer et al. (2012), dass die Trockenheit der obersten Bodenschichten entscheidend ist sowohl für die Keimung als

auch für die Etablierung der Keimlinge. Auch Interaktionen zwischen der Feuchtigkeit des Bodens und den Bodentemperaturen werden angenommen (Graham et al. 2012). Hier besteht auf jeden Fall noch weiterer Forschungsbedarf.

Literatur

- Aulitzky, H., Turner, H. & Mayer, H. (1982) Bioklimatische Grundlagen einer standortsgemäßen Bewirtschaftung des subalpinen Lärchen-Arvenwaldes. *Mitt. Eidg. Anst. Forst. Versuchswes.* 58: 327-580.
- Buchner, O. & Neuner, G. (2003) Variability of heat tolerance in alpine plant species measured at different altitudes. *Arct., Antarct., Alp. Res.* 35: 411-420.
- Cernusca, A. (1976) Bestandesstruktur, Bioklima und Energiehaushalt von alpinen Zergstrauchbeständen. *OEcolog. Plant.* 11: 71-102.
- Erschbamer, B. (2007) Winners and losers of climate change in a central alpine glacier foreland. *Arct., Antarct., Alp. Res.* 39: 237-244.
- Erschbamer, B., Bösch, D., Fleisch, M., Peintner, U. & Schwienbacher, E. (2012) Keimung und Etablierung im Gletschervorfeld in Abhängigkeit von abiotischen und biotischen Faktoren. *Ber. Reinholt-Tüxen-Gesell.* 24: 89-102.
- Franz, H. (1979) Ökologie der Hochgebirge. Ulmer, Stuttgart.
- Graham, E.A., Rundel, P.W., Kaiser, W., Lam, Y., Stealey, M. & Yuen, E.M. (2012) Fine-scale patterns of soil and plant surface temperatures in an alpine fellfield habitat, White Mountains, California. *Arct., Antarct., Alp. Res.* 44: 288-295.
- Koch, E.-M. & Kaufmann, R. (2010) Die tierische Besiedlung von Gletschermoränen. In: Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl, Koch, E.-M., Erschbamer, B. (Hg.), Alpine Forschungsstelle Obergurgl 1, Innsbruck University Press, Innsbruck, S. 165-183.
- Körner, Ch. (2003) Alpine Plant Life. 2nd edn. Springer, Berlin.
- 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.
- Körner, Ch. & Larcher, W. (1988) Plant life in cold climates. In: Plants and Temperature, Long S.E., Woodward F.I. (Hg.) Symp. Soc. Exp. Biol. 42, Cambridge, The Company of Biologists Ltd, S. 25-57.
- Ladinig, U., Hacker, J., Neuner, G. & Wagner, J. (2013) How endangered is sexual reproduction of high-mountain plants by summer frosts? – Frost resistance, frequency of frost events and risk assessment. *Oecologia*, accepted.
- Larcher, W. (2012) Bioclimatic temperatures in the High Alps. In: Plants in Alpine Regions. Cell Physiology of Adaptation and Survival Strategies, Lütz, C. (Hg.) Springer, Wien, New York, S. 21-27.

- Larcher, W. & Wagner, J. (2004) Lebensweise der Alpenrosen in ihrer Umwelt: 70 Jahre ökophysiologische Forschung in Innsbruck. Ber. nat.-med. Verein Innsbruck 91: 251-291.
- 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., Kainmüller, C. & Wagner, J. (2010) Survival types of high mountain plants under extreme temperatures. Flora 205: 3-18.
- Larcher, W. & Wagner, J. (2010) Temperatures in the life zones of the Tyrolean Alps. Österr. Akademie der Wissenschaften, Sitzungsber. Abt. I 213: 31-51.
- Marcante, S., Sierra-Almeida, A., Spindelböck, J.P., Erschbamer, B. & Neuner, G. (2012) Frost as a limiting factor for recruitment and establishment of early development stages in an alpine glacier foreland? J. Veg. Sci. 23: 858-868.
- Molau, U. & Mølgaard, P. (1996) The ITEX manual. Danish Polar Center, Copenhagen, Denmark.
- Nagl, F. & Erschbamer, B. (2010) Vegetation und Besiedelungsstrategien. In: Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl, Koch, E.-M., Erschbamer, B. (Hg.), Alpine Forschungsstelle Obergurgl 1, Innsbruck University Press, Innsbruck, S. 121-163.
- Neuner, G., Braun, V., Buchner, O. & Taschler, D. (1999) Leaf rosette closure in the alpine rock species *Saxifraga paniculata* Mill.: significance for survival of drought and heat under high irradiation. Plant Cell Environ. 22: 1539-1548.
- Neuner, G. & Buchner, O. (2012) Dynamics of tissue heat tolerance and thermotolerance of PS II in alpine plants. In: Plants in Alpine Regions. Cell Physiology of Adaption and Survival Strategies, Lütz, C. (Hg.) Springer, Wien, New York, S. 61-74.
- Neuner, G., Erler, E., Ladinig, U., Hacker, J. & Wagner, J. (2013) Frost resistance of reproductive tissues during various stages of development in high mountain plants. Phys. Plant. Doi: 10.1111/j.1399-3054.2012.01616.x
- Raffl, C., Mallaun, M., Mayer, R. & Erschbamer, B. (2006) Vegetation succession pattern and diversity changes in a glacier valley, Central Alps, Austria. Arct., Antarct., Alp. Res. 38: 421-428.
- Sakai, A. & Larcher, W. (1987) Frost Survival of Plants: Responses and Adaptation. Ecol. Stud. 62, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Scheffer/Schachtschabel (1992) Lehrbuch der Bodenkunde. Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.-H., Schwertmann, U. (Hg.) Fischer, W.R., Renger, M., Strelbel, O. (Mitarbeit) Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Scherrer, D. & Körner, Ch. (2011) Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. J. Biogeography 38: 406-416.

Taschler, D. & Neuner, G. (2004) Summer frost resistance and freezing patterns measured in situ in leaves of major alpine plant growth forms in relation to their upper distribution boundary. *Plant Cell Environ.* 27: 737-746.

Taschler, D., Beikircher, B. & Neuner, G. (2004) Frost resistance and ice nucleation in leaves of five woody timberline species measured in situ during shoot expansion. *Tree Physiol.* 24: 331-337.

Verzeichnis der Autorin

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