

**Die Rolle der Schneebedeckung für die  
Kryptogamen-Vegetation in der maritimen Antarktis  
(Potter-Halbinsel, King George Island)**

**The role of snowcover on the cryptogamic vegetation  
in the maritime Antarctic (Potter Peninsula, King  
George Island)**

---

**Jana Barbro Winkler**

**Ber. Polarforsch. 371 (2000)  
ISSN 0176-5027**

**Jana Barbro Winkler**

Institut für Polarökologie  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Wischhofstraße 1-3, Geb. 12,  
D-24116 Kiel

Die vorliegende Arbeit ist die Druckfassung einer Dissertation, die 2000 der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität  
zu Kiel vorgelegt wurde.

1	ZUSAMMENFASSUNG .....	3
2	SUMMARY .....	5
3	EINLEITUNG .....	5
3.1	Allgemeine Bemerkungen .....	7
3.2	Fragestellung .....	9
4	DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET .....	11
4.1	Geographische Lage und Topographie .....	11
4.2	Geologie .....	13
4.3	Geomorphologie der Potter-Halbinsel .....	14
4.4	Klima .....	15
4.5	Vegetation .....	17
5	METHODEN .....	20
5.1	Die Transekte .....	20
5.1.1	Transekt 1 .....	20
5.1.2	Transekt 2 .....	21
5.2	Erfassung des Mikroklimas .....	23
5.2.1	Sensoren .....	23
5.2.1.1	Lichtintensität .....	23
5.2.1.2	Temperatur .....	24
5.2.1.3	Luftfeuchte .....	25
5.2.1.4	Schneebedeckung .....	25
5.2.2	Datenerfassung und Stromversorgung .....	31
5.2.3	Mikroklima-Messstationen .....	32
5.3	Vegetationsanalysen .....	33
5.3.1	Vegetationsaufnahmen .....	33
5.3.2	Numerische Klassifikation und Ordination der Vegetationsaufnahmen .....	36
5.4	Wassergehalte unter Schnee .....	38
5.4.1	Natürliche Wassergehalte schneebedeckter Flechten .....	38
5.4.2	Aufsättigungsversuche unter Schnee .....	39
5.5	Messungen des CO <sub>2</sub> -Gaswechsels ausgewählter Flechtenarten .....	41
5.5.1	Die CO <sub>2</sub> -Gaswechsellanlagen .....	41
5.5.2	Versuche zum CO <sub>2</sub> -Gaswechsel .....	43
5.5.2.1	Versuche mit dem CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O-Porometer CQP-130 .....	43
5.5.2.2	Versuche mit dem Miniküvettenystem .....	44
5.5.3	Bestimmung der Bezugsgrößen für den CO <sub>2</sub> -Gaswechsel .....	45
5.5.4	Mathematische Modellierung der Nettophotosyntheseaktivität .....	47
5.6	Untersuchte Arten .....	48
5.6.1	Flechten .....	48
5.6.2	Moose .....	50
6	ERGEBNISSE .....	52
6.1	Schneebedeckung .....	52
6.1.1	Schneebedeckung im Transekt 1 .....	52
6.1.1.1	Schneehöhen am nordexponierten Hang 1996 .....	52
6.1.1.2	Schneehöhen am nordexponierten Hang 1997 .....	55

6.1.1.3	Interannuelle Variation der automatisch registrierten Schneehöhen 1996/ 1997 .....	58
6.1.1.4	Manuelle Messungen im Transekt 1 1995/1996 .....	59
6.1.2	Schneebedeckung im Transekt 2 1996 .....	61
6.2	Das Mikroklima .....	62
6.2.1	Das Mikroklima im Transekt 1 .....	62
6.2.1.1	Das Mikroklima am Standort von <i>Sanionia uncinata</i> 1996 .....	62
6.2.1.2	Das Mikroklima am Standort von <i>Himantormia lugubris</i> 1996 .....	64
6.2.1.3	Das Mikroklima am Standort von <i>Usnea aurantiaco-atra</i> 1996 .....	66
6.2.1.4	Saisonale Variation der mikroklimatischen Bedingungen 1996 an den Standorten der drei Arten .....	68
6.2.1.5	Interannuelle Variation des Mikroklimas 1996 und 1997 .....	72
6.2.2	Lichtverhältnisse im Transekt 2 .....	76
6.2.3	Lichtverhältnisse unter Schnee .....	78
6.3	Vegetationszusammensetzung im Transekt 1 .....	80
6.3.1	Artenanzahl und Wuchsformenspektrum .....	80
6.3.2	Artenspektrum in den Aufnahmeflächen entlang des Transekts 1 .....	81
6.3.3	Vegetationsmuster .....	85
6.3.3.1	Zusammenhang zwischen der Lage der Vegetationsgruppen und der Schneebedeckung .....	88
6.4	Rolle des Schnees für die Wassergehalte ausgewählter Flechtenarten .....	90
6.4.1	<i>In situ</i> Wassergehalte ausgewählter Flechtenarten .....	90
6.4.2	Verlauf der Aufsättigung unter Schnee .....	95
6.5	Der CO <sub>2</sub> -Gaswechsel ausgewählter Flechtenarten .....	100
6.5.1	Verlauf des CO <sub>2</sub> -Gaswechsels während der Aufsättigung durch Schnee .....	100
6.5.2	CO <sub>2</sub> -Gaswechsel von <i>Himantormia lugubris</i> und <i>Lecidea sciatrapha</i> unter kontrollierten Bedingungen .....	105
6.5.2.1	Vergleich der Licht- und Temperaturabhängigkeit der Netto- photosynthese von <i>Himantormia lugubris</i> und <i>Lecidea sciatrapha</i> .....	110
7	DISKUSSION .....	112
7.1	Eignung der automatischen Schneehöhensensoren zur ganzjährigen Erfassung der Schneehöhe .....	112
7.2	Zusammenhang zwischen Vegetationsausprägung und Schneedecke .....	114
7.3	Vergleich der mikroklimatischen Bedingungen an den verschiedenen Standorten .....	120
7.4	Reaktivierung des Gaswechsel durch Wasseraufnahme aus dem Schnee .....	123
7.5	Analyse des Photosyntheseverhaltens von <i>Himantormia lugubris</i> und <i>Lecidea sciatrapha</i> .....	127
7.6	Zusammenfassende Diskussion .....	133
8	LITERATUR .....	136
9	ANHANG .....	146
	DANKSAGUNG .....	151

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Auf der Potter-Halbinsel (King George Island, maritime Antarktis) wurden die Zusammenhänge zwischen der Vegetationsausprägung und der saisonalen Schneebedeckung entlang eines Transekts untersucht, das in Nord-Süd-Richtung verlief und von einer Senke bis zu einer Kuppe eine Höhendifferenz von 4,5 m hatte.

Um ganzjährig die kleinräumige Variation der Schneedecke erfassen zu können, wurden automatische Schneehöhensensoren entwickelt, die mittels Infrarotlichtschranken die Schneebedeckung registrierten. Entlang eines ca. 15 m langen Transektabschnitts wurde mit sieben automatischen Schneepegeln kontinuierlich von März 1996 bis November 1997 die Dauer und Höhe der Schneebedeckung gemessen. Die Eignung dieses Systems unter den herrschenden Klimabedingungen wird diskutiert.

Es zeigte sich ein deutlicher Gradient in der Schneebedeckung von der lange schneebedeckten Senke bis zur windexponierten Kuppe, die auch während der Wintermonate oft schneefrei war. Die größten Unterschiede in der Schneedecke zwischen den beiden Messjahren 1996 und 1997 traten in den Monaten September und Oktober auf.

Mittels Frequenzanalysen und Abschätzung des Deckungsgrads wurde die Vegetationszusammensetzung an 25 Punkten entlang des Transekts dokumentiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Artenzahl mit zunehmender Dauer der Schneebedeckung abnimmt. Anhand multivariater Analyseverfahren (Klassifikation und Ordination) wurden die Aufnahmeflächen hinsichtlich ihrer floristischen Ähnlichkeit in fünf Clustern zusammengefasst. Diese Gruppen spiegeln den Gradienten der Schneebedeckung wider. Das pleurokarpe Moos *Sanionia uncinata* dominierte die Vegetation in der annähernd sechs Monate schneebedeckten Senke. Strauchflechten wie *Himantormia lugubris* und *Usnea aurantiaco-atra* traten dagegen erst im höher gelegenen, windexponierten Transektabschnitt auf, der an weniger als 120 Tagen im Jahr schneebedeckt ist.

Parallel zu den Schneehöhenmessungen wurden von 1996 bis einschließlich 1997 die mikroklimatischen Bedingungen für drei jeweils typische Kryptogamen an ihren unterschiedlich lange schneebedeckten Standorten im Transekt erfasst. Ein Vergleich der Parameter Temperatur und photosynthetische Photonendichte (PPFD) zeigte während der Aperioden im Sommer und auch im Herbst nur sehr geringe Unterschiede an den drei Standorten. Im Winter und Frühjahr dagegen unterschieden sich die mikroklimatischen

Bedingungen deutlich. Am Standort von *Sanionia uncinata* in der Senke war das Licht im Frühjahr durch die hohe Schneedecke drastisch reduziert. In diesem Zeitraum betrug die Thallustemperatur konstant ca. 0°C. Dies ist auf eine Schmelzwasserzufuhr aus den höher gelegenen Hangbereichen zurückzuführen. Die Strauchflechten *Himantormia lugubris* in der Hangmitte und *Usnea aurantiaco-atra* auf der Kuppe waren während des Winters nicht durch eine hohe Schneedecke geschützt. Sie mussten daher deutlich tiefere Temperaturen als das Moos ertragen und waren auch immer wieder Gefrier-Tau-Zyklen ausgesetzt. Am Standort dieser Flechten stellte jedoch das Licht während des Frühjahrs keinen limitierenden Faktor für die Photosynthese dar.

Die Wasserverfügbarkeit am Standort ist für die Flechten als poikilohydre Organismen von entscheidender Bedeutung für die Primärproduktion. Dabei stellt der Schnee in der Antarktis eine wichtige Wasserquelle dar. Bei natürlichen Licht- und Temperaturbedingungen sättigten sich Thalli der Strauchflechten *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica* und *U. aurantiaco-atra* unter Schnee innerhalb weniger Stunden auf. Mit zunehmender Dauer der Schneebedeckung erhöhten sich die Wassergehalte nur wenig. Die Art der Schneebedeckung hatte dabei nur einen geringen Einfluss. Schon nach 2 bis 6 Stunden wurden Wassergehalte erreicht, die zur Reaktivierung des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels ausreichten. Bei Lufttemperaturen über dem Gefrierpunkt war unter dem Schnee ausreichend Flüssigwasser vorhanden, um die Photosynthese der Cyanolichene *Leptogium puberulum* zu aktivieren. Nur die Krustenflechte *Lecidea sciatrapha* zeigte eine Depression der Nettophotosynthese bei den unter Schnee erreichten Wassergehalten.

Für die Strauchflechte *Himantormia lugubris*, die im untersuchten Gebiet meist schneefrei war, und die chionophile Krustenflechte *Lecidea sciatrapha* wurden Photosynthesekapazitätsmodelle entwickelt. Beide Arten zeigten eine gute Anpassung an die am Standort herrschenden Temperaturbedingungen. Die Lichtkompensationspunkte lagen jedoch mit über 50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD verhältnismäßig hoch. Eine Verknüpfung der Photosynthesemodelle mit den mikroklimatischen Bedingungen an den drei untersuchten Standorten zeigte, dass für beide Flechten an einem Standort, der bis in den Sommer hinein mit einer hohen Schneeschicht bedeckt ist, hohe Respirationsverluste zu erwarten sind. Die negative Kohlenstoffbilanz aufgrund des Lichtmangels während der Schneebedeckung könnte während der schneefreien Zeit auch bei fortwährend optimalem Wassergehalt nicht ausgeglichen werden. Somit kann die Schneedecke im Frühjahr einen stressenden Faktor für die Kryptogamen darstellen.

## 2 SUMMARY

The extent to which seasonal snow cover determines vegetation pattern was investigated along a transect at Potter Peninsula (King George Island, maritime Antarctic). The transect extended southwards from a depression to a knoll with a change in elevation of 4.5 m. Special sensors were developed that automatically measured small changes in snow depth by means of infra-red light beams. Snow depth was recorded continuously from March 1996 to November 1997 at seven points along a 15 m segment of the transect. The suitability of this system under the prevalent climatic conditions is discussed.

A steep gradient in snow cover occurred along the transect. In contrast to the depression, where snow lay for long periods, snow-free episodes were frequent on the windswept knoll, even during the winter. Major differences in snow depth occurred along the transect for the months September and October in 1996 and 1997.

The vegetation composition at 25 points along the transect was described using estimates of percentage cover and species frequency. It was shown that the number of species decreased with increasing duration of snow cover. The sampling points were grouped into 5 clusters with respect to their floristic similarity using multivariate analysis techniques (cluster analysis and non-parametric multidimensional scaling). These clusters mirror the gradient in snow cover extent. In the depression, where snow lay for nearly six months, the pleurocarpous moss *Sanionia uncinata* dominates the vegetation. In contrast, fruticose lichens such as *Himantormia lugubris* and *Usnea aurantiaco-atra* occurred only on the more elevated, windswept part of the transect where snow lay for less than 120 days per year.

As well as measurements of snow depth, microclimatic conditions were recorded from 1996 to 1997, inclusive, for three cryptogams chosen as typical for sites with contrasting snow cover along the transect. The three investigated habitats were almost identical for temperature and photosynthetic active photon flux density (PPFD) during the snow free period in the austral summer and autumn. However, during winter and spring their microclimatic conditions differed greatly. Incoming radiation was reduced drastically by deep snow cover at the site of the moss *Sanionia uncinata*, in the depression. Thallus temperature was constant at approximately 0°C during spring, possibly due to melt water that originated higher up the slope. The fruticose lichens

*Himantormia lugubris*, in the middle of the slope, and *Usnea aurantiaco-atra*, at the knoll were not insulated by a deep snow-cover during winter. As a consequence they endured colder temperatures than the moss in the depression and were exposed to recurrent thaw-cycles. In spring radiation did not limit photosynthesis at the two lichen sites.

Being poikilohydrous, water availability is a factor of great importance for the primary production of lichens and, in the Antarctic, snow is an important water source. Thalli of the fruticose lichens *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica* and *U. aurantiaco-atra* became almost saturated within a few hours through water uptake from snow under natural light and temperature conditions. After this initial phase, thallus water content rose only slightly with increasing duration of snow cover. Differences in snow type and cover had little effect on thallus water content. Within two to six hours thallus water content had become sufficient to activate CO<sub>2</sub>-gas exchange. At air temperatures above the freezing point enough liquid water was present under the snow to activate photosynthesis of the cyanolichen *Leptogium puberulum*. Only the crustose lichen *Lecidea sciatrapha* showed a depression in net photosynthesis due to the high water contents that are reached beneath snow.

Models of photosynthetic capacity were developed for the fruticose lichen *Himantormia lugubris*, which was snow-free most of the time, and the chionophilous crustose lichen *Lecidea sciatrapha*. Both species are well adapted to the temperature conditions that prevail in their habitats. Light compensation points, exceeding 50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD, were comparatively high. By combining the photosynthesis models with the records of microclimatic conditions from the three investigated sites it was found that high respiratory losses could be expected for both lichens if they are covered by deep snow until summer. The carbon loss, due to low light, during the period of snow cover could not be compensated for during the time when the site was snow free. This remains true even if water contents were always optimal for photosynthesis. Therefore, snow cover in spring might well be a harmful factor for these cryptogams.



### 3 EINLEITUNG

#### 3.1 Allgemeine Bemerkungen

In der Antarktis dominieren Kryptogamen, vor allem Moose und Flechten sowie einige wenige Arten von Lebermoosen, Algen und Pilze, die terrestrische Vegetation. Die zwei natürlich vorkommenden Gefäßpflanzen haben nur eine sehr begrenzte Verbreitung (SMITH 1984, KOMÁRKOVÁ *et al.* 1985, 1990, SMITH 1996). Die Biogeographie der Antarktis weist einen ausgeprägten latitudinalen Gradienten auf, d.h. mit zunehmender geographischer Breite nimmt die Diversität, aber auch Abundanz und Fertilität der Kryptogamen deutlich ab (SEPPELT *et al.* 1992, GREEN *et al.* 1999). Dies ist nicht nur eine Folge der isolierten geographischen Lage des antarktischen Kontinents, sondern wird auch durch die extremen abiotischen Umweltbedingungen bedingt, denen die Organismen in den terrestrischen Ökosystemen der Antarktis ausgesetzt sind (KENNEDY 1999). Ein Schlüsselproblem für die Organismen in der Antarktis ist somit das Überleben unter den extremen Lebensbedingungen, die durch niedrige Temperaturen, geringe Niederschläge, starke Winde und eine ausgeprägte Saisonalität der Lichtverhältnisse bestimmt werden (KAPPEN *et al.* 1995). Eine Übersicht über verschiedene biologischen Anpassungen der Organismen, die ein Überleben unter solchen Bedingungen ermöglichen, gibt KENNEDY (1999).

Moose und Flechten gehören taxonomisch weit entfernten Gruppen an, sind sich jedoch hinsichtlich ihrer Anpassungen an extreme Umweltbedingungen bemerkenswert ähnlich (LONGTON 1997). Neben anatomischen und morphologischen Merkmalen sowie Reproduktions- und Verbreitungsmechanismen handelt es sich dabei auch um physiologische Anpassungen. Die verschiedenen Faktoren für den großen Erfolg von Moosen und Flechten in Polarregionen wurden u.a. von KAPPEN (1988), LONGTON (1988), SVEINBJÖRNSSON & OECHEL (1992) und GREEN *et al.* (1999) diskutiert. Viele Arten sind kältetolerant, haben ein breites Temperaturoptimum der Nettoassimilation und sind in der Lage, auch bei Minusgraden positive Photosyntheseraten erzielen (KALLIO & HEINONEN 1971, LANGE & KAPPEN 1972, SCHROETER *et al.* 1994, KAPPEN *et al.* 1996a). Ein wesentlicher Aspekt für die Fähigkeit der Kryptogamen, extreme Standorte zu besiedeln, ist jedoch sicherlich ihre Poikilohydrie (LÖSCH *et al.* 1997). Viele Moose und Flechten können fast vollständig austrocknen und sind daher daran angepasst,

schnell zwischen Perioden metabolischer Aktivität und Ruhe umzuschalten. Ungünstige Bedingungen werden so in einem ausgetrockneten, anabiotischen Zustand überdauert und sobald günstige Bedingungen auftreten, werden diese ausgenutzt.

In den wenigen eisfreien Regionen der maritimen Antarktis bilden Moose und Flechten in einigen Bereichen sehr dichte Bestände, während große Teile der eisfreien Landmassen gänzlich unbesiedelt bleiben. Als wesentliche Faktoren für diese unterschiedliche Verteilung oder Ausprägung der Kryptogamenvegetation werden unter anderem die Dauer und Höhe der Schneebedeckung diskutiert (KAPPEN *et al.* 1990a, SMITH 1990).

Schnee bietet der Vegetation nicht nur Schutz vor windinduzierter Erosion (LONGTON 1988), eine ausreichend hohe Schneedecke schützt die darunter liegenden Habitate auch vor dem Einfluss niedriger Lufttemperaturen (DAVEY *et al.* 1992).

Auf dem Antarktischen Kontinent kommt dem Schnee als die nahezu einzige Wasserquelle für die poikilohydrn Kryptogamen eine wichtige Rolle zu (KAPPEN 1993a). Dabei können Flechten den Schnee nicht nur in geschmolzenem Zustand zur Wasseraufnahme nutzen, sondern sich auch bei Temperaturen deutlich unter 0 °C unter Schnee aufsättigen (KAPPEN 1989, SCHROETER *et al.* 1994, SCHROETER & SCHEIDEGGER 1995).

Auch die Strahlung, d.h. die Energiequelle für die Photosynthese, wird durch den Schnee beeinflusst. Dabei müssen zwei Faktoren berücksichtigt werden: die Reduktion der Strahlung durch eine Schneedecke und die hohe Albedo frisch gefallenen Schnees (WALTON 1984). KAPPEN & BREUER (1991) konnten zeigen, dass unter einer bis zu 15 cm hohen Schneedecke noch genügend Licht für die Photosynthese vorhanden ist. So wurde ein Kohlenstoffgewinn für schneebedeckte Moose und Flechten von LARSON & KERSHAW (1975a) und von COLLINS & CALLAGHAN (1980) diskutiert. Eine zu lange bzw. zu starke Schneebedeckung kann sich jedoch auch nachteilig auswirken, z.B. durch eine starke Verkürzung der Vegetationsperiode (CRAWFORD 1997) oder durch hohe Respirationsverluste, die bei einer sehr starken Reduktion der einfallenden Strahlung in Kombination mit Temperaturen über 0 °C auftreten können (GANNUTZ 1970). Untersuchungen zum sogenannten „snow-kill“ von Flechten wurden von BENEDICT (1990a, 1991) in der Colorado Front Range, USA durchgeführt.

Eine Schneedecke kann somit, obwohl sie bei extrem kalten Lufttemperaturen einen idealen Isolator darstellt, bei entsprechender Dicke durch die Lichtabschwächung ein limitierender Faktor für das Gedeihen von Pflanzen sein (OBERMAYR 1997).

In den wenigen Arbeiten, in denen bisher die Ausprägung der Vegetation in der Antarktis mit ganzjährigen Daten der Schneebedeckung in Beziehung gesetzt wurde, liegen entweder keine Angaben über die Höhe der Schneedecke vor (MELICK & SEPPELT 1997, FRIEDMANN & MCKAY 1985, FRIEDMANN *et al.* 1987) oder diese wurde nur diskontinuierlich in mehrtägigen bis -wöchigen Abständen gemessen. (DAVEY *et al.* 1992).

### **3.2 Fragestellung**

Ein Ziel dieser Arbeit war es, Aussagen über den Zusammenhang zwischen der Vegetationsausprägung und der Dauer und Höhe der Schneebedeckung im Bereich der Potter-Halbinsel (King George Island, maritime Antarktis) zu machen. Zunächst mussten die methodischen Voraussetzungen geschaffen werden, ganzjährig und kontinuierlich, sowohl die räumliche als auch die zeitliche Variation der Schneebedeckung zu erfassen. Dazu wurden für diese Untersuchungen automatisch arbeitende Schneehöhensensoren entwickelt.

Parallel zur Schneehöhe sollen die mikroklimatischen Bedingungen für dominierende Kryptogamen an Standorten unterschiedlicher Schneebedeckung untersucht werden. Da der Schnee nicht nur das Mikroklima am Pflanzen-Standort verändert, sondern den poikilohydrischen Kryptogamen auch als Wasserquelle dient, stellte sich weiterhin die Frage nach der Bedeutung des Schnees für die Kohlenstoffbilanz der Kryptogamen. Durch die Bestimmung von Thalluswassergehalten unter Schnee sowie gezielten CO<sub>2</sub>-Gaswechseluntersuchungen unter natürlichen und simulierten Bedingungen an ausgewählten Flechtenarten sollen Aussagen darüber gemacht werden, wie gut diese Arten an die Licht- und Temperaturbedingungen unter Schnee angepasst sind. Ferner soll bilanziert werden, welche ökologischen Vor- und Nachteile sich für die verschiedenen Flechtenarten aus einer unterschiedlichen Schneebedeckung ergeben können.

Im Einzelnen werden folgende Fragen untersucht:

- Wie variiert die saisonale Schneebedeckung hinsichtlich Dauer und Höhe an Standorten unterschiedlicher Vegetationsausprägung?
- Gibt es Grenzwerte der Schneebedeckung für bestimmte Arten oder Wuchsformen?
- Wie sind die mikroklimatischen Bedingungen an Standorten unterschiedlicher Schneebedeckung?
- Wie stark sättigen sich Flechtenthalli unter Schnee auf?
- Wie gut ist der CO<sub>2</sub>-Gaswechsel ausgewählter Flechtenarten an die Bedingungen am Standort angepasst?

## 4 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Die Untersuchungen wurden auf der Potter-Halbinsel, King George Island, maritimen Antarktis durchgeführt.

### 4.1 Geographische Lage und Topographie

King George Island gehört zu den etwa 800 km südöstlich von Kap Horn gelegenen Süd-Shetland-Inseln. Die SW-NO ausgerichtete Inselgruppe erstreckt sich über 250 km von 61° bis 63°S und 53° bis 63°W (Abb. 4.1). Sie verläuft weitgehend parallel zur Küste der Antarktischen Halbinsel, von der sie durch die ca. 120 km breite Bransfield-Straße getrennt wird. Das Archipel der Süd-Shetland-Inseln umfasst zehn größere und zahlreiche kleinere Inseln. Die größten eisfreien Gebiete der Inselkette konzentrieren sich auf King George Island und Livingston Island.

King George Island ist die größte der Süd-Shetland-Inseln. Bei 80 km Längsausdehnung und einer Breite von bis zu 24 km umfasst die Insel eine Fläche von ca. 1500 km<sup>2</sup> (BLÜMEL *et al.* 1985). Über 95 % der Oberfläche sind von einer radial abfließenden Eiskappe bedeckt, die auf weiten Strecken mit hohem Eiskliff zum Meer abbricht und nur an wenigen Landzungen flach ausläuft. Die maximale Höhe von 686 m wird im Nordosten der Insel erreicht (BARSCH *et al.* 1985). Im Sommer sind neben einzelnen Nunatakkern auch kleinere Küstenstreifen und Halbinseln eisfrei. Die größeren gletscherfreien Gebiete liegen im Südwesten der Insel auf der Fildes-, der Barton- und der Potter-Halbinsel an der Maxwell Bay sowie rund um die Admiralty Bay. Das größte zusammenhängende Periglazialgebiet der Insel stellt die Fildes Peninsula mit ca. 25 km<sup>2</sup> dar (BLÜMEL 1984).

Die Potter-Halbinsel umfasst einen etwa sechs km<sup>2</sup> großen eisfreien Bereich am Rande des Fourcade Gletschers. Dominiert wird das Landschaftsbild von einem ca. 213 m hohen Basaltschlot, dem Three Brothers Hill (span.: Tres Hermanos). Im Norden der Halbinsel liegt an der Potter-Bucht die argentinische Station „Jubany“ (62°14'S, 58°40'W) mit dem angegliederten „Dallmann-Labor“, einem in deutsch-argentinischer Kooperation genutzten Forschungslabor (WIENCKE *et al.* 1998). Die Feldarbeiten wurden auf der Südseite des Three Brothers Hill, ca. 1,5 km südwestlich der Forschungsstation durchgeführt.

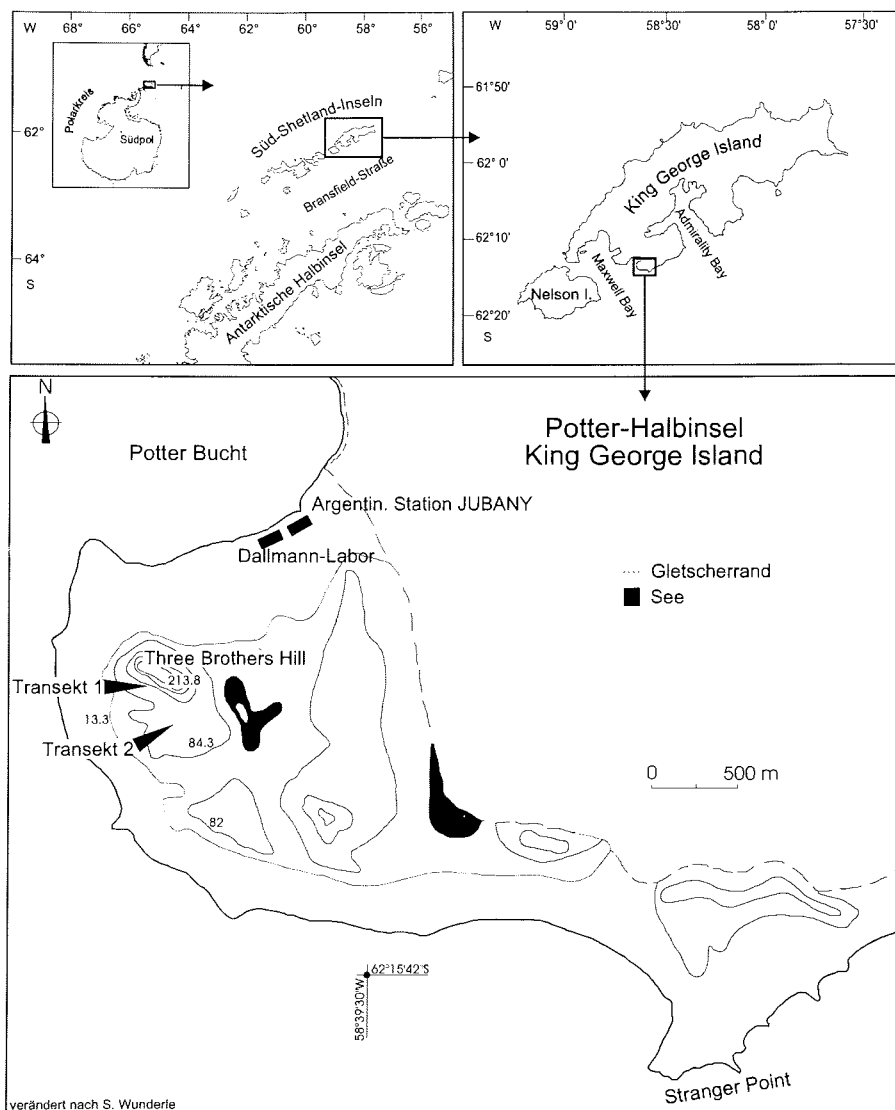


Abb. 4.1: Die Potter-Halbinsel, King George Island, Süd-Shetland-Inseln, maritime Antarktis mit den Untersuchungsstandorten (Transekt 1 und 2) auf der Südseite des Three Brothers Hill

## 4.2 Geologie

Die Süd-Shetland-Inseln sind vulkanischen Ursprungs. Geochronologische Untersuchungen haben gezeigt, dass ihr Alter zwischen 130 und 14 Mio. Jahre variiert, mit einer erneuten Phase vulkanischer Aktivität während des Pleistozäns und Holozäns (SMELLIE *et al.* 1984, BIRKENMAJER 1989, BIRKENMAJER *et al.* 1991). Aktiver Vulkanismus ist zum Beispiel heute noch auf Deception Island zu finden.

Petrographisch besteht King George Island fast vollständig aus Magmatiten, vor allem Basalte und Andesite, und Metamorphiten, die über weite Bereiche von Moränenmaterial bedeckt sind (MÄUSBACHER 1991). Die ältesten Vulkanite im Zentrum der Insel stammen aus dem Oberjura, im Norden und Süden sind überwiegend tertiäre und einige quartäre Vulkanite zu finden (HAWKES 1961, BARTON 1965).

King George Island setzt sich aus mehreren tektonischen Blöcken zusammen. Sie sind durch SW-NO streichende Blattverschiebungen tertiären Alters (54 – 21 Mio. Jahre) getrennt (BIRKENMAJER 1989). Der Barton Horst im Zentrum der Insel ist gegenüber dem Fildes Block im Nordwesten sowie dem Warszawa Block und dem Krakow Block im Südosten herausgehoben.

Die durch die Potter-Bucht verlaufende Ezcura-Verwerfung, die den Barton Horst vom Warszawa Block im Süden trennt, war vermutlich die Ursache für die Entstehung des Three Brothers Hill auf der Potter-Halbinsel. Dieser Basaltstock wird als Füllung eines vulkanischen Förderschlots angesehen, der während des Tertiärs am Aufbau von King George Island beteiligt war (BLÜMEL 1984, SMELLIE *et al.* 1984). Proben des Three Brothers Hill werden von WATTS (1982) auf ein Alter von  $50,6 \pm 0,7$  Mio. Jahren datiert, SMELLIE *et al.* (1984) geben  $47 \pm 1$  Mio. Jahre an.

Das heutige Relief der eisfreien Gebiete King George Islands ist ferner durch die Vergletscherungen geprägt, die erstmals im späten Miozän bzw. im Pliozän auftraten (BIRKENMAJER 1980). Aufgrund von C-14 Datierungen von Torfen aus dem eisfreien Gebiet um die Admiralty Bay wird angenommen, dass das Gebiet seit mindestens  $4090 \pm 140$  Jahren eisfrei ist (FABISZEWSKI & WOJTÚN 1993).

### 4.3 Geomorphologie der Potter-Halbinsel

Klimamorphologisch gehören die Süd-Shetland-Inseln bereits zur Gletscher- und Frostschuttzone (BLÜMEL 1984). Auf King George Island ist ein periglazialer Formenschatz mit Frosthängen, Permafrostsohlentälern und Muldentälern, Frostschuttdecken, Blockgletschern und Frostmusterformen ausgebildet (BARSCH *et al.* 1985). Der dominierende Prozess der periglazialen Formung ist Frostverwitterung.

Im Rahmen der Untersuchungen von HOCHSCHILDT (1995) und HOCHSCHILDT & STÄBLEIN (1998) wurde die Potter-Halbinsel geomorphologisch kartiert. Ein Großteil der Halbinsel wird zum glazialen Prozessbereich gerechnet. Im Gletschervorfeld ist ein etwa 300 m breiter Streifen vollständig vegetationsfrei und mit Ausnahme einer intensiven Frostverwitterung nur wenig von periglazialen Formen überprägt (WUNDERLE 1996). Die Moränenhügel der Potter-Halbinsel sind ausschließlich Eiskernmoränen (HOCHSCHILDT 1995). Die Moränenflächen werden durch zahlreiche Schmelzwasserseen gegliedert, die im Laufe des Sommers austrocknen können. Zwei permanente Seen befinden sich am Hangfuß des Three Brothers Hill und am Rand der Eiskappe (vgl. Abb. 4.1).

Von der Mitte der Halbinsel verlaufen parallel zum Eisrand bis zu vier Meter tiefe Erosionsrinnen nach Norden in die Potter-Bucht. Die Ostseite der Bucht wird durch ein ca. 50 m hohes Eiskliff begrenzt. Der Süd- und Westküste der Potter-Halbinsel ist ein flaches Felswatt vorgelagert, das stellenweise von vorspringenden Klippen überragt wird, die bis hinab zur Brandungszone von verschiedenen Flechtengesellschaften besiedelt sind. Mehrere Küstenfelsen sind auf der Oberfläche in ca. 25 m Höhe aufgrund mariner Abrasion abgeflacht.

Am Hangfuß des Three Brothers Hill tritt grobblockiger Frostschutt auf, der zum größten Teil aus hexagonalen Basaltsäulen besteht (WUNDERLE 1996). Daneben finden sich in über 60 m über dem heutigen Meeresspiegel eindeutige Strandgerölle (BLÜMEL 1984, HOCHSCHILDT 1995, HOCHSCHILDT & STÄBLEIN 1998).

Die ausgedehnten, im allgemeinen steilen Frostschutthänge weisen an flacheren Stellen durch Kryoturbation entstandene Feinerdekreise sowie, an stärker geneigten Bereichen, Streifen auf. Die Hangformung erfolgt durch Kryoklastik und Ablation oder selten durch Solifluktion von Feinmaterial. Auch kommt es immer wieder zu Rutschungen von wassergesättigten Bodenschichten über Permafrost oder auf nicht geschmolzenem Schnee, der dann zu Bodeneis umgewandelt wird (HOCHSCHILDT 1995). Die Auftau-



tiefen des an verschiedenen eisfreien Standorten der Insel auftretenden Permafrosts schwanken zwischen 20 und 150 cm (BARSCH & STÄBLEIN 1984, BARSCH *et al.* 1985).

An Steilhängen sowie in Talungen finden sich perennierende Schneeflecken, die durch die starken Winde an den Hängen akkumuliert und deren Oberflächen durch Windpressung geglättet werden. Die Ausdehnung der schneebedeckten Fläche nimmt von Dezember bis Februar stark ab (HOCHSCHILDT & STÄBLEIN 1998). Da die Schneeschmelze zum Teil durch Sublimation erfolgt, ist auch im Sommer nur wenig Substrat unterhalb der Schneeflecken deutlich durchfeuchtet (HOCHSCHILDT 1995).

Die vorherrschenden Böden der maritimen Antarktis sind Leptosole auf flachgründigem Festgestein und Regosole auf Lockermaterial und Moränen. Daneben treten noch Cambisole („Braunerden“), sowie Histosole und Gleyosole auf (BÖLTER *et al.* 1995, 1997).

#### 4.4 Klima

Die Antarktis umfasst laut Definition die Ozeane und Landmassen südlich des 60. Breitengrades. Sie wird in zwei vor allem klimatisch unterschiedliche Regionen eingeteilt. Die Süd-Shetland-Inseln gehören zusammen mit den Süd-Sandwich- und den Süd-Orkney-Inseln und der Westküste der Antarktischen Halbinsel nördlich von 68° S zum Bereich der maritimen Antarktis (HOLDGATE 1964, 1970, PICKARD & SEPPELT 1984, SMITH 1984, LONGTON 1985) bzw. nach der Einteilung von LONGTON (1988, 1997) zur „cold-polar region“. Gegenüber der kontinentalen Antarktis (nach LONGTON (1988, 1997) „frigid-polar region“) können die klimatischen Bedingungen der maritimen Antarktis als gemäßigt eingestuft werden.

Das Klima auf King George Island wird durch starke Westwinde beeinflusst. Es herrscht ein ozeanisches Polarklima (BLÜMEL *et al.* 1985), das durch geringe Schwankungen der Monatsmitteltemperaturen im Jahresverlauf, eine mittlere Lufttemperatur von über 0 °C während ein bis vier Monaten im Sommer (LINDSAY 1971) sowie durch andauernden, aber nur mäßigen Winterfrost charakterisiert ist. Die Luftfeuchtigkeit ist hoch und beträgt auch während der Sommermonate im Schnitt über 80 % (MÄUSBACHER 1991). Die überwiegend als Schnee fallenden Niederschläge betragen etwa 350 bis 500 mm pro Jahr (SMITH 1984), können aber auch 600 mm a<sup>-1</sup> übersteigen (MÄUSBACHER 1991). Regen tritt vor allem in den Sommermonaten auf, ist jedoch auch im

Winter möglich (TURNER *et al.* 1995, GONERA & RACHLEWICZ 1997). Eine deutliche Saisonalität der Niederschläge im Jahresverlauf ist nicht zu beobachten. Der Bewölkungsgrad des Himmels ist aufgrund häufig auftretender Tiefdruckgebiete hoch und beträgt im Schnitt mehr als 75 % (SCHWERDTFEGER 1970). Die überwiegend westlichen Winde können Spitzengeschwindigkeiten von mehr als  $130 \text{ km h}^{-1}$  (BARSCH *et al.* 1985, GONERA & RACHLEWICZ 1997) erreichen.

Da King George Island nördlich des Süd-Polarkreises liegt, herrscht ein ganzjähriger Tag-Nacht-Wechsel, wenn auch mit zeitweilig sehr kurzen Nächten bzw. Tagen. Dadurch kann es auch im Sommer häufig zu Frostwechsel (BARSCH *et al.* 1985, BLÜMEL 1984) und während der Wintermonate gelegentlich zu Temperaturen  $>0 \text{ °C}$  kommen (BLÜMEL *et al.* 1985). Die hohe Zahl an Frostwechselftagen kann im Sommer eine Verzögerung der Schneeschmelze bewirken (HOCHSCHILDT 1995).

Das Mesoklima der Station von Jubany für den Zeitraum 1994 bis 1996 (unveröffentlichte Daten) entspricht den oben beschriebenen klimatischen Bedingungen in der maritimen Antarktis (Abb. 4.2). Die Jahresmitteltemperatur betrug  $-1,9 \text{ °C}$ , die monatliche mittlere Lufttemperatur der drei Jahre schwankte zwischen  $-9,1 \text{ °C}$  im Juli und  $+2,4 \text{ °C}$  im Januar und Februar.

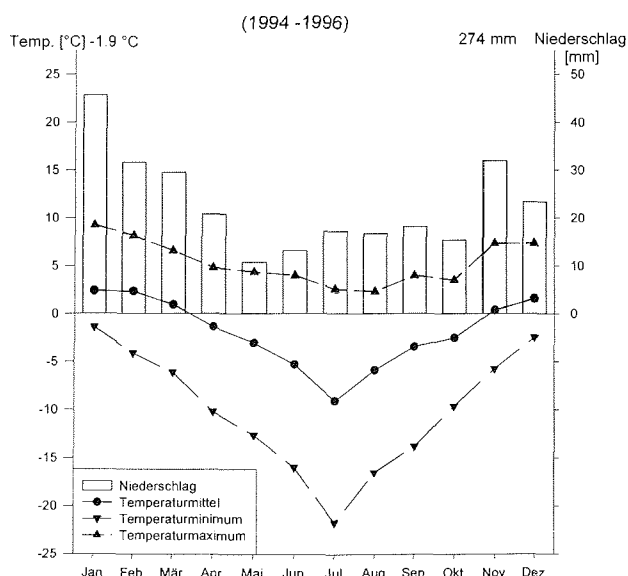


Abb. 4.2: Lufttemperatur (monatliche Mittel, Maxima und Minima) und Niederschlag bei der argentinischen Station Jubany gemittelt aus den Jahren 1994 bis 1996

Die maximale Lufttemperatur betrug  $+10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Januar 1996 und im Juli 1994 wurde mit  $-25,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  die niedrigste Temperatur in diesem Zeitraum gemessen. In den Monaten November bis März lagen die mittleren Lufttemperaturen über dem Gefrierpunkt. Zwischen 1994 und 1996 fielen im Schnitt 274 mm Niederschlag pro Jahr. Damit liegen die Werte unter denen, die in der Literatur für die maritime Antarktis angegeben werden. Dies kann vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass fester Niederschlag an der argentinischen Station nur in begrenztem Umfang registriert werden kann. In der benachbarten polnischen Station „H. Arctowski“ wurden beispielsweise 1987 und 1988 etwa  $100\text{ mm a}^{-1}$  höhere Niederschläge gemessen (BARANSKI & GRABIEC 1989; NIEMIEC & RAWA 1989). In Jubany betrug die Luftfeuchte von 1994 bis 1996 im Mittel 90,4 %. Ganzjährig traten Winde aus westlicher bis nordwestlicher Richtung mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von  $10,53\text{ m s}^{-1}$  auf. Von April bis Juli herrschten jedoch auch häufig Ostwinde vor. Nordwinde sind selten, können aber warme Luftmassen mitbringen, während die Ostwinde auch mitten im Sommer zu Kälteeinbrüchen führen können (KLÖSER & ARNTZ 1994).

Durch die relativ starken Winde wird Schnee verdriftet. So werden die Moränenkuppen freigeblasen und der Schnee akkumuliert in den Mulden, bedingt durch die vorherrschenden Windrichtungen, vor allem an den west- bzw. ostexponierten Hängen.

#### 4.5 Vegetation

Die Vegetation der Antarktis wird merklich durch die geographisch isolierte Lage des Kontinents sowie durch das vorherrschende Klima beeinflusst (OCHYRA 1998). Die klimatische Einteilung in maritime und kontinentale Antarktis bzw. „cold Antarctic“ und „frigid Antarctic region“ (LONGTON 1988, 1997) spiegelt nicht nur die klimatischen, sondern auch die biogeographischen Verhältnisse wider. Die Vegetation dieser beiden Regionen unterscheidet sich deutlich voneinander (LONGTON 1985). So haben die beiden einzigen natürlich vorkommenden Gefäßpflanzen der Antarktis, die antarktische Schmieie *Deschampsia antarctica* Desv. (Poaceae) und der Perlwurz *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. (Caryophyllaceae), in der maritimen Antarktis ihre südliche Verbreitungsgrenze (FOWBERT & SMITH 1994, SMITH 1994).

Unter den milden klimatischen Bedingungen hat sich in den eisfreien Gebieten der maritimen Antarktis eine reiche Kryptogamenflora entwickelt, die vor allem aus Moosen

und Flechten sowie in geringerer Anzahl aus Algen, Lebermoosen und Makropilzen besteht (HOLDGATE 1964, LINDSAY 1971, LONGTON 1985, SMITH 1996). Schon LAMB (1970) stellte fest, dass die ausgedehnteste Vegetation der Antarktis im Bereich der Süd-Shetland-Inseln und an einigen Standorten an der Westküste der Antarktischen Halbinsel in Form einer Torf bildenden Moostundra entwickelt ist.

Von den 260 Flechtenarten (CASTELLO & NIMIS 1997), die für die Antarktis beschrieben wurden, kommen annähernd 200 Arten in der maritimen Antarktis vor (GREEN *et al.* 1999, SANCHO *et al.* 1999). Ein entsprechendes Verhältnis gilt auch für die antarktische Bryophytenflora mit ca. 100 Moosarten, von denen etwa 90 in der maritimen Antarktis gefunden wurden (SEPPELT *et al.* 1998). Wie die Gefäßpflanzen sind auch Cyanolichenen auf die maritime Antarktis begrenzt (KAPPEN 1993b, SCHROETER 1994). Lebermoose kommen in der Antarktis ebenfalls fast ausschließlich im maritimen Bereich vor, sie treten in der kontinentalen Antarktis nur an besonders günstigen Standorten auf (LAMB 1970, OCHYRA & VANA 1989b, GREEN *et al.* 1999). Die Mehrzahl der Flechtenarten in der maritimen Antarktis gehört zu einer alpin-kosmopolitischen Flora (JACOBSEN & KAPPEN 1988, KAPPEN 1993b).

(GIMINGHAM & SMITH 1970) unterscheiden zwei floristische Hauptgruppen in der maritimen Antarktis, die „Antarctic non-vascular cryptogam tundra formation“ und die „Antarctic herb tundra formation“. Die Gefäßpflanzen sind in der Region weit verbreitet, jedoch nur selten abundant und nur in niedrigen Höhen (unterhalb von 60 bzw. 30 m ü.M.S) an Nord oder westexponierten küstennahen Standorten mit einem günstigen Temperaturregime und einer ausreichenden Nährstoffversorgung zu finden (HOLDGATE 1964, LONGTON 1985). *Deschampsia antarctica* bildet mitunter geschlossene Rasen. Bei der „Antarctic non-vascular cryptogam tundra formation“ handelt sich um eine überwiegend aus Kryptogamen bestehende Tundra, in der Moose und Flechten die Hauptkomponenten der Pflanzengesellschaften darstellen. Es wurden insgesamt sechs (LINDSAY 1971) bzw. acht Sub-Formationen beschrieben (GIMINGHAM & SMITH 1970, SMITH 1984, 1996), die entsprechend der Dominanz von Flechten und Moosen und deren Wuchsform eingeteilt werden. Sie sind alle in der maritimen Antarktis ausgebildet (LONGTON 1985) und können auf King George Island erkannt werden. (OCHYRA 1998), wenn auch einige nur sehr selten und räumlich begrenzt vorkommen.

Die erste umfassende Beschreibung der Vegetation von King George Island gab LINDSAY (1971). Als eines der auffälligsten Merkmale wird die im Vergleich zum Norden der Insel bessere Entwicklung der Vegetation an der Südküste erwähnt. Dies ist im

wesentlichen klimatisch bedingt, da zum Teil hohe Bergrücken diese Gebiete gegen die Westwinde abschirmen. Obwohl eine Reihe verschiedener, von Pflanzen besiedelter Gesteinstypen auf der Insel vorhanden ist, scheint sich die Entwicklung von Flechtengemeinschaften auf den verschiedenen Gesteinen nur geringfügig zu unterscheiden (OCHYRA 1998). Allerdings haben die harten, wetterbeständigeren und saureren Felsen auf der Barton Peninsula eine dichtere Pflanzendecke als der Basaltstock des Three Brothers Hill (LINDSAY 1971).

Auf der Potter-Halbinsel stellen die Klippen und Strandterrassen wichtige Habitate für die Kryptogamen dar. So haben sich v.a. in Vernässungsbereichen in Strandnähe dichte Moosteppiche gebildet. Auch die beiden Gefäßpflanzen, *Deschampsia antarctica* und *Colobanthus quitensis*, sind auf der Potter-Halbinsel zumeist in Küstennähe an gut nährstoffversorgten Standorten zu finden. In Gletschernähe findet sich auf den Moränenrücken allenfalls eine spärliche Vegetation. Die flacheren Kuppen sind zumeist mit *Usnea antarctica* bewachsen, während die Hänge unbesiedelt bleiben. Mit zunehmender Entfernung vom Gletscher nimmt sowohl die Vegetationsdichte als auch die Artenzahl deutlich zu. Im Südwesten des Three Brothers Hill bilden Flechten und Moose auf einem Plateau eine sehr dichte, zweischichtige Vegetation, die 100 % Deckung erreichen kann (SCHULZ *et al.* 1998).

## 5 METHODEN

### 5.1 Die Transekte

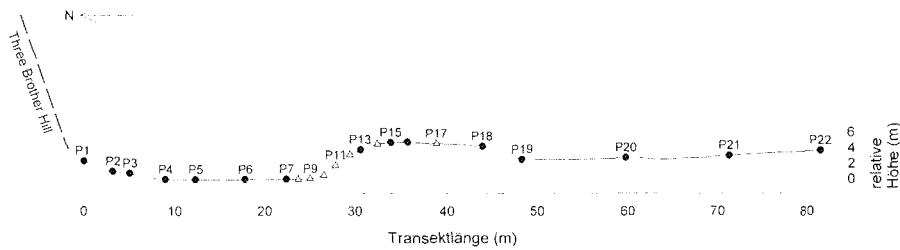
Zur Erfassung des Zusammenhanges zwischen Vegetationsausprägung und saisonaler Schneebedeckung wurde je ein Transekt in einem Bereich mit gut ausgebildeten Vegetationsgemeinschaften und an einem Standort mit fehlender makroskopischer Vegetation gelegt. Da die Entwicklung der Pflanzengemeinschaften neben der Wasserverfügbarkeit hauptsächlich von der Stabilität des Substrats abhängt (SMITH 1972), war diese ein entscheidendes Auswahlkriterium. Die weiteren Faktoren, die die Ausprägung der Vegetation beeinflussen, wie z.B. Gesteins- und Bodentypen, Nähr – und Mineralstoffverfügbarkeit und Mikroklima, sollten ebenfalls zumindest in der Apherzeit möglichst einheitlich ausgeprägt sein. Lediglich das Mikrorelief, das die Akkumulation und Dauer der winterlichen Schneebedeckung beeinflusst, konnte einen Gradienten aufweisen.

#### 5.1.1 Transekt 1

Der im Januar 1995 ausgewählte Untersuchungsstandort lag auf der Südseite des Three Brothers Hill bei  $62^{\circ} 14,739'S$  und  $58^{\circ} 40,464'W$  ungefähr 400 m landeinwärts von der Westküste auf einem Plateau ca. 80 m über dem Meeresspiegel (vgl. Abb. 4.1). Das Transekt 1 verlief in Nord-Süd-Richtung vom Fuße des Three Brothers Hill durch eine Senke einen nordexponierten Hang hinauf zu einer abgeflachten Kuppe (Abb. 5.1) und hatte eine Länge von annähernd 80 m. Auffällig war die deutlich variierte Vegetationszusammensetzung von der Senke bis zur Kuppe. Am Hangfuß des Three Brothers Hill befand sich mit Kryptogamen bewachsener Blockschutt. Die Basaltblöcke erreichten Höhen von mehr als 1 m. In der in der etwa 16 m breiten Senke verlief während des Sommers ein Schmelzwasserbach.

Das Relief des Transekts wurde mit einer Schlauchwaage vermessen. Der Höhenunterschied zwischen der Senke und der höchsten Stelle des Plateaus betrug ca. 4,5 m auf einer Länge von ca. 11 m. Daraus ergab sich für den nordexponierten Hang eine Neigung von ca.  $25^{\circ}$ . Der Untergrund dieses Hanges und der Kuppe bestand im wesentlichen aus Frostschutt. Die Kuppe fällt zunächst leicht nach Süden ab, von 36 m bis 49 m laufender Transektlänge um ca.  $8,7^{\circ}$ , um anschließend bis zum Ende des Transekts wieder um  $2^{\circ}$  anzusteigen.

Aufgrund der Reliefunterschiede war eine unterschiedlich hohe und lange Schneebedeckung zu erwarten.



**Abb. 5.1:** Querschnitt des Schneehöhen-Transekts 1 am Fuße des Three Brothers Hill von Nord nach Süd (• manuell abgelesene Schneepiegel, Δ automatisch arbeitende Schneehöhensensoren)

Zur Schneehöhenmessung wurden 22 Stangen (Edelstahl, 10 mm Ø) als Schneepegel in unterschiedlichen Abständen entlang des Transekts positioniert. Die Nummerierung der Stangen erfolgte fortlaufend von Nord nach Süd (P1 am Hangfuß des Three Brothers Hill, P22 am südlichen Ende des Transekts) (Abb. 5.1). Zusätzlich wurden in der Senke zwei Stangen, westlich (P6a) und östlich (P6b) der Stange P6, und weitere 10 Stangen auf dem Plateau parallel zu P17 sowie P19 bis P22 aufgestellt. An sieben Stangen am nordexponierten Hang wurden automatisch arbeitende Schneehöhensensoren (vgl. Kapitel 5.2.1.4) befestigt, die ganzjährig die Schneebedeckung registrierten, während an den restlichen Stangen die Schneehöhe nur während der Messkampagnen und an einigen Terminen während des Winters manuell gemessen wurde.

Die Stangen kennzeichneten ferner die Flächen, auf denen die Vegetationszusammensetzung analysiert wurde.

### 5.1.2 Transekt 2

Um auch die Bedingungen an einem makroskopisch annähernd vegetationsfreien Standort zu erfassen, wurde während der Messkampagne 1996/97 ein zweites Transekt eingerichtet. Das Transekt 2 lag bei  $62^{\circ} 14.828'S$ ;  $58^{\circ} 40.119'W$ , d.h. etwa 350 m süd-östlich vom Transekt 1 (vgl. Abb. 4.1). Dieses Transekt querte eine von Norden nach Süden verlaufende Senke in Ost-West Richtung und hatte eine Länge von ca. 17 m (Abb. 5.2).

Das Transekt 2 wurde am 01. November 1996 eingerichtet. Zu diesem Zeitpunkt lag in der Senkenmitte noch Schnee und die Hänge der Senke schienen ein nicht zu starkes Gefälle zu haben. Wie sich nach der Ausaperung zeigte, war dies jedoch lediglich hinsichtlich des westexponierten Hanges der Fall, der im Mittel  $19^\circ$  geneigt ist. Die Neigung des nach Osten exponierten Hanges betrug dagegen ca.  $45^\circ$ , d.h. die westliche Kuppe lag bei einer Entfernung von 4,5 m von der Senkenmitte fast 3,2 m höher als diese. Auf den Kuppen, am ostexponierten Hang und in der Senke bestand der Untergrund aus Frostschutt von  $>1,5$  cm Durchmesser. Am westexponierten Hang fanden sich dagegen im oberen Bereich deutlich kleinere Steine. Die Senke und die beiden Hänge waren annähernd unbesiedelt. Nur auf den beiden Kuppen war der Frostschutt relativ spärlich, vor allem von *Usnea antarctica*, besiedelt.

Zur Schneehöhenmessung wurden im Transekt 2 ebenfalls Edelstahlstangen als Schneepegel positioniert, die von West nach Ost in alphabetischer Reihenfolge als T2 A bis T2 F bezeichnet wurden. An den Pegeln wurde die Schneehöhe ab dem 01.11.96 manuell registriert. Ebenso wurde die Ausdehnung der Schneedecke zwischen den Pegeln dokumentiert.

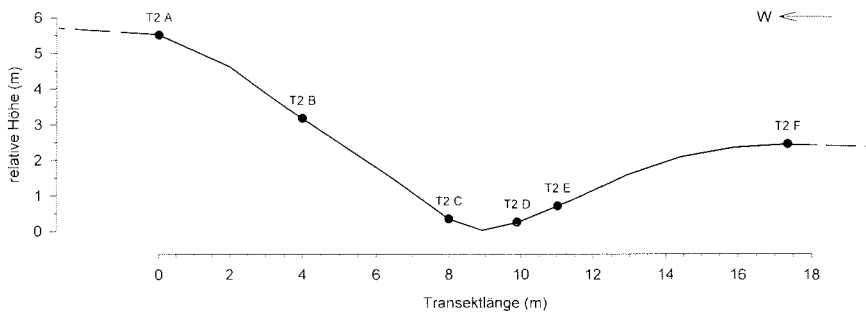


Abb. 5.2: Querschnitt des Schneehöhen-Transekts 2 von West nach Ost (• manuell abgelesene Schneepegel)



## 5.2 Erfassung des Mikroklimas

Das Ziel von Messungen des Mikroklimas ist die Beschreibung der meteorologischen Umweltparameter, denen die Kryptogamen am jeweiligen Standort ausgesetzt sind. Licht, Temperatur und Feuchtebedingungen, die wichtige Parameter für die pflanzliche Produktion darstellen, können über kurze Distanzen großen Schwankungen unterworfen sein. In dieser Arbeit wird untersucht, wie sich die mikroklimatischen Parameter Licht und Temperatur am natürlichen Standort verschiedener Kryptogamen unterscheiden und wie stark sie durch eine in Höhe und Dauer unterschiedliche Schneebedeckung beeinflusst werden.

Einen Überblick über die Mikroklimamessstechnik und verschiedene Sensoren geben UNWIN (1980) und MARSHALL & WOODWARD (1985) sowie WALTON (1982a) für Messungen unter polaren Bedingungen. Langzeitstudien der mikroklimatischen Bedingungen für Kryptogamen in der Antarktis sind bei FRIEDMANN *et al.* (1987), SCHROETER *et al.* (1995, 1997b), DAVEY (1997) und WALTON (1982b) beschrieben.

### 5.2.1 Sensoren

#### 5.2.1.1 Lichtintensität

Da für die pflanzliche Photosynthese nicht alle Wellenlängen gleich effektiv sind, wurden Lichtsensoren verwendet, welche die für die Photosynthese nutzbare Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 700 nm, d.h. die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, engl.: photosynthetic active radiation), messen. Da die Wirkung der Strahlung für die Photosynthese stärker von der Anzahl der absorbierten Photonen als von ihrer Energie abhängt, wird bevorzugt die photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (PPFD,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) gemessen (McCree 1972, Jones 1992).

Für die Messung der PPFD wurden GaAsP-Photodioden (Gallium Arsenid Photodioden G1116, Hamamatsu, J) sowie ein sphärischer Quantumsensor LI-193SA (LiCor, USA) verwendet. Die hohe Messgenauigkeit von Gallium Arsenid Photodioden im Vergleich zu Referenzsensoren, die Silizium Photozellen als Rezeptoren verwenden, wie z.B. der LI-190SB, wurde von PONTAILLER (1990) und von AASLYNG *et al.* (1999) nachgewiesen. Die GaAsP-Photodioden wurden gegen Feuchtigkeit verkapselt und mit einer Streuscheibe versehen. Letztere bewirkt die Kosinuskorrektur der Sensoren, d.h. alles im Winkel bis zu 180° einfallende Licht wird gleich gewichtet. Dies ist insbesondere

bei der Lichtmessung unter Schnee wichtig, da dieser einfallendes Licht stark streut. Der Messbereich der GaAsP-Photodioden betrug  $0 - 2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD. Sie wurden vor und nach Ende der Messkampagne im Labor mit Hilfe eines Optical Radiation Calibrator 1800-02 (LiCor, USA) kalibriert. Die Messgenauigkeit beträgt  $\pm 1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD.

Die GaAsP-Photodioden wurden an den verschiedenen Mikroklima-Messplätzen (s. Kap. 5.2.3) direkt neben den Flechten- und Moosthalli bzw. zur Bestimmung der Reduktion der PPFD durch die Schneedecke in der Nähe einzelner Schneepegel montiert.

Der sphärische Quantumsensor Li-193SA wird v.a. im aquatischen Bereich eingesetzt, kann aber auch für PAR-Messungen in der Luft genutzt werden. Er wurde als Referenzsensor verwendet, um auch die von einer Schneefläche reflektierte Strahlung zu erfassen. Aufgrund seiner Kugelgestalt registriert der Sensor die PPFD aus allen Richtungen, d.h. auch die Reflektion von der Oberfläche und die diffuse Strahlung. Daher sind die vom Li-193SA registrierten Werte auch dann höher als die der GaAsP-Photodioden, wenn kein Schnee liegt. Stark erhöhte Werte deuten jedoch in der Regel auf Reflektion durch eine geschlossene Schneebedeckung hin.

Der Li-193SA wurde im Transekt 1 in der Hangmitte (29,43 m laufende Transektlänge) am oberen Ende einer ca. 120 cm hohen Stange befestigt.

#### 5.2.1.2 Temperatur

Die Luft- und Thallustemperaturen ( $T$ , °C) wurden mit Widerstandsthermometern, d.h. mit Mini- und Mikrothermistoren (Grant, UK) gemessen. Die Spitze der Minithermistoren hat einen Durchmesser von ca. 2 mm, die der Mikrothermistoren war nadelförmig gestaltet mit einem Durchmesser von 0,6 mm. Der Messbereich der Sensoren reicht von  $-50 \text{ °C}$  bis  $+150 \text{ °C}$ , mit einer Auflösung von  $0,1 \text{ °C}$ . Da sie wartungsfrei sind, können sie auch für langfristige Mikroklimamessungen eingesetzt werden.

Zur Messung der Lufttemperatur wurde ein Minithermistor in ca. 0,8 m Höhe angebracht. Eine Haube aus Aluminium schützte den Sensor vor Aufheizung durch direkter Einstrahlung.

Bei der Messung der Thallustemperaturen (TT) wurden die Sensorspitzen im Thallus, d.h. zwischen den dichten Ästen der strauchförmigen Flechten bzw. bei der Messung an

Moosen einige Millimeter tief im Polster befestigt und so vor direkter Einstrahlung geschützt.

### 5.2.1.3 Luftfeuchte

Die Messung der relativen Luftfeuchte (rH, %) erfolgte mit einem Humicap-Feuchtefühler HMP 35A (Vaisala, SF). Dabei handelt es sich um ein Kondensatorhygrometer, dessen Dielektrikum aus einer hygroskopischen Kunststoffolie besteht. Mit der relativen Luftfeuchtigkeit ändert sich die Dielektrizitätskonstante des Kunststoffes und somit auch die Kapazität des Kondensators. Die Kondensatoren sind durch wasserdampfdurchlässige Membran- oder Sinterfilter vor flüssigem Wasser geschützt (DAY 1985). Der Humicap-Sensor zeichnet sich durch hohe Messkonstanz und Linearität aus, lediglich bei anhaltend hoher Luftfeuchtigkeit können Abweichungen auftreten. FRIEDMANN *et al.* (1987) geben bei ganzjährigem Einsatz unter polaren Bedingungen eine Abweichung von weniger als  $\pm 5\%$  an.

Der Sensorkopf des Feuchtefühlers wurde in ca. 50 cm Höhe angebracht.

### 5.2.1.4 Schneebedeckung

Für Langzeitstudien des Mikroklimas in der Antarktis müssen Sensoren und Datenerfassungssysteme für den kontinuierlichen, automatischen Betrieb unter extremen Bedingungen geeignet sein. Elektronische Sensoren zur Messung verschiedener Umweltparameter wie Temperatur, Strahlung, relative Feuchte (s.o.) oder auch Windgeschwindigkeit und -richtung sind vielfach entwickelt worden. Die Schneehöhe dagegen wird immer noch hauptsächlich mit Hilfe von Schneepegeln manuell gemessen (WILHELM 1975, GOODSIN *et al.* 1981). Als Schneepegel werden mit einer Meter- und Zentimeter-einteilung versehene Latten oder Stangen verwendet, die im Boden verankert sind oder durch den Schnee (und Eis) bis zu diesem durchgestoßen werden. An diesen Pegeln wird die Schneehöhe in cm über dem Grund abgelesen.

Aufgrund der hohen Variabilität ist eine großräumige Beobachtung der Schneebedeckung am besten durch die Nutzung von Fernerkundungstechniken möglich (ROTT 1990). Da die Auflösung jedoch 10 m bis 30 m pro Pixel beträgt (MARKON 1995), ist die Fernerkundung für kleinräumige Untersuchungen nicht geeignet. Zudem sind aufgrund des hohen logistischen Einsatzes für die Antarktis keine kontinuierlichen Radar-

bilder verfügbar (zum Empfang und zur Weiterverarbeitung der Daten muss zum Aufnahmezeitpunkt eine Bodenstation in dem Gebiet besetzt sein) (HOCHSCHILDT 1995).

Zur automatischen Aufzeichnung der Höhe einer Schneedecke wurden bislang nur wenige Systeme entwickelt und eingesetzt. Die nicht-destruktive Methode zur automatischen Messung der Schneehöhe mittels Ultraschallwellenreflektion (GUBLER 1981) zeigte im Test eine hohe Genauigkeit (CHOW 1992). Solche Sensoren sind kommerziell erhältlich. Da sie jedoch über der Schneedecke angebracht werden müssen, benötigen sie bei der erwarteten maximalen Schneehöhe von ca. 150 cm eine Montage in mindestens 175 cm Höhe. Die stabile, dauerhafte und senkrechte Verankerung einer solch langen Stange wäre in dem aus Frostschlutt bestehenden Untergrund des Geländes nicht möglich gewesen. Da diese Sensoren sich somit für die Untersuchungen auf der Potter-Halbinsel nicht eigneten, musste eine andere Methode entwickelt werden. Um die Schneebedeckung entlang eines Transekts automatisch erfassen zu können, wurden mehrere Sensoren benötigt.

Ein System zur automatischen Registrierung der Schneehöhen im Untersuchungsgebiet sollte folgenden Anforderungen genügen:

#### *Systemanforderungen*

- Beständigkeit gegen die in der maritimen Antarktis herrschenden klimatischen Bedingungen, v.a. tiefe Temperaturen, hohe Luftfeuchtigkeit und starke Winde.
- Wartungsfreier Betrieb für ein Jahr, d.h. rund 8000 Messungen.
- Extrem niedriger Energiebedarf, um kontinuierlichen Batteriebetrieb zu ermöglichen.
- Messung einer geringmächtigen Schneedecke (0 bis 60 cm).
- Keine bzw. möglichst geringe Veränderung der natürlichen Standortbedingungen durch das System.
- Pro Sensor standen maximal 250,- DM für Materialkosten zur Verfügung.

#### *Systembeschreibung*

Um diesen Anforderungen zu entsprechen, wurden automatisch arbeitende Sensoren (automatische Schneepegel = ASP) entwickelt, welche die Schneebedeckung mittels Infrarot-Lichtschranken, die in unterschiedlichen Höhen angebracht wurden, erfassen und das Signal an ein Registriergerät weiterleiteten.

Die ASP (Abb. 5.3) bestanden jeweils aus zwei 65 cm langen, weißen Kunststoff-U-Profilen (15 × 15 mm) mit Verschlussklappe. Durch die Verwendung von weißem Kunststoff sollte die Absorption der Sonnenstrahlung und das dadurch bedingte Schmelzen des Schnees in unmittelbarer Pegelnähe weitgehend minimiert werden. Der Querschnitt der Kunststoff-Streben wurde gering gewählt (Grundfläche = 2,25 cm<sup>2</sup>), damit kein zusätzlicher Schnee am Sensor akkumuliert wurde.

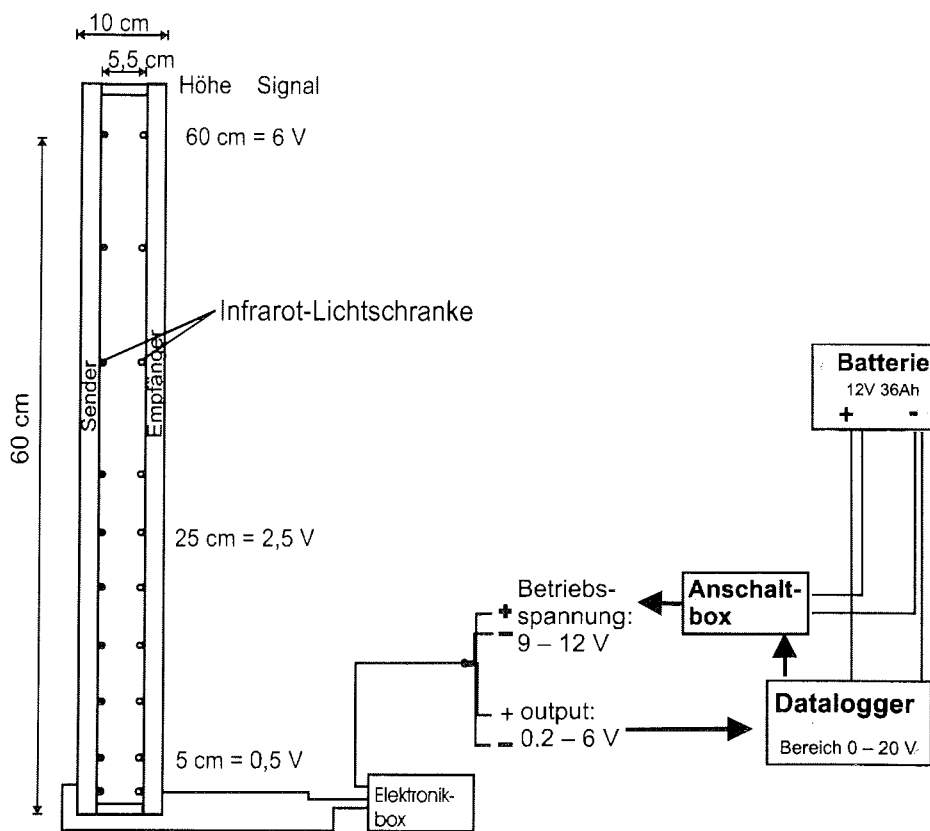
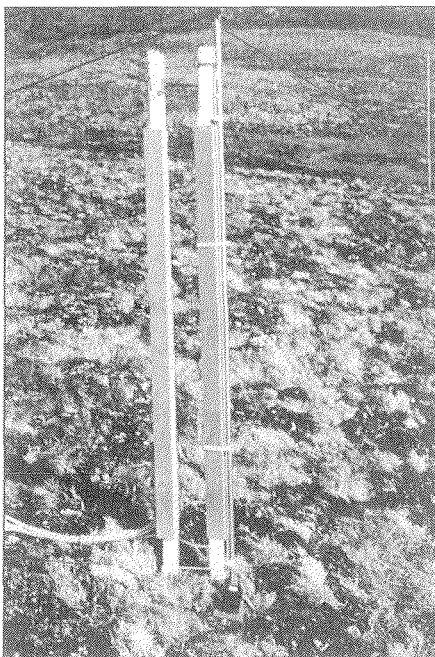


Abb. 5.3: Schematische Darstellung des automatischen Schneehöhensensors ASP und der wichtigsten elektronischen Teile

Hinsichtlich der Anzahl der Lichtschranken und ihrer vertikalen Anordnung in den Streben wurde die Abnahme der Lichtintensität mit zunehmender Schneetiefe berücksichtigt. Bereits in 10 cm Schneetiefe werden etwa 37 % bis 50 % und in etwa 50 cm 99 % der gesamten einfallenden Strahlung absorbiert (WELLER & HOLMGREN 1974, WILHELM 1975). Die Absorption der Strahlung durch Schnee ist aber nicht nur abhängig von der Schneetiefe, sondern auch von der Schneequalität (Schneedichte, Korngröße

und Wassergehalt des Schnees) und ist zudem in den verschiedenen Wellenlängenbereichen unterschiedlich stark (CURL *et al.* 1972, SCHWERDTFEGER & WELLER 1977, MALE & GRAY 1981). Es wurde somit erwartet, dass eine Transmission der Strahlung durch eine Schneedecke von  $\geq 60$  cm nicht mehr messbar wäre. Daher wurden in jeden ASP zehn Infrarot-Lichtschranken in unterschiedlichen Höhen zwischen 2 und 60 cm über dem Boden eingebaut (2 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm und 60 cm). Die Abstände zwischen den einzelnen Lichtschranken betrugen 10 cm für Schneehöhen über 30 cm, während für geringere Schneehöhen 2 cm bzw. 5 cm Intervalle gewählt wurden, um der annähernd exponentiellen Extinktion der Strahlung mit zunehmender Schneehöhe Rechnung zu tragen.

Die beiden Streben der ASP waren spiegelbildlich zueinander angeordnet. In der einen Strebe wurden die IR-Senderdioden angebracht. In der anderen befanden sich die IR-Empfängerdioden, die gegen sichtbares Licht unempfindlich waren. Die Pegelstreben sollten einerseits weit genug voneinander entfernt sein, damit sich auch zwischen ihnen Schnee ablagern konnte, andererseits musste das gesendete Signal die Empfangsdioden



**Abb. 5.4:** automatischer Schneepegel (ASP) mit Aluminium-Profilen verstärkt, in der linken Strebe sind die Empfänger-Dioden, rechts die Sender-Dioden eingebaut

noch erreichen. Als Abstand zwischen den Sender- und den Empfängerdioden der einzelnen Lichtschranken erwies sich die Distanz von 5,5 cm als geeignet (zwischen den Kunststoffstreben 6 cm). Um eine Beugung der Kunststoff-Streben durch die meist starken Winde zu vermeiden, wurden jeweils an den Außenseiten U-förmige Aluminiumschienen angebracht. Jeder ASP wurde mit einer Seite an einer Edelstahlstange (vgl. Kapitel 5.1.1) befestigt, die möglichst tief in den Untergrund getrieben und mit Seilen abgespannt wurde (Abb. 5.4).

Da die Grundfläche der Pegel möglichst klein sein sollte (s.o.), konnten nur die IR-Dioden und die zuführenden Kabel in die ASP eingebaut werden. Die Platinen mit den restlichen elektronischen Bauteilen wurden

in einer wassergeschützten Dose installiert, welche durch kurze Kabel mit dem Pegel verbunden war. Zum Schutz gegen die Witterung wurden die Platinen lackiert und die Dose zusätzlich in Plastik eingeschweißt. Die Durchführungen für die Kabel wurden mit Silikon abgedichtet. Durch die Verwendung kurzer Kabel zwischen den Dioden und den elektronischen Bauteilen sollte das Auftreten von Störungen, wie z.B. Spannungsverlusten, vermieden werden. Gleiches galt für die Länge der Kabel zwischen den Elektronik-Boxen und dem Registriergerät. Bei einer Kabellänge von maximal 10 m konnten sowohl Spannungsverluste als auch andere Störungen weitgehend ausgeschlossen werden.

Ein Datalogger (Squirrel 1257, Grant, UK) diente zur Erfassung und Speicherung der Daten (siehe Kapitel 5.2.2).

#### *Funktionsprinzip*

Durch ein Signal vom Datalogger wurde alle 60 Minuten in einer Relaisbox der Stromkreis geschlossen und fünf Sekunden später die Messung durchgeführt. Bei jedem ASP wurden die Lichtschranken, beginnend an der untersten Diode und nach oben fortlaufend, auf ihre Durchlässigkeit geprüft. Die höchste Diode, die kein Licht empfing, bestimmte die Höhe des an den Datalogger weitergegebenen Ausgangssignals. Für jede Messhöhe war die Ausgangsspannung mittels eines Potentiometers einstellbar. Die Sensoren wurden im Labor so kalibriert, dass das Signal für 2 cm Höhe 0,2 V und für 60 cm 6 V betrug (1 cm = 0,1 V). Waren alle Lichtschranken geschlossen, betrug das Ausgangssignal an den Datalogger 0 V.

#### *Stromversorgung*

Das System wurde für Batteriebetrieb entwickelt und daher mit stromsparenden „CMOS-Schaltkreisen“ vom Typ UA741 (Operationsverstärker) aufgebaut. Die erforderliche Betriebsspannung lag zwischen 9 und 12 V. Der Stromverbrauch pro Messung betrug weniger als 0,1 mAh.

Sieben automatische Schneepegel wurden im Transekt 1 an den Stangen entlang des nordexponierten Hanges montiert (vgl. Abb. 5.1).

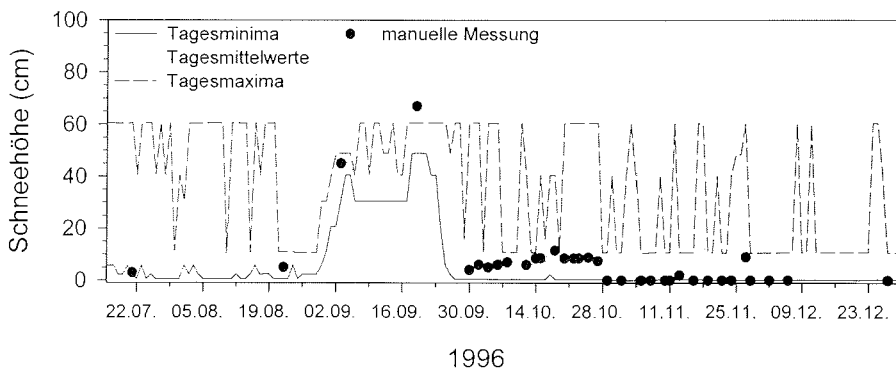
Zur Kontrolle und Validierung der automatisch erfassten Daten wurden die Schneehöhen während der Aufenthalte in Jubany je nach Jahreszeit in zwei- bis fünftägigen Intervallen an den automatischen Schneepegeln und an weiteren 25 Stangen entlang des

Transekts 1 manuell kontrolliert. Dazu wurde der schneefreie Teil der Schneepegel vermessen und von der jeweiligen Pegelgesamtlänge abgezogen. Im antarktischen Winter 1996 sowie 1997 wurden die Schneehöhen an je fünf Terminen von E. Besnati bzw. J. Marcelo (beide IAA, Buenos Aires) abgelesen.

Für eine vergleichende Betrachtung des Abtauprozesses der Jahre 1995 und 1996 wurde jeweils der erste von zwei aufeinanderfolgenden Ablesetagen, an denen die Pegel schneefrei waren, als Aptermin bezeichnet.

#### *Validierung der automatisch registrierten Schneehöhen*

Die Analyse der automatisch registrierten Schneehöhen zeigte, dass trotz der Verwendung der Aluminium-U-Profile bei hohen Windgeschwindigkeiten eine genaue Ausrichtung der beiden Streben des ASP zueinander nicht immer gewährleistet war. Da dadurch der gesendete Lichtstrahl zeitweilig nicht die Empfängerdioden traf, wurden immer wieder unrealistisch hohe Werte (Abb. 5.5, Tagesmaxima) registriert. Dieser Effekt wurde meist dann beobachtet, wenn keine oder nur eine dünne Schneedecke vorhanden war, während die Pegelstreben im schneebedeckten Bereich aufeinander ausgerichtet blieben.



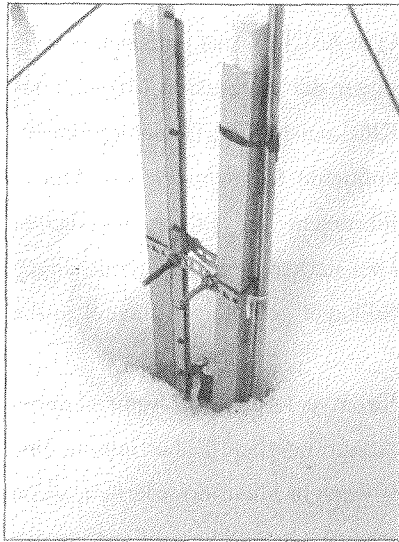
**Abb. 5.5:** Schneehöhe am Pegel P12 während des Spätwinters/Frühjahrs 1996. Die Linien zeigen die automatischen Messungen (— Tagesminima, ··· Tagesmittelwerte, - - - Tagesmaxima) und die Symbole (•) die manuellen Messungen an

Nicht nur die Verwendung der Tagesmaxima, sondern auch die der Tagesmittelwerte der aufgezeichneten Lichtschrankensignale würden im Jahresgang zu einer Überschätzung der Schneedecke führen (vgl. Abb. 5.5, Juli – August 1996). Daher wurden



nur die Tagesminima (durchgezogene Linie) zur Berechnung der Schneehöhen berücksichtigt.

Ein anderes Problem ergab sich am Ende des Frühlings, wenn die Intensität der Einstrahlung schon hoch war. Aufgrund der Erwärmung des Materials der ASP taute der



**Abb. 5.6:** Schneesituation am ASP im Frühjahr, der Schnee an und zwischen den Pegelstreben ist stärker getaut, als in der Umgebung des ASP

Schnee zwischen den Streben zum Teil stärker als in der direkten Umgebung der ASP (Abb. 5.6), wo die manuellen Messungen gemacht wurden. Dadurch konnte es zu Abweichungen zwischen den manuell und den automatisch gemessenen Schneehöhen kommen. Dies und der Umstand, dass nach Schneefällen eine leichte Zunahme der Schneehöhe (weniger als 5 cm) mit der vorgegebenen Auflösung der ASP nicht erfasst werden konnte, kann bei der Verwendung der Tagesminima zu einer Unterschätzung der Schneehöhe führen. Diese Unterschätzung ist jedoch, verglichen mit dem Fehler, der bei Verwendung der Tagesmittelwerte auftreten würde, im Jahresverlauf nur gering.

### 5.2.2 Datenerfassung und Stromversorgung

Die Temperatur-, PPF- und Luftfeuchte-Daten sowie die Schneehöhen wurden von Dataloggern (Squirrel, Grant, UK) automatisch abgefragt und gespeichert. Für die ganzjährigen Messungen wurden Squirrel der 1250 Serie (Sq1257, Sq1259) verwendet, für die temporäre, d.h. während des Aufenthalts im Dallmann-Labor aufgebaute Mikroklimastation wurde ein Squirrel 1201 eingesetzt. Die Speicherkapazität des 1259 Squirrel reichte aus, um die Daten von je vier Temperatur- und PPF-Sensoren sowie einem Luftfeuchtefühler über einen Zeitraum von 12 Monaten in einem 30 minütigen Intervall zu registrieren. Jeder abgespeicherte Wert entsprach dem Mittelwert mehrerer Einzelmessungen, die in 5 bis 10 minütigen Intervallen abgefragt wurden. Die Schneehöhen- und Lichtmessungen entlang des Transekts 1 fanden aus Gründen der Strom-

versorgung (s.o.) in 60 minütigen Intervallen mit dem 1257 Squirrel statt. Die Speicherung der Daten erfolgt im 12 Bit Format. Je nach Speicherkapazität der Geräte wurden die Daten während des Aufenthalts in Jubany alle ein bis vier Wochen mit einem Notebook-Computer unter Verwendung eines Kommunikationsprogramms (SQ10, Grant, UK) im Feld ausgelesen. Zur Weiterverarbeitung wurden die Daten mit einem Konvertierungsprogramm (Sqtrans, Grant, UK) in ASCII-Format umgewandelt. Zum Schutz gegen die Witterung wurde der Datalogger der temporären Mikroklimatestation in einem wasserdichten Kunststoffgehäuse (Klößner-Möller, D) untergebracht. Für die ganzjährigen Messungen waren wasserdampfdichte Schutzboxen aus Aluminium (Zarges, D) erforderlich, deren Kabeldurchführungen mit Silikon abgedichtet wurden. Um die relative Feuchte in den Boxen auch bei starken Temperaturänderungen möglichst gering zu halten, wurden zusätzlich mit Silikagel gefüllte Stoffbeutel in die Boxen gelegt.

Unter den antarktischen Klimabedingungen war die Stromversorgung der Squirrel durch interne Batterien nur über einen sehr begrenzten Zeitraum möglich. Daher musste eine externe Stromversorgung bereitgestellt werden. Dies war vor allem erforderlich, wenn die Logger nur in mehrmonatigem (annähernd jährlichem) Abstand kontrolliert werden konnten. Zur kontinuierlichen externen Stromversorgung der Dauer-Messstation – sieben Schneepegel, eine Mikroklimate-Messeinheit und zwei Datalogger – wurde ein Bleiakku (12V, 36Ah, Sonnenschein, D) verwendet. Zusätzlich wurden drei Solarmodule (Sa 5, Solarex, USA) installiert, um den Bleiakku während der Sommermonate aufzuladen. Zur Sicherheit wurden Laderegler und Tiefentladeschutz eingebaut.

### 5.2.3 Mikroklimate-Messstationen

Im Transekt 1 wurde eine Station zur ganzjährigen Erfassung des Mikroklimas und der Schneehöhen eingerichtet. Vom November 1995 bis zum Januar 1998 wurden Thallustemperatur- und Lichtmessungen an jeweils einem Thallus der Strauchflechten *Himantormia lugubris* und *Usnea aurantiaco-atra* im oberen Teil des nordexponierten Hanges bzw. auf der Kuppe durchgeführt. Am Übergang von der Senke zum Hang wurden diese Parameter in einem Polster vom *Sanionia uncinata* gemessen. Sensoren zur Messung der Lufttemperatur und des einfallenden Lichts (s. Kapitel 5.2.1.1) wurden in der Hangmitte am Pegel P12 befestigt.

Von März 1996 bis November 1997 wurden die Schneehöhen an sieben Pegeln (P8 – P12, P14 und P17) automatisch registriert. Ferner wurde im gleichen Zeitraum am Fuße der Schneepegel P7, P10, P14 und P17 die PPFD gemessen.

Während der Expedition 1996/97 wurde im Transekt 2 ebenfalls eine Mikroklima-Messstation aufgebaut. Hier wurden vom 10.11.1996 bis zum 24.02.1997 an einem der Schneepegel (T2 D) PPFD-Sensoren zur Ermittlung der Einstrahlung und Reflektion über der Schneeoberfläche sowie der Transmission des Lichts durch Schnee installiert. Der Sensor zur Messung der Transmission befand sich zu Beginn der Messperiode 50 cm unter der Schneeoberfläche.

### 5.3 Vegetationsanalysen

#### 5.3.1 Vegetationsaufnahmen

Um die Variation der Vegetationsausprägung mit der Höhe und der Dauer der jährlichen Schneebedeckung in Beziehung setzen zu können, wurde die Vegetation entlang des Schneehöhen-Transekts 1 erfasst. Das Erstellen von Transekten bietet sich dort an, wo steile ökologische Gradienten einen raschen Wechsel der Vegetationszusammensetzung bedingen (REICHELT & WILMANN 1973, DIERBEN 1990). Die Transekte sollten dem ökologischen Gradienten folgen, der meist quer zu erkennbaren Zonierungen verläuft (DIERSCHKE 1994). Die Vegetation kann innerhalb eines Transekts kontinuierlich, d.h. in aneinandergrenzenden Quadraten, oder in diskreten Abständen erfasst werden.

Mittels **Frequenzanalysen** wurde die statistische Häufigkeit des Auftretens der Arten in den Probestellen entlang des Transekts dokumentiert. Dafür wurden in jedem der 100 Teilfelder eines 20 × 20 cm großen Rahmens die vorhandenen Arten unabhängig von ihrer Artmächtigkeit (Abundanz und Deckungsgrad) erfasst. Die Ergebnisse wurden als prozentuale Frequenz (F) ausgedrückt.

$$F = \frac{Pf_b}{Pf_g} \times 100$$

F = Frequenz einer Art (%)

Pf<sub>b</sub> = Anzahl der besiedelten Felder der Probestelle

Pf<sub>g</sub> = Anzahl der gesamten Felder der Probestelle

Die Frequenz ist somit ein quantitatives Merkmal, das Aussagen über die individuelle Verteilung der Arten innerhalb einer Untersuchungsfläche erlaubt. Im Vergleich zu Schätzverfahren wird die Frequenzanalyse als objektivere Methode beurteilt, die vorwiegend für die Kraut- und Kryptogamenschicht geeignet ist (DIERSCHKE 1994). Als weitere Vorteile nennt DIERSCHKE (1994) u.a. die leichtere Erfassung kleinwüchsiger Arten, die bessere Erkennbarkeit der strukturellen Feinheiten der Aufnahmeflächen sowie die gute Reproduzierbarkeit durch die einheitlichen Grundbedingungen. Da Frequenzbestimmungen jedoch einen sehr viel höheren Zeitaufwand erfordern als die Schätzverfahren, ist eine flächendeckende Erfassung des Bestandes meist nicht möglich, wodurch seltene Arten möglicherweise übersehen werden können (DIERSCHKE 1994).

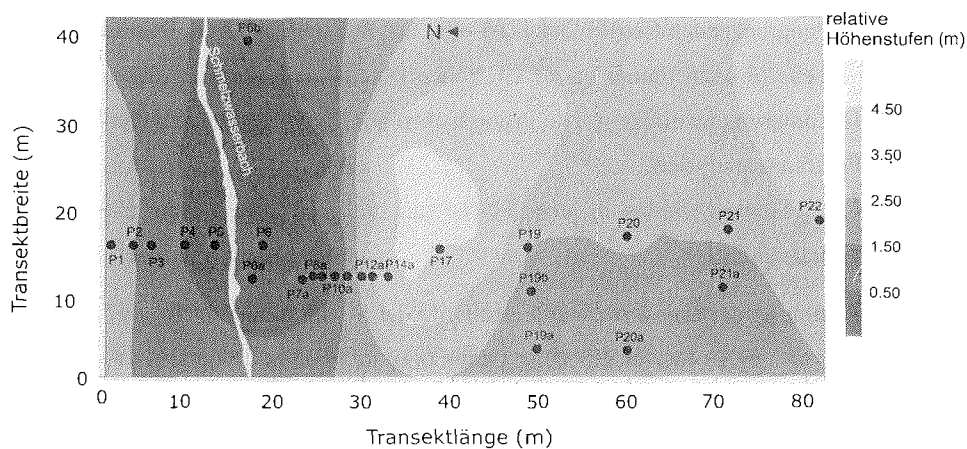
Jedoch können locker verteilte, wenig deckende und vorherrschende Arten gleiche Frequenzen haben. Daher wurde neben der Frequenzbestimmung auch eine Schätzung des **Deckungsgrads** (Dominanzwert) der Arten innerhalb der Probefläche durchgeführt. Der Deckungsgrad ist ein Maß für die horizontale Ausdehnung der Individuen einer Art in Bezug zu einer Grundfläche (DIERSCHKE 1994) und gibt z.B. Anhaltspunkte über die Konkurrenzkraft der einzelnen Arten (BRAUN-BLANQUET 1951). Er bezieht sich gewöhnlich auf die gesamte Aufnahmefläche. Um jedoch die Abschätzung bei den locker verteilten Arten zu verbessern, wurde ein 20 × 20 cm großer, in 25 Rasterfelder (4 × 4 cm) unterteilter Rahmen verwendet. Die Abschätzung des Deckungsgrads erfolgte für jedes Teilfeld anhand einer sechsstufigen Skala, die sich an die fünfstufige von BRAUN-BLANQUET (1951) anlehnt, jedoch in den unteren Stufen etwas gröber war, dagegen im oberen Bereich feiner aufgegliedert wurde (Tabelle 5.1).

**Tabelle 5.1:** In dieser Arbeit verwendete Dominanzskala im Vergleich zu BRAUN-BLANQUET (1951)

Skala	Diese Arbeit		BRAUN-BLANQUET
	Deckung (%)	Mittelwert (%)	Deckung (%)
6	90 – 100	95	
5	70 – 90	80	75 – 100
4	50 – 70	60	50 – 75
3	30 – 50	40	25 – 50
2	10 – 30	20	5 – 25
1	< 10	5	<5

Die Abundanz wurde nicht berücksichtigt, da v.a. bei Krustenflechten eine Abgrenzung der Einzelindividuen sehr schwer möglich ist. Innerhalb der Teilflächen wurden zunächst die mittleren Deckungsgrade ermittelt und anschließend der Mittelwert für die gesamte Aufnahme­fläche berechnet.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Vegetation an 19 Punkten entlang des Transekts 1 hinsichtlich ihrer Frequenzen und ihrer Deckung aufgenommen. Ferner wurden je ein bis zwei parallele Aufnahmen zu P6 in der Senkenmitte (P6a und P6b) sowie zu den Pegeln 19 bis 21 im hinteren Profilabschnitt gemacht (Abb. 5.7).



**Abb. 5.7:** Skizze des Transekts 1 mit den Flächen für die Vegetationsaufnahmen. Die unterschiedlichen Grautöne zeigen die Höhe des Geländes gegenüber dem niedrigsten Punkt des Transekts an.

Die Vegetationsaufnahmen wurden zumeist direkt an den Schneepegeln durchgeführt. Lediglich in dem Bereich der automatischen Schneepegel lagen die Probestellen (P7a – P14a, Abb. 5.7) 4,50 m westlich des Transekts, da beim Aufbau der Schneehöhen-Messanlage eine Störung der Vegetation an den Pegeln nicht vermieden werden konnte. Jedoch war die Hangneigung in diesem Bereich sehr ähnlich und es wurde ein nahezu identischer Abtauerlauf der Schneedecke beobachtet. Daher können die im Transekt gemessenen Parameter (Schneehöhe, Licht) mit der Vegetation dieser Probestellen in Beziehung gesetzt werden.

Bei der Auswahl der Aufnahme­flächen stand die Transektanalyse im Vordergrund. Dennoch wurde bei den Einzelaufnahmen darauf geachtet, dass diese Flächen möglichst den Kriterien Homogenität und Größe (Minimumareal) entsprachen. Die Größe der

Aufnahmeflächen für Kryptogamengemeinschaften wird mit  $< 0,02 \text{ m}^2$  bis  $1 \text{ m}^2$  (CREVELD 1981, KHALIFE & ROUX 1987, DIERBEN 1990) angegeben. Für verschiedene Kryptogamengesellschaften in der maritimen Antarktis (Signy Island) fand SMITH (1972) Minimumareale zwischen  $0,02$  und  $0,04 \text{ m}^2$ . Daher wurden die Rahmen ( $20 \times 20 \text{ cm}$ ), soweit die Homogenität der Probefläche gewahrt blieb, je viermal rings um jeden Schneepegel angelegt, d.h. es wurde die Vegetationszusammensetzung auf einer Fläche von  $0,16 \text{ m}^2$  dokumentiert. Bei den Pegeln P5, P6a und P6b wurde die beprobte Bodenfläche durch Geröllblöcke eingeschränkt. Daher wurden an diesen Pegeln neben der vorhandenen Bodenfläche (P5  $0,04 \text{ m}^2$ , P6a und P6b je  $0,08 \text{ m}^2$ ) die vertikale Fläche der angrenzenden Geröllblöcke (P5  $0,04 \text{ m}^2$ , P6a  $0,08 \text{ m}^2$ ) bzw. bei P6b die horizontale Fläche ( $0,04 \text{ m}^2$ ) eines ca.  $65 \text{ cm}$  hohen Blocks analysiert, um die vorhandene vertikale Zonierung zu erfassen. Die Probeflächen am Boden und an den Geröllblöcken wurden getrennt analysiert.

Bei den Aufnahmen wurden in jeder Fläche nur die nach äußerem Anschein vitalen Arten berücksichtigt.

Die Bestimmung der Moostaxa wurde mit Hilfe der Schlüssel von OCHYRA (1998) und GREENE *et al.* (1970) für verschiedene Laubmoosgattungen und von OCHYRA & VANA (1989a) für die Lebermoose durchgeführt. Die Nomenklatur folgt im Wesentlichen der der Moosflora von King George Island von OCHYRA (1998). Die Bestimmung der Flechtenarten erfolgte mit Schlüsseln für antarktische Arten (LAMB 1964, 1968, REDÓN 1985, WALKER 1985, STENROOS 1993). Kosmopolitische Arten wurden auch mit Hilfe mitteleuropäischer Schlüssel identifiziert (WIRTH 1995, PURVIS *et al.* 1994).

Bis auf eine sehr häufig auftretende Art wurden nicht-lichenisierte, parasitische oder parasymbiotische Pilze nicht berücksichtigt.

### 5.3.2 Numerische Klassifikation und Ordination der Vegetationsaufnahmen

Die multivariaten Analyseverfahren der Klassifikation und der Ordination werden verwendet, um Standorte hinsichtlich ihres Arteninventars zu vergleichen bzw. in Gruppen einzuteilen.

Um zu prüfen, ob die verschiedenen Aufnahmeflächen entlang des Transekts entsprechend der Ähnlichkeit in der Vegetationsausprägung in Gruppen zusammengefasst werden können, wurde anhand der ermittelten Frequenzen und Deckungsgrade sowohl eine

Klassifikation als auch eine Ordination der Probestellen mit dem Computerprogramm PRIMER (FIELD *et al.* 1982) durchgeführt. Grundlage der Analyse ist eine Vegetationstabelle, bei der zur Minderung des Einflusses extrem abundanter Arten zunächst eine  $\sqrt{\cdot}$ -Transformation der Daten vorgenommen wurde. Anschließend wurde aus der Vegetationstabelle durch paarweise Berechnung der floristischen Ähnlichkeiten zwischen allen Aufnahmen eine Similaritätsmatrix berechnet. Als Ähnlichkeitsmaß diente der Bray-Curtis-Index (BRAY & CURTIS 1957).

### **Klassifikation (Clusteranalyse)**

Das Ziel der numerischen Klassifikation besteht darin, floristisch ähnliche Aufnahmen in Gruppen zusammenzufassen. Dazu wurden die Aufnahmen durch eine hierarchische agglomerative Clusteranalyse so geordnet, dass die Ähnlichkeit der Aufnahmeflächen innerhalb der Cluster (Gruppen) möglichst groß und zwischen den Gruppen möglichst klein sind. Das Ergebnis wurde als Dendrogramm dargestellt. Als Cluster-Algorithmus wurde „group-average linkage“ verwendet.

### **Ordination**

Ordination bezeichnet den Prozess der Anordnung von Objekten (Aufnahmen oder Arten) in Bezug auf einen oder mehrere ökologische Gradienten oder in Bezug auf abstrakte Achsen, die solche Gradienten repräsentieren können (AUSTIN 1976, NOYMEIR & WHITTAKER 1977). Diese Anordnung soll die relative Position der Objekte in ihrem ökologischen Raum wiedergeben und die Beziehungen von Gemeinschaftsstrukturen zu möglichen Gradienten von Umweltfaktoren verdeutlichen (GLAVAC 1996). Im Gegensatz zur „direkten Ordination“ (direkte Gradientenanalyse; WHITTAKER 1967), die der Darstellung des Vorkommens von Organismen entlang ökologischer Gradienten dient, werden bei den Verfahren der „indirekten Ordination“ die Aufnahmen nach ihrer floristischen Ähnlichkeitsstruktur geordnet. Die Interpretation hinsichtlich der Umweltparameter erfolgt dann *à posteriori* anhand der Beziehung zwischen der Anordnung der Probestellen und den Gradienten der Umweltfaktoren (GAUCH & WENTWORTH 1976, WESTHOFF & VAN DER MAAREL 1978).

Als Ordinationsverfahren wurde die nicht-metrische Multidimensionale Skalierung (MDS) nach (KRUSKAL 1977) verwendet. Bei der MDS wird die Anordnung der Vegetationsaufnahmen in einem Raum mit frei wählbaren Dimensionen (meist 2) berechnet. Die Entfernungen der Probestellen zueinander in diesem Raum sollen dabei möglichst

gut die floristischen Ähnlichkeiten wiedergeben. Die Güte der Anpassung an zwei Dimensionen wird durch einen dimensionslosen Stressfaktor angegeben (0 = optimale Anpassung; 0,1 = gute Anpassung; 0,2 = mittlere Anpassung; CLARKE & WARWICK 1994).

Zu beachten ist, dass Klassifikation und Ordination im hier verwendeten Ansatz nur als explorativ-statistisches Mittel zur Darstellung der floristischen Ähnlichkeiten zwischen den Aufnahmen dienen. Die Abgrenzung der Gruppen erfolgte sowohl im Dendrogramm als auch im MDS-Plot nach subjektiver Einschätzung.

## **5.4 Wassergehalte unter Schnee**

Die Stoffwechselaktivität der poikilohydrn Flechten hängt stark vom Wassergehalt der Thalli ab. Während der antarktische Sommer in der maritimen Antarktis meist zu trocken für optimale Produktionsbedingungen ist, sind die Übergangsjahreszeiten zwischen Sommer und Winter für die Kohlenstoffbilanz der Flechten von großer Bedeutung (KAPPEN & SCHROETER 1997, SCHROETER *et al.* 1997b, 1997c). In dieser Arbeit wurde daher die Rolle des Schnees für die Befeuchtung der Flechten im Frühjahr untersucht.

### **5.4.1 Natürliche Wassergehalte schneebedeckter Flechten**

Zur Ermittlung der natürlichen Wassergehalte am Standort wurden Proben der Strauchflechten *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica*, *Usnea aurantiaco-atra* sowie einige weitere Proben von *Leptogium puberulum*, *Pseudephebe pubescens*, *Stereocaulon alpinum* und *Sphaerophorus globosus* unter verschiedenen Bedingungen gesammelt. Die Proben wurden unter Schneefeldern ausgegraben oder während bzw. nach Schneefällen genommen. Da die Schneeverhältnisse zu den Sammelzeitpunkten uneinheitlich waren, d.h. der Schnee in verschiedenen Metamorphosen auftrat, einige Thalli sich unter einer Eisschicht befanden, andere Thalli nicht mehr oder nur teilweise schneebedeckt waren, wurden die Schneebedingungen in sechs Klassen eingeteilt (vgl. Tabelle 5.2). Parallel dazu wurde die Schnee- oder Thallustemperatur und, sofern möglich, die Dauer der Schneebedeckung registriert.



**Tabelle 5.2:** Einteilung der Schneebedingungen in sechs verschiedene „Schneeklassen“ zur Beschreibung der Bedingungen zum Sammelzeitpunkt der Wassergehaltsproben.

„Schneeklasse“	Beschreibung der Schneebedingungen
Schneefrei	nach oder während Schneefällen gesammelt, kein Schnee auf den Thalli
Eis	Thalli unter einer wenige mm dicken Eisschicht, kaum Kontakt von Flechte und Eis
Schnee/Eis	Flechten im Frühjahr unter Restschneefeldern; Schnee sehr grobkörnig, vereist oder teilweise mit Eislinsen
Schnee	Flechten zu 100 % schneebedeckt
z.T. bedeckt	Thalli nicht vollständig schneebedeckt, aber direkter Kontakt zum Schnee
Schneetasche	der Schnee um die Flechtenthalli war geschmolzen, so dass kein direkter Kontakt zwischen Thallus und Schnee bestand

Die Probenahme erfolgte mit einer Pinzette, um ein Schmelzen anhaftender Schnee- und Eiskristalle durch Körperwärme, das zu Verfälschungen der Werte führen würde, zu vermeiden. Kristalle, die auch nach leichtem Schütteln noch am Thallus hafteten, wurden mit einer zweiten Pinzette vorsichtig entfernt. Wenn sich die Kristalle jedoch nicht entfernen ließen, ohne Thallusstücke abzubringen, wurden die Flechten mit der Hand angetaut und das Wasser sofort abgeschüttelt und abgetupft. Die Proben wurden dann unverzüglich in je einen verschließbaren PE-Beutel getan und nach dem Sammeln der letzten Probe umgehend zur Station gebracht. Dort wurde sofort das Frischgewicht mit einer Laborwaage (BP310S ( $\pm 0,001\text{g}$ ) bzw. A200S ( $\pm 0,0001\text{g}$ ), Satorius, D) gravimetrisch bestimmt. In einem Vorversuch zeigte sich, dass bei der Aufbewahrung in geschlossenen PE-Beuteln kein deutlicher Gewichtsverlust auftrat. Eine direkte Bestimmung des Frischgewichts am Standort mit der transportablen Waage BP310S war während der Schneefälle problematisch, da es gleichzeitig meist sehr stürmisch war. Die dadurch hervorgerufenen Vibrationen der Waage, die auch bei einer Installation der Waage in einer Zargeskiste auftraten, hatten zu große Messfehler zur Folge.

#### 5.4.2 Aufsättigungsversuche unter Schnee

Die Versuche zur Aufsättigung von Flechten unter Schnee wurden mit Thalli der drei Strauchflechten *Himantormia lugubris*, *Usnea aurantiaco-atra* und *Usnea antarctica*, die in der Flechtenheide an unterschiedlich feuchten Standorten vorkommen, durchgeführt. Dabei sollte geprüft werden, wie schnell sich diese Flechten unter Schnee

aufsättigen und ob bzw. nach wie viel Stunden keine Wassergehaltszunahme mehr auftritt.

Lufttrockene Thalli wurden entweder in Restschneefeldern, solange diese vorhanden waren, so tief in den in Schnee eingegraben, dass sie vollständig bedeckt waren (mindestens 5 cm) oder sie wurden bei einsetzenden Schneefällen exponiert. Dabei wurden die Thalli in Gazekörbchen gesetzt, um einen Verlust von Thallusstücken auszuschließen. In regelmäßigen Abständen wurden sie wieder ausgegraben, anhaftender Schnee wurde abgeschüttelt bzw. wie oben beschrieben mit einer Pinzette entfernt und das jeweilige Frischgewicht der Proben bestimmt. Sofern die Thalli schneebedeckt waren, wurden sie nach jeder Wägung wieder mit einer Schicht Schnee annähernd gleicher Höhe und Dichte wie vor der Wägung bedeckt. Dabei wurde darauf geachtet, dass weder die Thalli noch der Schnee mit wärmeren Gegenständen in Berührung kamen. Dazu wurden die benutzten Pinzetten und ein Löffel im Schnee vorgekühlt. Die Waage selbst befand sich in einem unbeheizten Labor-Iglu, dessen Raumtemperatur während der Neuschnee-Ereignisse annähernd der Außentemperatur entsprach, so dass der Fehler durch eventuell auftretende Evaporation während des Wiegens minimal blieb. Während der Versuche wurde die Schneetemperatur protokolliert.

Nach Beendigung der Aufsättigungsversuche wurde die maximale Aufsättigung der Flechten bei ca. +0,5 °C bis +1 °C bestimmt. Dazu wurden die wiederum lufttrockenen Proben für ca. 2 h in Wasser getaucht. Vor der abschließenden Wägung wurden die Proben leicht geschüttelt bzw. abgetupft, um anhaftendes Wasser zu entfernen.

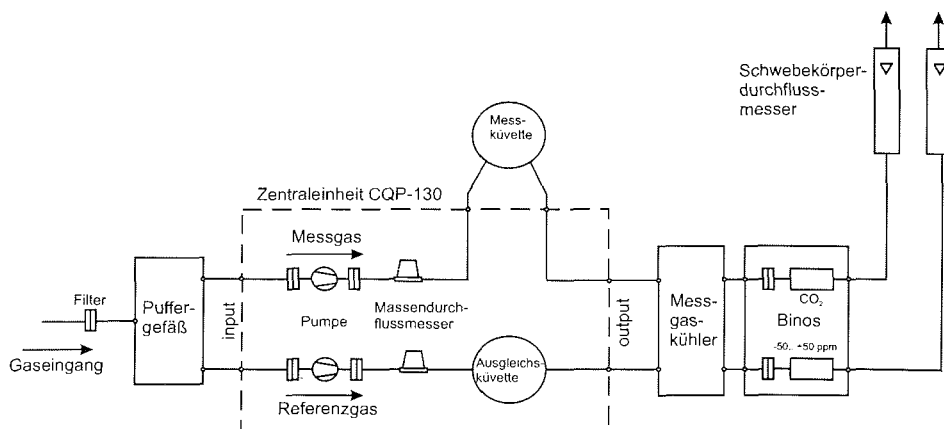
### **Trockengewichtsbestimmung**

Zur Berechnung der Wassergehalte aus dem aktuell gemessenen Frischgewicht wurden die Proben, die nicht zur Untersuchung des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels verwendet wurden, 24 Stunden bei 105 °C im Trockenschrank des Dallmann-Labors getrocknet. Nach einer Abkühlungsphase im Exsikkator wurde das Trockengewicht bestimmt.

## 5.5 Messungen des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels ausgewählter Flechtenarten

### 5.5.1 Die CO<sub>2</sub>-Gaswechsellanlagen

Die Messungen des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels wurden sowohl mit einem CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Porometer CQP-130 (Walz, D, ab hier als **1** bezeichnet) als auch mit einem Miniküvettenystem (Walz, D, ab hier als **2** bezeichnet), jeweils mit einem Infrarot-Gasanalysator (Binos 100, Rosemount Analytical, D), durchgeführt. Beide Geräte arbeiten in einem offenen System (VON WILLERT *et al.* 1995) nach der Differenzmessmethode (JANAC *et al.* 1971, JARVIS & SANDFORD 1985). Eine detaillierte Beschreibung für das CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Porometer CQP-130 findet sich bei (KAPPEN *et al.* 1990b) sowie für das Miniküvettenystem bei (SCHROETER *et al.* 1994). Für beide Systeme gilt das gleiche Messprinzip, das in Abb. 5.8 für das CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Porometer CQP-130 dargestellt ist. Die kontinuierlich angesaugte Luft wird nach einem Puffergefäß (5 l) in einen Mess- und einen Vergleichsgasweg aufgetrennt. Der Durchsatz im Messgas- und Vergleichsgasstrom wird durch elektronische Massendurchflussmesser kontrolliert. Nach den Pumpen gelangt die Luft durch einen geringen Überdruck in die Mess- bzw. die Ausgleichsküvette und von dort zum IR-Gasanalysator. Diesem ist eine Kältefalle (**1**: MGE130 / **2**: MGK4, Walz, D) vorgeschaltet, um Messfehler durch Überlappung der CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Absorptionsbanden im IR-Gasanalysator zu vermeiden.



**Abb. 5.8:** Schematische Darstellung der wesentlichen Teile der Gaswechsellanlagen und des Gaswegs der CO<sub>2</sub>-Differenzmessung, verändert nach WALZ (1991)

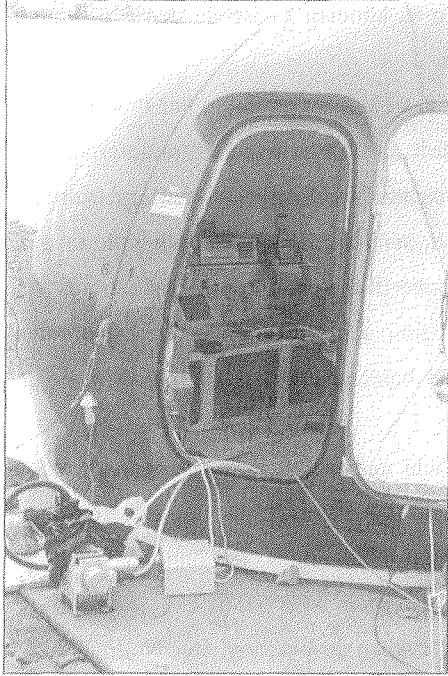
Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Gaswechsellanlagen besteht, neben der Möglichkeit des Batteriebetriebs beim CQP-130, in der Konstruktion der aus Poly-Methacryl-Kunststoff gefertigten Messküvetten.

Die zylinderförmige „Klick-Küvette“ des **CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Porometer CQP-130** ist ausführlich bei (LANGE *et al.* 1994) beschrieben. Sie hat einen Messflächendurchmesser von 44 mm. Der Küvettenverschluss erfolgt elektromagnetisch und erlaubt ein schnelles Wechseln der Proben. Durch ein integriertes Miniatur-Klimaaggregat erfolgt eine Anpassung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Messkopf an die Außenbedingungen, die von einem ventilierten Temperatur-Feuchtesensor (YA-100F, Rotronic; CH) erfasst werden. Das Klimaaggregat soll eine durch Einstrahlung bedingte Erhöhung der Innentemperatur der Messkammer gegenüber der Außentemperatur ausgleichen und ist demzufolge nur für den Kühlbetrieb ausgelegt. Das CQP-130 ist nur für diskontinuierliche Messungen unter Außenbedingungen geeignet.

Dagegen sind mit dem **Miniküvetten-system** kontinuierliche Messungen des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels unter kontrollierten Bedingungen möglich, da die Gaswechselkammer (500 ml Volumen) durch ein angeschlossenes Klimaaggregat (GK022, Walz, D) temperierbar ist. Es können dadurch konstante Messtemperaturen eingestellt werden, die je nach Außenbedingungen bis zu 15 K von der Umgebungstemperatur abweichen können. Ein Ventilator sorgt für eine homogene Durchmischung der Luftmassen in der Küvette.

Durch den Einsatz einer Kaltlichtquelle (FI400, Walz, D) in Kombination mit einer speziellen Fiberoptik können kontrollierte Lichtbedingungen in der Küvette erreicht werden. Eine stufenlos regelbare Halogenlampe (20 V/150 W) ermöglicht Lichtstärken zwischen 0 und 1600  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD. Mit der Lampenspannung ändert sich jedoch das Lichtspektrum der Halogenlampen, d.h. mit abnehmender Leistung verschiebt sich das Maximum zu längeren Wellenlängen. Daher werden zur Einstellung der niedrigeren Lichtstärken bei hoher Lampenspannung verschiedene Neutralfilter (NG3, NG4, NG5, NG11, Walz, D) in unterschiedlicher Kombination verwendet, um die Verschiebung des Spektrums zu vermeiden.

Bei beiden Anlagen werden die Gaswechsel- und Klimadaten von einer Datenerfassungseinheit (1: integriert in der Zentraleinheit / 2: externe Datenerfassungseinheit (DES), Walz, D) kontinuierlich in wählbaren Abständen aufgezeichnet und gespeichert. Anschließend können sie mit der entsprechenden Software (1: CQP130 / 2: Diagas, Walz, D) auf einen PC übertragen und weiterverarbeitet werden.



**Abb. 5.9:** Labor-Iglu mit der Miniküvettenzentraleinheit, der Datenerfassung und dem Binos 100 im Inneren. Vor dem Iglu die gegen Außenlicht abgedunkelte Gaswechselkammer mit angebrachter Lichtquelle.

Die Zentraleinheiten, Datenerfassungen, Gasanalysatoren und Messgaskühler der Anlagen waren in einem Feldlabor (Iglu, Abb. 5.9) untergebracht, während der Porometermesskopf und, je nach Versuchsanordnung, auch das Klimaaggregat im Freien aufgebaut und somit den natürlichen Klimabedingungen ausgesetzt waren.

Die Berechnung des Gaswechsels aus den aufgezeichneten Parametern erfolgte nach den bei CAEMMERER & FARQUHAR (1981) und BALL (1987) angegebenen Formeln. Als Bezugsgrößen dienten das Trockengewicht bzw. die Fläche und der Gesamtchlorophyllgehalt der Flechten.

## 5.5.2 Versuche zum CO<sub>2</sub>-Gaswechsel

### 5.5.2.1 Versuche mit dem CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Porometer CQP-130

In der Feldsaison vom 23.10. – 15.12.1995 wurden frisch gesammelte lufttrockene Flechten von *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica*, *Lecidea sciatrapha* und *Leptogium puberulum* unter Schnee vergraben bzw. durch Neuschnee aufgesättigt. In regelmäßigen Abständen wurde der Schnee entfernt, die Flechtenproben in der Porometerküvette eingeschlossen und unter natürlichen Licht- und Temperaturbedingungen die Photosyntheserate gemessen. Nach jeder Licht-Messung wurde die Küvette abgedunkelt, um auch die Dunkelatemungsraten bei den jeweiligen Wassergehalten zu messen. Die Proben wurden bis zur Einstellung eines konstanten CO<sub>2</sub>-Gaswechselwertes in der Küvette belassen. Vor und nach den Messungen wurde das jeweilige Frischgewicht der Flechten gravimetrisch bestimmt, um den CO<sub>2</sub>-Gaswechsel mit dem

Wassergehalt der Flechten in Beziehung setzen zu können. Zwischen den Messungen wurden die Flechten wieder mit Schnee bedeckt.

Krustenflechten können nicht ohne Schädigung des Thallus von ihrem Substrat getrennt werden. Die epilithische *Lecidea sciatrapha* wurde daher mit ihrer Substratunterlage gemessen, von welcher vor Versuchsbeginn alle sichtbaren Organismen entfernt wurden. Es wird für diese Art kein Thalluswassergehalt, sondern die Wasseraufnahme in mm Niederschlagsäquivalent (Volumen pro Probenoberfläche) dargestellt, welche aus der Differenz des Frischgewichts und des zu Beginn der Untersuchungen bestimmten Lufttrockengewichts (Ltg) der gesamten Probe berechnet wurde (vgl. LANGE *et al.*: 1994, 1997).

Da mit dem Porometer nur unter Umgebungslicht und –temperatur gearbeitet werden kann, wurden die Messungen möglichst während der Dämmerung, d.h. bei Schwachlicht und Temperaturen nahe des Gefrierpunktes durchgeführt, um ähnliche Lichtbedingungen wie unter dem Schnee zu haben.

Alle Messparameter wurden in 1-minütigen Intervallen gespeichert. Der Nullpunkt des Binos wurde alle ein bis zwei Stunden überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

Nach Versuchsende wurde der Chlorophyllgehalt der ganzen Probe bestimmt (vgl. Kap. 5.5.3).

#### **5.5.2.2 Versuche mit dem Miniküvetten-system**

Um die Auswirkungen der durch die Schneedecke veränderten Licht- und Temperaturbedingungen für die Photosynthese von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha* zu untersuchen, wurden mit dem Miniküvetten-system Versuche zum CO<sub>2</sub>-Gaswechsel beider Arten durchgeführt.

Die beiden Arten wurden ausgewählt, da *H. lugubris* im untersuchten Transekt I nur in den oberen Bereichen des Hanges bis zur Kuppe auftrat und daher meist schneefrei war, während *L. sciatrapha* in den tiefer gelegenen, länger schneebedeckten Bereichen gefunden wurde.

Die Messungen erfolgten sowohl unter kontrollierten Licht- und Temperaturbedingungen als auch bei natürlicher Einstrahlung am Standort in Jubany an je einem frisch gesammelten Thallus der beiden Arten. Zusätzlich wurde der CO<sub>2</sub>-Gaswechsel eines Thallus von *L. sciatrapha* im Labor in Kiel gemessen. In Jubany wurde vor allem die Licht- und Temperaturabhängigkeit des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels im Temperaturbereich von

-5 °C bis +5 °C in 2,5 K Schritten untersucht. Die Messungen an *L. sciatrapha* im Kieler Labor wurden in einem Temperaturbereich von -5 °C bis +10 °C (in 5 K Schritten) durchgeführt. Während die Photosynthese von *H. lugubris* bei Lichtstärken bis 1300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD untersucht wurde, betragen die Lichtintensitäten bei den Untersuchungen an *L. sciatrapha* maximal 900  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD. Es wurden nur die Messungen bei optimalen Thalluswassergehalten in der Auswertung berücksichtigt. Die Proben wurden durch Besprühen mit geschmolzenem Schnee (pH 7, in Jubany) bzw. VE-Wasser (in Kiel) durchfeuchtet.

Sowohl die am Standort untersuchten Proben als auch die Probe von *L. sciatrapha* für die Gaswechsellmessungen im Kieler Labor wurden in Jubany bei Umgebungstemperatur luftgetrocknet und anschließend bei -30 °C tiefgefroren. In diesem Zustand wurden sie von dort per Schiff nach Bremerhaven und von dort nach Kiel transportiert. In Kiel lagerten die Proben bei -20 °C bis zur Chlorophyllbestimmung bzw. bis zur CO<sub>2</sub>-Gaswechsellmessung.

Vor Beginn des Laborversuchs in Kiel wurde die Probe von *L. sciatrapha* aufgetaut und drei Tage bei 0 °C und 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD in einem 12/12 h Licht-Dunkelwechsel kultiviert. Einmal täglich wurde die Probe mit VE Wasser durchfeuchtet. Der Anfeuchtungs-Austrocknungs-Zyklus diente zur Reaktivierung der inaktiven Stoffwechselprozesse (SMITH & MOLESWORTH 1973, BEWLEY 1979). Zu Versuchsbeginn wurde bei +5 °C und 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD die Reaktivierung des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels überprüft.

### 5.5.3 Bestimmung der Bezugsgrößen für den CO<sub>2</sub>-Gaswechsel

#### Oberfläche

Als Bezugsgröße für den Gaswechsel der Krustenflechte *Lecidea sciatrapha* diente die einfache Oberfläche. Zur Bestimmung der Oberfläche wurden die Umrisse des Flechtenthallus zunächst auf Klarsichtfolie, die straff über die Proben gespannt wurde, abgezeichnet. Diese Flächen wurden auf Papier kopiert und eingescannt. Die Berechnung der Flächen erfolgte mit dem Programm SigmaScan (Jandel, USA).

#### Trockengewicht

Als Bezugsgröße für den CO<sub>2</sub>-Gaswechsel und für die Berechnung des Wassergehalts während der Gaswechsellmessungen wurde das Trockengewicht der Proben bestimmt. Zunächst wurde das Lufttrockengewicht (Ltg) der Gesamtprobe ermittelt und diese dann

in zwei Unterproben geteilt. Anschließend wurden die lufttrockenen Teilproben einzeln gewogen. Eine Unterprobe wurde für die Chlorophyllbestimmung verwendet. Die andere Unterprobe wurde zur Trockengewichtsbestimmung 24 Stunden bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet und anschließend im Exsikkator abgekühlt. Danach wurde das Trockengewicht gravimetrisch bestimmt und das Gesamttrockengewicht berechnet.

### **Chlorophyllgehalt**

Die Chlorophyllbestimmung folgte im Wesentlichen der Methode von BROWN & HOOKER (1977) und BROWN (1980).

#### Aufbereitung der Makroflechten:

Zur Bestimmung des Chlorophyllgehaltes wurde nur eine Teilprobe der luftgetrockneten Flechten, i.d.R. ca. 0,3 g, verwendet. Die Proben wurden mit der Schere grob zerkleinert und einmal in 100 %igem Aceton und anschließend zweimal in 80 %igem Aceton gespült. Anschließend wurde das Flechtenmaterial in 85 %igem Aceton und Seesand in einer Schwingmühle (MM2, Retsch, D) homogenisiert. Bei allen Arbeitsschritten bis zur Homogenisierung der Proben wurde Magnesiumcarbonat ( $MgCO_3$ ) als Puffer zugesetzt, um den Einfluss von acidischen Flechtensubstanzen und eine Phaeophytinisierung der Chlorophylle zu verhindern (ZIEGLER & EGGLE 1965, BROWN & HOOKER 1977, MARKER & JINKS 1982). Das Homogenisat und die Überstände der drei Spülungen wurden für 10 Minuten bei +10 °C und 3500 U min<sup>-1</sup> zentrifugiert (Megafuge 1,0 R, Heraeus Sepatech, D). Der Überstand des Homogenisats wurde dekantiert, das Pellet in 85 %igem Aceton aufgenommen und erneut zentrifugiert. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis der Überstand klar war, d.h. bis kein Chlorophyll mehr extrahiert werden konnte. Danach wurden die Volumina der Chlorophyllextrakte ermittelt. Zwischen den einzelnen Schritten und bis zur photometrischen Messung wurden die Lösungen dunkel gelagert (HOLDEN 1965).

#### Aufbereitung der Krustenflechten:

Bei *Lecidea sciatrapha* wurde die gesamte Probe zur Chlorophyllbestimmung verwendet. Die Thalli wurden vorsichtig und gründlich von den Steinen entfernt. Die Aufbereitung der abgekratzten Thalli entsprach der bei den Makroflechten. Um sicher zu gehen, dass keine Thallusreste, d.h. kein Chlorophyll auf der Oberfläche der Steine verblieb, wurden auch die Steine in Aceton gespült und dann über Nacht in 85 %igem



Aceton unter Zugabe von ausreichend  $\text{MgCO}_3$  eluiert. Die dabei gefundenen Chlorophyllmengen wurden zu denen der Flechtenthalli addiert.

Die Bestimmung der Extinktion der Chlorophyllextrakte erfolgte mit einem Spektrophotometer (Uvikon 922, Kontron, I).

Anschließend wurden die Chlorophyllgehalte anhand der Formel von ARNON (1949) mit den von ZIEGLER & EGGLE (1965) modifizierten Absorptionskoeffizienten berechnet.

#### 5.5.4 Mathematische Modellierung der Nettophotosyntheseaktivität

Die mathematische Beschreibung der **Lichtabhängigkeit** der Nettophotosynthese erfolgte durch eine Exponentialfunktion (vgl. KUTSCH & KAPPEN 1991; SCHROETER 1991):

$$NP(L) = NP_{\max(L)} - (NP_{\max(L)} - DA) \times \exp(-k \times L)$$

mit

- NP(L): lichtabhängige Nettophotosynthese  
 NP<sub>max(L)</sub>: maximale Nettophotosyntheserate (bei Lichtsättigung)  
 DA : Dunkelatmung  
 L : Photonenflussdichte (PPFD)  
 k : empirischer Parameter

Der Vorteil dieser Gleichung liegt darin, dass lediglich der Parameter k ermittelt werden musste. Dies erfolgte in dem Programm SigmaPlot 4.0 (SPSS, USA) nach der GAUSS'schen Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Die Darstellung der **Temperaturabhängigkeit** der Nettophotosynthese erfolgte durch eine Anpassung einer polynominalen Regression zweiten Grades an die Daten.

$$NP(T) = a_0 + a_1(T) + a_2(T^2)$$

mit

- NP(T): temperaturabhängige Nettophotosynthese  
 T: Temperatur  
 a0... a2: Regressionsparameter

Die Regressionsparameter wurden mit Hilfe des Programms SigmaPlot 4.0 (SPSS, USA) berechnet. Die Anpassung erfolgte wiederum mit der GAUSS'schen Methode der kleinsten Quadrate.

Anders als ein mechanistischer Ansatz gestattet die deskriptive Methode der nicht-linearen Regressionsanalyse zwar keine biologische Interpretation der Koeffizienten, sie wird aber wegen ihrer hohen Genauigkeit oft verwendet (PATERSON *et al.* 1983, SONESSON 1986, KAPPEN *et al.* 1988, SCHIPPERGES 1994).

Nach PISEK *et al.* (1969) wurde das Temperaturoptimum der Nettophotosynthese ( $T_{opt}$ ) als der Temperaturbereich definiert, in dem  $NP_{max}$  und  $NP_{max}-10\%$  erreicht wurden. Mittels der Regressionsparameter wurden weiterhin die maximale Nettophotosyntheserate bei optimaler Temperatur ( $NPT_{max}$ ) sowie die unteren und oberen Temperaturkompensationspunkte ( $T_{KP}$ ) bestimmt.

## 5.6 Untersuchte Arten

### 5.6.1 Flechten

#### ***Himantormia lugubris* (Hue) Lamb**

*Himantormia lugubris* ist eine bis zu 5 cm hohe strauchförmige Flechte. *H. lugubris* ist in ihrer Verbreitung auf die Antarktische Halbinsel, die Süd-Shetland- und die Süd-Orkney-Inseln beschränkt (LAMB 1964). Die Äste von *H. lugubris* sind abgeflacht, 2 bis 3,5 mm breit und 0,5 mm dick. Auf Steinen und Felsen kommt sie als aufrecht wachsender, eher bräunlicher Thallus vor, während auf Moosen die Thalli niederliegend und fast schwarz sind. In der niederliegenden Form sind die Thalli steril (REDÓN 1985), dagegen sind bei den saxicolen Formen häufig Apothecien zu finden (LAMB 1964). Diese halophobe und nitrophobe Art ist häufig mit *Usnea aurantiaco-atra* assoziiert (LINDSAY 1971). Von *H. lugubris* dominierte Gürtel um feuchte und lang anhaltend schneebedeckte Hänge in der Umgebung der *Usnea aurantiaco-atra*-Moos-Flechten-Vegetation wurden für die Fildes-Halbinsel, King George Island, beschrieben (KAPPEN & REDON 1984).

#### ***Usnea aurantiaco-atra* (Jacq.) Bory (= *U. fasciata* Torrey)**

*U. aurantiaco-atra*, die ebenso wie *Usnea antarctica* zum Subgenus *Neuropogon* gehört, ist eine der häufigsten Flechten auf King George Island (KAPPEN 1985, REDÓN

1985). *U. aurantiaco-atra* ist vor allem in der maritimen Antarktis verbreitet, aber auch aus dem subantarktischen Gebieten Südamerikas bekannt (WALKER 1985). Der strauchförmige Thallus kann bis zu 10 cm hoch werden und ist reich verzweigt. Die gelbgrünen Äste sind bis in die  $\pm$  durchgehend pigmentierten Spitzen zunehmend schwarz gebändert. *U. aurantiaco-atra* kommt in zwei verschiedenen Wuchsformen vor. Die aufrecht wachsende, häufig fertile, fest auf dem Substrat haftende Form wird auf Felsen und Steinen gefunden, die niederliegende, stärker verzweigte, immer sterile Form wächst locker aufliegend auf Moosen (KAPPEN & REDON 1987). Typisch sind die bei der saxicolen Wuchsform häufig gebildeten subterminalen Apothecien mit schwarzer Scheibe, die einen Durchmesser bis zu 1,7 cm erreichen können.

#### ***Usnea antarctica* Du Rietz**

*Usnea antarctica* ist sowohl in der maritimen als auch in der kontinentalen Antarktis weit verbreitet. Der aufrechte, bis zu 10 cm große Thallus ist gelb-grün gefärbt mit schwarzen Bändern und einer durchgehend schwarz pigmentierten Apikalregion (WALKER 1985, REDÓN 1985). Fruchtkörper sind selten, für die Süd-Shetland-Inseln ist *U. antarctica* nur vegetativ beschrieben (SCHROETER 1991). Kennzeichnend sind die reichlich vorhandenen Sorale (WALKER 1985). Die Art hat eine weite ökologische Amplitude. Sie wächst auf verschiedenen Gesteinen, aber auch auf Moosen (SCHROETER *et al.* 1997b). *U. antarctica* tritt oft neben Moosen oder Krustenflechten als Erstbesiedler von Moränen auf (LINDSAY 1971, SANCHO & VALLADARES 1993).

#### ***Lecidea sciatrapha* Hue**

Das Vorkommen von *Lecidea sciatrapha* ist auf die maritime Antarktis (Süd-Shetland Inseln, Melchior Inseln, Argentine Inseln, Grahamland) beschränkt (REDÓN 1985). Das krustige Lager von *L. sciatrapha* ist blass weiß-gräulich und kann Durchmesser bis zu 10 cm erreichen. Die lecideinen Apothecien (0,6 bis 1,0 cm Durchmesser) stehen einzeln oder in Gruppen (DODGE 1973, REDÓN 1985). Diese saxicole Krustenflechte besiedelt Geröllblöcke und auch Frostschutt.

#### ***Leptogium puberulum* Hue**

Diese dunkle, braun bis oliv-farbene Blattflechte ist in der maritimen und Sub-Antarktis endemisch (SMITH 1972, JØRGENSEN 1986). Der Photobiont, ein Cyanobakterium (*Nostoc*), bedingt den mehr oder weniger gallertigen Thallus. *L. puberulum* bevorzugt

feuchte Habitate, die während des Frühjahrs und Sommers gut mit Schmelzwasser versorgt sind (SCHLENSOG *et al.* 1997a, 1997b). SMITH (1972) bezeichnet sie als guten Indikator für überflutete und basenreiche Böden.

#### ***Pseudephebe pubescens* (L.) Choisy**

Diese Strauchflechte mit bipolarer Verbreitung ist in der maritimen Antarktis weit verbreitet (LAMB 1964, REDÓN 1985). Der filamentöse, schwarze Thallus kann bis zu 6 cm groß werden. Antarktische Proben der Art sind bisher nur steril beschrieben (REDÓN 1985). *P. pubescens* besiedelt Felsen oder steinigen Untergrund, wobei sie die Konkurrenz mit Moosen und anderen Strauchflechten zu vermeiden scheint (SANCHO *et al.* 1999).

#### ***Stereocaulon alpinum* Laur.**

Die bipolar verbreitete Art *Stereocaulon alpinum* ist in der maritimen Antarktis weit verbreitet, wo sie auf Moosen bzw. mit diesen assoziiert auf Boden oder auf mit Boden bedeckten Felsoberflächen oder -spalten vorkommt (Smith & Øvstedal 1991, SANCHO *et al.* 1999). Die weißlich-grauen bis zu 7 cm hohen Sekundärthalli (Pseudopodetien) von *S. alpinum* haben einen dichten blass-grauen Filz. Die weißen Phyllokladien sind warzig bis koralloid (REDÓN 1985). Neben dem Photobionten *Trebouxia* kommen in kleinen, bräunlichen Cephalodien auch Cyanobakterien der Gattung *Nostoc* vor.

#### ***Sphaerophorus globosus* (Huds.) Vain.**

*Sphaerophorus globosus* ist eine kosmopolitische Art, die in der maritimen Antarktis oft auf Moosrasen oder in gut entwickelten Kryptogamengemeinschaften in Küstennähe zu finden ist (LINDSAY 1971, SMITH 1972, Sancho *et al.* 1999). Die bräunlichen, reich verzweigten strauchförmigen Thalli von *S. globosus* können Kolonien von bis zu 20 cm Durchmesser und 10 cm Höhe bilden (Huneck *et al.* 1984, REDÓN 1985). In der Antarktis ist die Art bisher nur steril beschrieben worden.

### **5.6.2 Moose**

#### ***Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske (= *Drepanocladus uncinatus* [Hedw.] Warnst.)**

Die 2 – 6,5 cm langen Stämmchen von *Sanionia uncinata* bilden dichte, grüne, gelb- bis braungrüne Rasen. Die langen, sicheligen Blätter sind mit einer Rippe versehen und

haben einen gezähnten Blattrand. *S. uncinata* ist eines der häufigsten Moose auf King George Island (PUTZKE & PEREIRA 1990). Dieses hygrophytische Moos bildet eine Vielzahl von Morphotypen und besitzt eine weite ökologische Amplitude (GIMINGHAM & SMITH 1970, SMITH & GIMINGHAM 1976). Ausgedehnte Rasen von *S. uncinata* sind häufig in der Nähe von Schneeflecken oder Schmelzwasserrinnsalen oder anderen annähernd dauerfeuchten Habitaten zu finden (NOAKES & LONGTON 1989).

OCHYRA (1998) unterscheidet *S. georgio-uncinata* (Müll. Hal.) Ochyra & Hedenäs und *S. uncinata*. Er gibt für *S. georgio-uncinata* die oben beschriebenen Standortansprüche an, während *S. uncinata* zwar ebenfalls eine weite ökologische Amplitude habe und mitunter auch in feuchten bis nassen Habitaten vorkomme, jedoch generell trockene Standorte bevorzuge. Unterschieden werden können diese beiden Arten im sterilen Zustand nur mikroskopisch anhand der Blattmerkmale. Da diese Unterscheidung zum Zeitpunkt der Untersuchung zum einen nicht bekannt war und zum anderen auch nur im Labor mikroskopisch gemacht werden kann, wird in der vorliegenden Arbeit der alten Nomenklatur folgend nur *Sanionia uncinata* als Sammelart verwendet, wobei nicht ausgeschlossen werden kann, dass nach OCHYRA (1998) beide Arten vorkommen.

Tabelle 5.3 gibt eine Übersicht darüber, an welchen der Arten Untersuchungen zum Mikroklima, zum Wassergehalt und zum CO<sub>2</sub>-Gaswechsel durchgeführt wurden.

**Tabelle 5.3:** Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen an den einzelnen Arten (P: Porometer, M: Miniküvette)

Art	Mikroklima	Wassergehalt	CO <sub>2</sub> -Gaswechsel
<i>Himantormia lugubris</i>	x	x	P; M
<i>Usnea aurantiaco-atra</i>	x	x	
<i>Usnea antarctica</i>		x	P
<i>Lecidea sciatrappa</i>			P; M
<i>Leptogium puberulum</i>		x	P
<i>Pseudephebe pubescens</i>		x	
<i>Stereocaulon alpinum</i>		x	
<i>Sphaerophorus globosus</i>		x	
<i>Sanionia uncinata</i>	x		

## 6 ERGEBNISSE

### 6.1 Schneebedeckung

#### 6.1.1 Schneebedeckung im Transekt 1

Die kontinuierliche Erfassung der Schneehöhen im Transekt wurde an sieben Pegeln entlang des nordexponierten Hanges durchgeführt. Daher beschränkt sich die Darstellung der ganzjährig gemessenen Schneehöhen auf diesen Bereich (Abb. 6.1). Anhand der manuellen Messungen wird der Ausaperungsprozess 1996 für den ganzen Transekt dargestellt.

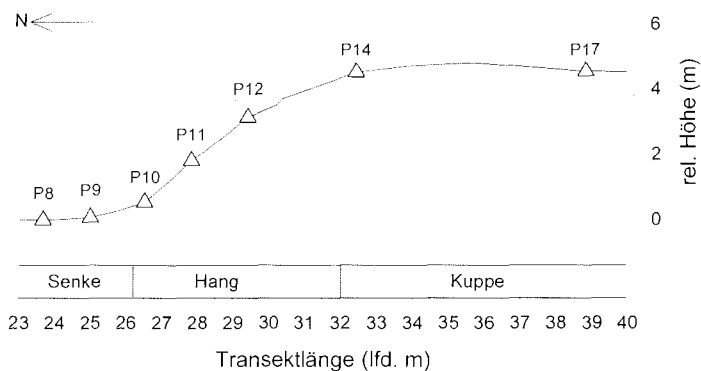


Abb. 6.1: Skizze des nordexponierten Hanges im Transekt 1 mit den automatischen Schneehöhensensoren an den Pegeln P8 – P12, P14 und P17 ( $\Delta$ )

#### 6.1.1.1 Schneehöhen am nordexponierten Hang 1996

Der Jahresverlauf der Tagesminima der automatisch gemessenen Schneehöhen zeigt einen deutlichen Gradienten der Schneebedeckung von der Senke zur Kuppenregion (Abb. 6.2). Die ersten größeren Schneefälle traten 1996 Mitte/Ende Mai auf. Ab Anfang Juni wurde der Schnee nach weiteren Schneefällen am stärksten im Bereich der Senke akkumuliert, während auf der Kuppe (P14, P17) keine oder nur eine sehr dünne Schneedecke vorhanden war. Diese Ergebnisse stimmen mit den manuell durchgeführten Messungen der Schneehöhe überein, mit denen am 15. Juni begonnen wurde. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Schneehöhe im tiefer gelegenen Bereich des Transekts ca. 30 cm (P8, P9), in der Hangmitte (P12) und auf der Flechtenheide (P14, P17) dagegen nur wenige Zentimeter.

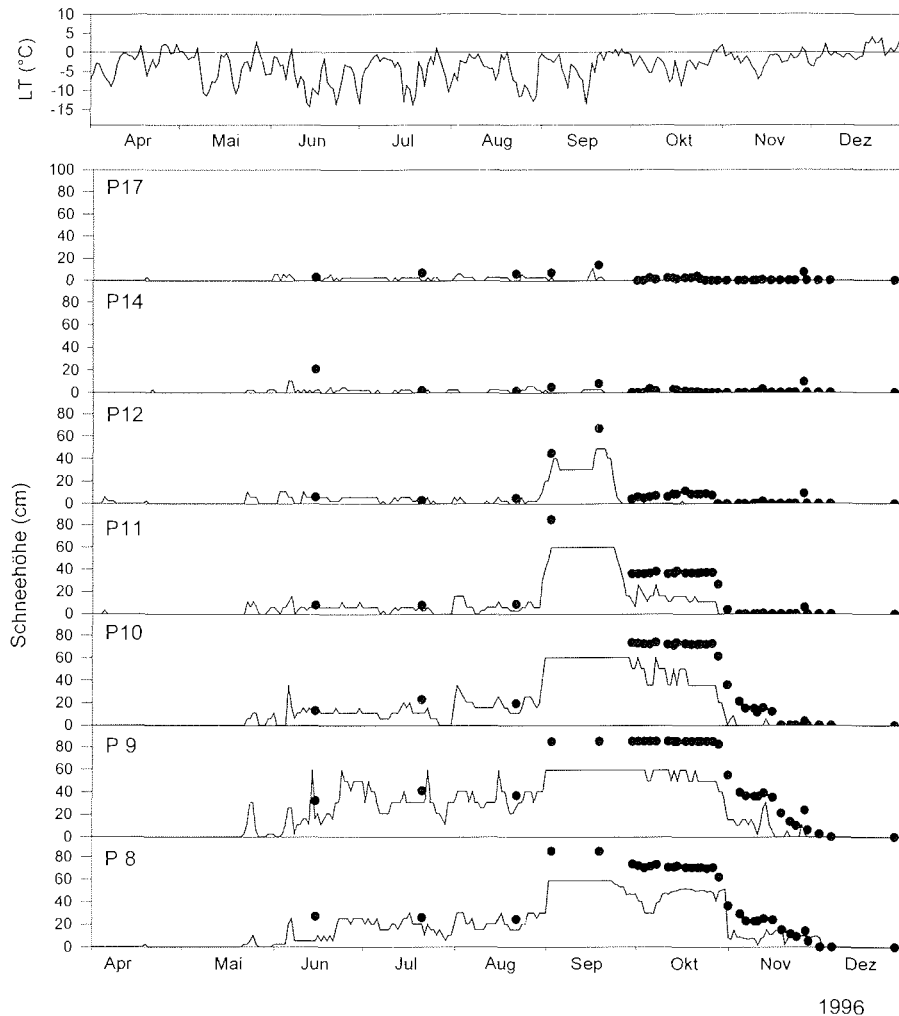


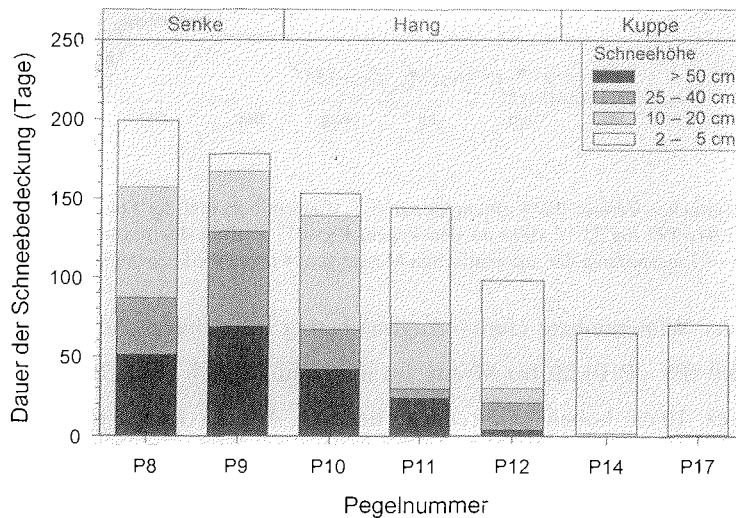
Abb. 6.2: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur (LT, Tagesmittel) und der Schneebedeckung vom 1.04.1996 bis 31.12.1996 an den Pegeln P8 - P17 entlang des nordexponierten Hanges (— Tagesminima der automatischen Messungen, ● manuelle Messungen)

Während der Wintermonate (Juni – August) betrug die Schneehöhe in der Senke und am Hangfuß (P8 – P10) 20 bis 40 cm. Im mittleren Bereich (P11, P12) war der Hang von einer ca. 10 cm hohen Schneedecke bedeckt. Auf der Kuppe (P14, P17) wurden auch in diesen Monaten nur Schneehöhen zwischen 2 und 5 cm gemessen. Auch im Winter kam es zu Schwankungen in der Höhe der Schneedecke, da zwar einerseits nach Schneefällen die Schneehöhe zunahm, andererseits die Tagesmittel der Lufttemperatur immer wieder bis knapp unter 0 °C anstiegen, so dass der Schnee teilweise taute. Am 27.07.1996 überschritt die mittlere tägliche Lufttemperatur den Gefrierpunkt, wodurch

der vorhandene Schnee zwischen dem unteren Bereich des Hanges (P10) und der Kuppe (P17) völlig abtaute.

Neuerliche Schneefälle Anfang August führten nur in der Senke und am Hangfuß zu einer Schneedecke von  $\geq 20$  cm. Etwa am 1. September setzten Schneefälle ein, nach denen der Schnee an den tiefer gelegenen Pegeln eine Höhe von z.T. über 1 m erreichte (manuelle Messung) und auch in der Hangmitte ca. 50 cm hoch lag. Auf der Kuppe kam es dagegen zu keiner nennenswerten Schneeeakkumulation. Bei Schneehöhen von 4 bis 7 cm ragen die Spitzen der Strauchflechten wie *Usnea aurantiaco-atra* und *U. antarctica* meist noch aus dem Schnee heraus. Die Vegetation auf der Kuppe war Ende September aper, während die Hangmitte (P11, P12) noch bis Ende Oktober schneebedeckt war und an den Pegeln im Senkenbereich (P8, P9) noch bis Anfang Dezember Schnee lag. Während des Dezembers war nach sommerlichen Schneefällen im Transekt nur kurzzeitig eine dünne Schneeauflage vorhanden, die aber zu gering war, um sie mit den automatischen Schneehöhensensoren erfassen zu können.

Die automatisch gemessenen Schneehöhen an den Pegeln P8 bis P11 waren im Frühjahr (September – Mitte November) geringer als die manuell erfassten. Jedoch stimmte das Datum, ab dem die Pegel durch ein 0 V Signal „schneefrei“ anzeigten, mit den visuellen Beobachtungen überein.



**Abb. 6.3:** Dauer der Schneebedeckung vom 1.01.-31.12.1996 an den Pegeln P8 – P12, P14 und P17 entlang des nordexponierten Hanges im Transekt I. (Berechnet aus den Tagesminima der automatisch gemessenen Schneehöhen)



Bei der Betrachtung der Dauer der Schneebedeckung im Jahr (Abb. 6.3) zeigt sich, dass die Vegetation in der Senke für mehr als 140 Tage, d.h. annähernd 40 % des Jahres, schneebedeckt war. In diesem Bereich des Transekts kam es an 51 (P8) bzw. 69 Tagen (P9) im Jahr zu einer maximalen Schneeakkumulation von über 50 cm. In der Hangmitte (P12) lag dagegen nur an 98 Tagen des Jahres Schnee. Für ca.  $\frac{1}{3}$  der Zeit, d.h. an 21 Tagen, betrug die Schneedecke mehr als 20 cm. Auf der Hügelkuppe wurde 1996 die maximale Schneehöhe von 10 cm nur an einem bzw. zwei Tagen erreicht. In diesem Teil des Transekts war an 65 Tagen (19 %) im Jahr eine Schneebedeckung von 2 - 5 cm vorhanden.

#### **6.1.1.2 Schneehöhen am nordexponierten Hang 1997**

Die ersten größeren Schneeakkumulationen wurden 1997 im April registriert (Abb. 6.4). Von Ende April (22.04.1997) bis zu ersten Maiwoche (03.05.1997) stiegen die Schneehöhen an den Pegeln in der Senke (P8, P9) und am Hang (P10 – P12) auf Werte zwischen 30 cm (P8) und 60 cm an. Auf der Hügelkuppe wurden dagegen im gleichen Zeitraum nur maximal 5 – 10 cm Schnee gemessen. Auffällig ist, dass zu diesem Zeitpunkt die Schneedecke an den Pegeln P11 und P12 in der Hangmitte höher war als in der Senke am Pegel P8 und auch P9. Nach einem Temperaturanstieg in der zweiten Maiwoche taute der vorhandene Schnee nahezu vollständig ab. Nach erneuten Schneefällen betrug die Schneedecke am 22.05.1997 von der Senke bis zur Hangmitte ca. 20 bis 30 cm (manuelle und automatische Messungen), während die Kuppe nur eine Schneeauflage von 3 bis 13 cm aufwies (manuelle Messung am 22.05.97).

Während des Winters (Juni bis Ende August) schwankte die Schneedecke in der Senke (P8, P9) zwischen 0 und 40 cm, wobei am Pegel P9 fortwährend eine Schneebedeckung von mindestens 2 cm gemessen wurde. Am Hang betrugen in diesen Monaten die Minima der automatisch gemessenen Schneehöhen am Pegel P11 durchschnittlich 10 cm mehr als am ca. 130 cm höher gelegenen Pegel P12, der an einigen Tagen auch schneefrei war. Annähernd gleiche Schneeverhältnisse wie in der Hangmitte (P12) wurden im Winter 1997 auf der Hangkuppe am Pegel P17 gemessen, während der am höchsten gelegene Schneepegel P14 nur jeweils für wenige Tage Schneehöhen von 2 cm registrierte und die restliche Zeit schneefrei war. Die Schwankungen der Schneedecke während des Winters stimmen mit dem Verlauf der Lufttemperatur gut überein.

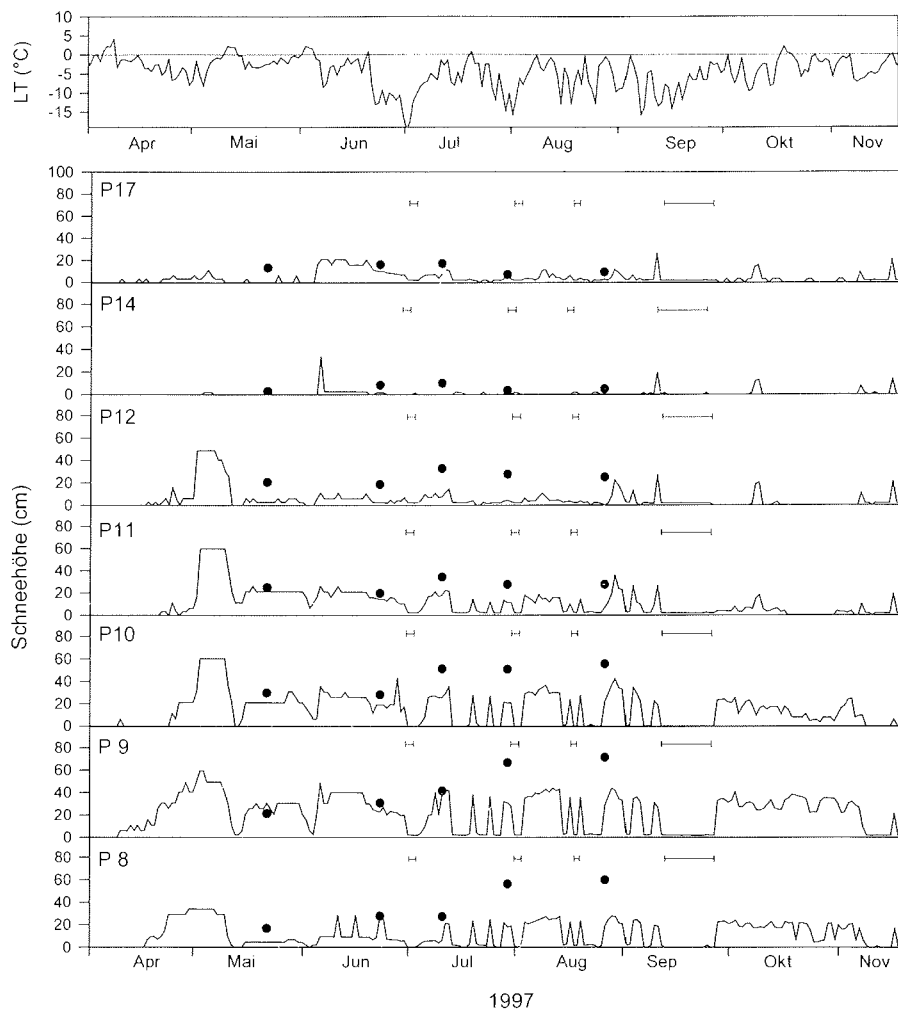
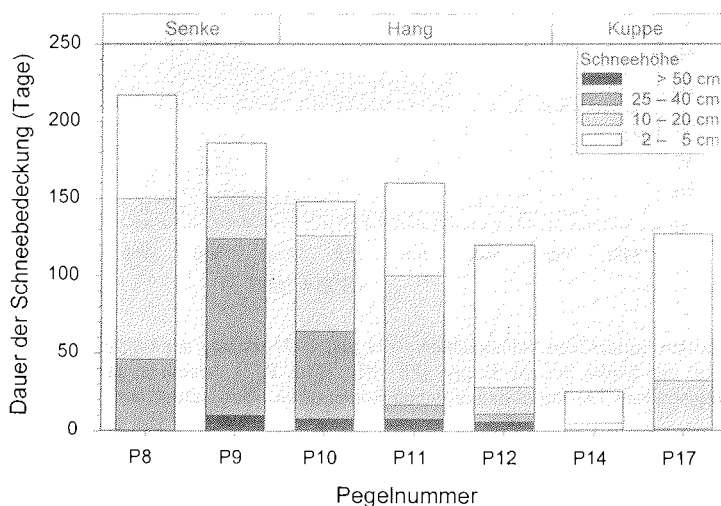


Abb. 6.4: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur (LT, Tagesmittel) und der Schneebedeckung vom 1.04.1997 bis 19.11.1997 an den Pegeln P8 – P17 entlang des nordexponierten Hanges (— Tagesminima der automatische Messungen, • manuelle Messungen, die Balken markieren Sensorausfälle)

Der von den automatischen Schneepiegeln angezeigte starke Rückgang der Schneedecke für jeweils ca. zwei bis vier Tage Anfang Juli, Anfang und Mitte August sowie für ca. 14 Tage Mitte September ließ sich jedoch nicht auf einen Abtauprozess durch Temperaturen über dem Gefrierpunkt zurückführen. Zu diesen Zeitpunkten betrug die mittlere tägliche Temperatur der Luft zwischen  $-20$  und  $-10$  °C. An diesen Terminen ist vermutlich die Elektronik der Sensoren ausgefallen (Abb. 6.4).

Von Ende September bis zum Ende der Messungen am 19.11.1997 wurde von der Mitte des nordexponierten Hanges bis zur Kuppe nur an drei Terminen eine kurzfristige, d.h.

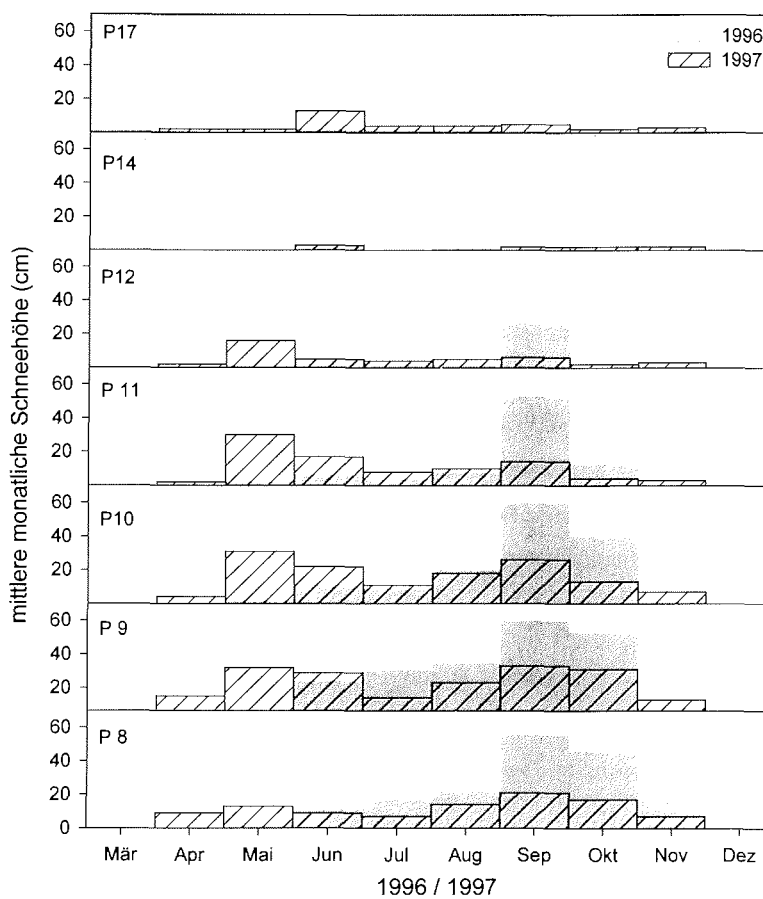
ein bis zwei Tage andauernde, Schneeauflage von 10 bis 20 cm registriert. Die restliche Zeit war nur eine 2 cm hohe Schneeschicht oder keine Schneebedeckung messbar. Am unteren Hangabschnitt am Pegel P11 war noch bis zum 17.10.1997 eine durchschnittlich 5 cm hohe Schneedecke vorhanden. Erst ab Anfang November wurde an diesem Pegel wieder eine neue Schneeauflage registriert. Am Hangfuß und im Bereich der Senke lagen noch bis zur zweiten Novemberwoche durchschnittlich 15 (P10) bis 30 cm (P9) Schnee. Während die Schneehöhensensoren an den Pegeln P10 und P8 am 9. bzw. 10. November schneefrei waren, zeigte der ASP am Pegel P9 ohne Unterbrechung noch bis zum Ende der Messungen am 19.11.1997 eine Schneehöhe von mindestens 2 cm an. Die Dauer der Schneebedeckung nahm 1997 von der Senke zur Hangkuppe tendenziell ab (Abb. 6.5). In der Senke wurde an 217 (P8) bzw. 186 Tagen im Jahr (P9) eine Schneebedeckung gemessen, die an ca. 150 Tagen mindestens 10 cm betrug. Vom Hangfuß bis zur Hangmitte war der Untergrund zwischen 160 und 120 Tagen schneebedeckt. Eine maximale Schneeakkumulation von  $\geq 50$  cm wurde 1997 von der Senke bis zur Hangmitte nur an maximal 10 Tagen registriert. In der Hangmitte (P12) betrug die Schneehöhe überwiegend, d.h. an 92 Tagen, 2 – 5 cm. Damit waren Dauer und Höhe der Schneebedeckung an diesem Punkt und auf dem ca. 1,50 m höheren Plateau (P17) 1997 sehr ähnlich. Der zweite Pegel auf der Hangkuppe (P14) war an nur 25 Tagen des Mess-Zeitraumes schneebedeckt.



**Abb. 6.5:** Dauer der Schneebedeckung vom 1.01.–19.11.1997 an den Pegeln P8 – P12, P14 und P17 entlang des nordexponierten Hanges im Transekt I. (Berechnet aus den Tagesminima der automatisch gemessenen Schneehöhen)

### 6.1.1.3 Interannuelle Variation der automatisch registrierten Schneehöhen 1996/ 1997

Während 1996 ein deutliches Maximum der Schneebedeckung im September und Oktober registriert wurde, waren 1997 die Unterschiede der mittleren monatlichen Schneehöhen von April bis Oktober nur schwach ausgeprägt (Abb. 6.6).



**Abb. 6.6:** Mittlere monatliche Schneehöhen 1996 und 1997 entlang des nordexponierten Hanges von der Senke bis zur Kuppe (P8 - P12, P14, P17), berechnet aus den automatisch registrierten Tagesminima der Schneehöhen (grau: 1996, schraffiert: 1997)

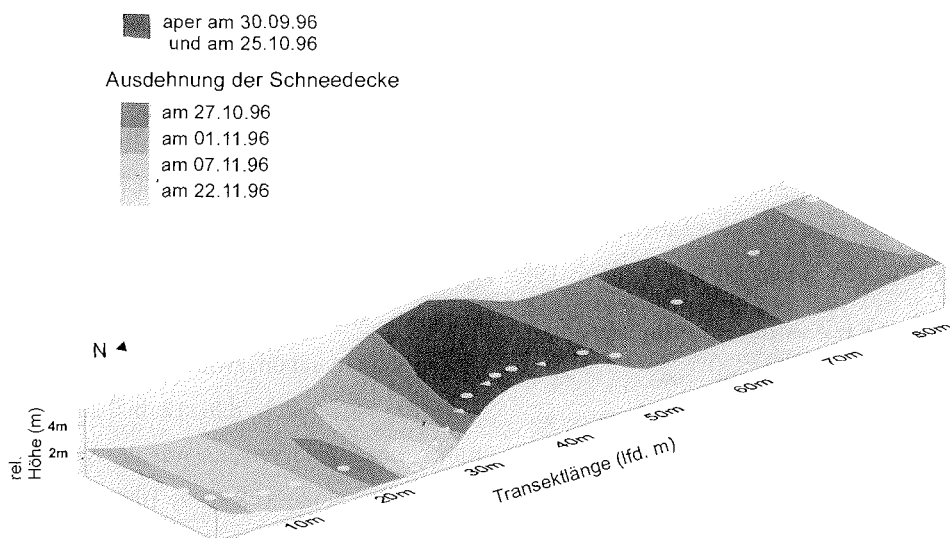
Eine mittlere monatliche Schneebedeckung von über 50 cm wurde 1996 im September in der Senke und im unteren Hangbereich erreicht, im Gegensatz zu maximal 30 cm im Jahr 1997. Die maximale mittlere Schneehöhe von ca. 30 cm wurde 1997 auch schon im Mai gemessen, während im Vorjahr die Schneefälle erst zu diesem Zeitpunkt einsetzten. In der Senke und am Hangfuß konnten 1997 schon im April mittlere Schneehöhen

zwischen 5 und 15 cm beobachtet werden. 1996 betrug die mittlere Schneehöhe in diesem Teil des Transekts 1 erst ab Juni/Juli mehr als 10 cm. Auch auf der Kuppe wurden am Pegel P17 von April bis November 1997 in jedem Monat mindestens 2 cm Schnee gemessen, dagegen war dieser Bereich 1996 im Herbst und Frühjahr weitgehend schneefrei.

#### 6.1.1.4 Manuelle Messungen im Transekt 1 1995/1996

##### Abtauprozess im Transekt 1 1996

Zu Beginn der Feldarbeiten am 30. September 1996 waren der erste Pegel im Transekt (am Hangfuß des Three Brothers Hill), die Kuppe zwischen 30,5 und 44 m sowie der Bereich zwischen 59 und 66 m schneefrei (Abb. 6.7).



**Abb. 6.7:** Skizze des Verlaufs der Ausaperung im Transekt 1. Die unterschiedlichen Grautöne symbolisieren die Schneebedeckung an den entsprechenden Terminen. Die Symbole markieren die Position der Schneepegel P1 – P20 ( $\Delta$  automatisch arbeitende Schneehöhensensoren, o manuell abgelesene Schneepegel; vgl. Abb. 5.1)

In der Senke wurden Schneehöhen zwischen 9 und 85 cm gemessen. Die höchste Schneedecke wurde am südlichen Ende der Senke beobachtet (73,5 – 85 cm), dabei handelte es sich um eine dichte Schneeauflage auf einer Eisschicht. An den Pegeln im nördlichen Abschnitt der Senke lagen noch zwischen 17 und 33 cm Schnee, während in der Senkenmitte eine geringere Schneeauflage von  $10 \pm 1$  cm gemessen wurde.

Hinsichtlich der Schneequalität zeigte sich, dass an allen Pegeln, die zu diesem Zeitpunkt nicht schneefrei waren, entweder eine Eisschicht oder stark vereister Schnee die Vegetation bedeckte.

Nach erneuten Schneefällen war vom 6.10. bis zum 20.10.1996 das gesamte Transekt schneebedeckt (vgl. Tabelle I im Anhang). Am 27.10.1996 waren die Abschnitte des Transekts zwischen 30 und 46 m (lfd. m) sowie zwischen 56 und 64 m schneefrei. Am 01.11.1996 waren der südliche Bereich des Transekts ab ca. 27 m Transektlänge (P11) bis auf einen Schneefleck bei 80 m sowie die Senkenmitte und der Hang ebenfalls aper. Eine Woche später am 7.11.1996 waren nur noch kleine Teile des Transekts zwischen 5 und 12 m sowie von 21,5 bis 27 m schneebedeckt. Der Abtauprozess verlief kontinuierlich weiter, so dass am 22.11.1996 nur bei 21,5 m und zwischen 23 und 25 m noch einzelne Schneeflecken vorhanden waren. Am 06.12.1996 war das Transekt komplett schneefrei.

**Vergleich der Apertermine im nördlichen Transektabschnitt (0 – 30 m) 1995/1996**

Die Apertermine der Pegel P1 bis P12, d.h. vom Fuß des Three Brother Hill durch die Senke bis zur Hangmitte, variierten in den Jahren 1995 und 1996 je nach Lage im Transekt relativ stark (Tabelle 6.1). Im nördlichsten Bereich bis ca. zur Senkenmitte (P1 bis P5) lagen die Apertermine 1995 zwischen dem 18. und dem 30. November.

**Tabelle 6.1:** Apertermine an den Pegeln im nördlichen Abschnitt des Transekts I 1995 - 1996

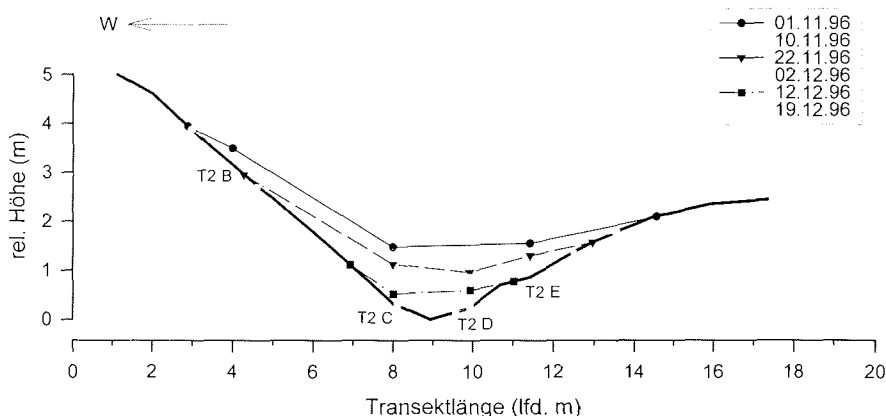
Pegelnr.	1995	1996
	Feldkampagne 23.10. - 25.12.95	Feldkampagne 28.09.96 - 08.03.97
1	18. Nov	1. Nov
2	21. Nov	7. Nov
3	21. Nov	7. Nov
4	21. Nov	19. Nov
5	30. Nov	19. Nov
6		1. Nov
7		19. Nov
8	1. Nov	2. Dez
9	25. Nov	6. Dez
10	< 25. Okt	19. Nov
11	< 25. Okt	5. Nov
12	< 25. Okt	29. Okt

Dagegen war 1996 der Untergrund an diesen Pegeln schon zwischen dem 1. und dem 19. November, d.h. 12 bis 20 Tage früher, aper. Andererseits war der südliche Bereich der Senke (P8 – P9) 1996 zwei bis vier Wochen länger schneebedeckt als 1995. Die größte Variabilität hinsichtlich des Apertermins wurde am nordexponierten Hang an den Pegeln P10 bis P12 beobachtet. Der Untergrund dieses Hangabschnittes war 1995 schon zu Beginn der Feldarbeiten am 23.10.1995 schneefrei, während 1996 der Apertermin erst ca. 4 Wochen später am 19. November lag.

1995 und 1996 gab es im November zahlreiche Niederschläge, die als Schnee fielen. Dieser Neuschnee blieb jedoch großflächig meist nicht länger als ein paar Stunden liegen. Nur an wenigen Stellen akkumulierte er und blieb mehrere Tage liegen. Auch an den Schneepegeln konnte nach Schneefällen nur selten eine Zunahme der Schneehöhe um einige Zentimeter (5 – 10 cm) festgestellt werden.

### 6.1.2 Schneebedeckung im Transekt 2 1996

Im zweiten Transekt (vgl. Kap. 5.1.2) wurde ab dem 01.11.1996 die Schneehöhe manuell in 2 – 3 tägigen Abständen an 4 Stangen abgelesen (T2 B – T2 E).



**Abb. 6.8:** Abtauprozess im Transekt 2 vom 01.11. – 19.12.1996. Die unterschiedlichen Linien geben die Schneedecke an den verschiedenen Terminen an. Die Schneehöhe (Symbole) wurde an den Pegel T2B – T2E bestimmt. (Die dicke schwarze Linie gibt das Relief des Transekts wieder (vgl. Abb. 5.2), das in dieser Abbildung überhöht dargestellt ist)

Der am höchsten gelegene Punkt, T2 B am ostexponierten Hang, war zu Beginn der Messungen am 01.11.1996 (Abb. 6.8) noch mit 33 cm Schnee bedeckt. Im ca. 2 m tiefer gelegenen Bereich um T2 E am westexponierten Hang betrug die Schneehöhe am 01.11.1996 68,5 cm und in der Senkenmitte 115 cm (vgl. Tabelle II im Anhang). Während der ersten 10 Tage verringerte sich die Schneedecke an allen Pegeln um ca. 18 cm. Bis zum 22.11.1996 nahm die Schneehöhe um weitere 10 – 20 cm ab. An diesem Termin war der Pegel T2 B bereits schneefrei. An den restlichen drei Stangen (T2C – T2E) konnten am 02.12.1996 noch Schneehöhen zwischen 27 cm (T2 E) und 63 bzw. 64,5 cm (T2 C, T2 D) gemessen werden. Zu diesem Zeitpunkt war das Transekt 2 zwischen ca. 5 und 12,5 m Transektlänge (lfd. m) schneebedeckt. In den folgenden 8

Tagen taute die Schneedecke am westexponierten Hang weitgehend ab. Auch der Pegel T2 E am ostexponierten Hang war am 12.12.1996 schneefrei, so dass nur noch ein 5 m breiter Bereich in der Senke schneebedeckt war. In der Senkenmitte betrug die Schneehöhe jedoch noch 19,5 (T2 C) bis 36 cm (T2 D). Der Abtauprozess setzte sich rasch fort und am 19.12.1996 waren auch die Pegel T2 C und T2 D schneefrei.

Im Vergleich zum Nord-Süd verlaufenden Transekt 1 blieb die Senke des Transekts 2 annähernd drei Wochen länger schneebedeckt und auch die ost- bzw. westexponierten, d.h. entsprechend der vorherrschenden Westwinde (vgl. Kap. 4.4) in Lee bzw. Luv gelegenen, Hänge waren deutlich länger schneebedeckt als der nordexponierte Hang im Transekt 1.

## 6.2 Das Mikroklima

### 6.2.1 Das Mikroklima im Transekt 1

An drei Standorten entlang des Transekts 1 wurden für das Moos *Sanionia uncinata* und die beiden Strauchflechten *Himantormia lugubris* und *Usnea aurantiaco-atra* zwei Jahrgänge der Thallustemperatur und der Lichtbedingungen (PPFD) aufgenommen. Der ebenfalls installierte Sensor zur Messung der relativen Luftfeuchte hat sich unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen nicht bewährt und fiel ab Ende April 1996 aus. Da in unmittelbarer Nähe der Standorte auch die Schneehöhe registriert wurde (s. Kap. 6.1.1), können die mikroklimatischen Bedingungen mit dieser in Beziehung gesetzt werden. Für jede Art wird der Verlauf der Tagesmittel der Thallustemperaturen und der täglichen Summen der Einstrahlung ( $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , PPFD) sowie die Schneebedeckung am Standort (cm) exemplarisch für das Jahr 1996 dargestellt.

#### 6.2.1.1 Das Mikroklima am Standort von *Sanionia uncinata* 1996

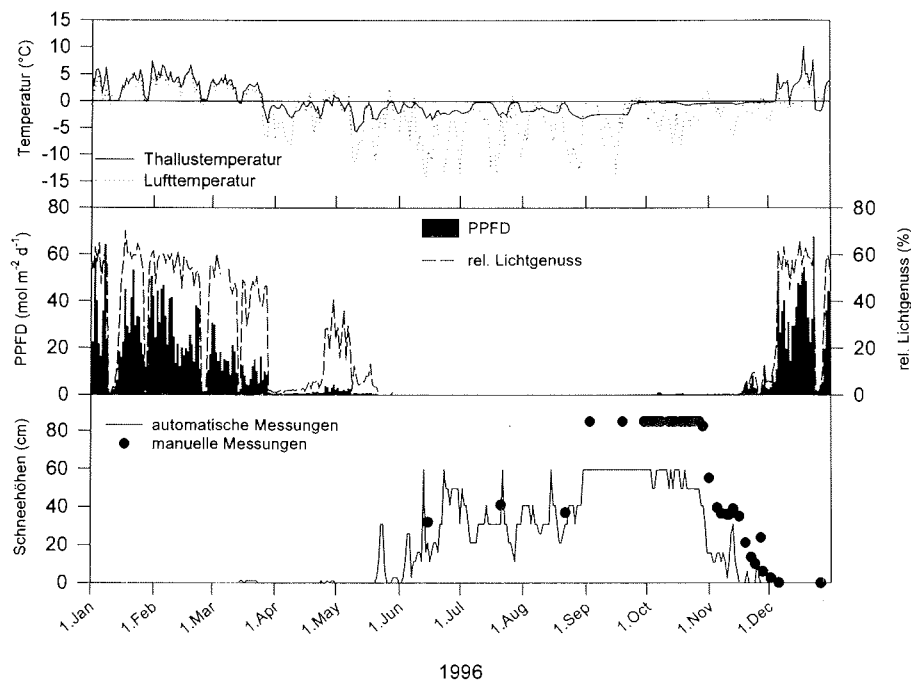
Der Standort von *Sanionia uncinata* befand sich im Transekt 1 bei 24 m Transektlänge am südlichen Ende der Senke nahe Pegel P9 (vgl. Abb. 5.1). In diesem Bereich bildete die Art ausgedehnte Rasen.

##### *Temperatur*

Von Januar bis Februar 1996 schwankten die Thallustemperaturen des Moooses zwischen  $-0,9^\circ\text{C}$  und  $+18,5^\circ\text{C}$ . Das Tagesmittel der Thallustemperatur lag in diesen



Monaten immer über dem Gefrierpunkt (Abb. 6.9), selbst wenn die mittlere Lufttemperatur unter 0 °C sank. Die maximale Tagesamplitude der Thallustemperatur von *S. uncinata* von 18 K wurde am 31.01.1996 gemessen. Erst Ende März sank die Thallustemperatur deutlich unter den Gefrierpunkt und erreichte diesen im Tagesverlauf auch nicht mehr. Bis auf wenige Ausnahmen Ende April und Anfang Mai wurden bis zum Dezember keine positiven Thallustemperaturen mehr registriert.



**Abb. 6.9:** Jahresgang 1996 der Tagesmitteltemperatur (— Thallustemperatur, ... Lufttemperatur), der Tages-Lichtsummen (■ PPF,  $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), des relativen Lichtgenusses (--- % der Einstrahlung) und der Schneebedeckung am Standort von *Sanionia uncinata* im Transekt 1

Ab Anfang Juni lag eine Schneedecke von mindestens 20 cm auf dem Moos, so dass sich nur längerfristige Änderungen der Lufttemperatur in dem Verlauf der Thallustemperatur widerspiegeln. Lag die minimale Thallustemperatur im Mai noch bei  $-6,5$  °C, sank sie in dem schneebedeckten Moosrasen nicht unter  $-4$  °C. Maximale Schneehöhen wurden im Transekt im September 1996 gemessen (vgl. Kap. 6.1.1.1). Am Standort von *S. uncinata* betrug die Schneebedeckung bis Ende Oktober mehr als 85 cm und erst Anfang Dezember war der letzte Schnee abgetaut. Von Ende September bis zum Dezember blieben die Thallustemperaturen konstant bei  $-0,8$  bis  $-0,1$  °C, während die Tagesmittel der Lufttemperatur meist noch deutlich tiefer lagen. Sobald der Standort von *S. uncinata* aper war (06.12.1996), stiegen die Thallustemperaturen deutlich an. Am

19. Dezember wurde die maximale Temperatur des Jahres von +34,8 °C gemessen. Nur nach Schneefällen am 25.12.1996 unterschritten die Tagesmittel der Thallustemperatur für einige Tage den Gefrierpunkt.

#### *Licht*

Während der Sommermonate bis Ende Februar lagen die täglichen Summen der Einstrahlung durchschnittlich bei  $25 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . An strahlungsreichen Tagen wurden jedoch auch Werte von mehr als  $50 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  gemessen, bedingt durch Quantenstromdichten bis zu  $2000 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Auf dem Niveau des aperen Moores betrug die gemessene Einstrahlung zwischen 50 % und 60 % der mit dem sphärischen Quantumsensor registrierten Werte (rel. Lichtgenuss (%), Abb. 6.9). Sommerliche Schneefälle führten für mehrere Tage zu einer Reduktion der Photonenflussdichte. Jahreszeitlich bedingt sanken die täglichen PPFD-Summen im März auf Werte zwischen  $4 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  und  $21 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Eine deutliche Reduktion der Tages-Lichtsummen auf  $0,2\text{--}0,5 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  PPFD und maximale Lichtstärken von  $66 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD vom 29.03. – 26.04.1996 zeigen eine dünne Schneedecke in dieser Zeit an. Vom 22. Mai bis zum 5. Oktober 1996 war *Sanionia uncinata* nahezu vollständig abgedunkelt. Nur an fünf Tagen wurden Lichtstärken von maximal  $5 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD registriert. Ab Oktober konnten vermehrt geringe Photonenflussdichten bis  $11 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  festgestellt werden, jedoch erst ab Mitte November war der Schnee soweit abgetaut, dass Einstrahlungen bis zu  $433 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD und somit Tages-Lichtsummen von über  $2 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  an dem Moosrasen gemessen werden konnten. Dies entsprach ca. 10 % der über der Schneedecke gemessenen PPFD. Sobald das Moos schneefrei war, wurden wieder Tages-Lichtsummen bis zu  $60 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  PPFD registriert. Dies entsprach ca. 60 % der Referenzwerte.

#### **6.2.1.2 Das Mikroklima am Standort von *Himantormia lugubris* 1996**

Der Mikroklimamessplatz von *Himantormia lugubris* befand sich im oberen Drittel des nordexponierten Hanges bei ca. 31 m laufender Transektlänge. Der Standort lag nahe dem Schneepegel P12. Da direkt am Thallus von *H. lugubris* eine Fixierung des PPFD-Sensors nicht möglich war, wurde dieser einige Zentimeter näher am Pegel P12 in gleicher Exposition wie der Flechtenthallus installiert.

### Temperatur

Während der ersten zwei Monate des Jahres wurden im Thallus von *H. lugubris* vorwiegend positive Tagesmittel der Temperatur gemessen, die zum Teil deutlich über denen der Lufttemperatur lagen (Abb. 6.10). Die Thallustemperatur stieg in diesem Zeitraum maximal auf über +30 °C, fiel jedoch auch bis auf -4 °C ab. Die Tagesamplituden betragen an 38 Tagen über 10 K; maximal betragen die diurnalen Schwankungen bis zu 41 K. An bedeckten Tagen zeigten die Thallustemperaturen annähernd die gleichen Tagesmittelwerte wie die Lufttemperatur.

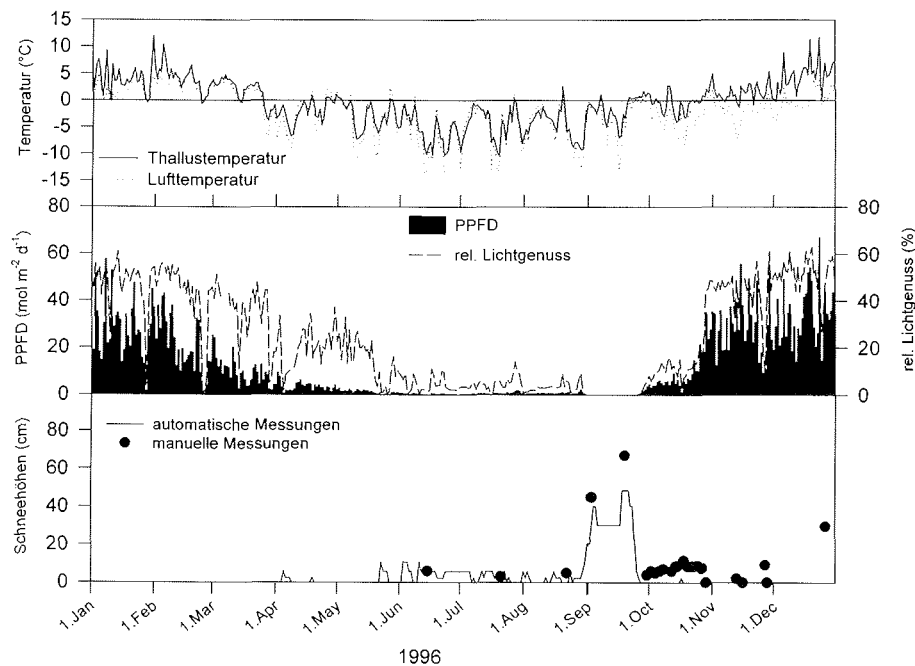


Abb. 6.10: Jahresgang 1996 der Tagesmitteltemperatur (— Thallustemperatur, --- Lufttemperatur), der Tages-Lichtsummen (■ PPFD,  $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), des relativen Lichtgenusses (--- % der Einstrahlung) und der Schneebedeckung am Standort von *Himantormia lugubris* im Transekt 1

Ab März zeigten die mittleren Thallustemperaturen einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Lufttemperatur. Beide Parameter sanken Ende März erstmals deutlich unter den Gefrierpunkt, überschritten diesen jedoch bis Mai noch mehrmals. Temperaturen über 0 °C wurden auch während der Wintermonate, in denen die Thallustemperaturen bis auf minimal -12,9 °C fielen, gemessen. Eine Schneebedeckung von maximal 5 cm dämpfte den Einfluss der Lufttemperatur in diesem Zeitraum kaum. Ende September lagen die Tagesmittel der Thallustemperatur an einigen Tagen wieder über dem Gefrierpunkt. Ab

Oktober wurde nahezu täglich der Gefrierpunkt durchlaufen. Die diurnalen Schwankungen erreichten ab November Maxima von  $\geq 20$  K.

#### *Licht*

An strahlungsreichen Tagen im Januar und Februar wurden am Standort von *H. lugubris* maximale Lichtstärken über  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  erreicht. Die Tages-Lichtsummen schwankten je nach Bewölkungsgrad zwischen 13 und  $52 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$  PPFD (Abb. 6.10). Nur nach Schneefällen wurden kurzzeitig niedrigere Werte registriert. Ab März nahmen durch die jahreszeitlich bedingte Änderung der Lichtverhältnisse die täglichen PPFD-Summen rasch ab und betruhen unter einer dünnen Schneedecke bis Ende August meist nur zwischen  $0,2$  und  $0,4 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ .

Erst nach den Schneefällen im September kam es durch die bis zu 67 cm hohe Schneedecke für ca. 3 Wochen zu einer völligen Reduktion der Einstrahlung ( $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD) auf Thallusebene. Doch schon im Oktober wurden Photonenflussdichten über  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD erreicht, die sich bis zum Dezember auf Werte bis  $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  steigerten.

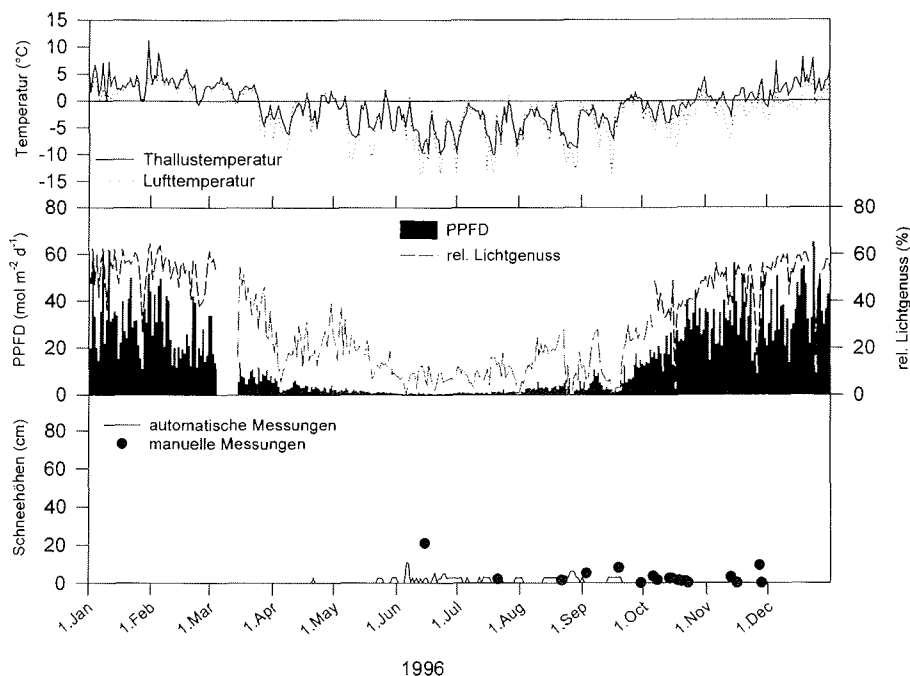
#### **6.2.1.3 Das Mikroklima am Standort von *Usnea aurantiaco-atra* 1996**

Die Mikroklimamessungen an *Usnea aurantiaco-atra* wurden auf der abgeflachten Kuppe ca. 0,5 m oberhalb des Schneepegels P14 (vgl. Abb. 5.1) durchgeführt. Der exponierte Standort lag in dem höchsten Abschnitt des Transekts. Zwischen dem 05.03. und 06.10.1996 führte ein Kabelbruch zum Ausfall des PPFD-Sensors. Da der PPFD-Sensor am Boden von P14 offen exponiert war und ab dem 06.10.1996 ähnliche Werte wie der Sensor an *U. aurantiaco-atra* registrierte, werden für den Zeitraum vom 15.03.1996 bis zum 05.10.1996 diese Werte dargestellt.

#### *Temperatur*

Die Tagesmittel der Thallustemperatur von *U. aurantiaco-atra* zeigten im Jahresgang einen ähnlichen Verlauf wie die von *H. lugubris*. Bis Ende Februar lagen die Tagesmittel immer über dem Gefrierpunkt (Abb. 6.11). Die maximale Thallustemperatur betrug  $+32,3$  °C, minimal wurden  $-4,6$  °C gemessen. Diurnale Schwankungen  $\geq 10$  K wurden im Januar und Februar an 21 Tagen registriert, die maximale Amplitude betrug 33,2 K. Vom 08.05. - 23.09.1996 erreichten die Tagesmittel der Thallustemperatur keine Werte über dem Gefrierpunkt. Die Schneedecke über *U. aurantiaco-atra* war in

den Wintermonaten nur sehr dünn, so dass der Temperaturverlauf im Flechtenthallus dem der Luft folgte. Ende September stiegen die Thallustemperaturen im Tagesdurchschnitt erstmals über  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , und die einfallende Strahlung war hoch genug, den Thallus über die Lufttemperatur zu erwärmen. Ab dem 3. Dezember 1996 lagen die Tagesmitteltemperaturen über dem Gefrierpunkt. Die maximal erreichte Temperatur des Flechtenthallus betrug  $+26,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Abb. 6.11:** Jahresgang 1996 der Tagesmitteltemperatur (— Thallustemperatur, ... Lufttemperatur), der Tages-Lichtsummen (■ PPFD,  $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), des relativen Lichtgenusses (--- % der Einstrahlung) (jeweils in Grau dargestellt die Werte des PPFD-Sensors an P14) und der Schneebedeckung am Standort von *Usnea aurantiaco-atra* im Transekt 1

### Licht

Das Lichtklima am Standort von *Usnea aurantiaco-atra* spiegelte die jahreszeitlichen Schwankungen der Strahlungsverhältnisse des Gebietes wider, wurde aber nicht durch eine länger andauernde Schneebedeckung beeinflusst. In den Sommermonaten variierten die täglichen Lichtsummen mit dem Bewölkungsgrad und betrugen an strahlungsreichen Tagen bis zu  $62 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$  PPFD (Abb. 6.11). In diesem Zeitraum erreichten die Tages-Lichtsummen auf Thallusebene 50 % bis 60 % der vom sphärischen Quantumsensor registrierten PPFD-Summen. Zum Winter nahm der Anteil der auf Thallusebene registrierten Strahlung bis auf 10 % ab, fiel aber nur an drei Tagen im Juni und

Ende August auf 0 %, wenn das einfallende Licht durch eine 5 bis 10 cm hohe Schneeschicht absorbiert wurde. Die Tages-Lichtsummen betragen im Juni und Juli zwischen 0,1 und 2,3 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> PPFD. Ab August stiegen sie deutlich an und lagen Ende Oktober bei durchschnittlich 25 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> PPFD. Im November und Dezember wurden meist über 30 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> PPFD erreicht. Schneefälle während des Sommers führten nur zu einer kurzfristigen Reduktion der Strahlung (z.B. am 26.11. und 25.12.96).

#### 6.2.1.4 Saisonale Variation der mikroklimatischen Bedingungen 1996 an den Standorten der drei Arten

Die mittleren monatlichen Tagesgänge der Luft- bzw. der Thallustemperaturen der drei untersuchten Arten, berechnet aus den aufgezeichneten halbstündigen Mittelwerten, zeigen eine deutliche Veränderung im Jahresverlauf (Abb. 6.12).

Anhand der mittleren Tagesgänge lassen sich die Monate Dezember bis Februar und - eingeschränkt - auch der März dem Sommer zuordnen, wenn der Sommer durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur über dem Gefrierpunkt charakterisiert wird. Kühlte sich die Luft im Dezember nachts noch unter den Gefrierpunkt ab, so wurde dieser in den folgenden drei Monaten nicht mehr unterschritten (Abb. 6.12 a). Die mittleren Tagesgänge der Thallustemperatur von *Sanionia uncinata* zeigten eine deutlich höhere Amplitude (Abb. 6.12 b) als die der Lufttemperatur, v.a. im Dezember. Die maximale Temperatur im Moospolster lag in diesem Monat bei ca. +8 °C. Die Thallustemperaturen von *H. lugubris* (Abb. 6.12 c) und *Usnea aurantiaco-atra* (Abb. 6.12 d) erreichten ebenfalls im Dezember Maximalwerte. Während das Maximum von *U. aurantiaco-atra* dem von *S. uncinata* entsprach, lagen die Werte für die schwarz gefärbte Strauchflechte *H. lugubris* ca. 2–4 K höher zwischen +10 °C und +12 °C. Das Maximum aller Temperaturen wurde zwischen 13:00 und 15:00 Uhr Ortszeit erreicht. Im Monatsmittel sank die Thallustemperatur von *H. lugubris* von Dezember bis März nicht unter den Gefrierpunkt. *U. aurantiaco-atra* kühlte dagegen im Dezember in den frühen Morgenstunden bis knapp unter 0 °C aus und die Temperatur von *S. uncinata* lag zwischen 20:00 und 6:00 Uhr noch deutlich darunter (bis –1 °C). Jedoch war im Januar und Februar die Abkühlung im Moospolster in den Nachtstunden geringer als in den beiden Strauchflechtenthalli.

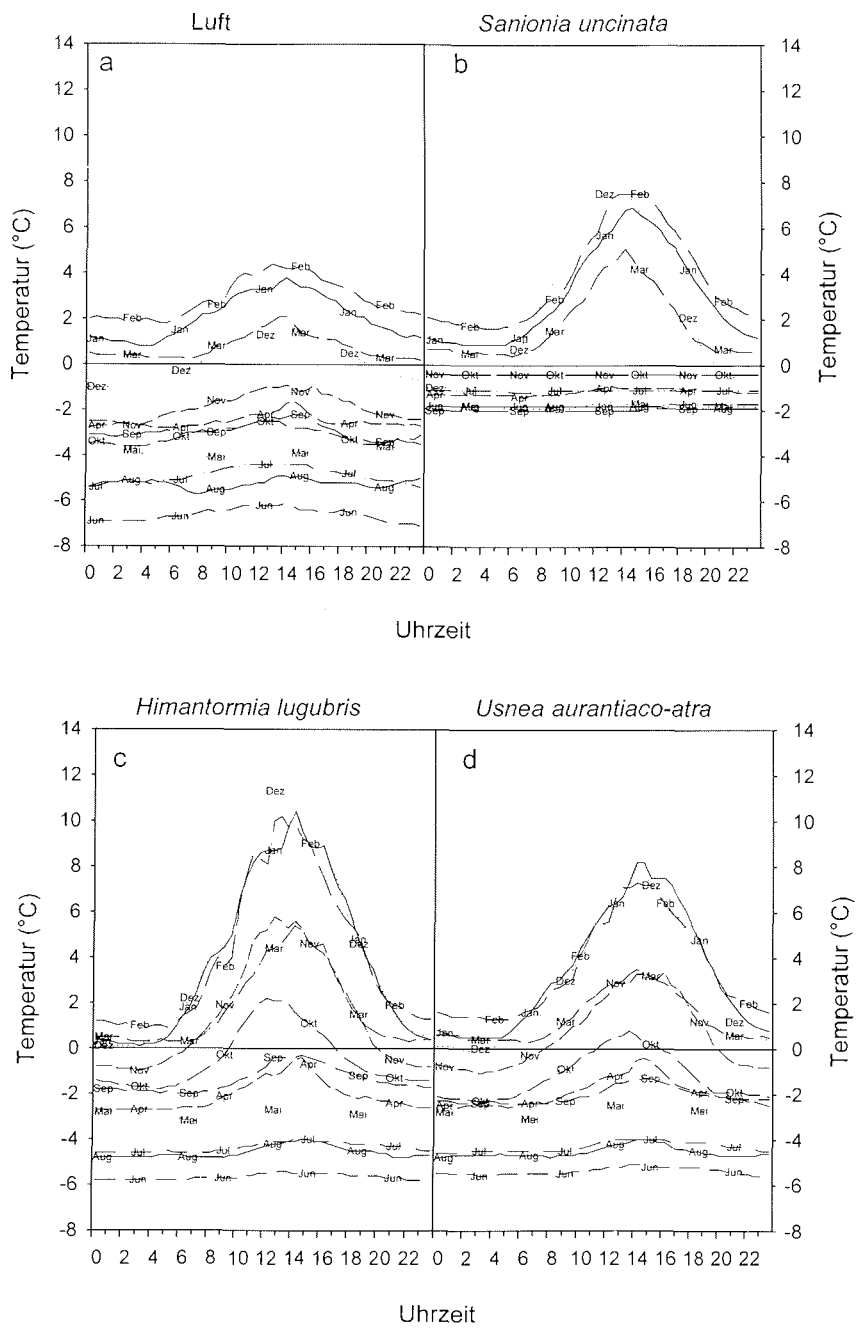


Abb. 6.12: Monatliche Tagesgänge der Halbstundenmittel der Lufttemperatur (a) sowie der Thallustemperatur von *Sanionia uncinata* (b), *Himantormia lugubris* (c) und *Usnea aurantiaco-atra* (d). Die Monate werden durch die ersten drei Buchstaben und unterschiedliche Linien gekennzeichnet (— Januar; — — Februar, - - März, - · - April, · · · Mai, - · - Juni, - · - Juli, — August; — — September, - - Oktober, - · - November, · · · Dezember)

April und Mai stellen die herbstliche Übergangsphase dar. Im Monatsmittel erreichten die Temperaturen zu keiner Tageszeit den Gefrierpunkt. Die Thallustemperaturen der beiden Flechten zeigten im April eine noch deutlichere Tagesamplitude als im Mai (ca. 2 – 3 K). Dagegen war die tägliche Amplitude der Thallustemperatur bei *S. uncinata* in diesen Monaten nur schwach ausgeprägt (0,3 – 0,5 K).

Während der Wintermonate (Juni – August) lagen die Temperaturen der Flechtenthalli zwischen  $-4\text{ °C}$  und  $-6\text{ °C}$  (Juni) und damit etwas höher als die Lufttemperatur. Die Tag-Nacht-Amplituden der Thallustemperaturen betragen in diesem Zeitraum weniger als 1 K. Die minimalen Temperaturen im Polster von *S. uncinata* betragen von Mai bis September ca.  $-2\text{ °C}$ . Nur im Juli stieg die Thallustemperatur im Monatsmittel auf  $-1\text{ °C}$ . Zu diesem Zeitpunkt war die Schneedecke noch so gering, dass der Anstieg der Lufttemperatur sich auch in dem Moosrasen bemerkbar machte. Von Juni bis einschließlich November wurde in dem Moosrasen keine diurnale Rhythmik der Thallustemperatur beobachtet. Dies ist auf die kontinuierliche Schneebedeckung zurückzuführen.

Zum Ende des Winters/Beginn des Frühjahrs im September stieg die Lufttemperatur auf Werte zwischen  $-3,4\text{ °C}$  und  $-2,3\text{ °C}$  an. Die Strahlung reichte zu diesem Zeitpunkt schon aus, die schwarzen Thalli von *H. lugubris* bis auf  $-0,3\text{ °C}$  zu erwärmen. Die mittlere Thallustemperatur der gelbgrünen *U. aurantiaco-atra* lag etwa 1 K tiefer.

Während der verbleibenden Zeit des Frühjahrs (Oktober – November) überschritten die Thallustemperaturen beider Flechten im Tagesverlauf den Gefrierpunkt. Die Temperatur von *H. lugubris* war jedoch nicht nur höher als die von *U. aurantiaco-atra*, es wurden auch über einen längeren Zeitraum Werte über  $0\text{ °C}$  erreicht. Die Thallustemperatur des Mooses betrug dagegen in beiden Monaten im Mittel nur  $-0,4\text{ °C}$ .

Hinsichtlich der Strahlungsverhältnisse ergab sich für *S. uncinata* eine Aufteilung des Jahres in eine Lichtphase (Dezember – März), eine Dunkelphase von Mai bis Oktober und zwei kurze Schwachlichtphasen (April und November) (Abb. 6.13 b). Eine Abnahme der mittleren monatlichen Photonendichten von Dezember bis Februar war nur bei *H. lugubris* ausgeprägt (Abb. 6.13 c). Für *U. aurantiaco-atra* (Abb. 6.13 d) wurde aufgrund der großen Unterbrechung der Messung der März nicht dargestellt (vgl. Kap. 6.2.1.3). Im März betrug die maximale Lichtstärke für *S. uncinata* und *H. lugubris* in den Mittagsstunden  $500$  bzw.  $400\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD. Von April bis Juni nahm die Strahlung für die Strauchflechten kontinuierlich ab.



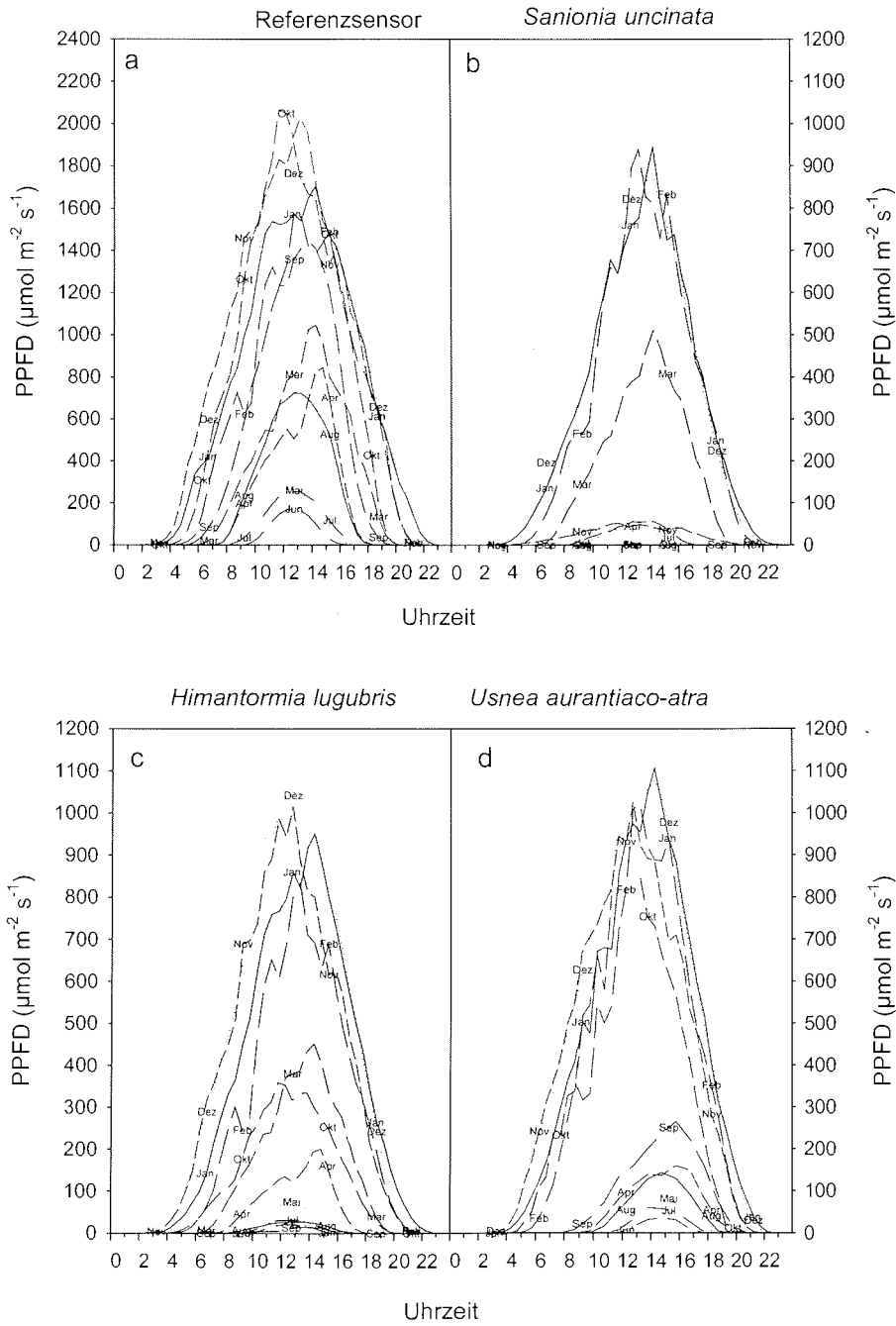


Abb. 6.13: Monatliche Tagesgänge der Halbstundenmittel der Photonenflussdichten 1996 für den Referenzsensor (a) (Skalierung 0–2400 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> PPFD), *Sanionia uncinata* (b), *Himantormia lugubris* (c) und *Usnea aurantiaco-atra* (d) (Skalierung jeweils 0–1200 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> PPFD). Die Monate werden durch die ersten drei Buchstaben und unterschiedliche Linien gekennzeichnet (— Januar; — — Februar, - - März, - - - April, ··· Mai, - · - Juni, - · - Juli, — — August; — — September, - - Oktober, - - - November, ··· Dezember)

Für das Moos wurde die Lichtintensität im April und Mai wesentlich stärker reduziert, und ab Juni war der Standort durch die Schneedecke völlig abgedunkelt. Im dunkelsten Monat (Juni) erreichten noch ca.  $25 - 50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD die Flechten, wobei eine geringere Schneebedeckung am Standort von *U. aurantiaco-atra* bemerkbar war. Bedingt durch den Schnee war die Einstrahlung für *H. lugubris* bis Oktober deutlich reduziert, während am exponierten Standort von *U. aurantiaco-atra* eine kontinuierliche Zunahme entsprechend den Bedingungen über der Schneedecke zu beobachten war.

Im August und September waren die vom Referenzsensor registrierten PPFD-Werte vier- bis sechsfach höher als die auf dem Niveau der offenbar kaum schneebedeckten *U. aurantiaco-atra* gemessenen Strahlungsintensitäten. Dies weist darauf hin, dass in der Umgebung des Referenzsensors die Schneedecke dichter und dadurch die Albedo höher war als während der vorangegangenen Monate, in denen nur ca. zwei- bis dreimal höhere Referenz-Werte registriert wurden.

Im Oktober erreichten durch die etwa 5 cm hohe Schneedecke schon ca.  $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD *H. lugubris*. Sobald die Flechte im November ebenfalls schneefrei war, betrug die mittäglichen Einstrahlungen ca.  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD. Diese Strahlungswerte wurden für *U. aurantiaco-atra* bereits im Oktober gemessen. Die Schneedecke über *S. uncinata* absorbierte noch im November den Großteil der Einstrahlung. Erst als das Moos im Dezember aper war, kam es in den Genuss von Photonenflussdichten bis zu  $900 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD.

#### **6.2.1.5 Interannuelle Variation des Mikroklimas 1996 und 1997**

Die vergleichende Betrachtung des Mikroklimas in den Jahren 1996 und 1997 am jeweiligen Standort der drei untersuchten Arten zeigt, dass die Unterschiede zwischen den beiden Jahren gering waren.

##### **Schneebedeckung**

Während 1996 ganzjährig, d.h. an 366 Tagen, die Schneebedeckung gemessen werden konnte, standen 1997 Messungen an 289 Tagen zur Verfügung, bis diese am 19. November gestoppt wurden (vgl. Kap. 6.1.1.2). Die durchschnittlichen Schneehöhen der einzelnen Monate beider Jahre wurden in Kapitel 6.1.1.3 dargestellt.

Der Standort von *Sanionia uncinata* in der Senke des Transekts 1 war 1997 nur 8 Tage länger schneebedeckt als 1996 (Tabelle 6.2). In beiden Jahren war das Moos länger als 30 % des Jahres mit einer Schneeschicht über 25 cm bedeckt.

Die Schneebedeckung von *Himantormia lugubris* in der Hangmitte dauerte 1997 43 Tage länger als 1996. Die Verteilung der Schneehöhen (in Tagen) war bei *H. lugubris* ebenfalls in beiden Jahren ähnlich, 69 – 77 % der Zeit betrug die Schneedecke 2 – 5 cm. Im Gegensatz zu den Standorten der beiden anderen Arten war der Standort von *Usnea aurantiaco-atra* 1996 an mehr als doppelt soviel Tagen wie 1997 schneebedeckt. In beiden Jahren betrug jedoch die Schneebedeckung kaum mehr als 5 cm.

**Tabelle 6.2:** Dauer der Schneebedeckung (Tage) insgesamt bzw. der Schneehöhenklassen 1996 und 1997 an den Standorten von *Sanionia uncinata*, *Himantormia lugubris* und *Usnea aurantiaco-atra* im Transekt 1

Schnee- bedeckung	<i>S. uncinata</i>		<i>H. lugubris</i>		<i>U. aurantiaco-atra</i>	
	1996	1997	1996	1997	1996	1997
gesamt	178	186	98	120	65	25
2 – 5 cm	11	35	68	92	63	20
10 – 20 cm	38	27	9	17	2	4
25 – 40 cm	60	114	17	5	0	1
> 50 cm	69	10	4	6	0	0

### Temperatur

Die Jahresmitteltemperaturen der Luft (1 m Höhe über dem Boden) waren 1996 und 1997 mit  $-2,1\text{ °C}$  bzw.  $-2,3\text{ °C}$  nahezu gleich (Tabelle 6.3). Das Maximum der Lufttemperatur lag 1997 ( $+11,4\text{ °C}$ ) um 0,9 K höher und das Minimum ( $-21,5\text{ °C}$ ) um 4,5 K niedriger als 1996. In beiden Jahren erreichten die Monatsmitteltemperaturen der Luft in jeweils 4 Monaten Werte über dem Gefrierpunkt. Der wärmste Monat des Jahres 1996 war der Februar mit durchschnittlich  $+2,9\text{ °C}$  und der Juni der kälteste Monat. 1997 wurden dagegen im September durchschnittlich die tiefsten Temperaturen gemessen.

Das Jahresmittel der Thallustemperatur lag bei *Sanionia uncinata* 1996 bei ca.  $0\text{ °C}$  und damit 1,8 K über dem von 1997 ( $-1,8\text{ °C}$ ). Die minimalen Temperaturen variierten bei *S. uncinata* in beiden Jahren kaum und fielen nicht unter  $-7,3\text{ °C}$ . Der kälteste Monat war sowohl 1996 als auch 1997 der September. Infolge der tieferen Lufttemperaturen und geringeren Schneedecke war jedoch der September 1997 um 2,3 K kälter als im

Vorjahr. Die Thallustemperatur von *S. uncinata* blieb im Monatsmittel 1996 in 8 Monaten und 1997 in 9 Monaten unter 0 °C.

Auch bei *Himantormia lugubris* wurde 1996 ein etwas höheres Jahresmittel der Thallustemperatur gemessen als 1997 (um 0,9 K). Das Temperaturminimum war bei *H. lugubris* 1997 mit -16,6 °C um 3,5 K niedriger als 1996. Das Temperaturmaximum lag 1996 bei +41,9 °C, 1997 wurden maximal +33,6 °C gemessen. Der schwarz gefärbte Thallus von *H. lugubris* erwärmte sich 1996 im Monatsmittel am stärksten im Dezember, 1997 wurden im der Januar die höchsten Thallustemperaturen registriert.

Bei *U. aurantiaco-atra* konnten nur die ersten neun Monate des Jahres 1997 (Sensorausfall ab Oktober) berücksichtigt werden. Hinsichtlich des Jahresmittels, -minimums und -maximums der Temperatur war, wie auch bei *H. lugubris*, 1997 kälter als 1996. Das Maximum der Thallustemperatur lag 1996 ca. 5 K höher als 1997 (+27,2 °C). Das Minimum unterschied sich in beiden Jahren nur um 0,4 K. In beiden Jahren war am Standort von *U. aurantiaco-atra* der Juni der kälteste Monat. Der wärmste Monat war 1996 der Februar.

**Tabelle 6.3:** Lufttemperatur und Thallustemperaturen (°C) von *Sanionia uncinata*, *Himantormia lugubris* und *Usnea aurantiaco-atra* (\* 1997 Daten von Januar bis September) im Transekt 1 in den Jahren 1996 und 1997

	Luft (1m )		<i>S. uncinata</i>		<i>H. lugubris</i>		<i>U. aurantiaco-atra</i> *	
	1996	1997	1996	1997	1996	1997	1996	1997
Mittel	-2,1	-2,3	0,0	-1,8	-0,5	-1,4	-0,9	-1,1
Minimum	-17,0	-21,5	-6,6	-7,3	-2,9	-6,6	-13,0	-13,4
Maximum	+10,3	+11,4	+34,8	+39,5	+41,9	+33,6	+32,3	+27,2
Monate < 0 °C	8	8	8	9	7	8	7	8
kältester Monat	Jun. (-6,6)	Sept. (-7,4)	Sept. (-2,0)	Sept. (-4,3)	Jun. (-5,7)	Sept. (-7,0)	Jun. (-5,4)	Jun. (-4,9)
wärmster Monat	Feb. (+2,9)	Jan. (+3,1)	Feb. (+3,8)	Jan. (+2,9)	Dez. (+4,3)	Jan. (+5,7)	Feb. (+3,5)	Jan. (+4,8)

## Licht

Hinsichtlich der monatlichen Tages-Lichtsummen (Tabelle 6.4) ergaben sich für *Usnea aurantiaco-atra* kaum Unterschiede zwischen 1996 und 1997. Nur im September 1997

war die mittlere monatliche Tages-Lichtsumme ( $10,5 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  PPFD) etwa doppelt so hoch wie im selben Monat des Vorjahres ( $5,7 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  PPFD).

Am Standort von *Himantormia lugubris* in der Hangmitte des Transekts 1 waren sich die monatlichen Mittel der Tages-Lichtsummen ebenfalls recht ähnlich. 1996 erreichte von Mai bis August ein wenig mehr Licht den Thallus als im darauf folgenden Jahr. Im September 1997 war das monatliche Mittel der Tages-Lichtsummen dagegen höher als im September 1996. Generell war die Einstrahlung an diesem Standort in beiden Jahren noch bis zum November deutlich reduziert.

Auch am Standort von *Sanionia uncinata* gab es in den Jahren 1996 und 1997 nur geringe Unterschiede der mittleren monatlichen Tages-Lichtsummen. 1996 lag *S. uncinata* von Juni bis Oktober unter einer Schneedecke, die keine bzw. nur ein sehr geringer Teil der Einstrahlung durchdringen konnte ( $0 - 0,1 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  PPFD). Eine solch starke Reduktion der Einstrahlung war 1997 zwei Monate länger (Mai und November) als 1996 zu beobachten.

**Tabelle 6.4:** Mittlere monatliche Tages-Lichtsummen ( $\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  PPFD) im Transekt I an den Standorten von *Sanionia uncinata*, *Himantormia lugubris* und *Usnea aurantiaco-atra* (\* Werte des Sensors an P14, vgl. Kapitel 6.2.1.3) sowie die mit dem Referenzsensor registrierten Werte in den Jahren 1996 und 1997

	<i>S. uncinata</i>		<i>H. lugubris</i>		<i>U. aurantiaco-atra</i>		Referenz	
	1996	1997	1996	1997	1996	1997	1996	1997
Januar	25,5	30,5	27,9	30,0	31,6	34,8	59,0	67,6
Februar	23,8	19,0	21,1	18,7	26,1	19,8	48,6	40,5
März	11,0	11,2	9,8	10,7	8,2*	11,4	25,4	28,3
April	0,9	0,7	3,4	2,9	3,4*	4,3	18,0	20,9
Mai	0,7	0,0	1,1	0,1	1,3*	1,2	7,4	8,6
Juni	0,0	0,0	0,3	0,1	0,4*	0,1	6,4	6,4
Juli	0,0	0,0	0,5	0,0	0,8*	0,4	9,2	8,2
August	0,0	0,0	0,5	0,2	2,5*	2,1	19,0	19,3
September	0,0	0,0	0,3	1,0	5,7*	10,5	38,2	49,5
Oktober	0,1	0,0	9,2	10,8	25,7	23,0	60,1	65,5
November	1,7	0,1	29,2	27,7	30,8	29,5	66,7	73,6
Dezember	27,7	26,1	33,7	40,9	35,4	42,0	65,1	77,2

### 6.2.2 Lichtverhältnisse im Transekt 2

In dem weitgehend von Kryptogamen unbesiedelten Transekt 2 (vgl. Abb. 5.2) wurden die Lichtverhältnisse vom 10.11.1996 bis zum 21.02.1997 erfasst. Etwa in der Senkenmitte des in Ost-West-Richtung verlaufenden Transekts wurden PPFD-Sensoren installiert, die die Einstrahlung und die Reflektion sowie die Transmission durch die Schneedecke registrierten. Aufgrund einer stabilen Eisschicht, die sich 50 cm unter der Schneeoberfläche (d.h. 41 cm über dem Boden) gebildet hatte, konnte der Sensor zur Messung der Transmission des Lichts durch den Schnee anfangs nicht direkt auf dem Untergrund installiert werden. Parallel wurde die Schneehöhe über dem Sensor in mehrtägigen Abständen bestimmt. War der unter dem Schnee vergrabene Lichtsensor frei getaut, wurde er wieder mit einer Schneesicht bedeckt, die der Höhe des Schnees in der Senkenmitte entsprach.

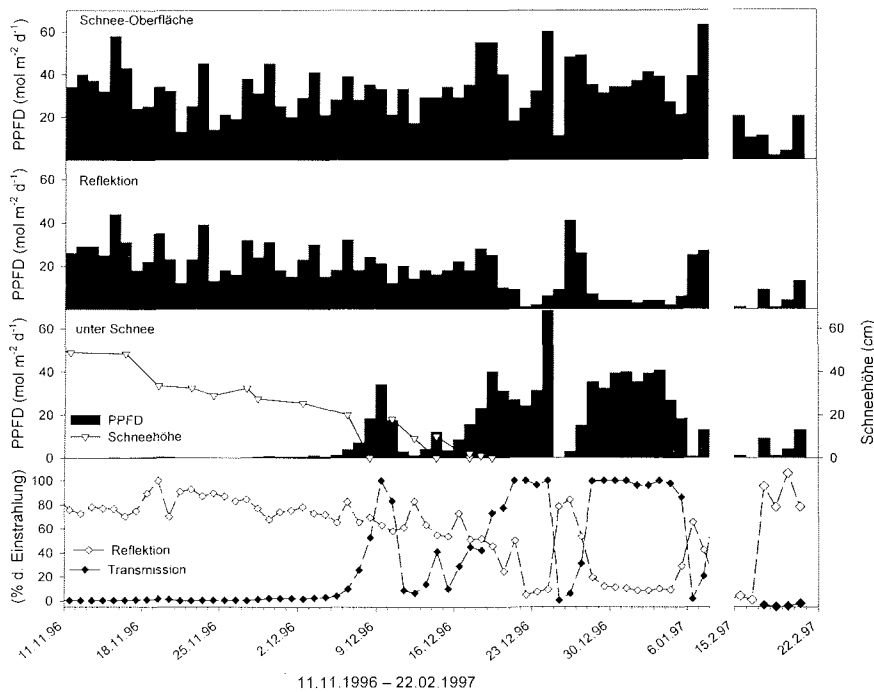


Abb. 6.14: Lichtklima in der Senke von Transekt 2 vom 11.11.1996 – 8.01.1997 und vom 14.02 – 22.02.1997. Dargestellt sind die Einstrahlung an der Schnee-Oberfläche, die Reflektion und die Lichtverhältnisse unter Schnee ( $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$  PPFD) sowie die Höhe der Schneedecke über dem Sensor (cm) und die Reflektion bzw. die Transmission (% d. Einstrahlung)

Solange der Sensor von einer Schneedecke höher als 40 cm bedeckt war, wurde fast keine Strahlung registriert (Abb. 6.14). Bis zum 13.12.1996 betrug die Albedo > 60 %, dann verringerte sie sich bis zum 18.12. auf ca. 50 % und am 22.12. wurden nur noch 5 % Reflektion gemessen. Diese Werte belegen die zunehmende Geschwindigkeit des Abtauprozesses.

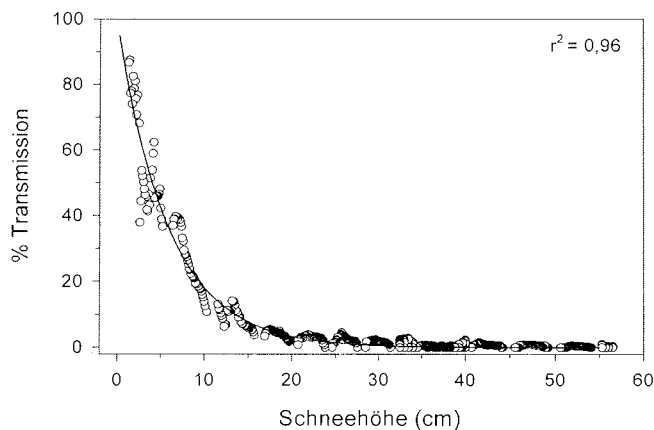
Eine Transmission größer als 1 % der Einstrahlung war erst messbar, wenn die Schneehöhe geringer als 40 cm war. Ab einer Schneehöhe von weniger als 20 cm gelangten ca. 25 % der Einstrahlung durch die Schneedecke. Dies entsprach unter den herrschenden Strahlungsbedingungen  $7 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  PPFD.

Der Sensor zur Messung der Transmission war erstmals am 9.12.1996 schneefrei, das Transekt 2 war jedoch erst am 21.12.96 aper. Nach starken Schneefällen am 25.12.1996 betrug die Extinktion der Strahlung für zwei Tage 94 % bis 100 %. Am dritten Tag (27.12.1996) war die Transmission im Tagesdurchschnitt auf ca. 30 % angestiegen und am 28.12.1996 war der Standort wieder schneefrei. Nach Schneefällen am 5./6.01.1997 wurde wiederum für drei Tage über 40 % der Einstrahlung von einer Schneeschicht, durch die weniger als 20 % der Strahlung gelangten, reflektiert. An den folgenden zwei Tagen bis zum 10.01.1997 war noch eine dünne Schneedecke vorhanden, die 20 % der Strahlung absorbierte. Am 17.02.1997 traten wiederum Schneefälle auf, nach denen sich bis zum Ende der Messungen soviel Schnee in der Senke akkumulierte, dass das einfallende Licht zu über 97 % absorbiert wurde.

Während des gesamten Untersuchungszeitraums wurden ca. 40 % der einfallenden Strahlung reflektiert und etwa 60 % wurden von dem PPFD-Sensor am Boden erfasst. Das Transekt 2 war vor dem 10.11.1996 schneebedeckt und ebenfalls am 24.02.1997, als die Sensoren abgebaut wurden. Die Senke des Transekts 2 war während der Messkampagne an 49 Tagen schneefrei gewesen. In dieser 49 Tage dauernden „Vegetationsperiode“ betrug die Einstrahlung ca.  $1600 \text{ mol m}^{-2}$  PPFD.

### 6.2.3 Lichtverhältnisse unter Schnee

Die Lichtdaten im Transekt 2 zeigten deutlich eine exponentielle Abnahme der relativen Transmission der photosynthetisch aktiven Photonenflussdichten mit der Schneehöhe (Abb. 6.15), die sich gut durch die Funktion  $f(x) = a \cdot e^{(-bx)}$  beschreiben ließ. Dabei handelte es sich in der Regel um Altschnee, der eine Dichte von  $\geq 0,4 \text{ g cm}^{-3}$  hat. Eine 2 cm hohe Schneeschicht reduzierte das Licht schon um ca. 20 %. Mit zunehmender Schneehöhe nahm die Transmission weiter ab, bis bei einer Schneehöhe von 20 cm über 90 % der Strahlung vom Schnee absorbiert bzw. reflektiert wurden. Unter einer Schneedecke von mehr als 35 cm betrug die Transmission maximal 1 %.



**Abb. 6.15:** Abnahme der relativen Transmission der einfallenden Strahlung (PPFD) durch Schnee zunehmender Höhe (gemessen im Transekt 2). Es wurde eine nicht-lineare Funktion ( $y = a \times e^{(-bx)}$ ) an die Daten angepasst

Die Transmission hängt jedoch nicht nur von der Schneehöhe sondern auch von der Schneequalität, d.h. der Schneedichte ab. Messungen in verschiedenen Schneetiefen in Restschneefeldern (Schneedichte  $0,40 - 0,49 \text{ g cm}^{-3}$ ) zwischen dem 11.11.1996 und dem 20.11.1996 zeigten im Vergleich zu Messungen unter Neuschnee (Schneedichte  $0,2 - 0,4 \text{ g cm}^{-3}$ ) deutlich stärkere Transmissionen bei annähernd gleicher Schneehöhe (Abb. 6.16). So gelangten zwischen 10 % und 54 % der Strahlung durch 5 cm Schnee von einer Dichte  $\geq 0,4 \text{ g cm}^{-3}$  (Firn). Unter Schnee mit einer Dichte von 0,2 bis  $0,4 \text{ g cm}^{-3}$  (Packschnee) lag der Median der Transmission in der gleichen Tiefe bei



20 % und die Hälfte der Messwerte zwischen 8 % und 21 %. Schon unter 2 cm Packschnee war die Transmission deutlich geringer als unter 5 cm Firn und betrug zwischen 6 % und 40 %.

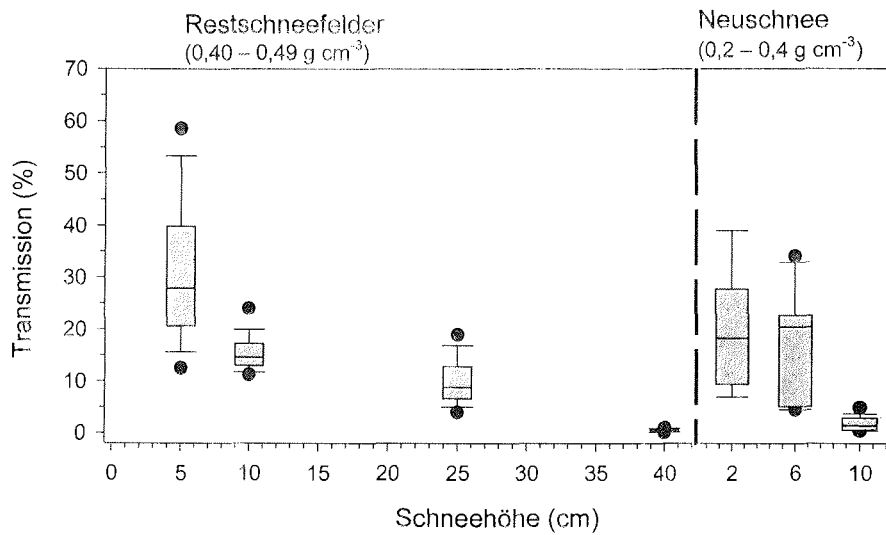


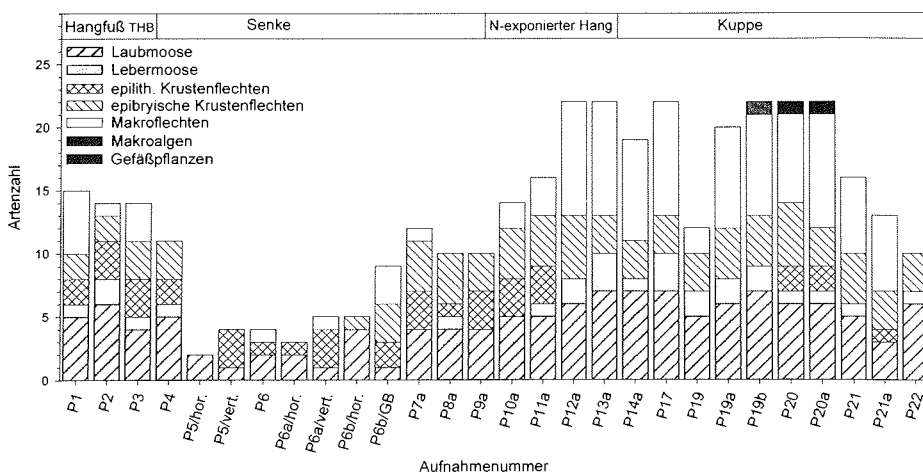
Abb. 6.16: Relative Transmission des Lichts (%) durch Schnee in verschiedenen Tiefen und bei unterschiedlicher Dichte. Auf der linken Seite sind Messungen unter Restschneefeldern (Schneedichte  $0,4 - 0,49 \text{ g cm}^{-3}$ ) dargestellt, rechts unter Neuschnee (Schneedichte  $0,2 - 0,4 \text{ g cm}^{-3}$ ). Angegeben sind der Median der Messungen (Linie), der Bereich, in dem 25 - 75 % der Messwerte liegen (Box) sowie der 10 %- bzw. 90 %-Bereich (Balken) und der 5 %- bzw. 95 %-Bereich (•)

### 6.3 Vegetationszusammensetzung im Transekt 1

In den 97 Einzelaufnahmen an den 26 Aufnahmepunkten im Transekt 1 (vgl. Abb. 5.7) wurden 24 verschiedene Flechtenarten, 6 Leber-, 14 Laubmoose, eine Makroalge und eine Gefäßpflanze gefunden. Eine eindeutige Bestimmung der Art war nicht bei allen Proben möglich. Bei einigen sterilen muscigen Flechtenproben konnte die Gattung nicht sicher bestimmt werden, diese Proben wurden unter einem Arbeitsnamen zusammengefasst.

#### 6.3.1 Artenanzahl und Wuchsformenspektrum

Innerhalb einer Aufnahmefläche wurden maximal 22 verschiedene Arten gefunden (Abb. 6.17). Dabei war die Senke der artenärmste Abschnitt des Transekts mit maximal 12 Arten pro Aufnahmefläche. Im Bereich des Schmelzwasserbachs traten nur 2 bis 5 Arten in den untersuchten Flächen auf. In der Senke kamen vor allem Laubmoose und Flechten mit krustigem Lager vor sowie an zwei Punkten die kleinblättrige Cyanolichene *Leptogium puberulum* als einzige Makroflechte auf den Bodenflächen dieses Transektbereichs. Die vertikalen Flächen der Geröllblöcke an den Pegeln P5 und P6a sowie die horizontale Fläche auf dem Geröllblock an P6b stellten Sonderstandorte dar.



**Abb. 6.17:** Artenzahl und Wuchsformenspektrum in den einzelnen Aufnahmeflächen (-ver: Aufnahme an der vertikalen Fläche eines Geröllblocks, -GB: horizontal auf dem Geröllblock, -hor: Aufnahmen auf den Bodenflächen neben den Geröllblöcken) entlang des Transekts 1 (vgl. Abb. 5.7). Die Höhe der Balken gibt die Artenzahl wieder, die verschiedenen Wuchsformen werden durch die unterschiedlichen Muster und Grautöne dargestellt

Es zeigt sich deutlich, dass Makroflechten überwiegend an den Standorten auftraten, die die längste Zeit im Jahr aper waren, d.h. am Hangfuß des Three Brothers Hill sowie ab der Mitte des nordexponierten Hanges und auf der Kuppe. In der Senke überwog dagegen der Anteil der Krustenflechten. Epilithische Krustenflechten kamen im südlichen Transektabschnitt auf der Kuppe nur an drei Aufnahmepunkten vor. Lebermoose traten überwiegend in den höher gelegenen Bereichen des Transekts 1 auf.

### 6.3.2 Artenspektrum in den Aufnahmeflächen entlang des Transekts 1

Die Artprofile des Transekts anhand der relativen Frequenzen (Abb. 6.18) und der Deckungsgrade (Abb. 6.19) der häufigsten Arten in den Aufnahmeflächen entlang des Transekts zeigen deutlich die unterschiedliche Besiedlung der einzelnen Transektabschnitte. Die Aufnahmeflächen P19a, P19b, P20a und P21a sowie die Aufnahmen an den Geröllblöcken wurden in diesen Darstellungen nicht berücksichtigt. Eine vollständige Artenliste der jeweiligen Aufnahmeflächen ist den Vegetationstabellen Tabelle III (Frequenzen) und Tabelle IV (Deckung) im Anhang zu entnehmen.

Einige Arten wie die Moose *Sanionia uncinata*, *Andreaea regularis*, *Polytrichastrum alpinum*, die epibryische Flechten *Ochrolechia frigida* und *Psoroma hypnorum* sowie der auf Flechten vorkommende Pilz *Arthonia cf. excentrica* (D. Triebel, pers. Mitteilung) waren in über 64 % der Aufnahmen entlang des Transekts vorhanden. *Ochrolechia frigida* und *Psoroma hypnorum* sowie *Polytrichastrum alpinum* kamen zwar in wechselnden Frequenzen bis zu 25 bzw. 50 % vor, jedoch betrug ihr Anteil an der Deckung in den einzelnen Aufnahmeflächen selten mehr als 10 %. In der nördlichsten Aufnahmefläche am Hangfuß des Three Brothers Hill, die gegenüber der tiefsten Stelle des Transekts ca. 2,5 m erhöht war, traten noch einige Strauchflechten wie *Usnea aurantiaco-atra* und *Himantormia lugubris* auf, die in den tiefer gelegenen Transektbereichen nicht mehr vertreten waren.

In der Senke (P5 – P8a) dominierte *Sanionia uncinata*. Die Art wurde zwar in annähernd allen Aufnahmen gefunden, jedoch kam sie nur in diesem Transektabschnitt mit Frequenzen zwischen 50 % und 100 % und mit Deckungsgraden zwischen 20 % und 80 % vor. Das hygrophytische Moos *Warnstorfia sarmentosa* war in seinem Vorkommen auf den Bereich des Schmelzwasserbachs in der Senkenmitte (P5, P6) beschränkt, wo es zusammen mit *S. uncinata* die Vegetation der horizontalen Flächen zwischen den Geröllblöcken bildete.

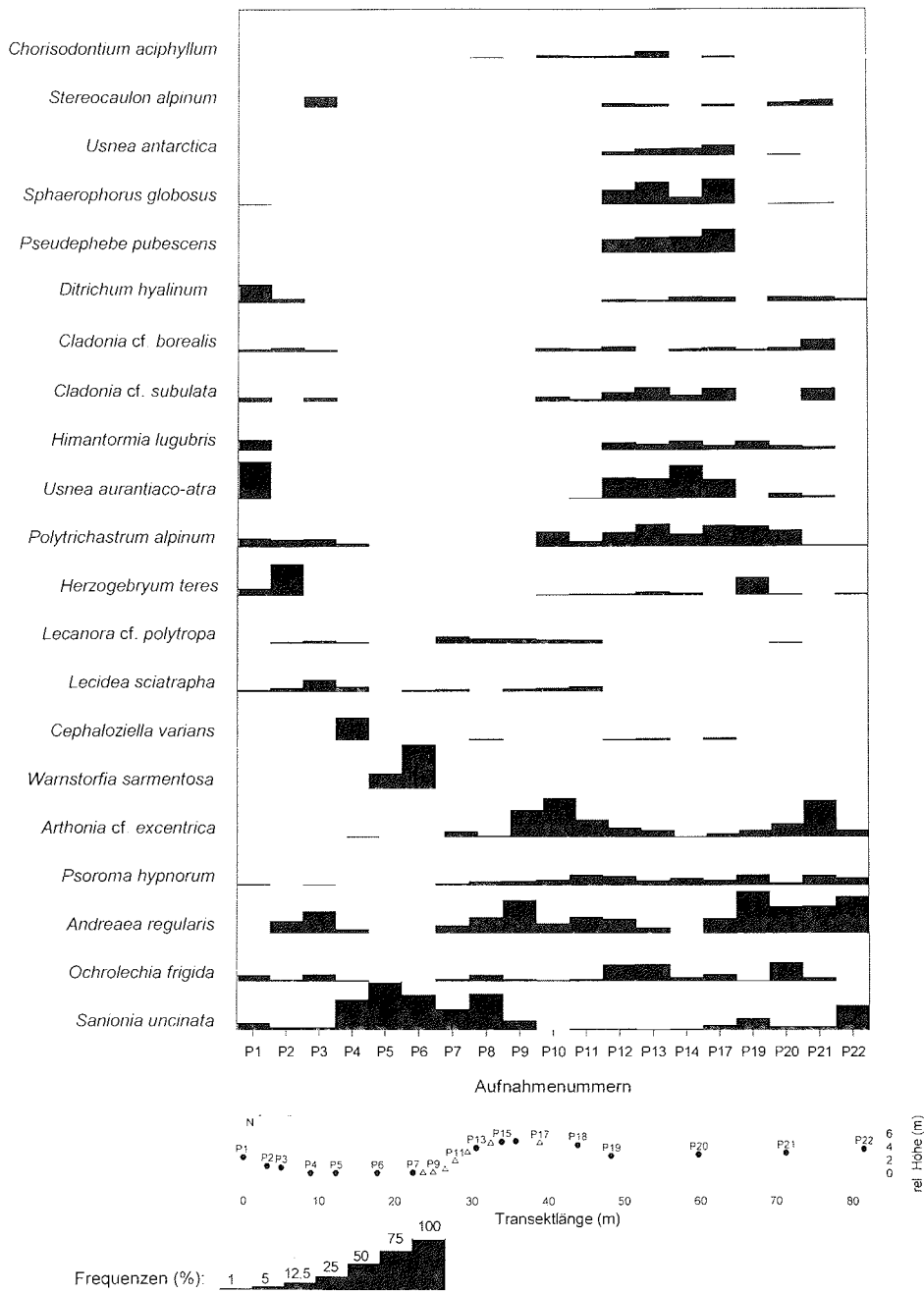


Abb. 6.18: Artenprofil des Transekts 1. Dargestellt sind die relativen Frequenzen und der Wuchsbereich der häufigsten Arten. Die Aufnahmeummern entsprechen weitgehend den Nummern der Schneepegel entlang des Transekts 1 (s. Skizze unter der Grafik), die Höhe der Balken gibt die relativen Frequenzen entsprechend der Skalierung links unten an

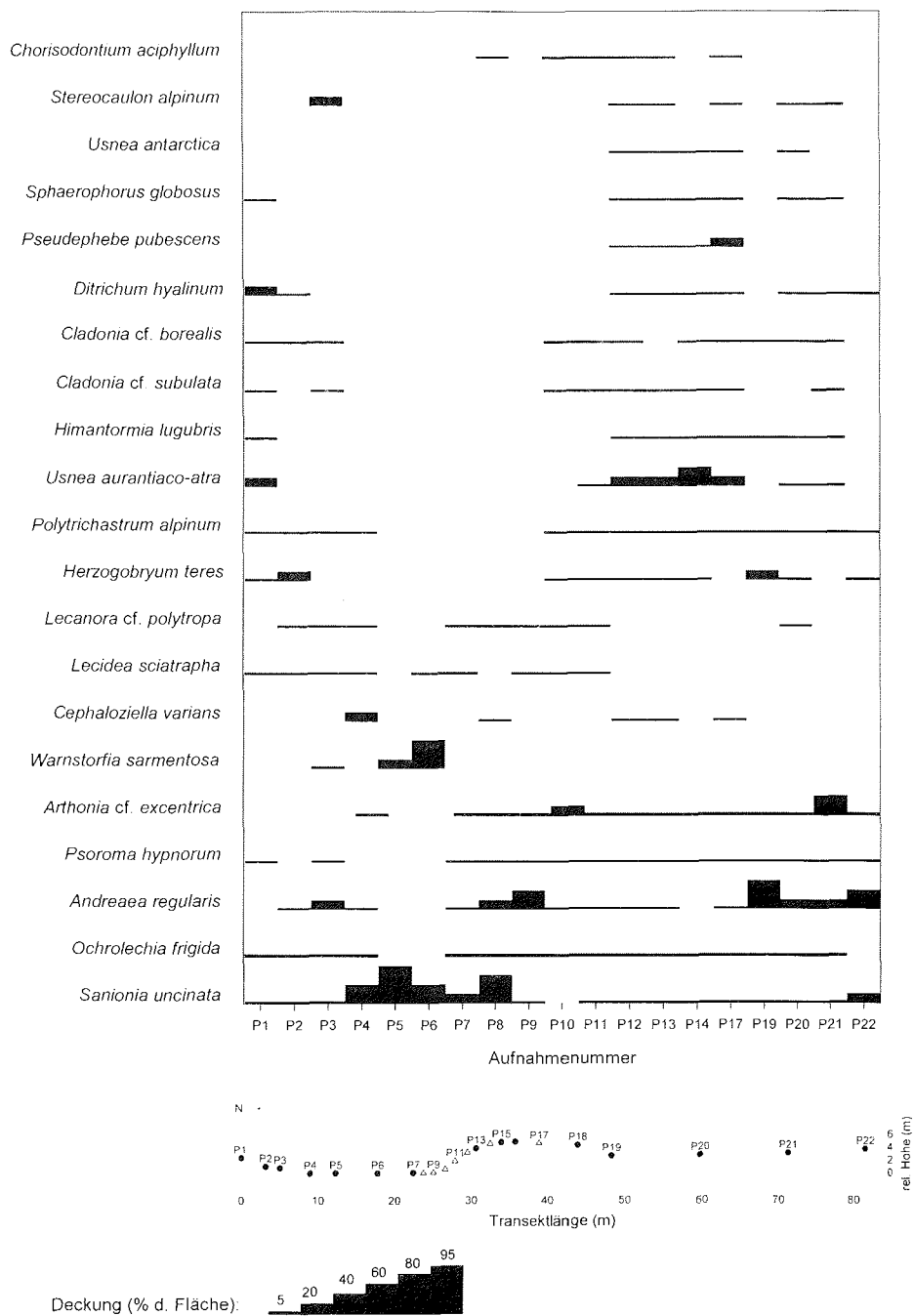


Abb. 6.19: Deckungsgrade der häufigsten Arten entlang des Transekts 1 (vgl. Skizze unter der Abbildung), die Balken geben die Mittelwerte der Deckungsgrade entsprechend der Skala links unten wieder. Anordnung der Aufnahmenummern s. Abb. 6.18

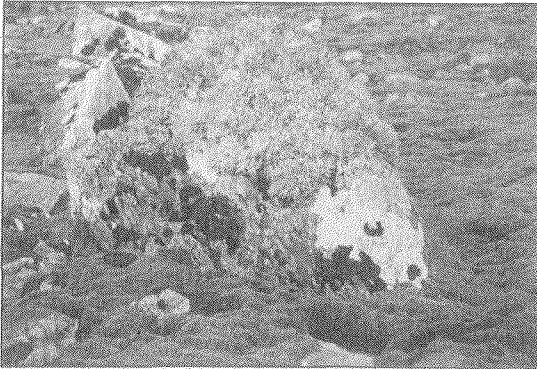
Das Lebermoos *Cephaloziella varians*, das zu geringen Anteilen auch in den höher gelegenen Bereichen des Transekts gefunden wurde, erreichte in einer Aufnahme in der Senke (P4) eine relative Frequenz von ca. 45 % und deckte ca. 20 % dieser Probestfläche. In den Randbereichen der Senke wurden diese Moose durch *Andreaea regularis*, *Polytrichastrum alpinum* und v.a. im nördlichen Teil von dem Lebermoos *Herzogobryum teres* abgelöst. Auf dem Frostschutt des südlichen Randes siedelten die epilithischen Krustenflechten wie *Lecidea sciatrapha* und *Lecanora* cf. *polymorpha*.

Mit zunehmender Standorthöhe traten am nordexponierten Hang zunächst die Becherflechten *Cladonia* cf. *borealis* und *Cladonia* cf. *subulata* und das Laubmoos *Chorisodontium aciphyllum* auf. Ab der Hangmitte (ca. 3 m relative Höhe) (P12a) bis zur exponierten Kuppe (P17) kamen in jeweils annähernd konstanter Frequenz auch Strauchflechten wie *Pseudephebe pubescens*, *Sphaerophorus globosus*, *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica* und *U. aurantiaco-atra* vor. Jedoch erreichte hier nur *U. aurantiaco-atra* Deckungsgrade bis zu 50 %. In dem südlichen, um ein bis zwei Meter tiefer gelegenen Transektbereich (ab ca. 48 m) nahmen die Polster von *Andreaea regularis* den Großteil der Aufnahmeflächen ein. Der parasitisch oder parasymbiontisch auf Flechten (hier vermutlich *Ochrolechia frigida*) vorkommende Pilz *Arthonia* cf. *excentrica* wurde ebenfalls in diesem Profilabschnitt und außerdem im unteren Teil des nordexponierten Hanges mit Frequenzen bis zu 75 % gefunden.

### **Artenzusammensetzung auf den Geröllblöcken im Transekt 1**

Am Hangfuß des Three Brother Hill und von dort bis zur Senkenmitte fanden sich Basaltblöcke, die an ihren Seitenflächen von unten nach oben eine deutlich wechselnde Vegetationszusammensetzung aufwiesen. An den Pegel P5, P6a und P6b wurden daher neben der Bodenflächen auch die vertikale bzw. horizontale Fläche angrenzender Geröllblöcke analysiert (vgl. Kap. 5.3, Abb. 5.7). Bei den Vertikalflächen wurde jeweils die dem Schneepiegel zugewandte Seite des Geröllblocks untersucht, da nur für diese Seiten die Schneehöhe erfasst wurde.

Die südexponierte, d.h. beschattete, vertikale Fläche eines Geröllblocks bei P5 (P5-ver) war in den unteren 20 cm bis auf ein kleines Polster von *Andreaea gainii* ausschließlich von Krustenflechten wie *Lecidea sciatrapha*, *Lecanora* cf. *polytropica* oder *Rhizocarpon* spec. besiedelt. Die Gesamtdeckung betrug in der 0,04 m<sup>2</sup> großen Aufnahmefläche 52 % (vgl. Tabelle IV im Anhang).



**Abb. 6.20:** Ansicht der nord- und westexponierten Flächen des Geröllblocks am Pegel P6a. Kartiert wurden die vertikale Fläche (40 × 20 cm) im Bild rechts

Auf der nordwest-, d.h. der sonnenexponierten Vertikalfläche des Geröllblocks an P6a (Gesamtdeckung 73 %) kam *A. gainii* dagegen in deutlich höheren relativen Frequenzen (34,5 %) vor und bedeckte 21 % der Aufnahme- fläche. Die Deckung von *Lecidea sciatriapha* und *Rhizocarpon geographicum* betrug 41 % bzw. 10 % der Probestfläche. In 19 cm Höhe ragten die ersten Äste von *Usnea*

*aurantiaco-atra*, die den oberen Teil des Geröllblocks dicht besiedelte, in die Probestfläche (Abb. 6.20).

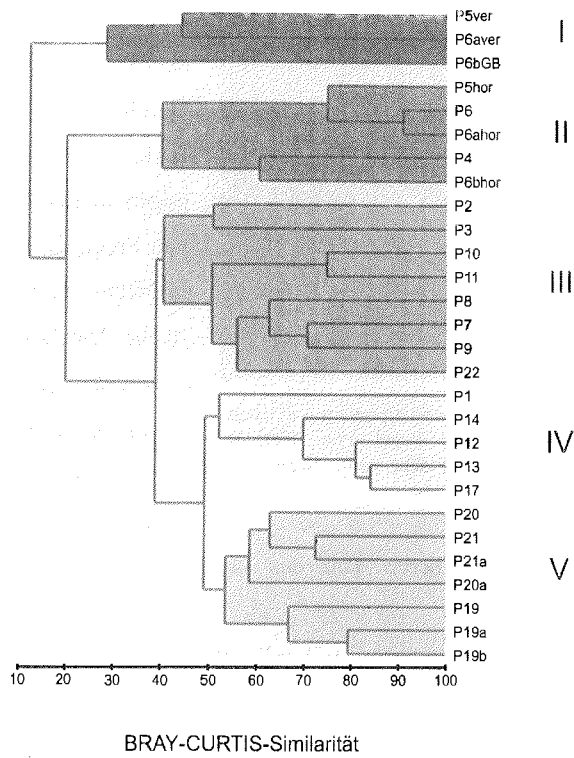
Auf der horizontalen Fläche (Oberseite) des Geröllblocks neben dem Schneepegel P6b ca. 26 m östlich des Haupttransekts wurde die Vegetation im Wesentlichen von *Usnea aurantiaco-atra*, die eine Deckung von 35 % hatte und *Ochrolechia frigida* auf *Andreaea gainii* gebildet. Die epilithischen Krustenflechten traten hier nur in relativen Frequenzen  $\leq 5$  % auf.

### 6.3.3 Vegetationsmuster

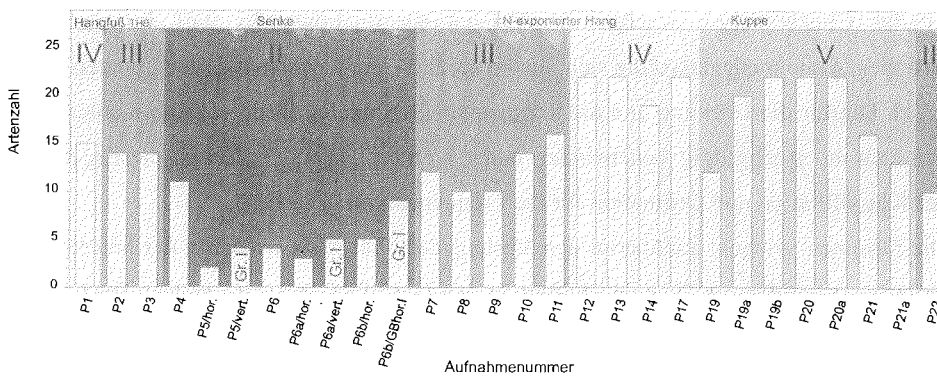
In der Clusteranalyse wurden die Vegetationsaufnahmen zu fünf verschiedenen Gruppen zusammengefasst, die sich unterschiedlich stark voneinander abgrenzten (Abb. 6.21). Die für die Deckung und die Frequenzen errechneten Dendrogramme unterschieden sich nur geringfügig voneinander, daher werden hier exemplarisch die Ergebnisse der Klassifikation und Ordination für die Frequenzen dargestellt.

Die Gruppen spiegeln annähernd den Verlauf des Transekts wider. In der heterogenen Gruppe (I) wurden die Gemeinschaften an den Geröllblöcken zusammengefasst. Dabei zeigte sich, dass sich die Aufnahmeflächen an den vertikalen Seiten hinsichtlich ihrer Vegetationszusammensetzung ähnlicher waren, als zur horizontalen Fläche.

Cluster II wurde von den artenarmen Aufnahmen im Zentrum der Senke gebildet (Abb. 6.22). Diese Flächen, in denen *Sanionia uncinata* und *Warnstorfia sarmentosa* dominierten, lagen im Bereich des Schmelzwasserbachs (vgl. Abb. 5.7).



**Abb. 6.21:** Dendrogramm der relativen Frequenzen der im Transekt I vorkommenden Arten (46 Arten,  $\sqrt{x}$ -Transformation, Bray-Curtis-Similarität, „group-average linkage“). Die Lage der Aufnahmeflächen ist in Abb. 5.7 angegeben



**Abb. 6.22:** Artenzahlen der Aufnahmeflächen und Verteilung der verschiedenen Gruppen der Clusteranalyse entlang des Transekts. Die Grautöne des Hintergrundes geben die Zugehörigkeit zu den Gruppen wieder. Die Geröllblöcke, an denen die Aufnahmen der Gruppe I gemacht wurden, sind durch Gr. I gekennzeichnet



Die Randbereiche der Senke, d.h. die Aufnahme­flächen am Hangfuß des Three Brothers Hill (P2 und P3), sowie die Aufnahmen P7 bis P11 im unteren Teil des nordexponierten Hanges wurden mit der Vegetation am südlichsten Pegel (P22) der heterogenen Gruppe III zugeordnet.

Im Cluster III wechselte die Dominanz zwischen *Sanionia uncinata* und *Andreaea regularis* sowie einigen epilithischen und epibryischen Krustenflechten und dem Pilz *Arthonia cf. excentrica* (18 % Deckung an P10). Diese Übergangszone unterschied sich von den artenreichen Aufnahmen der Gruppen IV und V vor allem darin, dass Strauchflechten wie *Usnea aurantiaco-atra*, *U. antarctica*, *Himantormia lugubris*, *Pseudophebe pubescens* und *Sphaerophorus globosus* fehlten. Zur Gruppe IV gehörten die Aufnahmen von der Hangmitte bis zur Kuppe sowie, weiter abgegrenzt, die am höchsten gelegene Fläche am Hangfuß des Three Brothers Hill (P1). In dieser Gruppe erreichten die Strauchflechten die höchsten Frequenzen und Deckungsgrade im Transekt (Abb. 6.18 und Abb. 6.19). Die Aufnahme­flächen im südlichen Bereich des Transekts auf dem abgesenkten Teil des Plateaus (P19 bis P21) bildeten die fünfte Gruppe. In dieser Gruppe traten die Strauchflechten bis auf *Himantormia lugubris* in der Deckung hinter *Andreaea regularis* zurück, wohingegen *Sanionia uncinata* und *Herzogobryum teres* häufiger zu finden sind.

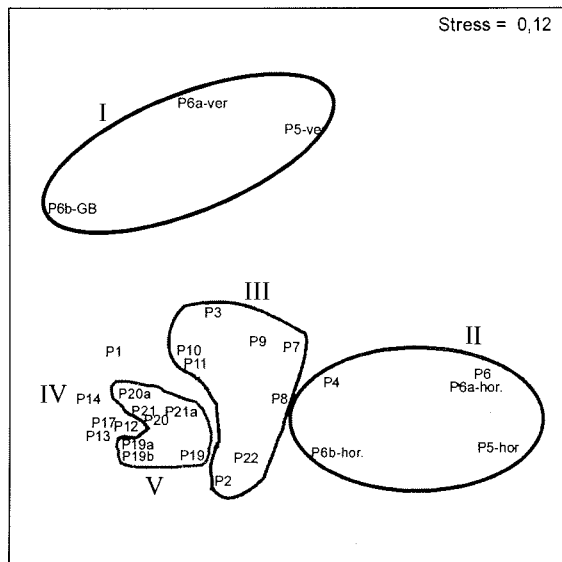
Das Dendrogramm hinsichtlich der Deckung unterschied sich von dem hier dargestellten dadurch, dass die Probefläche am Pegel P8 zur Gruppe II und die Fläche am P22 zur Gruppe V gerechnet wurden.

Die Ordination der Aufnahmen im MDS-Plot verdeutlicht die Beziehung der fünf Gruppen zueinander (Abb. 6.23). Ein Stressfaktor von 0,12 bedeutet eine gute zweidimensionale Abbildung der Ähnlichkeitsmatrix.

Wie im Dendrogramm sind die Aufnahmen an den Geröllblöcken (Cluster I) deutlich von den restlichen Flächen getrennt.

Die Aufnahmen im südlichen Transektabschnitt (Cluster V) liegen eng beieinander. Die Flächen sind aber nur undeutlich von den Probeflächen der Gruppe IV abgegrenzt.

Die Flächen im Randbereich der Senke (Cluster III) und die Aufnahme­flächen im zentralen Bereich der Senke (Cluster II) bilden zwei in sich heterogene, gut voneinander abgetrennte Gruppen.

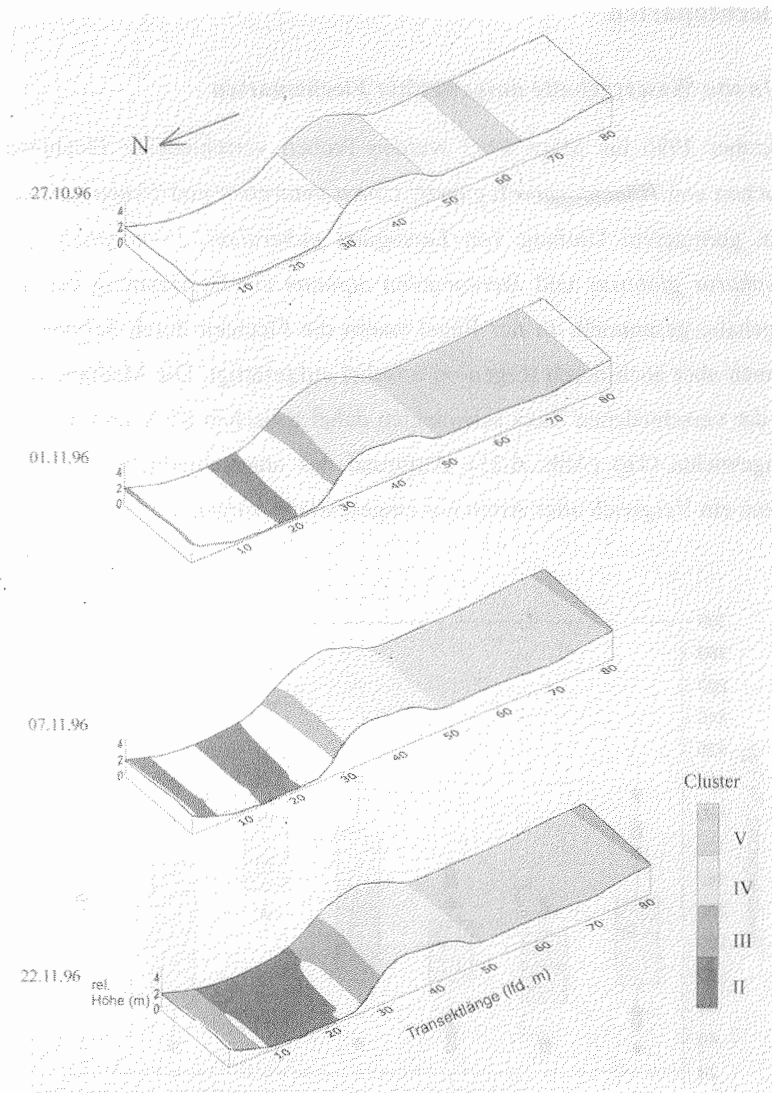


**Abb. 6.23:** MDS-Plot der relativen Frequenzen der im Transekt I vorkommenden Arten. Die Kreise im MDS-Plot markieren die Aufnahmegruppen aus der Clusteranalyse. (46 Arten,  $\sqrt{\quad}$ -Transformation, Bray-Curtis-Similarität, „group-average linkage“)

### 6.3.3.1 Zusammenhang zwischen der Lage der Vegetationsgruppen und der Schneebedeckung

In Abb. 6.24 ist die Lage der in den verschiedenen Clustern zusammengefassten Aufnahmegruppen sowie der Abtauprozess 1996 im Transekt I skizziert.

Es zeigt sich deutlich, dass die Vegetation der im Cluster IV zusammengefassten Aufnahmeflächen schon Ende Oktober aper war. Hier traten Strauchflechten wie *Usnea aurantiaco-atra*, *Himantormia lugubris*, *Pseudephebe pubescens* und *Sphaerophorus globosus*, aber auch Becherflechten oder das Laubmoos *Polytrichastrum alpinum* verstärkt auf (vgl. Abb. 6.18, Abb. 6.19). Auch die Vegetation im Bereich der Aufnahmeflächen des Clusters V, in dem nur *Andreaea regularis*, *Herzogobryum teres* und der lichenicole Pilz *Arthonia* cf. *excentrica* mit Deckungsgraden über 5 % vorkamen (vgl. Abb. 6.19), war ab November schneefrei. Am längsten schneebedeckt war die Vegetation im Bereich der artenärmeren Aufnahmeflächen, die in den Cluster II und III zusammengefasst wurden. Dort wurden noch am 22. November 1996 in einigen Bereichen Schneeflecken beobachtet.

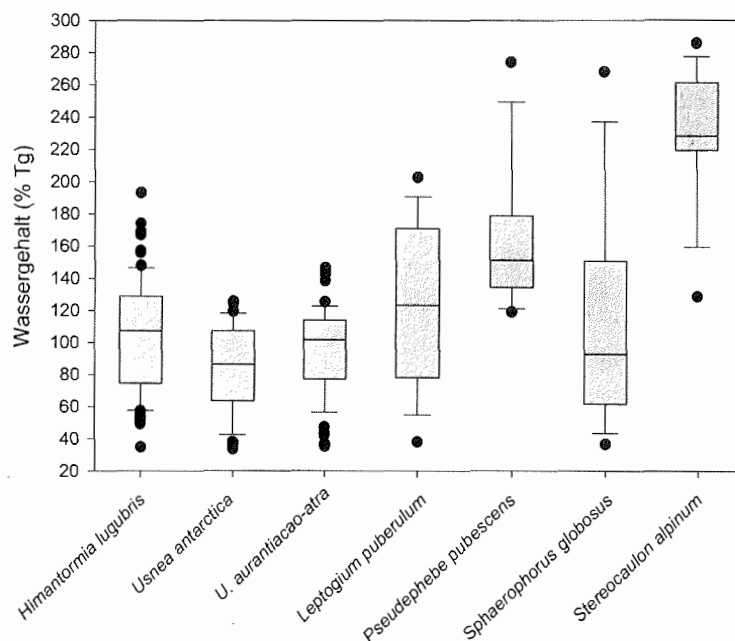


**Abb. 6.24:** Lage der verschiedenen Gruppen im Transekt und zeitlicher Verlauf des Abtauprozesses 1996. Die weißen Bereiche stellen die Ausdehnung der Schneedecke an den vier Terminen dar. Die Transektsskizzen geben einen ca. 2 m breiten Streifen wieder und sind im Verhältnis zur Transektlänge überhöht dargestellt

## 6.4 Rolle des Schnees für die Wassergehalte ausgewählter Flechtenarten

### 6.4.1 *In situ* Wassergehalte ausgewählter Flechtenarten

Von Oktober 1996 bis März 1997 wurden Proben verschiedener Flechtenarten, im wesentlichen von *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica* und *Usnea aurantiaco-atra* sowie in geringerem Umfang von *Leptogium puberulum*, *Pseudephebe pubescens*, *Sphaerophorus globosus* und *Stereocaulon alpinum* zur Bestimmung der natürlichen Wassergehalte gesammelt. In der Regel waren die Flechten durch Schnee, in einigen Ausnahmen aber auch durch Regen oder Nebel aufgesättigt. Die Mediane der Wassergehalte der verschiedenen Taxa schwankten dabei zwischen 85 % und über 200 % des Trockengewichts (Tg) (Abb. 6.25). Aufgrund des unterschiedlichen Stichprobenumfangs kann ein Vergleich aller Arten nur eingeschränkt vorgenommen werden.



**Abb. 6.25:** *In situ* Wassergehalte (% Tg) von *Himantormia lugubris* (Stichprobenumfang n=78), *Usnea antarctica* (n=43), *Usnea aurantiaco-atra* (n=65), *Leptogium puberulum* (n=10), *Pseudephebe pubescens* (n=8), *Sphaerophorus globosus* (n=10) und *Stereocaulon alpinum* (n=11). Angegeben sind die Bereiche, in denen 25 % – 75 % (Box) bzw. 10 % – 90 % der Werte lagen (Balken) sowie der Median der Stichprobe (Linie) und jeder Wert unter- bzw. oberhalb des 10 % - 90% Bereichs (•)

Die dicht mit Phyllocladien besetzten Thalli von *S. alpinum* hatten mit Werten zwischen 128 % und 285 % Tg die höchsten Wassergehalte. Die niedrigsten Wassergehalte wurden bei den Proben von *U. antarctica* festgestellt. Der Median dieser Proben war um ca. 10 % Tg geringer als der von *U. aurantiaco-atra* und um 20 % Tg geringer als der von *H. lugubris*.

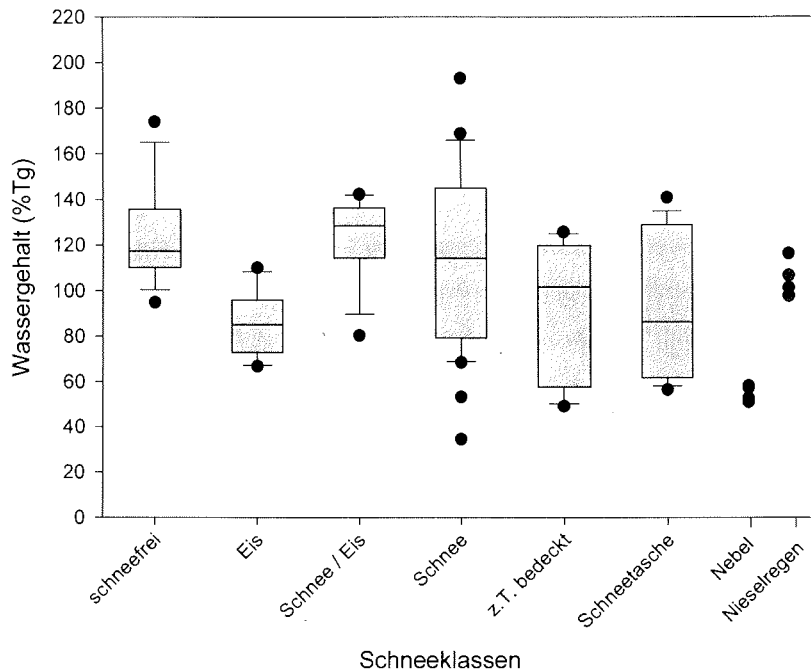
Da die Schneeverhältnisse zu den Sammelzeitpunkten uneinheitlich waren, wurden für *H. lugubris*, *U. antarctica* und *U. aurantiaco-atra* die Wassergehalte in Bezug zu den „Schneeklassen“ (vgl. Tabelle 5.2) am Standort genauer betrachtet.

### *Himantormia lugubris*

*H. lugubris* wies, sofern der Thallus vollständig schneebedeckt war, Wassergehalte zwischen 34 % und 193 % Tg auf (Abb. 6.26). Der Median lag bei ca. 115 % Tg. In dieser Größenordnung lagen auch die Wassergehalte der Proben, die unter stark vereistem Schnee („Schnee/Eis“, Abb. 6.26) ausgegraben wurden. Durch Schmelzen und erneutes Gefrieren vereiste der Schnee oder es bildeten sich teilweise Eislinsen. Das Schmelzwasser war aber für die Flechten verfügbar, die sich bis zu 140 % Tg auf sättigten.

Nach Schneefällen blieben die Thalli zwar oft schneefrei, wurden durch den Neuschnee aber meist auf 100 % bis 140 % Tg aufgesättigt. Die geringsten Wassergehalte hatten die Thalli, die sich unter einer wenige Millimeter dünnen Eisschicht befanden. Die Hälfte dieser Proben hatte sich zu 70 % bis 90 % Tg aufgesättigt.

Wurden die Proben aus Schneetaschen (vgl. Tabelle 5.2) entnommen, schwankten die Wassergehalte zwischen 56 % und 140 % Tg. Die höheren Werte (90 % bis 140 % Tg) wurden an Tagen gemessen, an denen die Lufttemperatur über dem Gefrierpunkt lag. Doch auch bei annähernd gleichen Temperaturbedingungen während der Probenahme waren die Wassergehalte sehr unterschiedlich, so dass sie nicht mit den herrschenden Umgebungstemperaturen in Beziehung gesetzt werden können. Es zeigte sich, dass sich die Thalli von *H. lugubris* durch Schnee meist deutlich stärker auf sättigen konnten als Thalli, die bei Nebel, d.h. bei 100 % Luftfeuchte, gesammelt wurden. Die Wassergehalte der schneebedeckten Thalli lagen etwa in der Größenordnung der Wassergehalte, die die Proben nach einer Stunde Nieselregen aufwiesen.



**Abb. 6.26:** *In situ* Wassergehalte (% Tg) von *Himantormia lugubris* in Bezug zu den Schneeverhältnissen zum Sammelzeitpunkt (vgl. Tabelle 5.2). Zum Vergleich sind die Wassergehalte bei Nebel und nach einer Stunde Nieselregen angegeben (aufgrund des kleinen Probenumfangs als Symbole dargestellt). Erläuterung des Box-Plots s. Abb. 6.25

### *Usnea antarctica*

Thalli von *Usnea antarctica* wiesen die geringsten Wassergehalte (30 % – 60 %) auf, wenn sie nur teilweise schneebedeckt waren (Abb. 6.27). In ähnlichen Größenordnungen lagen die Wassergehalte der durch Nebel befeuchteten Thalli. Anders als bei *H. lugubris* sättigten sich die Thalli von *U. antarctica* durch lang andauernde Schneebedeckung stärker auf als durch Schneefälle, nach denen der Schnee nicht liegen blieb („schneefrei“, Abb. 6.27). Der Median der Wassergehalte von Proben unter vereistem Schnee lag auch bei dieser Art ca. 10 % Tg höher als der von Proben unter Schnee.

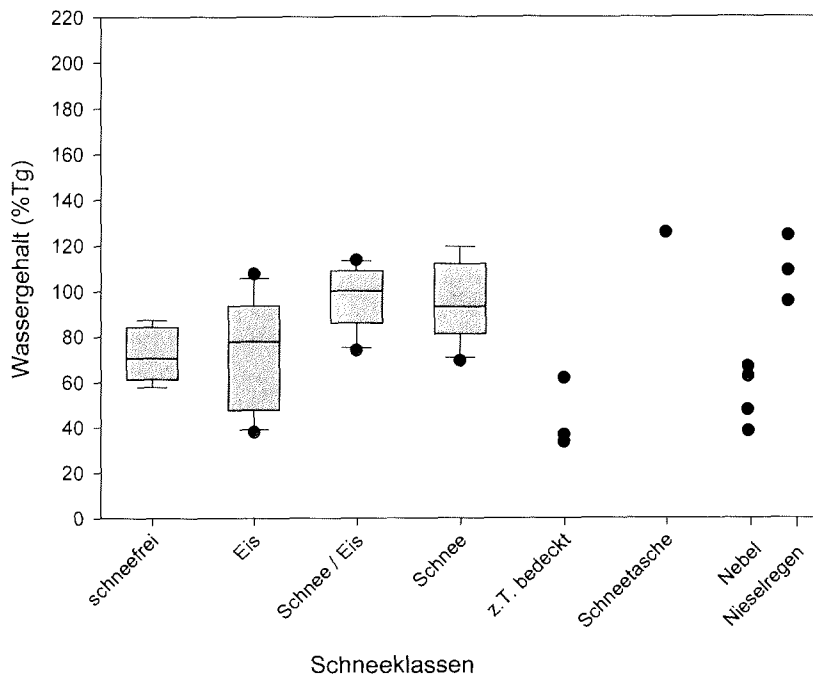
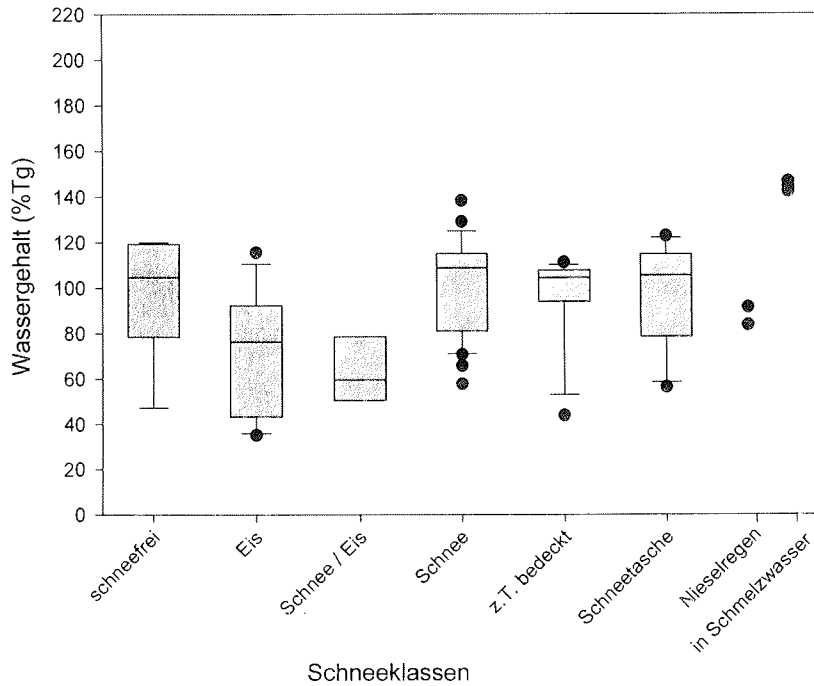


Abb. 6.27: *In situ* Wassergehalte (% Tg) von *Usnea antarctica* in Bezug zu den Schneebedingungen zum Sammelzeitpunkt (vgl. Tabelle 5.2). Zum Vergleich sind die Wassergehalte bei Nebel und nach einer Stunde Nieselregen angegeben. Diese Werte sowie die Wassergehalte der teilweise schneebedeckten bzw. einer Schneetasche entnommenen Proben werden aufgrund des geringen Stichprobenumfangs als Symbole dargestellt. Erläuterung des Box-Plots s. Abb. 6.25

### *Usnea aurantiaco-atra*

Die völlig schneebedeckten Thalli von *U. aurantiaco-atra* hatten meist ähnliche Wassergehalte (Median ca. 110 % Tg) wie die nicht oder nur teilweise schneebedeckten Thalli oder wie die Thalli in den Schneetaschen ohne Kontakt zum Schnee (Abb. 6.28). Der Wassergehalt dieser Proben schwankte zwischen 50 % und 125 % Tg. Im Gegensatz zu den anderen beiden untersuchten Arten lagen die ermittelten Wassergehalte unter vereistem Schnee deutlich unter denen der anderen „Schneeklassen“ und auch unter denen der Proben unter Eis (Median ca. 75 % Tg). Unter vereistem Schnee oder Eis sättigten sich die Thalli von *U. aurantiaco-atra* etwas weniger auf als nach einer Stunde Nieselregen, während die Wassergehalte der Proben in den restlichen „Schneeklassen“ darüber lagen. Jedoch erreichten diese nicht die maximalen Wassergehalte von ca. 144 % Tg, die die Proben hatten, wenn sie in Schmelzwasser untergetaucht waren.



**Abb. 6.28:** *In situ* Wassergehalte (% Tg) von *Usnea aurantiaco-atra* in Bezug zu den Schneeverhältnissen zum Sammelzeitpunkt (vgl. Tabelle 5.2). Zum Vergleich sind die Wassergehalte nach einer Stunde Nieselregen und von in Schmelzwasser untergetauchten Proben angegeben. Diese Werte werden als Symbole dargestellt. Erläuterung des Box-Plots s. Abb. 6.25

Die drei untersuchten Arten nutzten die verschiedenen „Schneeklassen“ in ähnlichem Ausmaß als Wasserquelle. Alle untersuchten Proben sättigten sich unter Eis weniger stark auf als unter Schnee. Während bei *H. lugubris* und *U. aurantiaco-atra* die Aufsättigung der unterschiedlich stark schneebedeckten Thalli ungefähr so hoch war wie die Wassergehalte nach einer Stunde Nieselregen, lagen die Werte bei *U. antarctica* darunter.

Es lässt sich somit weder für *Himantormia lugubris* noch für *Usnea antarctica* oder *Usnea aurantiaco-atra* eine eindeutige Abhängigkeit der Thalluswassergehalte von der Art der Schneebedeckung erkennen.



#### 6.4.2 Verlauf der Aufsättigung unter Schnee

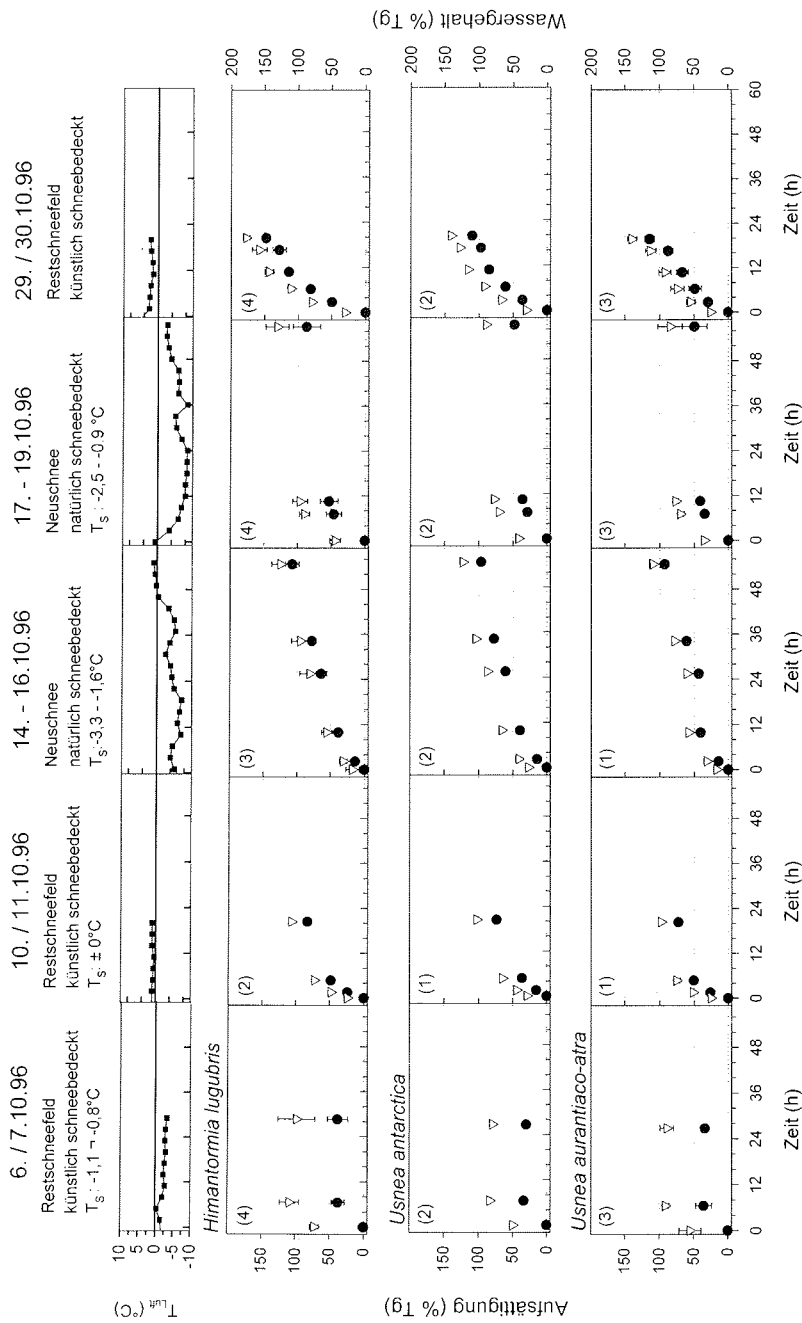
Die Wasseraufnahme aus Schnee wurde an Proben der Strauchflechten *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica* und *Usnea aurantiaco-atra* gravimetrisch bestimmt. Dazu wurde die Gewichtszunahme einzelner Thalli der drei Arten an verschiedenen Tagen bei unterschiedlichen Schnee- und natürlichen Temperatur- und Lichtbedingungen protokolliert. Lufttrockene Thalli wurden mit vorhandenem Schnee bedeckt („künstlich schneebedeckt“) oder bei Schneefall ausgelegt („natürlich schneebedeckt“).

Die Thalli der drei Arten zeigten hinsichtlich der Aufsättigungsgeschwindigkeit sehr ähnliche Reaktionen (Abb. 6.29, Abb. 6.30). Unterschiede zwischen den Taxa wurden lediglich in der Höhe der Aufsättigung deutlich. Dabei erreichte *H. lugubris* in der Regel höhere Wassergehalte als die beiden *Usnea*-Arten, die sich nur wenig unterschieden.

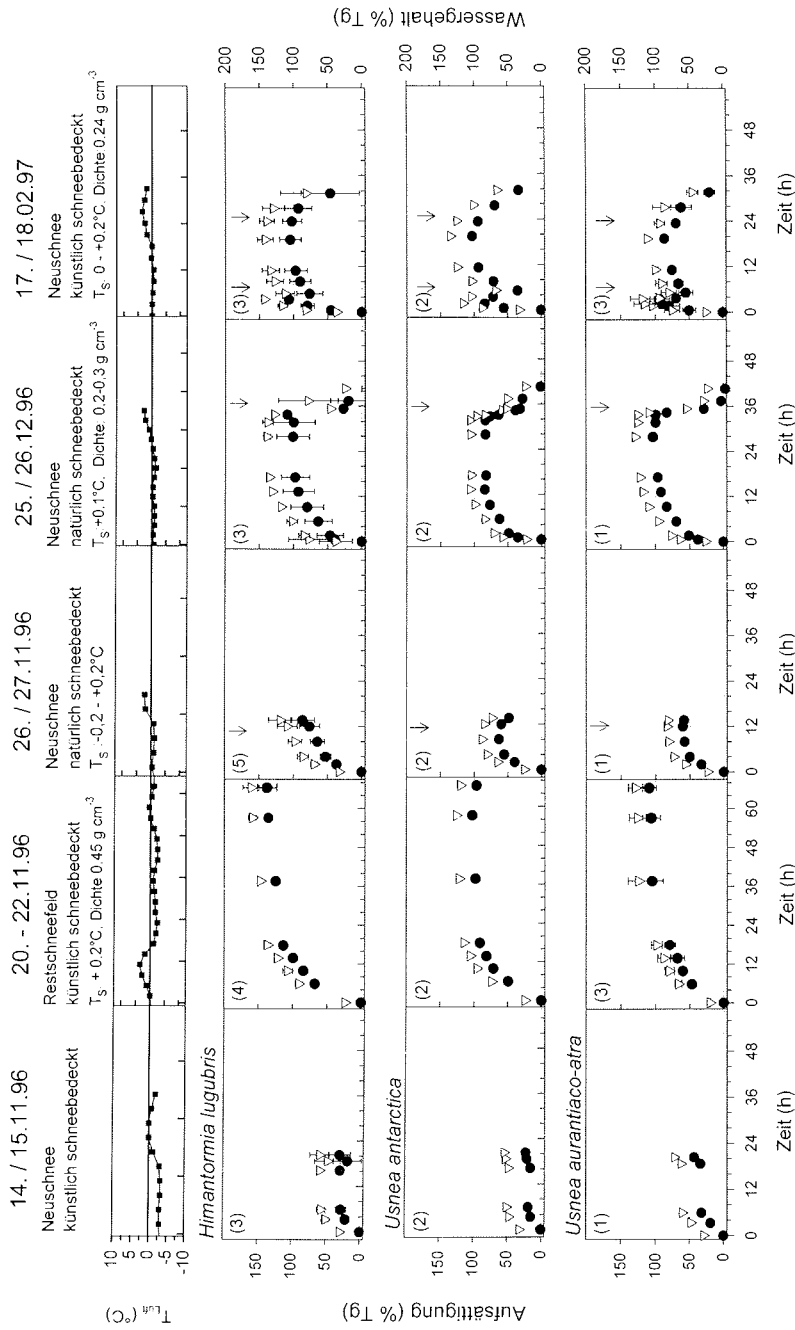
Da die Aufsättigungsrate vom Ausgangswassergehalt abhängig ist, wurden die Proben vor Versuchsbeginn über mehrere Tage in einem unbeheizten Labor-Iglu luftgetrocknet. Mit Ausnahme des Versuchs am 6./7.10.1996 hatten alle Proben zu Versuchsbeginn Wassergehalte unter 50 % Tg. Da am ersten Versuchstag die Anfangswassergehalte darüber lagen, betrug die Aufsättigung innerhalb von 28 h weniger als 50 % Tg. Jedoch stieg der Wassergehalt bei Temperaturen unter 0 °C auf 80 % bis 110 % Tg. In vergleichbarer Größenordnung (80 % – 130 % Tg) lagen die Wassergehalte der Thalli bei allen Versuchen, die bei Luft- und Schneetemperaturen deutlich unterhalb des Gefrierpunkts durchgeführt wurden. Dies zeigen sowohl die Versuche, bei denen die Flechten mit vorhandenem Schnee bedeckt wurden (6./7.10. und 14./15.11.1996), als auch die Versuche, bei denen die Thalli bei einsetzendem Schneefall exponiert und durch den Neuschnee aufgesättigt wurden (14. – 19.10.1996). Die Schneefälle waren so stark, dass die Thalli innerhalb kurzer Zeit völlig schneebedeckt waren.

Höhere Wassergehalte (bis zu  $\geq 150$  % Tg) wurden erreicht, wenn der Schnee zu tauen begann und einen hohen Flüssigwasseranteil hatte, wie am 30.10.96 (Abb. 6.29), 20. bis 22.11.96, 26.12.96 und 18.02.97 (Abb. 6.30).

Vom 20. – 22.11.96 konnte bei den mit älterem Schnee (Dichte ca.  $0,45 \text{ g cm}^{-3}$ ) bedeckten Flechten eine Sättigung der Wassergehalte erst nach 36 Stunden beobachtet werden. Unter Neuschnee (Dichte  $0,2 - 0,3 \text{ g cm}^{-3}$ ) nahmen bei vergleichbaren Temperaturbedingungen dagegen bereits nach 12 Stunden die Wassergehalte kaum noch zu (25./26.12.1996 und 17./18.02.1997).



**Abb. 6.29:** Aufsättigung lufttrockener Thalli von *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica* und *Usnea aurantiaco-atra* unter Schnee bei natürlichen Temperaturbedingungen ( $\blacksquare$ ,  $T_{Luft}$  (°C)). Dargestellt sind die Aufsättigung ( $\bullet$ , % Tg) sowie die relativen Wassergehalte ( $\nabla$ , % Tg). Die Zahlen in Klammern geben die parallel gemessenen Thalli an (bei  $\geq 2$  Thalli wurde nur der Mittelwert, bei  $\geq 3$  Thalli auch die Standardabweichung dargestellt). Die Art der Schneebedeckung und die Schneetemperatur sind angegeben

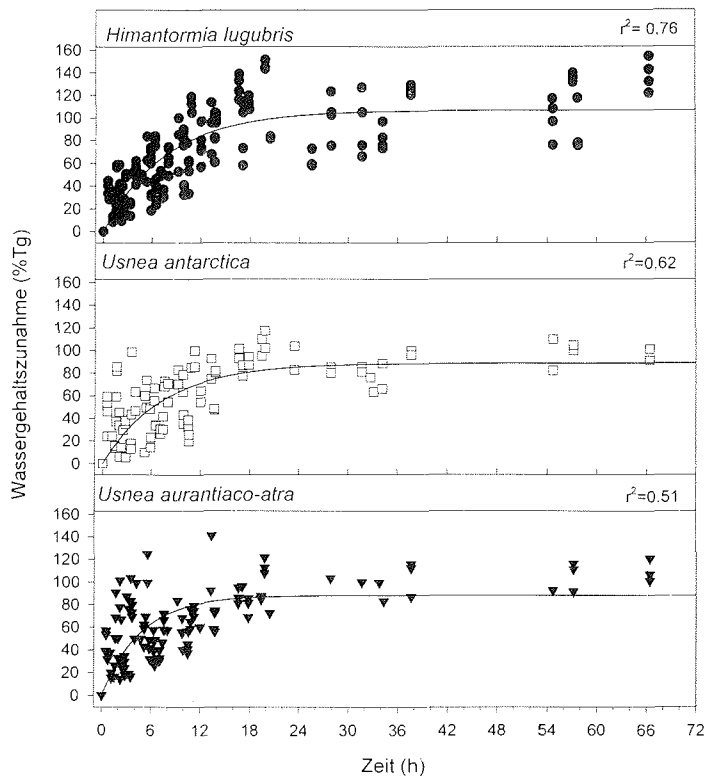


**Abb. 6.30:** Aufsättigung lufttrockener Thalli von *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica* und *Usnea aurantiaco-atra* unter Schnee bei natürlichen Temperaturbedingungen (■, T<sub>luft</sub> (°C)). Dargestellt sind die Aufsättigung (●, % Tg) und relativen Wassergehalte (▽, % Tg). Die Zahlen in Klammern geben die parallel gemessenen Thalli an (bei ≥ 2 Thalli wurde nur der Mittelwert und bei ≥ 3 Thalli auch die Standardabweichung dargestellt). Die Art der Schneebedeckung und die Schneetemperatur sind angegeben, Pfeile (↓) zeigen an, dass die Thalli schneefrei waren

Sobald die Flechten freigehtaut waren, trockneten sie innerhalbweniger Stunden bis zum Anfangswassergehalt aus (vgl. 26.12.1996, Abb. 6.30).

Für die zusammenfassende Betrachtung des Verlaufs der Wasseraufnahme aus dem Schnee wurden Daten aus allen Versuchen verwendet.(Abb. 6.31). Zur Darstellung des Aufsättigungsverlaufes wurde eine Exponentialfunktion an die Daten der drei Arten angepasst ( $Wg_A = a \times (1 - b^{t_s})$  mit  $Wg_A$ : Wassergehaltszunahme (%Tg);  $t_s$ : Dauer der Schneebedeckung; a, b: Regressionsparameter).

Der Verlauf der Wassergehaltszunahme lässt sich mathematisch als Sättigungskurve beschreiben. Die relativ große Streuung der Daten um die berechnete Kurve wurde durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen während der einzelnen Versuche be-



**Abb. 6.31:** Wasseraufnahme aus Schnee als Funktion der Dauer der Schneebedeckung (h). Neben den einzelnen Messpunkten für *Himantormia lugubris* (●), *Usnea antarctica* (□) und *Usnea aurantiaco-atra* (▼) ist auch die jeweilige mathematische Beschreibung der Wassergehaltszunahme (% Tg) als durchgezogene Linie dargestellt. Die Sättigungskurven wurden durch eine nicht lineare Kurvenanpassung ermittelt. Erläuterungen siehe Text

dingt. Es zeigt sich, dass die Thalli nach einer Schneebedeckung von 18 Stunden kaum noch weiteres Wasser aus dem Schnee aufnehmen konnten. Die stärkste Wassergehaltszunahme erfolgte bei *H. lugubris* und *U. antarctica* während der ersten acht Stunden, bei *U. aurantiaco-atra* in den ersten sechs Stunden nach einsetzender Befeuchtung durch den Schnee.

Zum Vergleich wurde die Aufsättigung der Thalli nach ca. 2 Stunden in +0,5 bis +1,0 °C kaltem Wasser gravimetrisch ermittelt.

Die Wassergehalte der luftgetrockneten Proben entsprachen ungefähr den Ausgangswerten in den Versuchen zur Aufsättigung durch Schnee. Es zeigten sich wiederum Unterschiede bei den erreichten Wassergehalten (*H. lugubris* > *U. aurantiaco-atra* > *U. antarctica*) (Tabelle 6.5). Die Wassergehalte nahmen um 121 % bis 157 % des Trockengewichts zu. Die maximale Wasseraufnahme aus dem Schnee lag bei den Thalli der drei Arten etwa 20 % niedriger. Nach zwei Stunden Schneebedeckung waren die Wassergehalte der Thalli auch bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt um 60 % bis 100 % geringer als die Wassergehalte der Proben, die 2 Stunden in Wasser belassen wurden (vgl. Abb. 6.29 bis Abb. 6.31).

**Tabelle 6.5:** Aufsättigung luftgetrockneter Thalli von *Himantormia lugubris* (n=12), *Usnea antarctica* (n=6) und *Usnea aurantiaco-atra* (n=6) nach zwei Stunden in +0,5 bis +1,0 °C kaltem Wasser. Es sind die Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben

ART (Anzahl der Thalli)	Wassergehalt der luftgetrockneten Thalli (% Tg)	Wassergehalt der aufgesättigten Thalli (% Tg)
<i>Himantormia lugubris</i> (n=12)	21,30 ± 1,34	178,65 ± 31,11
<i>Usnea antarctica</i> (n= 6)	20,62 ± 2,03	141,60 ± 19,72
<i>Usnea aurantiaco-atra</i> (n= 6)	19,80 ± 2,02	155,53 ± 21,70

## 6.5 Der CO<sub>2</sub>-Gaswechsel ausgewählter Flechtenarten

### 6.5.1 Verlauf des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels während der Aufsättigung durch Schnee

Es sollte untersucht werden, wie stark sich Flechtenthalli unter Schnee bzw. bei Schneefall und natürlichen Temperatur- und Lichtbedingungen aufsättigen können und wie sich Photosynthese- und Respirationsraten während der Wassergehaltszunahme verändern. Dazu wurden im Frühsommer 1995 mit Hilfe des CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Porometers Versuche zum CO<sub>2</sub>-Gaswechsel von Thalli der Strauchflechten *Himantormia lugubris* und *Usnea antarctica*, der Krustenflechte *Lecidea sciatrapha* und der Cyanolichene *Leptogium puberulum* durchgeführt (vgl. Kap. 5.5.2.1).

Die Verläufe der Aufsättigungskurven vom 18./19. November und vom 7.–9. Dezember 1995 zeigten, dass lufttrockene Thalli von *Himantormia lugubris* sich nach

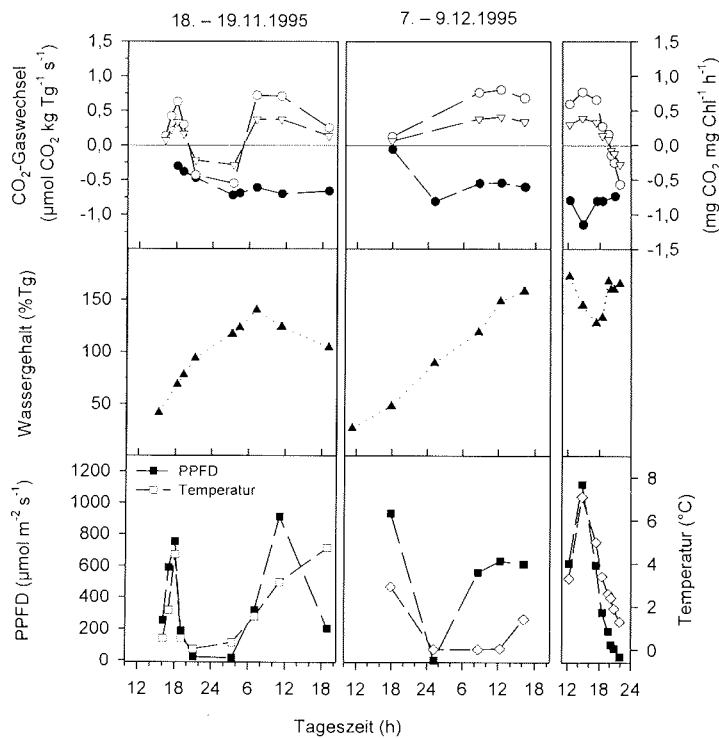


Abb. 6.32: *Himantormia lugubris*: Verlauf des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels während der Aufsättigung unter Schnee (Gaswechsel unter natürlichen Lichtbedingungen (○) und bei abgedunkelter Küvette (●) bezogen auf das Trockengewicht sowie unter natürlichen Lichtbedingungen bezogen auf den Gesamtchlorophyllgehalt (▽)), Thalluswassergehalt (▲, % Tg), sowie Photonenflussdichte (■) und Thallus- ( ) bzw. Küvettentemperatur (◇) an verschiedenen Tagen im Frühsommer 1995

etwa sechs Stunden unter Schnee auf ca. 100 % Tg aufgesättigt hatten und nach 14 Stunden nur noch eine geringe Zunahme des Wassergehaltes beobachtet werden konnte (Abb. 6.32).

Bei diesen Wassergehalten und bei Temperaturen zwischen 0 °C und +7,1 °C betrug die Dunkelatmung zwischen  $-0,6$  und  $-1,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ kg Tg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Zu Beginn der Messungen waren bei einem Wassergehalt von ca. 50 % Tg schon positive Nettophotosyntheseraten messbar, wurden aber mit zunehmendem Wassergehalt rasch gesteigert, solange die Einstrahlung höher als  $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD war. Ab einem Wassergehalt von ca. 100 % Tg und Lichtstärken über  $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD hatte eine Zunahme der Photonenflussdichte keinen weiteren Einfluss auf die Nettophotosynthese, die maximale Raten von  $0,7$  bis  $0,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ kg Tg}^{-1} \text{ s}^{-1}$  bzw.  $0,3$  bis  $0,4 \text{ mg CO}_2 \text{ mg Chl}^{-1} \text{ h}^{-1}$  erreichte.

Sank die Lichtstärke unter  $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD zeigte der zu 160 % Tg aufgesättigte Thallus von *H. lugubris* ein Absinken der Nettophotosynthese, bis bei Lichtstärken um  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD die Atmung nicht mehr kompensiert werden konnte.

*Usnea antarctica* sättigte sich nach sechs bis acht Stunden unter Schnee auf 100 - 120 % Tg auf. Bei Neuschnee am 22.11.1995 erreichte *U. antarctica* schon innerhalb 75 Minuten einen Wassergehalt von ca. 58 %. Bei diesem Wassergehalt und über  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD wurden annähernd  $0,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ kg Tg}^{-1} \text{ s}^{-1}$  gemessen. Die maximalen Photosyntheseraten betragen  $0,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ kg Tg}^{-1} \text{ s}^{-1}$  und wurden bei Lichtstärken zwischen 112 und  $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  PPFD erreicht (Abb. 6.33). Die Dunkelatmung lag bei diesen Wassergehalten zwischen  $-0,4$  und  $-1,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ kg TG}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Im Gegensatz zu *H. lugubris* zeigte *U. antarctica* am 9.12.1995 bei vergleichbarer Lichtintensität keinen Abfall der Nettophotosynthese in den negativen Bereich.

Während der Versuche am 19.11.1995 trocknete *U. antarctica* bei Umgebungstemperaturen von  $+1,7$  °C und  $+5,8$  °C stärker aus als *H. lugubris*. Die Wasseraufnahme aus dem Schnee zwischen den Messungen reichte nicht aus, um den Wasserverlust zu kompensieren. Die Nettophotosyntheseraten nahmen an diesem Tag bei den beiden Strauchflechten etwa im gleichen Umfang ab. Parallel zu dem Absinken der Photosyntheseraten wurde jedoch nicht nur eine Abnahme des Thalluswassergehalts, sondern auch ein Anstieg der Thallustemperatur um ca. 4,5 K zwischen der ersten und der letzten Messung beobachtet.

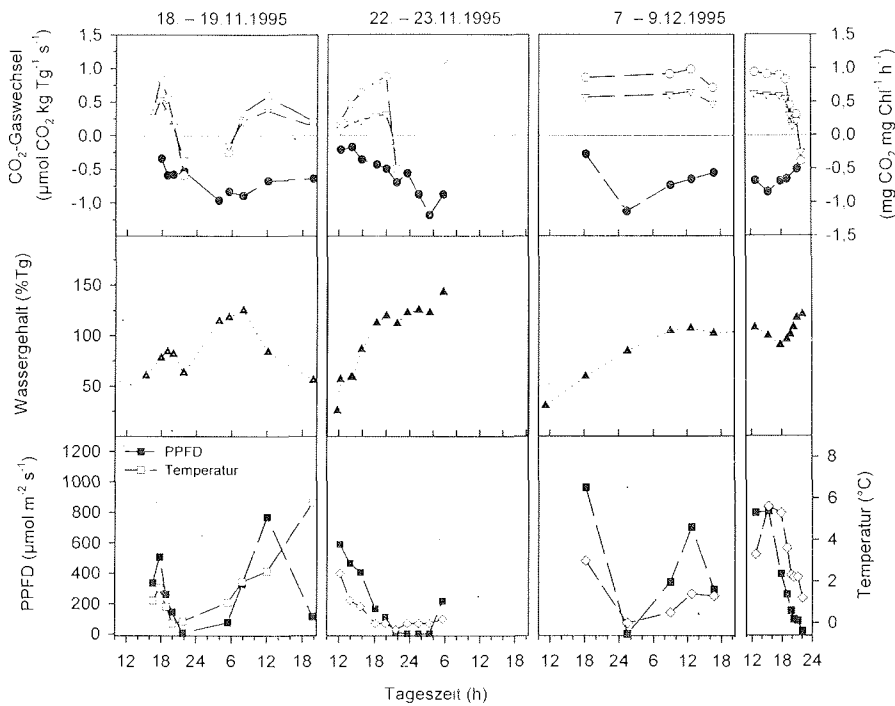


Abb. 6.33: *Usnea antarctica*: Verlauf des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels während der Aufsättigung unter Schnee (Gaswechsel unter natürlichen Lichtbedingungen (○) und bei abgedunkelter Küvette (●) bezogen auf das Trockengewicht sowie unter natürlichen Lichtbedingungen bezogen auf den Gesamtchlorophyllgehalt (▽), Thalluswassergehalt (▲, % Tg), sowie Photonendichte (■) und Thallus- ( ) bzw. Küvettemperatur (◇) an verschiedenen Tagen im Frühsommer 1995

Die epilithische *Lecidea sciatriapha* wurde mit ihrer Substratunterlage gemessen. Die Wasseraufnahme wird in mm Niederschlagsäquivalent dargestellt (vgl. Kap. 5.5.2.1). Während des Versuches am 22. November 1995 reichten 40 Minuten Schneebedeckung aus, um den Gaswechsel der Krustenflechte zu aktivieren, so dass bei Temperaturen zwischen +1,3 °C und +3 °C Photosyntheseraten von ca. 0,1 µmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> bzw. 0,17 - 0,27 mg CO<sub>2</sub> mg Chl<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> gemessen wurden (Abb. 6.34). Nach weiterer Wasseraufnahme aus dem Schnee (0,06 bis 0,09 mm) überwog jedoch die Dunkelatmung mit Raten zwischen -0,2 und -0,4 µmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Die Nettophotosynthese nahm – entsprechend den Lichtbedingungen – während der folgenden Messungen kontinuierlich ab, bis bei 160 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> PPFD die Atmung nicht mehr kompensiert werden konnte.



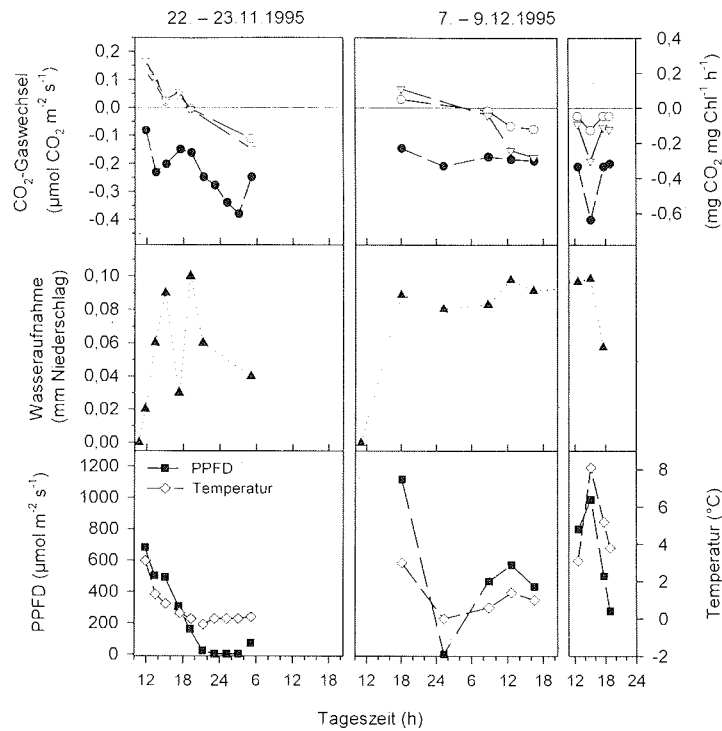


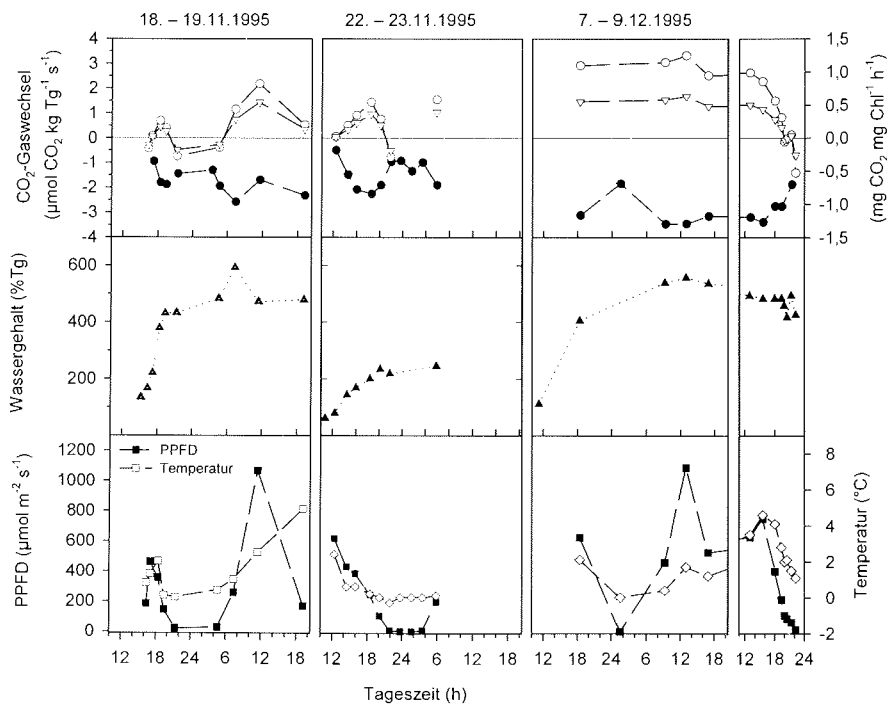
Abb. 6.34: *Lecidea sciatrappa*: Verlauf des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels während der Aufsättigung unter Schnee (Gaswechsel unter natürlichen Lichtbedingungen (○) und bei abgedunkelter Kuvette (●) bezogen auf die Oberfläche sowie unter natürlichen Lichtbedingungen bezogen auf den Gesamtchlorophyllgehalt (▽)), Wasseraufnahme (▲, mm Niederschlagsäquivalent), sowie Photonenflussdichte (■) und Kuvettentemperatur (◇) an verschiedenen Tagen im Frühsommer 1995

Während des Versuches vom 7. bis zum 9. Dezember 1995 erreichte *L. sciatrappa* nach einer Wasseraufnahme von 0,09 mm bei Temperaturen um +3 °C nur bei Lichtstärken über 1000 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> PPFD eine positive Photosyntheserate. Am 9. Dezember 1995 wirkte sich eine Temperaturerhöhung um 5 K deutlich negativ auf den CO<sub>2</sub>-Gaswechsel aus.

Die Versuche mit *Leptogium puberulum* zeigen, dass bei Temperaturen zwischen 0 °C und +5 °C Lufttemperatur unter Schnee genügend Flüssigwasser vorhanden war, um die Cyanolichene aufzusättigen und den CO<sub>2</sub>-Gaswechsel zu aktivieren (Abb. 6.35).

Nach sechs bis zehn Stunden Schneebedeckung wurden Wassergehalte zwischen 200 und 400 % Tg erreicht. Die maximalen Wassergehalte lagen bei ca. 500 % Tg. Die Zunahme des Wassergehaltes spiegelte sich am 18./19. November und besonders deutlich

am 22. November 1995 bei Lichtstärken über  $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD in steigenden  $\text{CO}_2$ -Gaswechselraten wider. Positive Nettophotosyntheseraten waren bei Wassergehalten ab ca. 200 % Tg messbar, die jedoch deutlich geringer waren als bei Sättigungswassergehalten. Schwankungen der Einstrahlung oberhalb von  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  hatten bei Sättigungswassergehalten (7. – 9.12.1995) nur geringen Einfluss auf die Nettophotosynthese. Erst eine Abnahme der Lichtintensität auf geringere Werte bewirkte eine Verringerung der Photosyntheseraten. Bezogen auf das Trockengewicht waren die maximalen Raten der Nettophotosynthese und der Dunkelatmung von *L. puberulum* (ca.  $+3,3$  bzw.  $-3,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ kg Tg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) wesentlich höher als die der beiden Grünalgenflechten *Himantormia lugubris* und *Usnea antarctica*. Dagegen waren die Raten der drei Flechten bezogen auf den Chlorophyllgehalt ähnlich.



**Abb. 6.35:** *Leptogium puberulum*: Verlauf des  $\text{CO}_2$ -Gaswechsels während der Aufsättigung unter Schnee (Gaswechsel unter natürlichen Lichtbedingungen ( $\circ$ ) und bei abgedunkelter Küvette ( $\bullet$ ) bezogen auf die Oberfläche sowie unter natürlichen Lichtbedingungen bezogen auf den Gesamtchlorophyllgehalt ( $\nabla$ ), Thalluswassergehalt ( $\blacktriangle$ , % Tg), sowie Photonenflussdichte ( $\blacksquare$ ) und Thallus- ( $\square$ ) bzw. Küvettemperatur ( $\diamond$ ) an verschiedenen Tagen im Frühsommer 1995

### 6.5.2 CO<sub>2</sub>-Gaswechsel von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha* unter kontrollierten Bedingungen

Um mögliche physiologische Anpassungen an die durch die Schneedecke veränderten Licht- und Temperaturbedingungen auf die Photosynthese zu untersuchen, wurden mit dem Miniküvetten-System Versuche zum CO<sub>2</sub>-Gaswechsel von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha* durchgeführt (vgl. Kap. 5.5.2.2). *H. lugubris* trat im Transekt an Standorten mit geringer Schneebedeckung auf, während *L. sciatrapha* als chionophil gilt. Die Messungen erfolgten sowohl unter kontrollierten Licht- und Temperaturbedingungen als auch bei natürlicher Einstrahlung am Standort in Jubany an je einem frisch gesammelten Thallus der zwei Arten sowie an einem Thallus von *Lecidea sciatrapha* im Labor in Kiel. Der CO<sub>2</sub>-Gaswechsel wurde vor allem im Temperaturbereich von  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (in 2,5 K Schritten) untersucht, da dies die in den Mikroklimamessungen überwiegend beobachteten Thallus- und Lufttemperaturen waren (vgl. Kap. 6.2.1). Es wurden nur die Messungen bei optimalen Wassergehalten zur Berechnung der Licht- und Temperaturabhängigkeit des Gaswechsels verwendet.

#### *Himantormia lugubris*

Die Lichtkurven der Nettophotosynthese von *H. lugubris* zeigen eine charakteristische Abhängigkeit von der Temperatur (Abb. 6.36). Die maximalen Nettophotosyntheseraten dieser Art stiegen von  $0,13\text{ }\mu\text{mol CO}_2\text{ kg Tg}^{-1}\text{ s}^{-1}$  (bzw.  $0,15\text{ mg CO}_2\text{ mg Chl}^{-1}\text{ h}^{-1}$ ) bei  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis auf  $0,68\text{ }\mu\text{mol CO}_2\text{ kg Tg}^{-1}\text{ s}^{-1}$  ( $0,82\text{ mg CO}_2\text{ mg Chl}^{-1}\text{ h}^{-1}$ ) bei  $+2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  an. Die maximalen Dunkelatemungsraten nahmen im Vergleich zu den Nettophotosyntheseraten mit steigender Temperatur deutlich stärker zu und betragen bei  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$   $-0,47\text{ }\mu\text{mol CO}_2\text{ kg Tg}^{-1}\text{ s}^{-1}$  (d.h. etwa 73% der maximalen Photosyntheseraten). Die Lichtsättigung der Photosynthese wurde in dem untersuchten Temperaturbereich zwischen  $300\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und ca.  $750\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD ( $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) erreicht. Die Steigung des linearen Bereichs der Lichtsättigungskurven war bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  am größten und nahm bis  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ab. Die Streuung der Messwerte um die berechneten Lichtkurven kann weder auf Austrocknung noch auf Depression der Photosynthese durch Übersättigung des Thallus zurückgeführt werden.

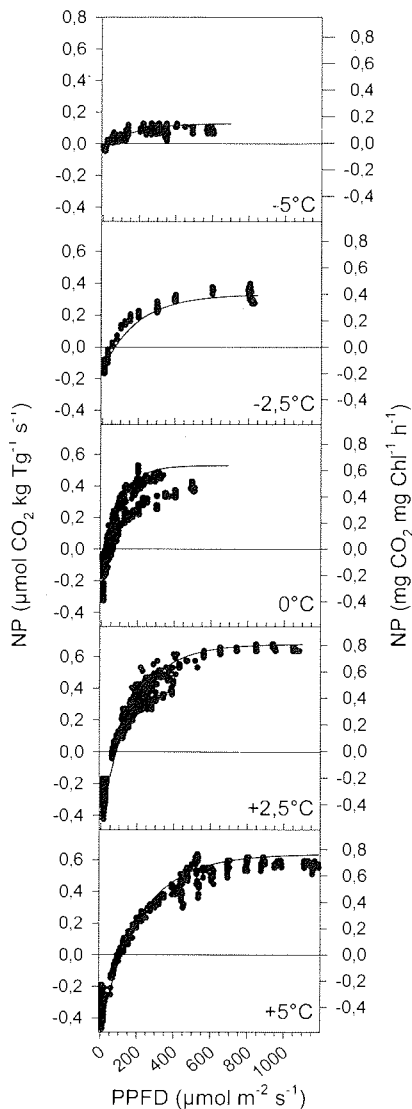
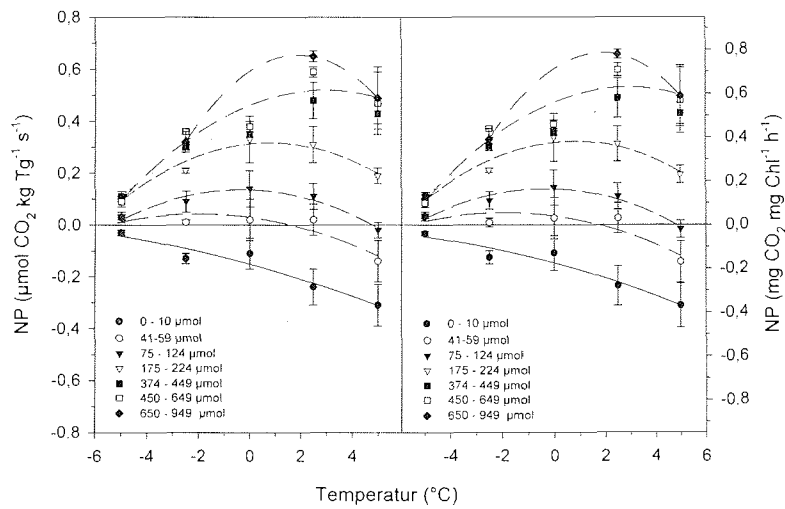


Abb. 6.36: Lichtabhängigkeit der Nettophotosynthese (NP) von *Himantormia lugubris* bei Temperaturen von  $-5\text{ °C}$  bis  $+5\text{ °C}$  (• gemessene Raten, – berechnete Kurve). (Die Werte bezogen auf das Trockengewicht sind auf der linken Ordinate, bezogen den Gesamtchlorophyllgehalt auf der rechten Ordinate abzulesen)

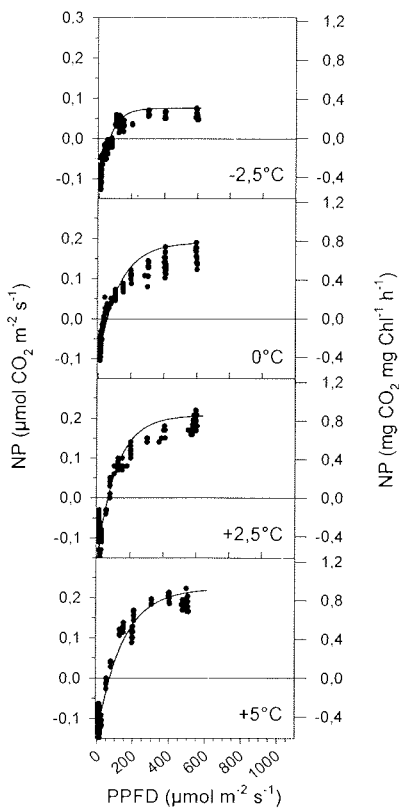
Die Verteilung der Messpunkte bei  $0\text{ °C}$  könnte auch auf einen flacheren Verlauf der Lichtsättigungskurve schließen lassen. Eine detaillierte Analyse der Daten zeigte jedoch, dass die unterschiedlich hohen Photosyntheseraten bei Lichtintensitäten über  $100\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD durch eine Verwendung von zwei verschiedenen Lichtquellen bedingt wurden. Die höheren Raten wurden bei natürlicher Einstrahlung, die niedrigeren Raten bei stufenweiser Steigerung der Lichtintensität mit einer künstlichen Lichtquelle gemessen. Die Lichtkompensationspunkte der Nettophotosynthese lagen im Temperaturbereich von  $-5\text{ °C}$  bis  $0\text{ °C}$  bei  $50$  bis  $70\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD und stiegen bis  $120\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD bei  $+5\text{ °C}$  an.

Die Temperaturabhängigkeit der Nettophotosynthese ist in Abb. 6.37 dargestellt. Es werden jeweils Mittelwert und Standardabweichung der Gaswechseldaten in den angegebenen Lichtklassen bei den verschiedenen Temperaturen angegeben. Bei  $-5\text{ °C}$  war bei allen Lichtstärken eine positive Nettophotosynthese messbar, d.h. der untere Kompensationspunkt wurde bei dieser Temperatur bereits überschritten. Der obere Temperaturkompensationspunkt wurde im untersuchten Temperaturbereich bis  $+5\text{ °C}$  nur bei Lichtstärken zwischen  $41$  und  $124\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD unterschritten. Bei

Lichtintensitäten über  $175 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD wurden auch bei  $+5 \text{ }^\circ\text{C}$  positive Nettophotosyntheseraten erreicht. Das Temperaturoptimum der Nettophotosynthese verschob sich mit zunehmender Lichtstärke von ca.  $-2 \text{ }^\circ\text{C}$  bei ca.  $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD auf ca.  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$  bei Lichtstärken ab  $375 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD.



**Abb. 6.37:** Temperaturabhängigkeit von Dunkelatmung und Nettophotosynthese von *Himantormia lugubris* bezogen auf das Trockengewicht ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ kg Tg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) und den Gesamtchlorophyllgehalt ( $\text{mg CO}_2 \text{ mg Chl}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ). Dargestellt sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung des  $\text{CO}_2$ -Gaswechsels in den Lichtklassen (siehe Legende) zwischen  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $+5 \text{ }^\circ\text{C}$

*Lecidea sciatriapha*

**Abb. 6.38:** Lichtabhängigkeit der Nettophotosynthese (NP) von *Lecidea sciatriapha* bei Temperaturen von  $-2,5\text{ °C}$  bis  $+5\text{ °C}$  (• gemessene Raten, – berechnete Kurve). (Die Werte bezogen auf die Oberfläche sind auf der linken Ordinate, bezogen den Gesamtchlorophyllgehalt auf der rechten Ordinate abzulesen)

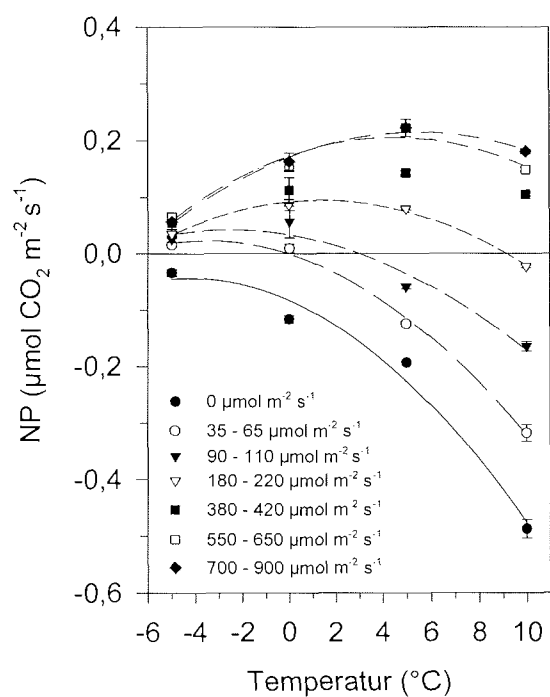
Die Krustenflechte *Lecidea sciatriapha* erreichte im Temperaturbereich von  $-2,5\text{ °C}$  bis  $+5\text{ °C}$  maximale Nettophotosyntheseraten von  $0,08$  bis  $0,22\ \mu\text{mol CO}_2\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  (bezogen auf die Oberfläche) bzw.  $0,31$  –  $0,92\ \text{mg CO}_2\ \text{mg Chl}^{-1}\ \text{h}^{-1}$  (bezogen auf den Chlorophyllgehalt). Von  $0\text{ °C}$  bis  $+5\text{ °C}$  nahmen die Photosyntheseraten nur geringfügig zu. Im untersuchten Temperaturbereich wurden Atmungsraten zwischen  $-0,10$  und  $-0,15\ \mu\text{mol CO}_2\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  gemessen.

Die Lichtkompensationspunkte der Nettophotosynthese lagen zwischen  $60$  ( $0\text{ °C}$ ) und  $80\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  PPFD ( $+5\text{ °C}$ ). Eine Lichtsättigung der Photosynthese trat bei  $-2,5\text{ °C}$  schon bei  $200\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  PPFD ein. Von  $0\text{ °C}$  bis  $+5\text{ °C}$  war die Photosynthese zwischen  $350$  und  $450\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  PPFD lichtgesättigt.

Die Temperaturabhängigkeit des  $\text{CO}_2$ -Gaswechsels von *L. sciatriapha* wurde im Labor in Kiel im Bereich zwischen  $-5\text{ °C}$  und  $+10\text{ °C}$  in  $5\text{ K}$  Schritten ermittelt. Die maximalen Nettophotosyntheseraten lagen mit  $0,2\ \mu\text{mol CO}_2\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  in der gleichen

Größenordnung wie die Raten bei dem frisch gesammelten Thallus. Auch bei dieser Krustenflechte wurden bei  $-5\text{ °C}$  und Lichtintensitäten über  $35\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  PPFD positive Nettophotosyntheseraten gemessen. Das Temperaturoptimum der Nettophotosynthese verschob sich mit zunehmender Lichtstärke von  $-3,5\text{ °C}$  bei ca.  $50\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  PPFD auf etwa  $+5\text{ °C}$  in der Lichtklasse  $700$  –  $900\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  PPFD. Der obere

Temperaturkompensationspunkt der Photosynthese wurde im untersuchten Bereich bis +10°C nur bei Lichtstärken unter 220  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD erreicht. Die Dunkelatmung erreichte bei +10 °C maximale Raten von ca. -0,5  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .



**Abb. 6.39:** Temperaturabhängigkeit von Dunkelatmung und Nettophotosynthese von *Lecidea sciatrapha* bezogen auf die Oberfläche. Dargestellt sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung des  $\text{CO}_2$ -Gaswechsels von -5 °C bis +10 °C (in 5 K Schritten) in verschiedenen Lichtklassen (siehe Legende)

### 6.5.2.1 Vergleich der Licht- und Temperaturabhängigkeit der Nettophotosynthese von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha*

Der Vergleich der Temperaturabhängigkeit der Lichtkompensationspunkte von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha* soll die Temperaturanpassung der Photosynthese im Bereich niedriger Lichtintensitäten, die auch unter Schnee zu beobachten sind, verdeutlichen. Dazu wurden aus den berechneten Lichtsättigungskurven die Lichtkompensationspunkte ( $L_{KP}$ ) ermittelt.

Während sich bei *H. lugubris* die Lichtkompensationspunkte mit zunehmender Temperatur deutlich zu höheren Lichtintensitäten verschoben, unterschieden sie sich bei *L. sciatrapha* im Bereich von  $-2,5\text{ °C}$  bis  $+5\text{ °C}$  nur geringfügig voneinander (Abb. 6.40). Bei  $-2,5\text{ °C}$  und  $0\text{ °C}$  waren die Lichtkompensationspunkte der beiden Arten mit jeweils  $70$  bzw.  $50$  und  $60\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD sehr ähnlich. Jedoch benötigte *H. lugubris* bei  $+5\text{ °C}$  wesentlich höhere Lichtintensitäten zur photosynthetischen Energiegewinnung.

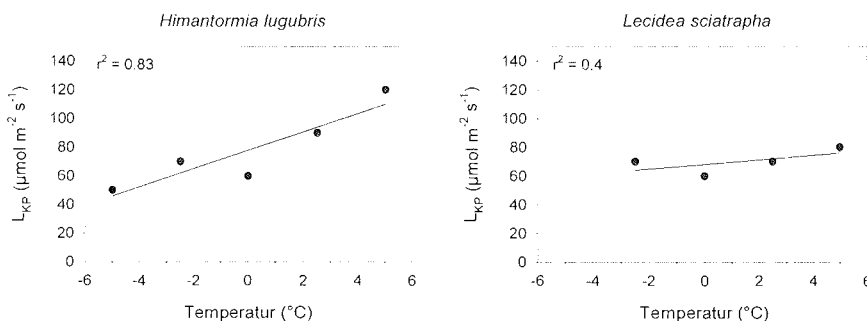


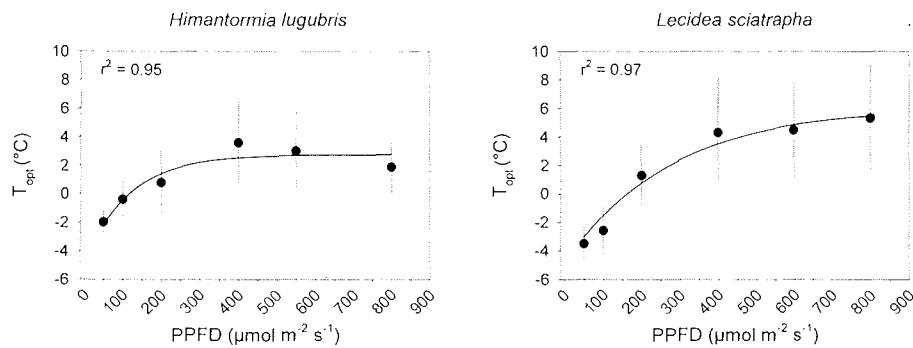
Abb. 6.40: Temperaturabhängigkeit der Lichtkompensationspunkte ( $L_{KP}$ ) der Nettophotosynthese von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha*. Die Regressionsanalyse der Temperaturabhängigkeit des Lichtkompensationspunkts ergab für *H. lugubris*  $r^2 = 0,83$  und für *L. sciatrapha*  $r^2 = 0,4$ .

In Abb. 6.41 ist die Lichtabhängigkeit der Temperaturoptima der Nettophotosynthese von *H. lugubris* und *L. sciatrapha* dargestellt.

Bei *H. lugubris* zeigte sich zunächst ein rascher Anstieg des Temperaturoptimums von  $-2\text{ °C} \pm 1\text{ K}$  bei  $50\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD auf  $+0,8\text{ °C} \pm 2,3\text{ K}$  bei  $200\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD. Bei Lichtintensitäten über  $400\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD lag der optimale Temperaturbereich für die Nettophotosynthese zwischen  $0\text{ °C}$  und  $+6\text{ °C}$ .



Das Temperaturoptimum von *Lecidea sciatriapha* lag dagegen mit  $-3,5\text{ °C} \pm 1,2\text{ K}$  bei  $50\text{ mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD um  $1,5\text{ K}$  tiefer als bei *H. lugubris* und änderte sich bis  $100\text{ mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD kaum. Während sich bei  $200\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD die Temperaturoptima der beiden Arten ähnelten, lagen bei stärkerer Einstrahlung (über  $400\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD) die optimalen Temperaturen für die Nettophotosynthese bei *L. sciatriapha* ( $\text{NP}_{\text{max}}$  bei  $+4,3\text{ °C}$  bis  $+5,4\text{ °C}$ ) höher als bei *H. lugubris*.



**Abb. 6.41:** Lichtabhängigkeit der Temperaturoptima ( $T_{\text{opt}}$ ) der Nettophotosynthese von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatriapha*. Die Symbole geben die Temperatur an, für die die maximale Nettophotosynthese ( $\text{NP}_{\text{max}}$ ) berechnet wurde, die Striche stellen den Bereich für  $\text{NP}_{\text{max}}-10\%$  dar. Die Anpassung der Daten an eine Exponentialfunktion [ $y = y_0 + a_0 \times (1 - \exp(-b \times x))$ ] ergab für *H. lugubris*  $r^2 = 0,95$  und für *L. sciatriapha*  $r^2 = 0,97$

## 7 DISKUSSION

### 7.1 Eignung der automatischen Schneehöhensensoren zur ganzjährigen Erfassung der Schneehöhe

In den Untersuchungen verschiedener Autoren zum Einfluss der Schneebedeckung auf die Vegetationsausprägung in der Antarktis wurde die Schneedecke meist nur direkt mit einem Metermaß erfasst. Eine kontinuierliche Beobachtung der Schneebedingungen (täglich) war dabei nur während der meist kurzen, d.h. mehrwöchigen, Aufenthalte der Wissenschaftler im Untersuchungsgebiet möglich (KAPPEN *et al.* 1990a) und fanden aus logistischen Gründen in der Regel in den Sommermonaten statt. Einige Autoren nahmen zwar auch während der Wintermonate und im Frühjahr Messungen der Schneehöhen vor, diese wurden jedoch in unregelmäßigen, größeren Abständen durchgeführt (SMITH 1972, DAVEY *et al.* 1992, DAVEY & ROTHERY 1996). Dadurch können kurzfristige Schwankungen in der Schneedecke nicht erfasst werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten automatischen Schneepegel (ASP) haben sich unter den Bedingungen der maritimen Antarktis gut bewährt. Über zwei antarktische Winter (von März 1996 bis November 1997) registrierten die ASP die Schneebedeckung im Transekt I. Der Vergleich der automatisch registrierten Schneehöhen mit direkten Ablesungen zeigt, dass dieses System genau genug arbeitet, um ökologische Untersuchungen zur Rolle des Schnees in einem unzugänglichen Gebiet wie der Antarktis durchzuführen.

Eine direkte Messung der Schneehöhe, z.B. mit einem System, das auf der Reflektion von Ultraschallwellen basiert (GUBLER 1981, CHOW 1992), wäre zwar generell einer Messung der Schneedecke in fixierten Höhen vorzuziehen, jedoch erlaubt der aus Frostschutt bestehende Untergrund keine dauerhafte Fixierung des erforderlichen Haltesystems. Die von FRIEDMANN & MCKAY (1985) entwickelte Leitfähigkeitsbestimmungs-Methode, registriert nur das Vorhandensein einer Schneedecke, nicht jedoch ihre Höhe.

Die ASP haben auch den Vorteil, dass die Schneehöhe gemessen wird, welche die Quantität und Qualität des auf der Vegetationsebene ankommenden Lichts beeinflusst (CURL *et al.* 1972, WELLER & HOLMGREN 1974, SCHWERDTFEGGER & WELLER 1977, MALE & GRAY 1981). Die vorgegebenen Abstände zwischen den Lichtschranken (5 cm

bei Schneehöhen von 5 bis 30 cm bzw. 10 cm-Intervalle bei Schneehöhen zwischen 30 und 60 cm) sind eng genug, um auf das Lichtklima rückschließen zu können. Die im Transekt 2 gemessenen Transmissionen der PPFD zeigten, dass die gewählte maximale Messhöhe der ASP von 60 cm ausreichend war. Bei einer Schneehöhe über 50 cm wurde durchschnittlich weniger als 0,5 % Transmission gemessen (vgl. Abb. 6.15), das entspricht bei PPFD-Werten von  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  über der Schneedecke weniger als  $8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD am Boden.

Bei der Analyse der ASP-Daten müssen jedoch die in Kap. 3.2.1.4 erwähnten Probleme berücksichtigt werden:

- das Verschieben der Pegelstreben durch starken Wind, das zu hohe Signale hervorruft,
- das schnellere Abtauen des Schnees an den ASP aufgrund der höheren Wärmekapazität des Material, das zu niedrige Signale bewirkt,
- Alterung und Toleranzen der Bauteile, die Signalabfälle bei tiefen Temperaturen und somit letztlich kurzfristige Sensorausfälle bewirkten.

Aufgrund von Fehlmessungen bei starkem Wind wurden für die Darstellung der Schneebedeckung nur die Tagesminima der registrierten Daten verwendet. Dadurch kann es zu einer leichten Unterschätzung der Schneedecke kommen. So waren z.B. die automatisch gemessenen Schneehöhen an den Pegeln P8 bis P11 im Frühjahr 1996 (September – Mitte November) zwar geringer als die direkt abgelesenen, jedoch stimmte das Datum, an dem ein 0 V-Signal einen Pegel als schneefrei indizierte, mit den visuellen Beobachtungen überein. Die automatisch erfasste Dauer der Schneebedeckung gibt demnach die direkt beobachtbaren Bedingungen am Standort gut wieder und kann daher mit dem Mikroklima und dem Vegetationsmuster entlang des Transekts in Beziehung gesetzt werden.

Signalabfälle bei tiefen Temperaturen, die zu kurzfristigen Sensorausfällen führten, wurden nur 1997 beobachtet. Stiegen die Lufttemperaturen wieder über einen kritischen Wert von ca.  $-7^\circ\text{C}$ , wurde ein Signal angezeigt, das ungefähr demjenigen vor dem Temperaturabfall entsprach.

Die Ergebnisse der Schneemessungen in dieser Arbeiten zeigten deutlich, dass es am Standort auf der Potter-Halbinsel auch während des Winters zu Schwankungen in der Schneedecke kommt, die durch Schneefälle, Schneeschmelze bei Temperaturen über  $0^\circ\text{C}$  oder Winddrift hervorgerufen werden können. Auch kleinräumige interannuelle Variationen der Schneedecke konnten in dieser Arbeit nachgewiesen werden. Wird die

Schneehöhe an nur wenigen Terminen und/oder Punkten gemessen, können solche Schwankungen der Schneedecke übersehen werden. Daher ist eine ganzjährige Messung der Schneehöhe in möglichst kurzen (täglichen) Abständen zweckmäßig, um die saisonale Variation der Schneedecke zu erfassen. Diese Werte können dann zur Interpretation von Vegetationszonierungen herangezogen werden oder in Modelle zur Berechnung der Primärproduktion eingehen.

## **7.2 Zusammenhang zwischen Vegetationsausprägung und Schneedecke**

Schon eine flüchtige Betrachtung der Vegetation der maritimen Antarktis lässt erkennen, dass die Ausdehnung der winterlichen Schneebedeckung, die auch mit der Exposition zum Wind zusammenhängt, ein wichtiger Faktor für die Zusammensetzung der Vegetation ist (HOLDGATE 1964).

Inwiefern dies für die Vegetationsgemeinschaften im Transekt 1 gilt, soll im Folgenden diskutiert werden. Dazu wird zunächst eine Einordnung der gefundenen Gruppen in ein bestehendes Klassifikations-System vorgenommen und anschließend überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der Gemeinschaftsstruktur und der Dauer und Höhe der Schneebedeckung besteht.

### **Vegetationsmuster im Transekt 1**

Die Potter-Halbinsel ist bisher nur sehr wenig floristisch untersucht worden. So findet sich neben einzelnen Aufsammlungen von Moosen und Flechten (LINDSAY 1971, PUTZKE & PEREIRA 1990, OCHYRA 1998) nur eine detaillierte Untersuchung zur Vegetationsstruktur im Gebiet der Potter-Halbinsel (SCHULZ *et al.* 1998).

Die in den Aufnahmen entlang des Transekts 1 gefundenen Taxa (u.a. 24 Flechtenarten, 14 Laubmoos-, 6 Lebermoosarten; vgl. Tabelle III, IV im Anhang) sind auf den Süd-Shetland-Inseln nicht selten (LINDSAY 1971, KOMÁRKOVÁ *et al.* 1985, REDÓN 1985, OCHYRA & VANA 1989a, PUTZKE & PEREIRA 1990, SANCHO *et al.* 1990, OCHYRA 1998, SANCHO *et al.* 1999).

Ein Charakteristikum der Kryptogamengemeinschaften der maritimen Antarktis ist die große Übereinstimmung ihres Arteninventars (SMITH & GIMINGHAM 1976), d.h. viele

Gemeinschaften weisen annähernd gleiche Artenlisten auf, nur dass jeweils andere Arten dominant sind. Unterschiede in der Dominanz werden schon durch geringe Änderungen der Umweltfaktoren hervorgerufen, wobei die Übergänge zwischen den Gemeinschaften deutlich ausgeprägt oder fließend sein können (GIMINGHAM & SMITH 1970). Dies wiederum erschwert die Einordnung solcher Flächen in bestimmte Assoziationen (FURMANCZYK & OCHYRA 1982).

Die Aufnahmeflächen entlang des Transekts I wurden in dieser Arbeit mittels Klassifikation und Ordination nach ihrer floristischen Ähnlichkeit in fünf Gruppen (Cluster) zusammengefasst. Da die vorgenommene numerische Klassifikation Frequenzen bzw. Deckungsgrade berücksichtigt, haben seltene Arten allenfalls einen geringen Einfluss auf die Einteilung der Cluster. Diese erfolgt meist aufgrund des Vorkommens oder Fehlens relativ häufiger Arten. So unterscheiden sich zum Beispiel die Cluster I und IV v.a. durch das Fehlen der in Cluster IV häufigen Arten *Polytrichastrum alpinum* und *Pseudephebe pubescens* in Cluster I und die geringe relative Frequenz von *Lecidea sciatrapha* in Cluster IV unterschieden.

Die Klassifikation und Ordination zeigten, dass sich die a priori anhand des Reliefs definierten Transektbereiche (Senke, Hang, Kuppe) in ihrer Gemeinschaftsstruktur unterscheiden. Cluster II umfasste die Aufnahmeflächen in der Senke, die Hang aufwärts daran anschließenden Flächen wurden in den Cluster III eingeordnet und die in den höher gelegenen Bereichen Cluster IV sowie im hinteren Transektabschnitt in den Cluster V (vgl. Abb. 6.21, Abb. 6.22).

Die fünf verschiedenen Cluster lassen sich anhand der dominanten Arten bedingt in das Klassifikations-System von GIMINGHAM und SMITH (GIMINGHAM 1967, GIMINGHAM & SMITH 1970, SMITH 1972, 1996) einordnen. In diesem System werden die Hauptgruppen nach der Lebensform, d.h. dem Vorkommen bzw. dem Fehlen höherer Pflanzen in eine „Antarctic herb tundra formation“ und eine „Antarctic non-vascular cryptogam tundra formation“ unterschieden. Die „sub-formations“ werden anhand der Wuchsform indikativer Arten definiert, z.B. Strauch- oder Krustenflechten, Rasen bildende oder polsterförmige Moose. Die weiteren Untereinheiten geben dann die floristische Zusammensetzung an.

In der Antarktis wird dieses Klassifikations-System gegenüber dem hierarchischen System von Braun-Blanquet als effektiver und praktischer beurteilt, da die Wuchsform oftmals auch die Ökologie der Arten widerspiegelt (OCHYRA 1998). Vegetationskundliche Arbeiten in der Antarktis sind grundsätzlich dadurch erschwert, dass viele Krypto-

gamentaxa im Feld nicht eindeutig ansprechbar oder bisher noch gar nicht identifiziert sind (KAPPEN 1999).

Es wurden auch computergestützte Verfahren zur Einteilung der antarktischen Vegetation verwendet (SMITH 1988, KAPPEN *et al.* 1990a, GREMMEN *et al.* 1994, MELICK & SEPPELT 1997). SMITH & GIMINGHAM (1976) zeigten, dass die mit computergestützten Verfahren vorgenommene Einordnung in Gemeinschaften zu Ergebnissen führt, die mit denen der „subjektiven“ Klassifikation vergleichbar sind. Dies gilt auch für die in dieser Arbeit durchgeführte numerische Klassifikation.

Die Vegetation im Transekt gehört zur „Antarctic non-vascular cryptogam tundra formation“. Nicht immer können alle in einem Cluster zusammengefassten Aufnahmen nur einer „sub-formation“ zugeordnet werden. Die Aufnahmeflächen an den vertikalen Seiten der Geröllblöcke (Cluster I), in denen *Lecidea sciatrapha* dominierte, zählen nach GIMINGHAM & SMITH (1970) und SMITH (1972) zur „Crustose lichen sub-formation“ (und darin zur „*Buellia* spp.-*Lecanora* spp.-*Lecidea* spp. association“). Dagegen lässt sich die von *Usnea aurantiaco-atra* und *Andreaea gainii* dominierte Gemeinschaft auf der horizontalen Oberseite des ca. 60 cm hohen Geröllblocks an P6b der „Fruticose lichen and moss cushion sub-formation“ zuordnen.

Die Aufnahmen des Clusters II gehören alle zur „Moss carpet sub-formation“ (SMITH 1972) bzw. „Bryophyte carpet and mat sub-formation“ (SMITH 1996). Diese Formation wird durch das Vorkommen pleurokarper Moose wie *Sanionia uncinata* und *Warnstorfia sarmentosa*, die flache, rasenähnliche Teppiche auf feuchten bis nassen Böden bilden, charakterisiert.

Die Aufnahmeflächen der Cluster IV und V, in denen die Vegetation von Strauchflechten wie *Usnea aurantiaco-atra*, *U. antarctica*, *Himantormia lugubris* und *Pseudophebe pubescens* und dem Moos *Andreaea regularis* dominiert wird, lassen sich der „Fruticose lichen and moss cushion sub-formation“ zuordnen, zu der verschiedene Gemeinschaften in meist trockenen, steinigen und exponierten Habitaten gehören. Dabei lassen sich alle Aufnahmen der beiden Cluster in die „*Andreaea-Usnea* association“ einordnen, die wiederum in 10 Untereinheiten gegliedert ist. Eine Einordnung in diese verschiedenen Untereinheiten wird hier nicht vorgenommen.

Die im Cluster III zusammengefassten Aufnahmen stellen eine Übergangszone dar, deren Artenkombination keine eindeutige Entsprechung diesem Klassifikations-System findet. Solche Übergangszonen beschrieben auch MELICK & SEPPELT (1997) für die Vegetation eines Standorts in der kontinentalen Antarktis.

Es zeigt sich somit, dass die Kryptogamengemeinschaften des Transekts für die der maritime Antarktis z.T. typisch ausgebildet sind. Damit gelten die Ergebnisse dieser Arbeit zur Bedeutung der Schneebedeckung für die Vegetationsausprägung nicht nur allein für diese eine Transekt auf der Potter-Halbinsel, sondern können für auch eine Interpretation der Vegetationszonierung an vergleichbaren Standorten der maritimen Antarktis und die Abschätzung der Auswirkung eventueller Klimaänderungen auf die Vegetationsausprägung der maritimen Antarktis verwendet werden.

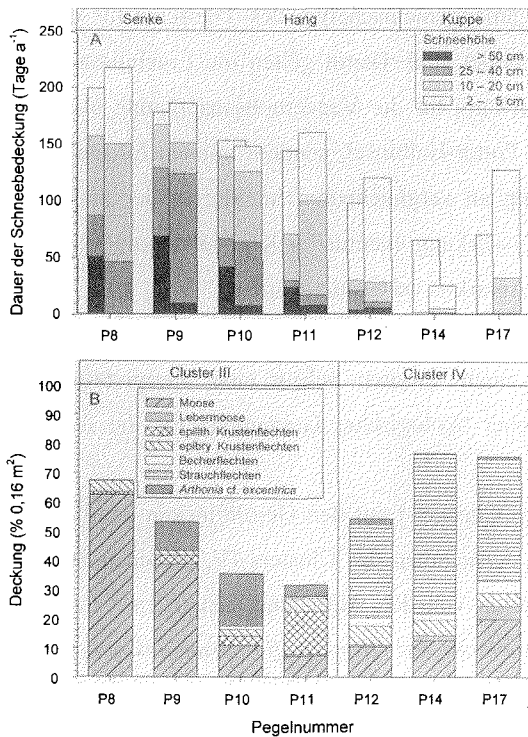
Nach der Klassifikation erfolgte in einem zweiten Schritt eine Interpretation der Gruppeneinteilung hinsichtlich möglicher ökologischer Gradienten, die die Artenzusammensetzungen bedingen.

Im MDS-Plot sind die Aufnahmen des Clusters I auf den Geröllblöcken deutlich von den übrigen Clustern abgegrenzt. Die Aufnahmen des Clusters IV, in denen Strauchflechten dominieren, stehen am weitesten von den Aufnahmeflächen des Clusters II entfernt, in denen Moose (*Sanionia uncinata* und *Warnstorfia sarmentosa*) fast reine Bestände bilden. Da Flechten meist trockenere Habitate besiedeln als Moose (LONGTON 1988), wird somit im MDS-Plot ein Feuchtegradient angezeigt. Daraus kann gefolgert werden, dass die Gemeinschaftsstruktur entlang des Transekts durch einen Feuchtigkeitsgradienten beeinflusst wird, welcher durch verschiedene Faktoren bedingt wird. Dies könnten z.B. Staunässe oder eine unterschiedlich starke Windexposition und damit verbundene Evaporation sein. Diese Faktoren wiederum werden von der Schneebedeckung beeinflusst, deren Zusammenhang mit der Vegetationszusammensetzung im Folgenden diskutiert wird.

### **Zusammenhang zwischen Schneedecke und Vegetationsausprägung**

Der Jahresgang der täglichen minimalen Schneehöhen zeigte sowohl 1996 als auch 1997 einen steilen Gradienten der Schneebedeckung von der Senke bis zur Kuppe. Die deutliche Abgrenzung des Clusters III vom Cluster IV korrespondiert sehr gut mit den Unterschieden in Dauer und Höhe der Schneedecke in diesem Transektabschnitt (P8 bis P17) (Abb. 7.1).

In der Senke (P8 und P9) war die artenarme und überwiegend aus Moosen (*Sanionia uncinata* und *Andreaea regularis*) bestehende Vegetation insgesamt etwa 200 Tage schneebedeckt, davon ca. 150 Tage mit einer Schneedecke höher als 10 cm.



**Abb. 7.1:** **A** Dauer der Schneebedeckung 1996 und 1997 an den Schneepegeln P8 – P17 (berechnet aus den automatisch gemessenen Schneehöhen), dargestellt sind für jeden Pegel jeweils links die Daten für 1996, rechts für 1997  
**B** Deckung der verschiedenen Wuchsformen in den Aufnahmeflächen an den Schneepegeln P8 - P17

Ab der Hangmitte, wo nur noch an insgesamt 98 bzw. 120 Tagen eine Schneeauflage registriert wurde, nahm die Diversität deutlich zu und es dominierten Strauchflechten. Die Deckung von *U. aurantiaco-atra* nahm von der Hangmitte bis zur Kuppe, die maximal von 10 bzw. 20 cm Schnee bedeckt war, weiter zu.

*Himantormia lugubris* erreichte dagegen erst in dem hinteren Transektbereich, der 1996 später aper war als die Kuppe, eine Deckung von 22 %. Dieser Bereich hatte im Vergleich zum nordexponierten Hang nur ein geringes Gefälle und war nach der Schneeschmelze schlechter drainiert. Durch die Staunässe ist an diesem Standort nach der Schneeschmelze eine gute Was-

serversorgung der Kryptogamen bei hohen Photonenflussdichten zu erwarten, die sich positiv auf die Produktionsraten auswirken können.

Ähnliche Zusammenhänge zwischen dem Wechsel der Dominanzverhältnisse von *Sanionia uncinata*, *Andreaea spec.*, *Usnea spp.* sowie *Himantormia lugubris* und der Schneebedeckung postulierte SMITH (1972) aufgrund der Schneesituation im September 1966 in verschiedenen Transekten auf Signy Island. Jedoch machte SMITH keine Angaben die Schneesituation im Winter oder eine interannuelle Variation der Schneedecke. COLLINS (1976) bezeichnet das typische Habitat von *Sanionia uncinata* als tief schneebedeckt im Winter und mit einer fortwährenden Wasserzufuhr während der gesamten Vegetationsperiode.



Im Gebiet der Windmill-Inseln, Wilkes Land, bilden sich die am besten entwickelten Pflanzengemeinschaften an den Standorten, die während des Großteils des Sommers nicht stark schneebedeckt waren (MELICK *et al.* 1994).

KAPPEN *et al.* (1990a) beobachteten in der kontinentalen Antarktis eine *Rinodina olivaceobrunnea*-Moospolster-Gemeinschaft an lange schneebedeckten Standorten, während eine *Usnea sphacelata*-Gemeinschaft leegerichtete Felsoberflächen, an denen sich häufig Schnee akkumulierte, besiedelte.

Auch in dieser Arbeit konnte auf den Geröllblöcken scharfe Trennlinie hinsichtlich der Artenzusammensetzung festgestellt werden, die sich ebenfalls mit der Schneebedeckung erklären lassen könnte. In den unteren Bereichen der Vertikalflächen fehlten Strauchflechten und es traten neben *Lecidea sciatrapha* und anderen epilithischen Krustenflechten nur wenige Polster von *Andreaea gainii* auf. Letzteres, als xerisch eingestufte Moos (NOAKES & LONGTON 1989), wurde jedoch nur auf den nord-, d.h. sonnenexponierten und somit früher aperen und im Sommer trockeneren Flächen gefunden. Da der Wind meist aus West kommt, akkumuliert sich der Schnee vornehmlich an den west- und ostexponierten Flächen, d.h. im Luv und Lee der Geröllblöcke.

Die horizontalen Flächen der Blöcke und die oberen Bereiche der Vertikalflächen, auf denen Strauchflechten wie *Usnea aurantiaco-atra* bis zu 100 % Deckung erreichten, sind dagegen windexponiert. Die manuellen Messungen der Schneehöhen zeigten, dass im Frühjahr die oberen Bereiche der Geröllblöcke und der obere Hangabschnitt und die Kuppe, wo ebenfalls *U. aurantiaco-atra* dominierte, annähernd gleichzeitig aper waren.

Es konnte somit deutlich gezeigt werden, dass Strauchflechten erst auftraten, wenn an weniger als 120 Tagen im Jahr eine Schneedecke vorhanden war bzw. diese an weniger als 30 Tagen mehr als 10 cm betrug. Moose wie *Sanionia uncinata* konnten dagegen auch bei einer Schneebedeckung von etwa 200 Tagen ausgedehnte Bestände bilden.

Der Schnee dient den Kryptogamen als Wasserquelle, bietet Schutz gegen tiefe Temperaturen und Windwirkung, reduziert aber auch die einfallende Strahlung (LONGTON 1988, KAPPEN 1993a). Die Bedeutung des Schnees für das Mikroklima, als Wasserquelle und damit sein Einfluss auf die Primärproduktion verschiedener Arten wird in den folgenden Kapiteln diskutiert.

### 7.3 Vergleich der mikroklimatischen Bedingungen an den verschiedenen Standorten

Bedingt durch den Gradienten der Schneebedeckung kam es im Jahresverlauf zu deutlichen Unterschieden der mikroklimatischen Bedingungen für das Mooses *Sanionia uncinata* in der Senke und für die Strauchflechten *Himantormia lugubris* und *Usnea aurantiaco-atra* in der Hangmitte bzw. auf der windexponierten Kuppe.

#### Das Mikroklima an den aperen Standorten

Während des Zeitraums in dem alle drei Standorte aper waren, wurden nur geringe Unterschiede im Temperatur- bzw. Lichtklima für die drei Arten festgestellt. Von Dezember bis März entsprachen die durchschnittlichen Tagesmaxima der Thallustemperatur von *Sanionia uncinata* denen der gelbgrünen Strauchflechte *Usnea aurantiaco-atra*. In den Dezembernächten fiel nur die Thallustemperatur von *Sanionia uncinata* noch deutlich unter den Gefrierpunkt. Der schwarzbraune Thallus von *Himantormia lugubris* wurde von September bis März im Tagesverlauf zwischen 2 und 4 K stärker erwärmt als *Usnea aurantiaco-atra*. Dies ist auf die stärkere Absorption der einfallenden Strahlung aufgrund des dunkleren Thallus von *H. lugubris* zurückzuführen. An bedeckten Tagen unterschieden sich die Thallustemperatur der beiden Strauchflechten kaum. Während des Sommers wird die Photosyntheseaktivität der Kryptogamen an den drei Standorten daher durch die unterschiedliche Wasserverfügbarkeit limitiert werden (KAPPEN 1993b).

#### Das Mikroklima unter der Schneedecke

Die größten Unterschiede im Mikroklima der drei Arten traten während der Wintermonate und im Frühjahr auf. Dies verdeutlicht den Einfluss der Dauer und Höhe der Schneebedeckung sowohl auf die Temperatur- als auch auf die Lichtbedingungen am Standort ausüben.

#### *Der Faktor Licht*

Die starke Reduktion der einfallenden PPFD durch die Schneedecke konnte deutlich anhand der im Transekt 2 gemessenen Lichtverhältnisse über und unter Schnee gezeigt werden. Schon unter einer 15 cm hohen Schneedecke betrug die gemessene Transmission nur noch ca. 8 %. Dieser Wert entspricht den Messungen von SOMMERKORN (1993) in der Arktis, der unter einer 15 cm hohen Schneedecke eine Transmission von 9 %

feststellte. KAPPEN & BREUER (1991) fanden bei der gleichen Schneehöhe einen relativen Lichtgenuss zwischen 10 und 30 %. Diese Abweichungen sind wahrscheinlich auf eine unterschiedliche Schneequalität zurückzuführen (vgl. Abb. 4.16). So ist die Absorption in frisch gefallenem Schnee größer als in dichterem Altschnee (MARCHAND 1987). SCHWERDTFEGER & WELLER (1977) weisen darauf hin, dass der Extinktionskoeffizient des Schnees stärker von der Korngröße als von der Schneedichte abhängt.

#### *Der Faktor Temperatur*

Unter dem Schnee kann eine starke Pigmentierung des Thallus für die Flechten von Vorteil sein. Durch die Erwärmung des Thallus können anhaftende Schneekristalle schmelzen, so dass Wasser frei wird (KAPPEN 1993a). Andererseits kann es durch Evaporation zu einer Wärmeabgabe kommen, wodurch der Erwärmungseffekt ausgeglichen wird (KAPPEN 1993b). Um die dunkelpigmentierten Flechten können durch das Schmelzen des Schnees infolge der Thalluserwärmung Hohlräume entstehen (LARSON & KERSHAW 1975a), in welchen die Wassersättigung der Luft hoch ist (KERSHAW 1983). Während des Frühjahrs konnten viele solcher sogenannten Schneetaschen im Transekt I beobachtet werden. Aus Schneetaschen über den Strauchflechten *Himantormia lugubris*, *Usnea aurantiaco-atra* und *U. antarctica* wurden Proben zur Wassergehaltsbestimmung entnommen. Aber auch an den Geröllblöcken und über größeren Steinen, die von *Lecidea sciatrapha* besiedelt waren, bildeten sich solche Hohlräume aufgrund der Erwärmung des Gesteins.

Ab Mitte Juni bis Dezember war *Sanionia uncinata* kontinuierlich von einer isolierenden Schneeschicht (über 20 cm) bedeckt, so dass in dem Moosrasen keine diurnale Rhythmik der Thallustemperatur vorhanden war. Die Thallustemperaturen erreichten während der Schneebedeckung den Gefrierpunkt nicht, sanken aber auch nicht unter  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Eine hohe Schneedecke kann somit während des Winters für *Sanionia uncinata* einen notwendigen Schutz vor tiefen Temperaturen und Gefrier-Tau-Zyklen darstellen. MELICK & SEPPELT (1992) stellten für antarktische Moose Gefrierpunkte zwischen  $-8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $-3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  fest. KENNEDY (1993a) diskutiert Temperaturen unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  und Gefrier-Tau-Stress als Faktoren, die die Verbreitung und die Lebensfähigkeit von *Polytrichum alpestre* begrenzen und betont den Isolationseffekt einer Schneedecke.

*Himantormia lugubris* kam im Transekt nur in Bereichen vor, die zwar bis zu 4 Monate schneebedeckt waren, in beiden Jahren erreichte die Schneeeauflage jedoch nur an maximal 30 Tagen mehr als 10 cm. Selbst im Winter war das Habitat nur schwach schnee-

bedeckt und dadurch war die Flechte nicht nur wesentlich tieferen Lufttemperaturen, sondern auch größeren täglichen Temperaturschwankungen ausgesetzt als *Sanionia uncinata* in der Senke.

*Usnea aurantiaco-atra* erreichte ihre höchste Deckung auf der Kuppe. Dort betrug die Dauer der Schneebedeckung maximal 65 Tage, wobei Schneehöhen über 10 cm selten registriert wurden. Für beide Flechten wurden auch während des Winters immer wieder positive Thallustemperaturen gemessen. Die täglichen minimalen Thallustemperaturen lagen immer unter dem Gefrierpunkt, sinken jedoch in den beiden niederliegenden Thalli nicht so stark ab wie die Lufttemperatur. Die Strauchflechten *Usnea aurantiaco-atra* und *Himantormia lugubris* sind demnach während des Winters weder vor tiefen Temperaturen noch vor den Wirkungen des Windes (Eisabration, Austrocknung) oder Gefrier-Tau-Zyklen geschützt. Diese Bedingungen können von vielen Flechten toleriert werden. So konnten KAPPEN & LANGE (1972) nachweisen, dass antarktische Flechten auch im feuchten Zustand Temperaturen bis  $-196\text{ °C}$  ertragen können. Eine Strategie zur Vermeidung von Frostschäden kann dabei die extrazelluläre Eisbildung sein (SCHROETER & SCHEIDEGGER 1995). Ein hoher Gehalt Polyolen und Zuckern ist für die Frosttoleranz von Bedeutung (ROSER *et al.* 1992, KAPPEN 1993b). Antarktische Flechten können einen bis zu dreimal höheren Gehalt an Polyolen haben als Arten gemäßiger Breiten (TEARLE 1987).

Ende September stieg die Thallustemperatur von *Sanionia uncinata* an und blieb unabhängig von dem Verlauf der Lufttemperatur bis zum Apertermin Anfang Dezember konstant zwischen  $-0,8\text{ °C}$  und  $-0,1\text{ °C}$ . Dieser Anstieg der Thallustemperatur kam vermutlich durch die Zufuhr von Schmelzwasser aus den oberen Hangbereichen zustande. Während dieser Zeit war das Licht durch die hohe Schneedecke noch deutlich reduziert, erst ab dem 17.11.1996 konnten über  $20\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD gemessen werden. (DAVIS & HARRISSON 1981) haben für *S. uncinata* bei  $0\text{ °C}$  Respirationsraten gemessen, die etwa 50 % der Nettophotosyntheseraten bei Sättigungslicht betragen. Somit kann für *S. uncinata* eine negative  $\text{CO}_2$ -Bilanz während des Frühjahrs angenommen werden, die während der Aperzeit ausgeglichen werden müsste.

Ab Oktober lag die Thallustemperatur von *H. lugubris* im Monatsmittel ca. 8 Stunden über dem Gefrierpunkt und das Licht stieg bis ca.  $350\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  PPFD an. Bei diesen Licht- und Temperaturkombinationen stellt die Wasserverfügbarkeit den begrenzenden Faktor für die Primärproduktion dar.

#### 7.4 Reaktivierung des Gaswechsel durch Wasseraufnahme aus dem Schnee

Flechten und Moose sind als poikilohydre Organismen von den Feuchtigkeitsbedingungen ihrer Umwelt abhängig, das bedeutet, sie können ihren Wasserhaushalt nicht selbst kontrollieren. Daher müssen sie gegen Austrocknung tolerant sein und bei Wiederbefeuchtung schnell ihre normalen Photosynthesereaktionen wiedererlangen. Während viele Moose Strategien zur externen Wasserspeicherung und -leitung entwickelt haben (OECHEL & SVEINBJÖRNSSON 1978, PROCTOR 1982, SVEINBJÖRNSSON & OECHEL 1992) fehlen diese bei Flechten (GREEN & LANGE 1995). Die Zusammensetzung der Vegetation in der Antarktis wird daher stärker noch als von der Temperatur vom Wasserfaktor beeinflusst (KENNEDY 1993b, DAVEY & ROTHERY 1997).

Schnee als essentielle Wasserquelle für die Kryptogamen in der Antarktis wurde vielfach diskutiert (KAPPEN 1993b, HOVENDEN *et al.* 1994). Bei Flechten mit Grünalgen als Photobionten ist die Reaktivierung der Nettophotosynthese durch Wasserdampfaufnahme möglich (LANGE & KILIAN 1985, LANGE *et al.* 1988, SCHEIDEGGER *et al.* 1995). Dies ist auch unter Schnee von Bedeutung, da Flechten das Wasser nicht nur in flüssigem Zustand aus dem Schnee aufnehmen, sondern auch bei Temperaturen unter 0 °C den Wasserdampf aus Schnee und Eis absorbieren können (KAPPEN 1993a, SCHROETER & SCHEIDEGGER 1995, KAPPEN & SCHROETER 1997, SCHROETER *et al.* 1997a).

Während der Untersuchungen im Frühjahr und Sommer 1995 und 1996/1997 betrug die Schneetemperatur bis auf sehr wenige Tage im Oktober 1996 ca. 0 °C. Aussagen über die Abhängigkeit der Wasseraufnahme unter Schnee von der Temperatur können daher nicht gemacht werden. Jedoch wurde die Fähigkeit verschiedener Arten untersucht, Quellwasser aus dem im Schnee verfügbaren flüssigen Wasser zu beziehen und dadurch den CO<sub>2</sub>-Gaswechsel zu reaktivieren.

Unter Schnee sättigten sich Proben verschiedener Flechtenarten unterschiedlich stark auf. So sättigte sich *Stereocaulon alpinum* durch Schnee durchschnittlich zu 220 % Tg auf. Bei solchen Wassergehalten fanden SANCHO *et al.* (1997b) maximale Nettophotosyntheseraten.

Die Wassergehalte unter Schnee von *Himantormia lugubris* waren etwa so hoch wie bei KAPPEN & REDON (1987), wenn sie Thalli dieser Flechte durch Sprühen mit flüssigem

Wasser befeuchteten, während sich die Thalli durch Wasserdampfaufnahme bei 20 °C nur bis zu ca. 70 % Tg aufsättigten.

Die Wassergehalte völlig schneebedeckter Thalli von *Pseudephebe pubescens* lagen deutlich unter den von FALK (1990) bestimmten Sättigungswassergehalten von 230 % Tg. Waren diese Thalli nach Schneefällen jedoch nur teilweise bedeckt, wurden Wassergehalten gemessen, bei denen *P. pubescens* maximale Nettophotosyntheseraten erreicht (SANCHO *et al.* 1997a). Teilweise überschritten sie sogar 200 % Tg, ein Bereich, in dem die gleichen Autoren bereits eine Depression der Photosyntheseraten feststellten.

Für Thalli der Strauchflechten *Himantormia lugubris*, *Usnea aurantiaco-atra* und *U. antarctica* konnte keine eindeutige Abhängigkeit von den Schneesverhältnissen festgestellt werden. Lediglich bei Thalli unter einer Eisschicht wurden etwas geringere Wassergehalte gemessen. Nach Schneefällen unbedeckte Thalli wiesen Wassergehalte in der gleichen Größenordnung auf wie schneebedeckte Thalli. Dies weist darauf hin, dass die Wasseraufnahme rasch erfolgt. Aufsättigungsversuche unter Schnee bestätigten dies. Lufttrockene Flechtenthalli sättigten sich innerhalb von 6 bis 8 Stunden um 50 bis 100 % Tg auf. Dabei waren die Aufsättigungsraten bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt etwas geringer als bei höheren Temperaturen, wenn der Schnee zu tauen begann (vgl. Abb. 4.29, 4.30). Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt ist die Wasseraufnahme unter Schnee von der Thallustemperatur abhängig (SCHROETER & SCHEIDEGGER 1995).

Die Wasseraufnahme aus Schnee als Funktion der Schneebedeckungsdauer zeigte, dass Sättigungswassergehalte am schnellsten bei *U. aurantiaco-atra* und am langsamsten bei *H. lugubris* erreicht wurden. Die relativ große Streuung der Daten um die berechnete Kurve ( $r^2$  zwischen 0,51 und 0,76) wurde durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen während der einzelnen Versuche bedingt (vgl. Kap. 4.4.2).

Die schnelle Aufsättigung unter Schnee ist eine gute Anpassung an die oftmals, besonders im Sommer, nur sehr kurze Dauer der Schneebedeckung am Standort. Die Wasseraufnahme aus Schnee ist jedoch hinsichtlich der Aufsättigungsraten und der Sättigungswassergehalte deutlich geringer als die Aufnahme flüssigen Wassers. So waren die Sättigungswassergehalte unter Schnee bei allen drei Arten ca. 50 % Tg niedriger als die Aufsättigung nach 2 Stunden in flüssigem Wasser von durchschnittlich +0,7 °C.

Ob die Wasseraufnahme aus Schnee ausreicht, um die Nettophotosynthese und die Respiration zu reaktivieren, wurde bei *Himantormia lugubris*, *Usnea antarctica*, *Lecidea*

*sciatriapha* und *Leptogium puberulum* überprüft. Die Strauchflechten *H. lugubris* und *U. antarctica* besiedeln windexponierte, wenig schneebedeckte Standorte, die epilithische Krustenflechte *Lecidea sciatriapha* wird dagegen meist in den unteren Bereichen von Felsen und Geröllblöcken gefunden. *Leptogium puberulum* ist eine bodenbewohnende Cyanolichene, deren Photobiont auf flüssiges Wasser zur Reaktivierung der Photosyntheseaktivität angewiesen ist (BÜDEL & LANGE 1991, LANGE *et al.* 1993, SCHROETER 1994).

Bei allen vier Arten reichte die Wasseraufnahme dem Schnee zur Reaktivierung des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels aus. Die Temperaturen lagen während dieser Versuche nicht unter dem Gefrierpunkt.

*Himantormia lugubris* sättigte sich innerhalb von 6 Stunden unter Schnee bis auf etwa 100 %Tg auf. Bei diesen Wassergehalten und Lichtstärken über 300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD erreichte sie maximale Nettphotosyntheseraten, die den von KAPPEN & REDON (1987) gemessenen entsprachen. Die Dunkelatmung war bei gleichen Temperaturbedingungen etwa so hoch wie die maximalen Nettphotosyntheseraten. Positive Photosyntheseraten wurden jedoch schon bei Wassergehalten von ca. 50 % Tg gemessen.

Bei *Usnea antarctica* reichte ebenfalls eine Schneebedeckung von wenigen Stunden aus, um bei Wassergehalten zwischen 50 und 75 % Tg die Nettphotosynthese zu reaktivieren. Die maximalen Photosyntheseraten waren dabei - bezogen auf den Chlorophyllgehalt - mit den von SCHROETER *et al.* (1995) ermittelten Raten vergleichbar. Jedoch hat SCHROETER (1991) deutlich geringere Nettphotosyntheseraten bei gleichen Versuchsbedingungen gemessen, wenn *U. antarctica* unter Schnee aufgesättigt wurde, als bei Aufsättigung durch Regen, hoher Luftfeuchte oder Tau.

Die als chionophil eingestufte epilithische Krustenflechte *Lecidea sciatriapha* konnte aus dem Schnee nur sehr geringe Wassermengen (maximal 0,1 mm Niederschlagsäquivalent) aufnehmen. LANGE *et al.* (1994) konnten an Krustenflechten in der Namibwüste 4- bis 6-fach höhere Wassergehalte messen. Die Reaktivierung der Photosynthese war dadurch nur begrenzt möglich. So konnten bei hohen Wassergehalten nur bei hohen Lichtintensitäten positive Nettphotosyntheseraten gemessen werden. Dagegen konnte bei einer Abnahme des Wassergehaltes trotz abnehmender Photonenflussdichte eine leichte Zunahme der Nettphotosyntheseraten beobachtet werden. Durch flüssiges Wasser im oder auf dem Thallus werden die CO<sub>2</sub>-Diffusionswiderstände erhöht und es kommt zu einer Depression der Photosynthese (SNELGAR *et al.* 1981, LANGE & TENHUNEN 1982, LANGE & ZIEGLER 1986, LANGE *et al.* 1996). KAPPEN *et al.* (1990b)

konnten am natürlichen Standort an *Lecidea sciatrapha* nur bei Lichtstärken bis zu  $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD Photosynthese messen, was als Anpassung an den lange schneebedeckten Standort interpretiert wurde. In den Aufsättigungsversuchen waren die Photosyntheseraten etwa so hoch wie in den Versuchen von KAPPEN *et al.* (1990b), jedoch deutlich geringer als die in den Laborversuchen ermittelten Raten (vgl. Abb. 6.38 und Abb. 6.39). Die Dunkelatemungsraten waren fast immer höher als die Nettphotosyntheseraten, nahmen jedoch mit dem Wassergehalt ab.

Die Versuche mit *Leptogium puberulum* zeigten, dass auch unter Schnee genügend flüssiges Wasser vorhanden ist, um auch bei Flechten mit Cyanobakterien als Photobionten die Photosynthese zu reaktivieren. Die höchsten Nettphotosyntheseraten wurden bei Wassergehalten über 400 % Tg und Lichtstärken über  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD gemessen. Die Wassergehalte lagen damit etwa so hoch wie die regenfeuchter Thalli (SCHLENSOG *et al.* 1997b). Die Wassergehalte der am Standort unter Schnee gesammelten Proben von *Leptogium puberulum* betragen dagegen nur durchschnittlich 120 % Tg. Diese Wassergehalte reichen zwar aus, um die Photosynthese zu aktivieren, wie der Versuch vom 22. – 23.11.1995 zeigte, doch waren die Dunkelatemungsraten deutlich höher. Eine hohe, lichtreduzierende Schneedecke, unter der flüssiges Wasser vorhanden ist, würde somit auch bei *Leptogium puberulum* zu hohen Atmungsverlusten führen.

Bei allen untersuchten Arten reichte die Aufsättigung unter Schnee aus, um den  $\text{CO}_2$ -Gaswechsel zu aktivieren. Bei *Lecidea sciatrapha* führte ein zu hoher Wassergehalt jedoch zu einer Depression der Photosynthese. Es zeigt sich somit, dass auch hinsichtlich des Wasserfaktors eine Schneebedeckung nicht für jede Art von Vorteil sein muss. Da *L. sciatrapha* häufig an den Vertikalflächen von Felsen und Geröllblöcken vorkommt, ist am natürlichen Standort eine Übersättigung bzw. die Ausbildung eines Wasserfilms über dem Thallus für längere Zeit unwahrscheinlich.

Bei *Usnea antarctica* konnte eine solche Depression dagegen auch bei hohen Wassergehalten nicht beobachtet werden (SCHROETER 1991).

Die Wasseraufnahme aus dem Schnee erfolgte grundsätzlich schnell und reichte schon nach kurzer Zeit aus, um die Photosynthese zu aktivieren. Dies wiederum ist z.B. bei Schneefällen zwischen September und März, wenn die Strahlung schon deutlich über dem Lichtkompensationspunkt der meisten Arten liegt, von Bedeutung.

Bei allen vier Arten waren die Dunkelatemungsraten annähernd so hoch oder höher als die gemessenen Nettphotosyntheseraten. Gerade im Frühjahr kann bei Temperaturen



um den Gefrierpunkt aufgrund der Schwachlichtverhältnissen eine längere Schneebedeckung zu Atmungsverlusten führen (GANNUTZ 1970, BENEDICT 1990a, 1991).

### 7.5 Analyse des Photosyntheseverhaltens von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha*

Um eine positive Kohlenstoffbilanz am Standort zu erzielen, sollte die Photosynthesereaktion einer Flechte möglichst optimal an die herrschenden Umweltbedingungen, d.h. die mikroklimatischen Parameter Licht, Temperatur und Wassergehalt angepasst sein. Die Fähigkeit von Flechten auch bei Minusgraden positive Photosyntheseraten zu erzielen ist mehrfach nachgewiesen worden (LANGE & KAPPEN 1972, KAPPEN 1989, 1993b, SCHROETER *et al.* 1994, 1995, KAPPEN *et al.* 1996a, 1996b, KAPPEN & SCHROETER 1997).

Um die Auswirkungen der Schneedecke auf die potentielle Primärproduktion abschätzen zu können, wurde die Reaktion des CO<sub>2</sub>-Gaswechsel zweier Flechtenarten, die am natürlichen Standort unterschiedlich lange schneebedeckt sind, auf die dort herrschenden Temperatur- und Lichtbedingungen untersucht. Die Messung des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels erfolgte im wesentlichen im Temperaturbereich von -5 °C bis +5 °C, den in den Mikroklimamessungen überwiegend beobachteten Thallus- und auch Lufttemperaturen. Bei höheren Temperaturen während des Sommers sind die Thalli von *Himantormia lugubris* am Standort trocken. Auch das schnelle Austrocknen bei Temperaturen unter +5 °C am Ende der Aufsättigungsversuche wenn die Flechten freigesetzt waren (vgl. Abb. 6.30), legt den Schluss nahe, dass bei Thallustemperaturen über +5 °C der Wassergehalt nicht ausreicht, um die Photosynthese bzw. die Respiration lange aufrecht zu erhalten.

Hinsichtlich des Photosyntheseverhaltens weisen sowohl *Himantormia lugubris* als auch *Lecidea sciatrapha* eine gute Anpassung an niedrige Temperaturen auf. So wurden bei beiden Arten auch bei -5 °C noch signifikante Nettphotosyntheseraten gemessen.

Der optimale Temperaturbereich der Nettphotosynthese von *H. lugubris* lag bei niedrigen Lichtstärken (50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD) bei -2 °C ( $\pm 1\text{K}$ ) und stieg bei PPFD von 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD auf +3,6 °C ( $\pm 3\text{K}$ ). Die niedrigen Temperaturoptima können als gute Anpassung an den lichtreichen, jedoch stark windexponierten Standort

interpretiert werden. Auch KAPPEN & REDON (1987) fanden Temperaturoptima unterhalb +5 °C bei niedrigen Lichtintensitäten. Der obere Temperaturkompensationspunkt wurde bis +5 °C bei Lichtstärken unter 175  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD unterschritten. KAPPEN & REDON (1987), deren Untersuchungen am Ende des Sommers durchgeführt wurden, konnten dagegen bei 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD noch bis +10 °C positive Nettophotosyntheseraten messen. Da jedoch in dieser Arbeit der  $\text{CO}_2$ -Gaswechsel von *H. lugubris* Ende Oktober, d.h. im Frühjahr, gemessen wurden, kann dies auf eine saisonale Anpassung der Photosynthesekapazität zurückzuführen sein, wie sie bei arktischen Flechten festgestellt wurde (LARSON & KERSHAW 1975b, KERSHAW 1985, SONESSON *et al.* 1992). Angaben über saisonale Veränderungen der Photosyntheseaktivität antarktischer Flechten fehlen bislang.

Bei Lichtstärken über 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD trocknete der Thallus rasch aus, so dass die gemessenen Photosyntheseraten, insbesondere bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt, vermutlich nicht die Kapazität eines optimal gesättigten Thallus wiedergeben, jedoch die natürlichen Verhältnisse am Standort reflektieren.

Hinsichtlich der Lichtabhängigkeit der Photosynthese zeigt *H. lugubris* eine vergleichbare Anpassung an den lichtreichen Standort wie *Pseudephebe pubescens* (FALK 1990). Diese beiden dunkelpigmentierten Flechten, die am selben Standort vorkommen, haben Lichtkompensationspunkte von 50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD bei -5 °C und 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD bei +5 °C und erreichen Lichtsättigung zwischen 200 – 500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD. Bei *Usnea antarctica* (SCHROETER *et al.* 1995) und *Usnea aurantiaco-atra* (KAPPEN 1985, SCHROETER 1997), die den gleichen Standort haben, lagen dagegen die Lichtkompensationspunkte bei niedrigen Temperaturen schon bei etwa 20  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD. Grundsätzlich muss bei den dunklen Thalli eine Reduktion der Strahlung auf Photobiontenebene durch die Pigmentierung des Cortex in Betracht gezogen werden (KAPPEN 1988).

Bei *Lecidea sciatriapha* wurde die Temperaturabhängigkeit der Photosynthese bis +10 °C untersucht. Die Lage der Temperaturoptima, bei niedrigen Lichtintensitäten deutlich unter dem Gefrierpunkt und bei hohen Lichtintensitäten bei annähernd +5 °C, zeigt eine gute Anpassung an das Temperaturregime für die epilithische Krustenflechte, das von ihrem Substrat beeinflusst wird. KAPPEN *et al.* (1998) konnten bei *Buellia frigida* in der kontinentalen Antarktis zeigen, dass die Substrat- und die Thallus-

temperatur sich bei hohen Lichtintensitäten um 19 K über die Lufttemperatur erwärmen, während der Thallus noch durch Schmelzwasser befeuchtet war.

Die Lichtkompensationspunkte waren mit 60 bis 80  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD wenig höher als es für eine an das Lichtklima unter Schnee, d.h. an Schwachlicht, angepasste Flechte erwartet wurde. Die gemessenen Nettophotosyntheseraten von *L. sciatrapha* waren höher als bei *in situ* Messungen KAPPEN *et al.* (1990b). Sie betragen jedoch nur ca. ein Zehntel der Raten antarktischer Nabelflechten (SANCHO *et al.* 1997a, SCHROETER *et al.* 1997a).

Die maximalen Photosyntheseraten von *L. sciatrapha* waren nur wenig höher als die Dunkelatemungsraten bei den jeweiligen Temperaturen. Dagegen waren die maximalen Nettophotosyntheseraten von *Himantormia lugubris* bei den untersuchten Temperaturen deutlich höher als die Dunkelatemungsraten.

### **Ökologische Bilanz an Standorten unterschiedlicher Schneebedeckung**

Die Parameter Licht, Temperatur und Wassergehalt beeinflussen die saisonale Kohlenstoffbilanz. In diesen Untersuchungen ergaben sich an den verschiedenen Standorten, bedingt durch die Schneebedeckung, deutliche Unterschiede im Jahresgang des Mikroklimas.

Um die Bedeutung der unterschiedlich langen Schneebedeckung für die Primärproduktion an den verschiedenen Standorten zu charakterisieren, wurde die potentielle Primärproduktion für *Himantormia lugubris*, *Lecidea sciatrapha* und *Usnea aurantiaco-atra* an den verschiedenen Standorten berechnet.

Dazu wurde für *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha* aus den berechneten Licht- und Temperaturkurven der  $\text{CO}_2$ -Gaswechselfmessungen (vgl. Kap. 5.5.4) jeweils ein Reaktionsmodell der Photosynthese erstellt (vgl. SCHROETER 1991, SCHROETER *et al.* 1995). Anhand dieser Photosynthesemodelle wurde aus den jeweiligen Halbstundenmittel der Thallustemperaturen und der PPFD-Werte die potentielle Primärproduktion von *Himantormia lugubris* und *Lecidea sciatrapha* für die drei verschiedenen Mikroklima-Standorten berechnet. Mit Hilfe der registrierten Schneedaten, wurde die Primärproduktion für den Zeitraum der Schneebedeckung und für die Aperaturzeit getrennt kalkuliert.

Um die potentielle Primärproduktion von *Usnea aurantiaco-atra* für diese drei Standorte zu berechnen, wurde ein von SCHROETER (1997) erstelltes Reaktionsmodell der Photosynthese verwendet (vgl. GREEN *et al.* 1999).

Das Photosynthesemodell für *Himantormia lugubris* berücksichtigt nur den Temperaturbereich von  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , daher wurden alle höheren Thallustemperaturen gleich  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  und alle tieferen Temperaturen gleich  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  gesetzt. Bei *Lecidea sciatrapha* entsprechend auf  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bzw.  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Das Photosynthesemodell für *Usnea aurantiaco-atra* wurde für den Bereich von  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$  entwickelt (SCHROETER 1997).

Da die Modelle für optimale Wassergehalte berechnet wurde, gelten die Werte als potentielle Primärproduktion. Die Modelle werden den  $\text{CO}_2$ -Gaswechsel während Zeiten suboptimaler aber auch supraoptimaler Wassergehalte, die eine Depression der Photosynthese hervorrufen können, überschätzen. Mit diesem Modell kann daher nur die Primärproduktion abgeschätzt, die potentiell möglich wäre, wenn die Flechten während der gesamten Zeit einen optimalen Wassergehalt hätten. In den vorangegangenen Kapiteln konnte einerseits der Einfluss der Schneebedeckung auf das Licht- und Temperaturklima gezeigt werden und andererseits, dass für alle Flechten unter dem Schnee ausreichend Wasser verfügbar ist, um den Metabolismus zu aktivieren. Daher können die berechneten Werte einen guten Anhaltspunkt geben, inwieweit die Schneedecke hinsichtlich der Kohlenstoffbilanz einen fördernden oder hemmenden Faktor darstellt. Lediglich für das Mikroklima von *Lecidea sciatrapha* liegen keine Daten vor.

Die jährliche Potentielle Primärproduktion der drei Arten an den drei Standorten zeigt deutlich den Einfluss der Schneebedeckung auf die Kohlenstoffbilanz (Tabelle 7.1).

Die Kuppe stellt für alle drei Arten den günstigsten Standort dar, in der nahezu 6 Monate schneebedeckten Senke dagegen sind die mikroklimatischen Bedingungen am ungünstigsten.

*Himantormia lugubris*, die in der Senke fehlt, ist gut an ihren Standort in der Hangmitte angepasst. Zwar ist unter einer Schneedecke die Kohlenstoffbilanz negativ, jedoch wären die erzielbaren Gewinne in der Aperiode deutlich höher als die Verluste.

*Lecidea sciatrapha* könnte nach der berechneten potentiellen Primärproduktion nur an dem Standort auf der Kuppe eine positive  $\text{CO}_2$ -Bilanz haben und hätte nach dem Modell unter einer langandauernden Schneedecke die schlechteste Bilanz.

*Usnea aurantiaco-atra* ist sehr gut an die klimatischen Bedingungen auf der Kuppe Standorte angepasst. Sie könnte 1997 an ihrem Standort auch unter Schnee eine positive Bilanz erzielen. Dies kommt durch die geringe Schneeeauflage im Oktober und November 1997 zustande, die im Vorjahr fehlte. Auf Kuppe wurde 1996 fast nur

**Tabelle 7.1:** Potentielle Primärproduktion von *Himantormia lugubris* und *Usnea aurantiaco-atra* ( $\text{mg CO}_2 \text{ g Tg}^{-1}$ ) sowie *Lecidea sciatrapha* ( $\text{mg CO}_2 \text{ dm}^{-2}$ ) für die verschiedenen Standorte. (Senke: Mikroklimadaten von *Sanionia uncinata*, Hangmitte Mikroklimadaten von *Himantormia lugubris*, Kuppe: Mikroklimadaten von *Usnea aurantiaco-atra*) (\* für 1997 wurde die Schneebedeckung bis zum 19. November gemessen)

Standort	<i>Himantormia lugubris</i>		<i>Lecidea sciatrapha</i>		<i>Usnea aurantiaco-atra</i>	
	1996	1997*	1996	1997*	1996	1997*
Senke						
Aper	32,38	54,72	0,12	165,42	288,83	259,00
schneebedeckt	-78,41	-66,04	-426,50	-409,09	-83,70	-59,25
Gesamt	<b>-46,03</b>	<b>-11,32</b>	<b>-426,38</b>	<b>-243,67</b>	<b>205,14</b>	<b>199,74</b>
Hangmitte						
Aper	76,48	79,37	126,33	169,78	445,89	417,60
schneebedeckt	-27,74	-32,85	-180,30	-235,31	-22,27	-15,25
Gesamt	<b>48,74</b>	<b>46,52</b>	<b>-53,98</b>	<b>-65,53</b>	<b>423,62</b>	<b>402,35</b>
Kuppe						
Aper	74,86	75,05	183,72	170,32	490,32	385,70
schneebedeckt	-16,52	-25,11	-115,93	-152,45	-9,98	10,07
Gesamt	<b>58,35</b>	<b>49,94</b>	<b>67,79</b>	<b>17,87</b>	<b>480,35</b>	<b>395,77</b>

während der Wintermonate eine Schneeauflage registriert. In dieser Zeit war somit zwar Wasser verfügbar, aber die Photosynthese Licht limitiert.

Nur *U. aurantiaco-atra*, die ebenfalls nur im höher gelegenen Transektbereich (ab der Hangmitte) oder auf den Oberseiten der Geröllblöcke vorkam, könnte in der Senke bei optimalen Wassergehalten während der Aperzeit die negative  $\text{CO}_2$ -Bilanz unter der Schneedecke ausgleichen. Doch an diesem Standort wäre für sie die  $\text{CO}_2$ -Bilanz ca. zehnmal negativer als an dem Standort auf der Kuppe.

Die schlechteste Kohlenstoffbilanz in der Senke wurden für alle Arten im Oktober 1996 ermittelt, d.h. in der Zeit, als unter der hohen Schneedecke die Temperatur konstant bei ca.  $0^\circ\text{C}$  lag.

Es wurde damit deutlich, dass alle drei Flechtenarten 1996 an jedem Standort in der Zeit mit Schneebedeckung eine negative  $\text{CO}_2$ -Bilanz hätten. In dieser Zeit wird das Licht zum begrenzenden Faktor.

Da *U. aurantiaco-atra* deutlich niedrigere Lichtkompensationspunkte hat als *H. lugubris* und *L. sciatrapha* (SCHROETER 1997), hätte sie auch im Verhältnis zur Aperzeit die geringsten  $\text{CO}_2$ -Verluste unter dem Schnee.

Die potentielle Primärproduktion von *U. aurantiaco-atra* beträgt etwa das zehnfache von *H. lugubris*. Das gleiche Verhältnis für beide Arten fanden KAPPEN & REDON (1987) für die potentielle tägliche Primärproduktion.

Für *Usnea antarctica* wurde für 11 Monate eine potentielle Primärproduktion von  $323 \text{ mg CO}_2 \text{ g Tg}^{-1}$  berechnet (SCHROETER *et al.* 1995). Dieser Wert ist der potentiellen Primärproduktion von *U. aurantiaco-atra* vergleichbar.

Aufgrund lichenometrischer Messungen und direkter Gewichtszunahme schätzte (HOOKER 1980) eine jährliche Produktion von  $40 - 150 \text{ mg CO}_2 \text{ g Tg}^{-1}$  für *U. antarctica* und  $35 \text{ mg CO}_2 \text{ g Tg}^{-1}$  für *U. aurantiaco-atra*. Dies stimmt mit den Ergebnissen von SCHROETER (1997) überein, der unter Berücksichtigung der Zeiten metabolischer Aktivität, für *Usnea aurantiaco-atra* an einem Küstenfelsen auf Livingston Island für drei Jahre eine Kohlenstoffbilanz von nur etwa  $+118 \text{ mg CO}_2 \text{ g Tg}^{-1}$  berechnete. In diesen Langzeitstudien wurde ferner gezeigt, dass Flechten auch während des Winters photosynthetisch aktiv sein können, jedoch zwischen April und September, wenn das Licht limitierend ist, es zu einer negativer  $\text{CO}_2$ -Bilanz kommen kann (SCHROETER 1997, SCHROETER *et al.* 2000). SANCHO *et al.* (1997a, 1997b) berechneten für die kosmopolitischen Flechtenarten *Pseudephebe pubescens*, *Parmelia saxatilis* und *Umbilicaria nylanderiana* negative  $\text{CO}_2$ -Bilanzen während des antarktischen Sommers. Daher werden die Übergangsjahreszeiten (Frühling/Frühsummer und Herbst) als die wichtigsten Jahreszeiten für die Primärproduktion von Flechten interpretiert, wenn Wasser verfügbar und die Lichtintensität hoch genug ist, um positive Photosyntheseraten zu erzielen (KAPPEN & SCHROETER 1997, SCHROETER *et al.* 1997b).

Während sich für die untersuchten Flechten unter einer Schneedecke eine negative Kohlenstoffbilanz ergab, errechneten COLLINS & CALLAGHAN (1980) dagegen für *Sanionia uncinata* eine  $\text{CO}_2$  Nettofixierung von  $40,945 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$  über einen Zeitraum von 70 Tagen, in dem sich das Moos bei  $-2,5$  bis  $0^\circ\text{C}$  unter 5 bis 10 cm dickem Eis befand. Andererseits kann aufgrund hoher Respirationsraten (DAVIS & HARRISSON 1981) auch für von *Sanionia uncinata* an dem Standort in der Senke eine negative  $\text{CO}_2$ -Bilanz während des Frühjahrs angenommen werden. Da der Standort jedoch auch im Sommer gut wasserversorgt ist, sollte dies während der Aperaturzeit ausgeglichen werden können. Die maximalen Photosyntheseraten von *S. uncinata* liegen mit fast  $8 \text{ mol CO}_2 \text{ kg Tg}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (DAVIS & HARRISSON 1981) deutlich höher als die von *Usnea*

*aurantiaco-atra*, *U. antarctica* (SCHROETER 1991, 1997) oder *Himantormia lugubris* (KAPPEN & REDON 1987, diese Arbeit).

*Lecidea sciatriapha* kommt in der Senke, einem Standort mit hoher und lang anhaltender Schneebedeckung, in den unteren Bereichen von Geröllblöcken aber auch auf Frostschutt vor (vgl. Kap. 6.3.2). Aus den vorhandenen Daten lässt sich eine Chionophilie dieser Flechtenart nicht ableiten. Es ist jedoch zu vermuten, dass sich das Mikroklima von *L. sciatriapha* von dem von *Sanionia uncinata* unterscheidet. Um dies zu klären, wären weitere Messungen, möglichst als Kombination von Mikroklimauntersuchungen und Aktivitätsmessungen, sinnvoll.

## 7.6 Zusammenfassende Diskussion

In dieser Arbeit konnten kleinräumige Variationen des Vegetationsmusters mit der Dauer und Höhe der Schneebedeckung über das ganze Jahr in Beziehung gesetzt werden. Dabei zeigte sich in dem untersuchten Transekt auf der Potter-Halbinsel, dass die Artenzahl mit zunehmender Dauer der Schneebedeckung abnahm. Solche Zusammenhänge wurden auch in der arktischen und alpinen Vegetation entlang kleinräumiger Gradienten, aber auch über große Distanzen beobachtet (ELVEBAKK 1984, EDLUND & ALT 1989, WALKER *et al.* 1993, STANTON *et al.* 1994). Dabei beeinflusst die Schneedecke indirekt die Verbreitung verschiedener Pflanzenarten, indem sie die Länge der Vegetationsperiode limitiert (WALKER *et al.* 1993, CALLAGHAN & JONASSON 1995). Auch für die maritime Antarktis kamen GREMMEN *et al.* (1994) zu dem Schluss, dass die Länge der Vegetationsperiode der möglicherweise wichtigste Faktor ist, der die Artenzusammensetzung der Kryptogamengemeinschaften beeinflusst.

Es konnte in diesen Untersuchungen ebenfalls ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Vegetationsgemeinschaften und der Dauer der Schneebedeckung festgestellt werden. Würde der Zeitraum als Vegetationsperiode betrachtet, in dem die Untersuchungsstandorte vom Frühjahr bis zum Herbst schneefrei waren, so dauerte sie im vegetationsfreien Transekt 2 nur ca. 50 Tage. Dies könnte eine mögliche Ursache für das Fehlen makroskopischer Vegetation sein. BENEDICT (1990a) konnte in der Colorado Front Range einen sogenannten „snow-kill“ von Flechten beobachten, die länger als 282 - 299 Tage kontinuierlich schneebedeckt waren (Vegetationsperiode ca. 75 Tage).

Als Ursache für den snow-kill werden substantielle Respirationsverluste angenommen, die gerade im Frühjahr auftreten können, wenn unter der Schneedecke bei milden Temperaturen ausreichend Schmelzwasser zur Verfügung steht, um den Metabolismus der Kryptogamen zu aktivieren (GANNUTZ 1970, BENEDICT 1990b, 1991, 1993).

Bei einer doppelt so langen Vegetationsperiode (ca. 130 Tage) in der Senke des untersuchten Transekts dominierte das Moos *Sanionia uncinata*. Strauchflechten wie *Usnea aurantiaco-atra* und *Himantormia lugubris* traten nur auf, wenn die Schneeauflage selten mehr als 10 cm betrug ( $\leq 30$  Tage). Erst auf der Kuppe mit einer Vegetationsperiode von ca. 220 Tagen waren sie bestandesbildend. Da für die poikilohydrischen Kryptogamen die Dauer der Vegetationsperiode wesentlich vom Wasserfaktor beeinflusst wird, wird die Vegetationsperiode auf der windexponierten Kuppe jedoch deutlich kürzer sein.

In den hohen Breiten müssen die Pflanzen in einer sehr kurzen Vegetationsperiode eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz erzielen, um zu Überleben (CRAWFORD *et al.* 1993). In der maritimen Antarktis herrschen dabei extreme Bedingungen vor, da hier im Vergleich zum arktisch-alpinen Raum während der Vegetationsperiode nicht so hohe Lufttemperaturen erreicht werden. Zudem dauert in einem großen Teil der maritimen Antarktis (nördlich des Polarkreises) auch im Dezember die tägliche „Dunkelphase“ mindestens 5,5 h (SANCHIO *et al.* 1997a), während in der Arktis den Pflanzen 24 Stunden Licht für die Photosynthese zur Verfügung steht (CALLAGHAN & JONASSON 1995).

Bei den in dieser Arbeit untersuchten Flechtenarten reichte die Wasseraufnahme unter Schnee im Frühjahr aus, um den CO<sub>2</sub>-Gaswechsel zu reaktivieren. Die exponentielle Abnahme der Transmission durch den Schnee bewirkt aber, dass besonders eine länger andauernde Bedeckung mit mehr als 10 cm Schnee einen limitierenden Faktor für die Primärproduktion darstellt. So würde bei *Usnea aurantiaco-atra* und *Himantormia lugubris* eine langanhaltende Schneebedeckung zu einer negativen CO<sub>2</sub>-Bilanz führen. Schneehöhen zwischen 2 und 5 cm, bei denen meist noch die Thallusspitzen aus dem Schnee herausragen, reduzieren den Lichtgenuss für die Strauchflechten dagegen nur unwesentlich (WINKLER *et al.* 2000). So können Flechten unter einer dünnen Schneeauflage bei hoher Einstrahlung positive Nettophotosyntheseraten erreichen (SOMMERKORN 1993, KAPPEN & BREUER 1991, KAPPEN *et al.* 1995). Dies zeigt die Bedeutung des Schnees als Wasserquelle in der Antarktis (KAPPEN 1993a).



Die inzwischen diskutierte globale Erwärmung der Erdatmosphäre könnte in den hohen Breiten zu einer Abnahme der Schneebedeckung führen (CALLAGHAN & JONASSON 1995). Auf Spitzbergen wurde gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Wintertemperaturen und ein früheres Einsetzen des Abtauprozesses bereits zu einer Veränderung der Artenzusammensetzung führte (CRAWFORD *et al.* 1993). Die globale Erwärmung kann nicht nur zu milderem Wintern führen, sondern damit auch zu häufigeren Gefrier-Tau-Zyklen (CALLAGHAN & JONASSON 1995). Die fehlende Isolation durch eine Schneedecke kann somit eine erhöhte Belastung für die Vegetation darstellen. Es könnte daher auch in der maritimen Antarktis zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung kommen. Dabei muss jedoch wiederum die Abhängigkeit der Kryptogamen vom Wasserfaktor betont werden. An einigen Standorten in der maritimen Antarktis wurde schon eine schnelle Ausdehnung der Populationen der beiden Gefäßpflanzen beobachtet und mit der Temperaturerhöhung korreliert (FOWBERT & SMITH 1994, SMITH 1994).

## 8 LITERATUR

- AASLYNG, J.M., ROSENQUIST, E., HOGH-SCHMIDT, K. (1999): A sensor for microclimatic measurement of photosynthetically active radiation in a plant canopy. *Agric. For. Meteorol.* **96**: 189-197.
- ARNON, D.I. (1949): Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* **24**: 1-15.
- AUSTIN, M.P. (1976): On non-linear species response models in ordination. *Vegetatio* **33**: 33-41.
- BALL, J.T. (1987): Calculations related to gas exchange. In: Zeiger, E., Farquhar, G.D. & Cowan, I.R. (eds.): Stomatal function. Stanford University Press, Stanford, CA. 445-476.
- BARANSKI, A. & GRABIEC, J. (1989): Meteorological data from Polish Antarctic Station "H. Arctowski" for 1988. *Pol. Polar Res.* **10**: 255-258.
- BARSCHE, D., BLÜMEL, W.-D., FLÜGEL, W.-A., MAUSBACHER, R., STÄBLEIN, G., ZICK, W. (1985): Untersuchungen zum Periglazial auf der König-Georg-Insel Südshetlandinseln / Antarktika. *Ber. Polarforsch.* **24**: 1-75.
- BARSCHE, D. & STÄBLEIN, G. (1984): Frostdynamik und Permafrost in eisfreien Gebieten der Antarktischen Halbinsel. *Polarforschung* **54**: 111-119.
- BARTON, C.M. (1965): The geology of the South Shetland Islands. III. The stratigraphy of King George Island. *Brit. Ant. Surv. Sci. Rep.* **44**: 1-33.
- BENEDICT, J.B. (1990a): Lichen mortality due to late-lying snow: Results of a transplant study. *Arct. Alp. Res.* **22**: 81-89.
- BENEDICT, J.B. (1990b): Experiments on lichen growth. I. Seasonal patterns and environmental controls. *Arct. Alp. Res.* **22**: 244-254.
- BENEDICT, J.B. (1991): Experiments on lichen growth. II. Effects of a seasonal snow cover. *Arct. Alp. Res.* **23**: 189-199.
- BENEDICT, J.B. (1993): A 2000-year lichen-snowkill chronology for the Colorado Front Range, USA. *The Holocene* **3**: 27-33.
- BEWLEY, D. (1979): Physiological aspects of desiccation tolerance. *Ann. Rev. Plant Physiol.* **30**: 195-238.
- BIRKENMAJER, K. (1980): Geology of Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands) - an outline. *Pol. Polar Res.* **1**: 29-54.
- BIRKENMAJER, K. (1989): A guide to tertiary geochronology of King George Island, West Antarctica. *Pol. Polar Res.* **10**: 555-579.
- BIRKENMAJER, K., FRANCALACI, L., PECCERILLO, A. (1991): Petrological and geochemical constraints on the genesis of mesozoic-cenozoic magnetism of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarctic Sci.* **3**: 293-308.
- BLÜMEL, W.D. (1984): Zur Natur der West-Antarktis. *Fredericiana* **35**: 65-88.
- BLÜMEL, W.D., EMMERMANN, R., SMYKATZ-KLOSS, W. (1985): Vorkommen und Entstehung von tri-oktaedrischen Smektiten in den Basalten und Böden der König-Georg-Insel (S-Shetlands/West-Antarktis). *Polarforschung* **55**: 33-48.
- BÖLTER, M., BLUME, H.-P., KAPPEN, L. (1995; ersch. 1997): Bodenbiologische Untersuchungen in der maritimen und kontinentalen Antarktis (King George Island und Windmill Islands). Teil 1. Umweltparameter und anorganische Nährstoffe. *Polarforschung* **65**: 41-61.
- BÖLTER, M., BLUME, H.-P., SCHNEIDER, D., BEYER, L. (1997): Soil properties and distribution of invertebrates and bacteria from King George Island (Arctowski Station), maritime Antarctic. *Polar Biol.* **18**: 295-304.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1951): Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. Wien, Springer-Verlag. 631 pp.
- BRAY, J.R. & CURTIS, J.T. (1957): An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecol. Monogr.* **27**: 325-349.
- BROWN, D.H. (1980): Notes on the instability of extracted chlorophyll and a reported effect of ozone on lichen algae. *Lichenologist* **12**: 151-154.
- BROWN, D.H. & HOOKER, T.N. (1977): The significance of acidic lichen substances in the estimation of chlorophyll and phaeophytin in lichens. *New Phytol.* **78**: 617-624.
- BÜDEL, B. & LANGE, O.L. (1991): Water status of green and blue-green phycobionts in lichen thalli after hydration by water vapor uptake: Do they become turgid? *Botanica Acta* **104**: 361-366.

- CAEMMERER, S. V. & FARQUHAR, G.D. (1981): Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* **153**: 376-387.
- CALLAGHAN, T.V. & JONASSON, S. (1995): Arctic terrestrial ecosystems and environmental change. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **352**: 259-276.
- CASTELLO, M. & NIMIS, P.L. (1997): Diversity of lichens in Antarctica. In: Battaglia, B., Valencia, J. & Walton, D.W.H. (eds.): Antarctic communities. Species, structure and survival. Cambridge University Press, Cambridge. 15-21.
- CHOW, T.L. (1992): Performance of an ultrasonic level sensing system for automated monitoring of snowcover depth. *Agric. For. Meteorol.* **62**: 75-85.
- CLARKE, K.R. & WARWICK, R.M. (1994): Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. UK, Natural Environment Research Council. 144 pp.
- COLLINS, N.J. (1976): The development of moss-peat banks in relation to changing climate and ice cover on Signy Island in the maritime Antarctic. *Brit. Ant. Surv. Bull.* **43**: 85-102.
- COLLINS, N.J. & CALLAGHAN, T.V. (1980): Predicted patterns of photosynthetic production in maritime Antarctic mosses. *Ann. Bot.* **45**: 601-620.
- CRAWFORD, R.M.M. (1997): Habitat fragility as an aid to long-term survival in arctic vegetation. In: Woodin, S.J. & Marquiss, M. (eds.): Ecology of Arctic environments. Blackwell Science, Oxford. 113-136.
- CRAWFORD, R.M.M., CHAPMAN, H.M., ABBOTT, R.J., BALFOUR, J. (1993): Potential impact of climatic warming on arctic vegetation. *Flora* **188**: 367-381.
- CREVELD, M. (1981): Epilithic lichen communities in the Alpine zone of Southern Norway. *Bibl. Lichenol.* **17**: 1-287.
- CURL, H., HARDY, J.T., ELLERMEIER, R. (1972): Spectral absorption of solar radiation in alpine snowfields. *Ecology* **53**: 1189-1194.
- DAVEY, M.C. (1997): Effects of physical factors on photosynthesis by the Antarctic liverwort *Marchantia berteroaana*. *Polar Biol.* **17**: 219-227.
- DAVEY, M.C. & ROTHERY, P. (1996): Seasonal variation in respiratory and photosynthetic parameters in three mosses from the maritime Antarctic. *Ann. Bot.* **78**: 719-728.
- DAVEY, M.C. & ROTHERY, P. (1997): Interspecific variation in respiratory and photosynthetic parameters in Antarctic bryophytes. *New Phytol.* **137**: 231-240.
- DAVEY, M.C., PICKUP, J., BLOCK, W. (1992): Temperature variation and its biological significance in fellfield habitats on a maritime Antarctic island. *Antarctic Sci.* **4**: 383-388.
- DAVIS, R.C. & HARRISSON, P.M. (1981): Prediction of photosynthesis in maritime Antarctic mosses. *Colloque sur les Ecosystèmes subantarctiques. C.N.F.R.A.* **51**: 241-247.
- DAY, W. (1985): Water vapour measurement and control. In: Marshall, B. & Woodward, F.I. (eds.): Instrumentation for environmental physiology. Cambridge University Press, Cambridge. 59-78.
- DIERSCHKE, H. (1994): Pflanzensoziologie. Stuttgart, Eugen Ulmer GmbH. 683 pp.
- DIERBEN, K. (1990): Einführung in die Pflanzensoziologie (Vegetationskunde). Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 241 pp.
- DODGE, C.W. (1973): Lichen flora of the Antarctic continent and adjacent islands. Canaan, New Hampshire, Phoenix Publishing. 399 pp.
- EDLUND, S.A. & ALT, B.T. (1989): Regional congruence of vegetation and summer climate patterns in the Queen Elizabeth Islands, Northwest Territories, Canada. *Arctic* **42**: 3-23.
- ELVEBAKK, A. (1984): Vegetation pattern and ecology of siliceous boulder snow beds on Svalbard. *Polarforschung* **54**: 9-20.
- FABISZEWSKI, J. & WOJTUN, B. (1993): Peat-forming vegetation. In: Rakusa-Suszczewski, S. (ed.): The Maritime Antarctic ecosystem of Admiralty Bay. Polish Academy of Sciences, Warsaw. 189-195.
- FALK, K. (1990): Photosyntheseleistung ausgewählter Flechten der Antarktis und spanischer Hochgebirgsstandorte - ein Vergleich. Diplomarbeit Universität Kiel. 118 pp.
- FIELD, J.G., CLARKE, K.R., WARWICK, R.M. (1982): A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **8**: 37-52.

- FOWBERT, J.A. & SMITH, R.I.L. (1994): Rapid population increases in native vascular plants in the Argentine Islands. *Arct. Alp. Res.* **26**: 290-296.
- FRIEDMANN, E.I. & MCKAY, C.P. (1985): A method for continuous monitoring of snow: Application to the cryptoendolithic microbial community of Antarctica. *Antarctic Journal U.S.* **20**: 179-181.
- FRIEDMANN, E.I., MCKAY, C.P., NIENOW, J.A. (1987): The cryptoendolithic microbial environment in the Ross Desert of Antarctica: Satellite-transmitted continuous nanoclimate data, 1984-1986. *Polar Biol.* **7**: 273-287.
- FURMANCZYK, K. & OCHYRA, R. (1982): Plant communities of the Admiralty Bay region (King George Island, South Shetland Islands, Antarctic) I. Jasnorzewski Gardens. *Pol. Polar Res.* **3**: 25-39.
- GANNUTZ, T.P. (1970): Photosynthesis and respiration of plants in the Antarctic Peninsula area. *Antarctic Journal U.S.* **5**: 49-52.
- GAUCH, H.G. & WENTWORTH, T.R. (1976): Canonical correlation analysis as an ordination technique. *Vegetatio* **33**: 17-22.
- GIMINGHAM, C.H. (1967): Quantitative community analysis and bryophyte ecology on Signy Island. *Phil. Transact. Roy. Soc. London, Ser. B* **252**: 251-259.
- GIMINGHAM, C.H. & SMITH, R.I.L. (1970): Bryophyte and lichen communities in the maritime Antarctic. In: Holdgate, M.W. (ed.) *Antarctic Ecology*. Academic Press, London. 752-785.
- GLAVAC, V. (1996): *Vegetationsökologie*. Jena, Stuttgart, Lübeck, Ulm, Gustav Fischer. 358 pp.
- GONERA, P. & RACHLEWICZ, G. (1997): Snow cover in the vicinity of Arctowski Station, King George Island, in winter 1991. *Polish Polar Record* **18**: 3-14.
- GOODSIN, B.E., FERGUSON, H.L., MCKAY, G.A. (1981): Measurements and data analysis. In: Gray, D.M. & Male, D.H. (eds.): *Handbook of snow: Principles, Processes, Management and use*. Pergamon Press, Toronto. 191-274.
- GREEN, T.G.A. & LANGE, O.L. (1995): Photosynthesis in poikilohydric plants: A comparison of lichens and bryophytes. In: Schulze, E.-D. & Caldwell, M.C. (eds.): *Ecophysiology of Photosynthesis*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York. 319-341.
- GREEN, T.G.A., SCHROFFER, B., SANCIO, L.G. (1999): Plant life in Antarctica. In: Pugnaire, F.I. & Valladares, F. (eds.): *Handbook of functional plant ecology*. Marcel Deller, Inc., New York, Basel. 495-543.
- GREENE, S.W., GREENE, D.M., BROWN, P.D., PACEY, J.M. (1970): Antarctic moss flora. I. The genera *Andreaea*, *Pohlia*, *Polytrichum*, *Psilopilum* and *Sarconeurum*. *Brit. Ant. Surv. Sci. Rep.* **64**: 1-118.
- GREMME, N.J.M., HUISKES, A.H.L., FRANCKE, J.W. (1994): Epilithic macrolichen vegetation of the Argentine Islands, Antarctic Peninsula. *Antarctic Sci.* **6**: 463-471.
- GUBLER, H. (1981): An inexpensive remote snow-depth gauge based on ultrasonic wave reflection from the snow surface. *J. Glaciol.* **27**: 157-163.
- HAWKES, D.D. (1961): The geology of the South Shetland Islands. I. The petrology of King George Island. *Falkland Islands Dependencies Survey Sci. Rep.* **26**: 1-28.
- HOCHSCHILD, V. (1995): Geomorphologische Kartierung und Untersuchung der Aufwinddynamik mit ERS-1-SAR-Daten im Bereich der Antarktischen Halbinsel. *Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung* **28**: 1-160.
- HOCHSCHILD, V. & STÄBLEIN, G. (1998): Geomorphologische Kartierung der Potter-Halbinsel (King George Island) mit optischen Fernerkundungsdaten und ERS-1-SAR-Daten. In: Goßmann, H. (ed.) *Patagonien und Antarktis - Geofernerkundung mit ERS-1-Radarbildern*. Justus Perthes Verlag, Gotha. 101-117.
- HOLDEN, M. (1965): Chlorophylls. In: Goodwin, T.W. (ed.) *Chemistry and biochemistry of plant pigments*. Academic Press, London. 461-488.
- HOLDGATE, M.W. (1964): Terrestrial ecology in the maritime Antarctic. In: Carrick, R., Holdgate, M.W. & Prévost, J. (eds.): *Biologie antarctique*. Hermann, Paris. 181-194.
- HOLDGATE, M.W. (1970): Vegetation. In: Holdgate, M.W. (ed.) *Antarctic Ecology*. Academic Press, London, New York. 729-732.
- HOKKER, T.N. (1980): Growth and production of *Usnea antarctica* and *U. fasciata* on Signy Island, South Orkney Islands. *Brit. Ant. Surv. Bull.* **50**: 35-49.
- HOVENDEN, M.J., JACKSON, A.E., SEPPELT, R.D. (1994): Field photosynthetic activity of lichens in the Windmill Islands oasis, Wilkes Land, continental Antarctica. *Physiol. Plantarum* **90**: 567-576.

- HUNECK, S., SAINSBURY, M., RICKARD, T.M.A., SMITH, R.J.L. (1984): Ecological and chemical investigations of lichens from South Georgia and the maritime Antarctic. *J. Hattori Bot. Lab.* **56**: 461-480.
- JACOBSEN, P. & KAPPEN, L. (1988): Lichens from the Admiralty Bay region, King George Island (South Shetland Islands, Antarctica). *Nova Hedwigia* **46**: 503-510.
- JANAC, J., CATSKY, J., JARVIS, P.G., BROWN, K.W., ECKARDT, F.E., FOCK, K., SCHAUB, H., BJÖRKMAN, O., GAUTH, E., PLETTERS, G.A. (1971): Infra-red gas analysers and other physical analysers. In: Sestak, Z., Catsky, J. & Jarvis, P.G. (eds.): Plant photosynthetic production. Manual of methods. Dr. W. Junk N.V. Publishers, The Hague. 111-197.
- JARVIS, P.G. & SANDFORD, A.P. (1985): The measurement of carbon dioxide in air. In: Marshall, B. & Woodward, F.I. (eds.): Instrumentation for environmental physiology. Cambridge University Press, Cambridge. 29-57.
- JONES, H.G. (1992): Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge, Cambridge University Press. 428 pp.
- JØRGENSEN, P.M. (1986): Makrolichens of Boutvetoya. *Norsk Polarinstitut Skrifter* **185**: 23-34.
- KALLIO, P. & HEINONEN, S. (1971): Influence of short-term low temperature on net photosynthesis in some subarctic lichens. *Rep. Kevo Subarctic Res. Stat.* **8**: 63-72.
- KAPPEN, L. (1985): Water relations and net photosynthesis of *Usnea*. A comparison between *Usnea fasciata* (maritime Antarctica) and *Usnea sulphurea* (continental Antarctica). In: Brown, D.-H. (ed.) Lichen physiology and cell biology. Plenum Press, New York and London. 41-56.
- KAPPEN, L. (1988): Ecophysiological relationships in different climatic zones. In: Galun, M. (ed.) CRC Handbook of Lichenology II. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. 37-100.
- KAPPEN, L. (1989): Field measurements of carbon dioxide exchange of the Antarctic lichen *Usnea sphacelata* in the frozen state. *Antarctic Sci.* **1**: 31-34.
- KAPPEN, L. (1993a): Plant activity under snow and ice, with particular reference to lichens. *Arctic* **46**: 297-302.
- KAPPEN, L. (1993b): Lichens in the Antarctic region. In: Friedmann, E.I. (ed.) Antarctic Microbiology. Wiley-Liss. 433-490.
- KAPPEN, L. (1999): Pflanzen und Mikroorganismen in den Polarregionen. *Naturw. Rundschau* **52**: 174-183.
- KAPPEN, L. & BREUER, M. (1991): Ecological and physiological investigations in continental Antarctic cryptogams. II. Moisture relations and photosynthesis of lichens near Casey Station, Wilkes Land. *Antarctic Sci.* **3**: 273-278.
- KAPPEN, L. & LANGE, O.L. (1972): Die Kälteresistenz einiger Makrolichenen. *Flora* **161**: 1-29.
- KAPPEN, L. & REDON, J. (1984): Microclimate influencing the lichen vegetation on different aspects of a coastal rock in the maritime Antarctic. *Ser. Cient. INACH* **31**: 53-65.
- KAPPEN, L. & REDON, J. (1987): Photosynthesis and water relations of three maritime Antarctic lichen species. *Flora* **179**: 215-229.
- KAPPEN, L. & SCHROETER, B. (1997): Activity of lichens under the influence of snow and ice. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.* **10**: 163-168.
- KAPPEN, L., MEYER, M., BÖLTER, M. (1988): Photosynthetic production of the lichen *Ramalina terebrata* Hook. f. et Tayl. in the maritime Antarctic. *Polarforschung* **58**: 181-188.
- KAPPEN, L., MEYER, M., BÖLTER, M. (1990a): Ecological and physiological investigations in continental Antarctic cryptogams. I. Vegetation pattern and its relation to snow cover on a hill near Casey Station, Wilkes Land. *Flora* **184**: 209-220.
- KAPPEN, L., SCHROETER, B., SANCHO, L.G. (1990b): Carbon dioxide exchange of antarctic crustose lichens *in situ* measured with a CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O porometer. *Oecologia* **82**: 311-316.
- KAPPEN, L., SOMMERKORN, M., SCHROETER, B. (1995): Carbon acquisition and water relations of lichens in polar regions - potentials and limitations. *Lichenologist* **27**: 531-545.
- KAPPEN, L., SCHROETER, B., SCHEIDEGGER, C., SOMMERKORN, M., HESTMARK, G. (1996a): Cold resistance and metabolic activity of lichens below 0°C. *Adv. Space Res.* **18**: 119-128.

- KAPPEN, L., SCHROETER, B., HESTMARK, G., WINKLER, J.B. (1996b): Field measurements of photosynthesis of Umbilicarius lichens in winter. *Botanica Acta* **109**: 292-298.
- KAPPEN, L., SCHROETER, B., GREEN, T.G.A., SEPPELT, R.D. (1998): Microclimatic conditions, meltwater moistening, and the distributional pattern of *Buellia frigida* on rock in a southern continental Antarctic habitat. *Polar Biol.* **19**: 101-106.
- KENNEDY, A.D. (1993a): Photosynthetic response of the Antarctic moss *Polytrichum alpestre* Hoppe to low temperatures and freeze-thaw stress. *Polar Biol.* **13**: 271-279.
- KENNEDY, A.D. (1993b): Water as a limiting factor in the Antarctic terrestrial environment: A biogeographical synthesis. *Arct. Alp. Res.* **25**: 308-315.
- KENNEDY, A.D. (1999): Modeling the determinants of species distributions in Antarctica. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* **31**: 230-241.
- KERSHAW, K.A. (1983): The thermal operating-environment of a lichen. *Lichenologist* **15**: 191-207.
- KERSHAW, K.A. (1985): Physiological ecology of lichens. Cambridge, Cambridge University Press. 293 pp.
- KHALIFE, S. & ROUX, C. (1987): L'aire minimale d'un peuplement de lichens corticoles crustacés (peuplement a *Lecanora chlorotera* et *Pertusaria leioplaca*). *Bull. Soc. linn. Provence* **38**: 247-250.
- KLÖSER, H. & ARNTZ, W.E. (1994): RASCALS (Research on Antarctic Shallow Coastal and Litoral Systems) Untersuchungen zur Struktur und Dynamik eines antarktischen Küstenökosystems. *Polarforschung* **64**: 27-41.
- KOMÁRKOVÁ, V., PONCET, S., PONCET, J. (1985): Two native Antarctic vascular plants, *Deschampsia antarctica* and *Colobanthus quitensis*: A new southernmost locality and other localities in the Antarctic Peninsula area. *Arct. Alp. Res.* **17**: 401-416.
- KOMÁRKOVÁ, V., PONCET, S., PONCET, J. (1990): Additional and revisited localities of vascular plants *Deschampsia antarctica* Desv. and *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. in the Antarctic Peninsula area. *Arct. Alp. Res.* **22**: 108-113.
- KRUSKAL, J.B. (1977): Multidimensional scaling and other methods for discovering structure. New York, Wiley.
- KUTSCH, W.L. & KAPPEN, L. (1991): Plasticity of the photosynthetic production of *Galium aparine* L. In: Esser, G. & Overdieck, D. (eds.): Modern Ecology. Elsevier, Amsterdam, London, New York, TOKYO. 113-131.
- LAMB, I.M. (1964): Antarctic lichens. I. The genera *Usnea*, *Ramalina*, *Himantormia*, *Alectoria*, *Cornicularia*. *Brit. Ant. Surv. Sci. Rep.* **38**: 1-34.
- LAMB, I.M. (1968): Antarctic lichens. II. The genera *Buellia* and *Rinodina*. *Brit. Ant. Surv. Sci. Rep.* **61**: 1-129.
- LAMB, I.M. (1970): Antarctic terrestrial plants and their ecology. In: Holdgate, M.W. (ed.) Antarctic ecology. Academic Press, London. 733-751.
- LANGE, O.L. & KAPPEN, L. (1972): Photosynthesis of lichens from Antarctica. *American Geophysical Union. Antarctic Research Series* **20**: 83-95.
- LANGE, O.L. & KILIAN, E. (1985): Reaktivierung der Photosynthese trockener Flechten durch Wasserdampfaufnahme aus dem Luftraum: Art-spezifisch unterschiedliches Verhalten. *Flora* **176**: 7-23.
- LANGE, O.L. & TENHUNEN, J.D. (1982): Water relations and photosynthesis of desert lichens. *Journ. Hattori Bot. Lab.* **53**: 309-313.
- LANGE, O.L. & ZIEGLER, H. (1986): Different limiting processes of photosynthesis in lichens. In: Marcelle, R., Clijsters, H. & Poucke, M.v. (eds.): Biological control of photosynthesis. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht. 147-161.
- LANGE, O.L., GREEN, T.G.A., ZIEGLER, H. (1988): Water status related photosynthesis and carbon isotope discrimination in species of the lichen genus *Pseudocyphellaria* with green or blue-green phycobionts and in photosymbiodemes. *Oecologia* **75**: 494-501.
- LANGE, O.L., BÜDEL, B., MEYER, A., KILIAN, E. (1993): Further evidence that activation of net photosynthesis by dry cyanobacterial lichens requires liquid water. *Lichenologist* **25**: 175-189.
- LANGE, O.L., MEYER, A., ZELLNER, H., HEBER, U. (1994): Photosynthesis and water relations of lichen soil crusts: field measurements in the coastal fog zone of the Namib Desert. *Funct. Ecol.* **8**: 253-264.

- LANGE, O.L., GREEN, T.G.A., REICHENBERGER, H., MEYER, A. (1996): Photosynthetic depression at high thallus water content in lichens: concurrent use of gas exchange and fluorescence techniques with a cyanobacterial and a green algal *Peltigera* species. *Botanica Acta* **109**: 43-50.
- LANGE, O.L., BELNAP, J., REICHENBERGER, H., MEYER, A. (1997): Photosynthesis of green algal soil crust lichens from arid lands in southern Utah, USA: role of water content on light and temperature responses of CO<sub>2</sub> exchange. *Flora* **192**: 1-5.
- LARSON, D.W. & KERSHAW, K.A. (1975a): Studies on lichen-dominated systems. XI. Lichen-heath and winter snow cover. *Can. J. Bot.* **53**: 621-626.
- LARSON, D.W. & KERSHAW, K.A. (1975b): Studies on lichen-dominated systems. XIII. Seasonal and geographical variation of net CO<sub>2</sub> exchange of *Alectoria ochroleuca*. *Can. J. Bot.* **53**: 2598-2607.
- LINDSAY, D.C. (1971): Vegetation of the South Shetland Islands. *Br. Antarct. Surv. Bull.* **25**: 59-83.
- LONGTON, R.E. (1985): Terrestrial habitats - vegetation. In: Bonner, W.N. & Walton, D.W.H. (eds.): Antarctica. Pergamon Press, Oxford. 73-105.
- LONGTON, R.E. (1988): The Biology of polar bryophytes and lichens. Cambridge, Cambridge University Press. 391 pp.
- LONGTON, R.E. (1997): The role of bryophytes and lichens in polar ecosystems. In: Woodin, S.J. & Marquiss, M. (eds.): Ecology of Arctic environments. Blackwell Science, Oxford. 69-96.
- LOSCH, R., PAUSE, R., MIES, B. (1997): Poikilohydrie und räumlich-zeitliche Existenznische von Flechten und Moosen. *Bibl. Lichenol.* **67**: 145-162.
- MAH, D.H. & GRAY, D.M. (1981): Snowcover ablation and runoff. In: Gray, D.M. & Male, D.H. (eds.): Handbook of snow: Principles, Processes, Management and use. Pergamon Press, Toronto. 360-436.
- MARCHAND, P.J. (1987): Life in the cold. An introduction to winter ecology. Hanover, London, University Press of New England. 176 pp.
- MARKER, A.F.H. & JINKS, S. (1982): The spectrophotometric analysis of chlorophyll *a* and phaeopigments in acetone, ethanol and methanol. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* **16**: 3-17.
- MARKON, C.J. (1995): History and use of remote sensing for conservation and management of Federal Lands in Alaska, USA. *Natural Areas Journal* **15**: 329-338.
- MARSHALL, B. & WOODWARD, F.I. (eds.) (1985): Instrumentation for environmental physiology. Seminar Series. Cambridge, Cambridge University Press. 241 pp.
- MÄUSBACHER, R. (1991): Die jungquartäre Relief- und Klimageschichte im Bereich der Fildeshalbinsel, Süd-Shetland-Inseln, Antarktis. *Heidelberger Geographische Arbeiten* **89**: 1-207.
- MCCREFF, K.J. (1972): Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* **10**: 443-453.
- MELICK, D.R. & SEPPELT, R.D. (1992): Loss of a soluble carbohydrates and changes in freezing point of antarctic bryophytes after leaching and repeated freeze-thaw cycles. *Antarctic Sci.* **4**: 399-404.
- MELICK, D.R. & SEPPELT, R.D. (1997): Vegetation patterns in relation to climatic and endogenous changes in Wilkes Land, continental Antarctica. *Journal of Ecology* **85**: 43-56.
- MELICK, D.R., HOVENDEN, M.J., SEPPELT, R.D. (1994): Phytogeography of bryophyte and lichen vegetation in the Windmill Islands, Wilkes Land, Continental Antarctica. *Vegetatio* **111**: 71-87.
- NIEMIEC, J. & RAWA, Z. (1989): Meteorological data from Polish Antarctic Station "H. Arctowski" for 1987. *Pol. Polar Res.* **10**: 251-254.
- NOAKES, T.D. & LONGTON, R.E. (1989): Studies on water relations in mosses from the cold-Antarctic. *Antarct. Spec. Topic*: 103-116.
- NOY-MEIR, I. & WHITTAKER, R.H. (1977): Continuous multivariate methods in community analysis: some problems and developments. *Vegetatio* **33**: 79-98.
- OBERMAYR, W. (1997): Flechten der Hochgebirge. In: Schöller, H. (ed.) Flechten. Geschichte, Biologie, Systematik, Ökologie, Naturschutz und kulturelle Bedeutung. Kramer, Frankfurt/ M. 119-127.

- OCHYRA, R. (1998): The moss flora of King George Island, Antarctica. Cracow, Poland. W. Szafer Institute of Botany. 278 pp.
- OCHYRA, R. & VANA, J. (1989a): The hepatics of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica, with particular reference to the Admiralty Bay region. *Pol. Polar Res.* **10**: 183-210.
- OCHYRA, R. & VANA, J. (1989b): The hepatics reported from the Antarctic and an outline of their phytogeography. *Pol. Polar Res.* **10**: 211-229.
- OECHTEL, W.C. & SVEINBJÖRNSSON, B. (1978): Primary production processes in arctic bryophytes at Barrow, Alaska. In: Tieszen, L.L. (ed.) *Vegetation production and production ecology of an Alaskan Arctic tundra*. Springer-Verlag, New York. 269-298.
- PATERSON, D.R., PATERSON, E.W., KENWORTHY, J.B. (1983): Physiological studies on temperate lichen species. I. A mathematical model to predict assimilation in the field, based on laboratory responses. *New Phytol.* **94**: 605-618.
- PICKARD, J. & SEPPELT, R.D. (1984): Phytogeography of Antarctica. *J. Biogeography* **11**: 83-102.
- PISEK, A., LARCHER, W., MOSER, W., PACK, I. (1969): Kardinale Temperaturbereiche der Photosynthese und Grenztemperaturen des Lebens der Blätter verschiedener Spermatophyten III. Temperaturabhängigkeit und optimaler Temperaturbereich der Nettophotosynthese. *Flora. Abt. B* **158**: 608-630.
- PONTAILLER, J.-Y. (1990): A cheap quantum sensor using a gallium arsenide photodiode. *Funct. Ecol.* **4**: 591-596.
- PROCTOR, M.C.F. (1982): Physiological ecology: water relations, light and temperature responses, carbon balances. In: Smith, A.J.E. (ed.) *Bryophyte Ecology*. Chapman and Hall, London, New York. 333-381.
- PURVIS, O.W., COPPINS, B.J., HAWKSWORTH, D.L., JAMES, P.W., MOORE, D.M. (eds.) (1994): *The lichen flora of Great Britain and Ireland*. London, Natural History Museum Publication. 710 pp.
- PUTZKE, J. & PEREIRA, B. (1990): Mosses of King George Island, Antarctica. *Pesq. antárt. bras.* **2**: 17-71.
- RIDÓN, J. (1985): *Liquenes antárticos*. Santiago de Chile, Instituto Antártico Chileno. 123 pp.
- REICHLI, G. & WILMANN, O. (1973): *Vegetationsgeographie*. Braunschweig, Georg Westermann Verlag. 210 pp.
- ROSER, D.J., MELICK, D.R., LING, H.U., SEPPELT, R.D. (1992): Polyol and sugar content of terrestrial plants from continental Antarctica. *Antarctic Sci.* **4**: 413-420.
- ROTT, H. (1990): Snow and ice in the climate system: Research problems and possibilities of remote sensing. Remote sensing and the earth's environment. Alpbach, Austria ESA: 61-75.
- SANCHO, L.G., KAPPEN, L., SCHROETER, B. (1990): Primeros datos sobre la flora y vegetación liquenica de isla Livingston (Islas Shetland del Sur, Antártida). In: *Technología, C.I.d.C.y. (ed.) Actas del Tercer Symposium Español de Estudios Antárticos*, Madrid. 94-99.
- SANCHO, L.G. & VALLADARES, F. (1993): Lichen colonization of recent moraines on Livingston Island (South Shetland I., Antarctica). *Polar Biol.* **13**: 227-233.
- SANCHO, L.G., PINTADO, A., VALLADARES, F., SCHROETER, B., SCHLENSOG, M. (1997a): Photosynthetic performance of cosmopolitan lichens in the maritime Antarctic. *Bibl. Lichenol.* **67**: 197-210.
- SANCHO, L.G., VALLADARES, F., PINTADO, A., SCHLENSOG, M., SCHROETER, B. (1997b): Comportamiento fotosintético de líquenes cosmopolitas en la Antártida marítima. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Biol.)* **93**: 113-118.
- SANCHO, L.G., SCHULZ, F., SCHROETER, B., KAPPEN, L. (1999): Bryophyte and lichen flora of South Bay (Livingston Island: South Shetland Islands, Antarctica). *Nova Hedwigia* **63**: 301-337.
- SCHIEDEGGER, C., SCHROETER, B., FREY, B. (1995): Structural and functional processes during water vapour uptake and desiccation in selected lichens with green algal photobionts. *Planta* **197**: 399-409.
- SCHIPPERGES, B. (1994): Intraspecific variations in the ecophysiology of arctic to temperate populations of the lichen *Cetraria nivalis*. Dissertation Universität Kiel. 179 pp.
- SCHLENSOG, M., SCHROETER, B., SANCHO, L.G., PINTADO, A., KAPPEN, L. (1997a): Effect of strong irradiance on photosynthetic performance of the melt-water dependent cyanobacterial lichen *Leptogium puberulum* (Collembataceae) Hue from the maritime Antarctic. *Bibl. Lichenol.* **67**: 235-246.



- SCHILNSOG, M., SCHROETER, B., SANCIO, L.G., PINTADO, A., KAPPEN, L. (1997b): Photosynthetic performance of the cyanobacterial lichen *Leptogium puberulum* Hue (Collemales) in the maritime Antarctica. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Biol.)* **93**: 105-111.
- SCHROETER, B. (1991): Untersuchungen zu Primärproduktion und Wasserhaushalt von Flechten der maritimen Antarktis unter besonderer Berücksichtigung von *Usnea antarctica* Du Rietz. Dissertation Universität Kiel. 148 pp.
- SCHROETER, B. (1994): *In situ* photosynthetic differentiation of the green algal and the cyanobacterial photobiont in the crustose lichen *Placopsis contortuplicata*. *Oecologia* **98**: 212-220.
- SCHROETER, B. (1997): Grundlagen der Stoffproduktion von Kryptogamen unter besonderer Berücksichtigung der Flechten. Habilitationsschrift Universität Kiel. 130 pp.
- SCHROETER, B. & SCHEIDFEGGER, C. (1995): Water relations in lichens at subzero temperatures: structural changes and carbon dioxide exchange in the lichen *Umbilicaria aprina* from continental Antarctica. *New Phytol.* **131**: 273-285.
- SCHROETER, B., GREEN, T.G.A., KAPPEN, L., SEPPELT, R.D. (1994): Carbon dioxide exchange at subzero temperatures. Field measurements on *Umbilicaria aprina* in Antarctica. *Cryptogamic Bot.* **4**: 233-241.
- SCHROETER, B., OLECH, M., KAPPEN, L., HILLAND, W. (1995): Ecophysiological investigations of *Usnea antarctica* in the maritime Antarctic. I. Annual microclimatic conditions and potential primary production. *Antarctic Sci.* **7**: 251-260.
- SCHROETER, B., KAPPEN, L., GREEN, T.G.A., SEPPELT, R.D. (1997a): Lichens and the Antarctic environment: Effects of temperature and water availability on photosynthesis. In: Lyons, W.B., Howard-Williams, C. & Hawes, I. (eds.): Ecosystem processes in Antarctic ice-free landscapes. Balkema, Rotterdam. 103-117.
- SCHROETER, B., KAPPEN, L., SCHULZ, F. (1997b): Long-term measurements of microclimatic conditions in the fruticose lichen *Usnea aurantiaco-atra* in the maritime Antarctic. In: Cacho, J. & Serrat, D. (eds.): Actas del V. Simposio español de estudios antárticos. CICYT (Comision interministerial de ciencia y tecnologia). Madrid, Spain. 63-69.
- SCHROETER, B., SCHULZ, F., KAPPEN, L. (1997c): Hydration-related spatial and temporal variation of photosynthetic activity in Antarctic lichens. In: Battaglia, B., Valencia, J. & Walton, D.W.H. (eds.): Antarctic communities. Species, structure and survival. Cambridge University Press, Cambridge. 221-225.
- SCHROETER, B., KAPPEN, L., SCHULZ, F., SANCIO, L.G. (2000): Seasonal variation in the carbon balance of lichens in the maritime Antarctic: long-term measurements of photosynthetic activity in *Usnea aurantiaco-atra*. In: Howard-Williams, C. & Davison, W. (eds.): Antarctic Ecosystems: Models for a wider ecological understanding. Caxton Press, Christchurch, New Zealand. in press.
- SCHULZ, F., WINKLER, J.B., KAPPEN, L. (1998): Components of terrestrial vegetation, pattern and processes. In: Wiencke, C., Ferreyra, G., Arntz, W. & Rinaldi, C. (eds.): The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica. Synopsis of research performed with the frame of the Argentinean - German cooperation at the Dallmann Laboratory and Jubany Station (King George Island, Antarctica, 1991 - 1997) *Ber. Polarforsch.* **299**: 54-58.
- SCHWERDTFEGER, P. & WELLER, G.E. (1977): Radiative heat transfer processes in snow and ice. In: Businger, J.A. (ed.) Meteorological Studies at Plateau Station, Antarctica. Antarctic Research Series 25. American Geophysical Union, Washington, D.C. 35-39.
- SCHWERDTFEGER, W. (1970): The climate of the Antarctic. In: Orvig, S. (ed.) Climates of the Polar regions. Elsevier, Amsterdam, London, New York. 253-330 (355 mit Tafeln).
- SEPPELT, R.D., GREEN, T.G.A., SCHWARZ, A.-M.L., FROST, A. (1992): Extreme southern locations for moss sporophytes in Antarctica. *Antarctic Sci.* **4**: 37-39.
- SEPPELT, R.D., SMITH, R.I.L., KANDA, H. (1998): Antarctic bryology: Past achievements and new perspectives. *J. Hattori Bot. Lab.* **84**: 203-239.
- SMELLIE, J.L., PANKHURST, R.J., THOMPSON, M.R.A., DAVIES, R.E.S. (1984): The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *Brit. Antarc. Surv. Sci. Rep.* **87**: 1-85.
- SMITH, D.C. & MOLESWORTH, S. (1973): Lichen physiology. XIII. Effects of rewetting dry lichens. *New Phytol.* **72**: 525-533.
- SMITH, R.I.L. (1972): Vegetation of the South Orkney Islands with particular reference to Signy Island. *Brit. Ant. Surv. Sci. Rep.* **68**: 1-124.

- SMITH, R.I.L. (1984): Terrestrial plant biology of the sub-Antarctic and Antarctic. In: Laws, R.M. (ed.) Antarctic ecology. Academic Press, London. 61-162.
- SMITH, R.I.L. (1988): Classification and ordination of cryptogamic communities in Wilkes Land, Continental Antarctica. *Vegetatio* **76**: 155-166.
- SMITH, R.I.L. (1990): Plant community dynamics in Wilkes Land, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.* **3**: 229-244.
- SMITH, R.I.L. (1994): Vascular plants as bioindicators of regional warming in Antarctica. *Oecologia* **99**: 322-328.
- SMITH, R.I.L. (1996): Terrestrial and freshwater biotic components of the western Antarctic peninsula. Foundations for ecological research west of the Antarctic Peninsula. Antarctic Research Series. American Geophysical Union. 15-59.
- SMITH, R.I.L. & GIMINGHAM, C.H. (1976): Classification of cryptogamic communities in the maritime Antarctic. *Br. Antarct. Surv. Bull.* **43**: 25-47.
- SMITH, R.I.L. & ØVSTEDAL, D.O. (1991): The lichen genus *Stereocaulon* in Antarctica and South Georgia. *Polar Biol.* **11**: 91-102.
- SNELGAR, W.P., GREEN, T.G.A., WILKINS, A.L. (1981): Carbon dioxide exchange in lichens: resistances to CO<sub>2</sub> uptake at different thallus water contents. *New Phytol.* **88**: 353-361.
- SOMMERKORN, M. (1993): Die Rolle der früh-jährlichen Schneebedeckung für den Kohlenstoffhaushalt von *Cetraria nivalis* (L.) Ach. und *Cetraria delisei* (Bory) Th. Fr. an einem subarktisch-alpinen Standort. Diplomarbeit Universität Bonn. 113 pp.
- SONESSON, M. (1986): Photosynthesis in lichen populations from different altitudes in swedish lapland. *Polar Biol.* **5**: 113-124.
- SONESSON, M., SCHIPPERGES, B., CARLSSON, B.Å. (1992): Seasonal patterns of photosynthesis in alpine and subalpine populations of the lichen *Nephroma arcticum*. *OIKOS* **65**: 3-12.
- STANTON, M.L., REJMÁNEK, M., GALEN, C. (1994): Changes in vegetation and soil fertility along a predictable snowmelt gradient in the mosquito range, Colorado, USA. *Arct. Alp. Res.* **26**: 364-374.
- STENROOS, S. (1993): Taxonomy and distribution of the lichen family Cladoniaceae in the Antarctic and peri-Antarctic regions. *Cryptogamic Bot.* **3**: 310-344.
- SVEINBJÖRNSSON, B. & OECHEL, W.C. (1992): Controls on growth and productivity of bryophytes: environmental limitations under current and anticipated conditions. In: Bates, J.W. & Farmer, A.M. (eds.): Bryophytes and lichens in a changing environment. Clarendon Press, Oxford. 77-102.
- TEARLE, P.V. (1987): Cryptogamic carbohydrate release and microbial response during spring freeze-thaw cycles in Antarctic fellfield fines. *Soil Biol. Biochem.* **19**: 381-390.
- TURNER, J., LACHLAN-COPE, T.A., THOMAS, J.P., COLWELL, S.R. (1995): The synoptic origins of precipitation over the Antarctic Peninsula. *Antarctic Sci.* **7**: 327-337.
- UNWIN, D.M. (1980): Microclimate measurements for ecologists. London, Academic Press. 97 pp.
- VON WILLERT, D.J., MATYSSEK, R., HERPPICH, W. (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. Stuttgart, New York, Georg Thieme Verlag. 344 pp.
- WALKER, F.J. (1985): The lichen genus *Usnea* subgenus *Neuropogon*. *Bull. Brit. Mus. Bot. Ser.* **13**: 1-130.
- WALKER, P., HALFPENNY, J.C., WALKER, D.M., WESSMAN, C.A. (1993): Long-term studies of snow - vegetation interactions. *Bioscience* **43**: 287-301.
- WALTON, D.W.H. (1982a): Instruments for measuring biological microclimates for terrestrial habitats in polar and high alpine regions: A review. *Arct. Alp. Res.* **14**: 275-286.
- WALTON, D.W.H. (1982b): The Signy Island terrestrial reference sites: XV. Micro-climate Monitoring, 1972-74. *Brit. Ant. Surv. Bull.* **55**: 111-126.
- WALTON, D.W.H. (1984): The terrestrial environment. In: Laws, R.M. (ed.) Antarctic ecology. Academic Press, London. 1-60.
- WALZ, H. (1991): Kompakt CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Porometer. 90 pp.
- WATTS, D.R. (1982): Potassium-Argon ages and palaeomagnetic results from King George Island, South Shetland Islands. In: Craddock, C. (ed.) Antarctic Geoscience., Madison. 255-261.

- WELLER, G. & HOLMGREN, B. (1974): The microclimates of the Arctic tundra. *J. Appl. Meteorol.* **13**: 854-862.
- WESTHOFF, V. & VAN DER MAAREL, E. (1978): The Braun-Blanquet Approach. In: Whittaker, R.H. (ed.) *Classification of plant communities*. Junk, The Hague. 287-399.
- WHITTAKER, R.H. (1967): Gradient analysis of vegetation. *Biol. Reviews* **42**: 297-264.
- WIENCKE, C., FERREYRA, G., ARNTZ, W., RINALDI, C. (1998): The Potter Cove coastal ecosystem. Antarctica. Synopsis of research performed with the frame of the Argentinean - German cooperation at the Dallmann Laboratory and Jubany station (King George Island, Antarctica, 1991 - 1997). *Ber. Polarforsch.* **299**: 326.
- WILHELM, F. (1975): *Schnee- und Gletscherkunde*. Berlin, New York, Walter de Gruyter. 434 pp.
- WINKLER, J.B., KAPPEN, L., SCHULZ, F. (2000): Snow and ice as an important ecological factor for the cryptogams in the Maritime Antarctic. In: Howard-Williams, C. & Davison, W. (eds.): *Antarctic ecosystems: Models for wider ecological understanding*. Caxton Press. in press.
- WIRTH, V. (1995): *Die Flechten Baden-Württembergs*. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer. 1006 pp.
- WUNDERLE, S. (1996): Die Schneedeckendynamik der Antarktischen Halbinsel und ihre Erfassung mit aktiven und passiven Fernerkundungsverfahren. *Freiburger Geographische Hefte* **48**: 1-172.
- ZIEGLER, R. & EGLE, K. (1965): Zur quantitativen Analyse der Chloroplastenpigmente. I. Kritische Überprüfung der spektralphotometrischen Chlorophyll-Bestimmung. *Beitr. Biol. pflanzen* **41**: 11-37.

## 9 ANHANG

**Tabelle I:** Manuell gemessene Schneehöhen an den Schneepegeln im Transekt I zwischen dem 15.06.1996 und dem 29.01.1997

**Tabelle II:** Manuell gemessene Schneehöhen an den Schaepegeln T2 B – T2 E im Transekt 2 zwischen dem 01.11.1996 und dem 24.02.1997

**Tabelle III:** Vegetationstabelle des Transekts 1. **Frequenzen** der Arten in den Aufnahmeflächen.

**Tabelle IV:** Vegetationstabelle des Transekts 1. **Deckungsgrade** der Arten in den Aufnahmeflächen.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P6a	P6b	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P17a	P17b	P17c	P18	P19	P19a	P19b	P19c	P19d	P19e	P20	P20a	P21	P21a	P22	
15.06.1996	8.5	16.0	19.0	15.5	16.0	2.5	11.0	*	10.0	27.0	32.0	13.0	8.0	6.0	10.0	21.0	3.3	2.5	3.0	2.0	8.0	3.5	1.5	17.5	5.5	10.0	*	*	*	2.5	2.0	10.0	6.0	19.0	
21.07.1996	10.5	18.0	19.0	26.5	35.0	11.5	11.0	*	16.0	26.0	41.0	23.0	8.0	3.0	1.0	2.0	3.3	3.5	7.0	1.5	16.0	3.5	3.5	20.5	13.5	18.0	5.0	1.4	15.0	10.0	14.0	6.0	15.0	29.0	
22.08.1996	5.5	17.0	19.0	25.5	36.0	10.5	16.0	*	11.0	24.5	37.0	19.5	9.0	5.0	2.0	1.5	2.3	3.5	6.0	2.0	14.0	6.5	1.5	18.5	14.5	15.0	4.0	0.9	14.0	8.0	15.0	-	14.5	28.0	
3.09.1996	21.5	47.0	58.0	62.5	32.0	28.5	36.0	*	80.0	85.0	85.0	100.0	85.0	45.0	16.0	5.0	4.3	4.5	7.0	2.0	18.0	5.5	4.5	31.5	30.5	22.0	9.5	1.4	15.0	25.0	18.0	17.0	32.0	44.5	
19.09.1996	39.0	65.0	66.0	70.5	65.0	49.5	50.0	*	90.0	85.0	85.0	100.0	107.0	67.0	23.0	8.0	8.3	4.5	14.0	3.0	21.0	5.5	6.5	49.5	33.5	42.5	15.5	2.4	17.0	32.0	23.0	36.0	41.5	61.0	
30.09.1996	-	17.4	25.5	32.5	33.0	9.9	11.0	8.5	44.5	73.5	85.0	73.5	36.0	4.0	-	-	-	0.8	-	0.5	-	0.5	-	10.5	4.5	10.0	-	-	1.0	0.5	5.0	-	13.0	18.0	
2.10.1996	5.5	16.0	25.5	32.5	36.0	12.5	18.0	12.1	44.7	72.0	85.0	73.0	36.0	6.0	1.6	-	2.3	1.8	-	1.0	8.0	2.5	1.0	10.0	5.0	8.0	2.3	0.4	3.0	2.8	4.5	1.0	13.0	21.5	
4.10.1996	4.5	16.0	25.8	32.2	34.6	12.0	15.0	12.0	43.0	70.0	85.0	72.3	36.0	5.0	-	-	-	-	-	-	2.0	2.0	-	10.1	4.7	8.2	-	-	-	2.0	3.5	1.0	11.8	17.7	
6.10.1996	14.0	16.7	26.0	32.3	35.5	12.5	16.0	12.4	44.2	71.5	85.0	72.2	36.5	6.0	1.8	3.5	1.8	1.5	2.5	1.5	5.1	3.7	2.0	16.0	8.5	13.4	3.0	7.3	3.6	10.7	4.3	4.5	20.4	21.2	
8.10.1996	12.5	16.5	25.2	32.5	36.1	12.3	19.0	19.1	45.5	73.0	85.0	74.0	38.0	7.0	1.5	1.5	2.0	1.0	1.0	1.0	7.5	2.5	0.3	11.3	4.5	3.5	2.5	1.4	3.0	3.8	4.0	3.0	17.4	20.5	
12.10.1996	8.8	16.5	23.5	33.9	36.0	11.0	16.5	17.1	44.5	70.5	85.0	72.0	35.9	6.0	0.8	*	2.3	1.5	2.4	1.0	6.0	3.0	1.0	10.5	6.5	7.7	5.5	1.4	6.0	2.5	5.0	2.2	12.5	20.4	
14.10.1996	9.5	18.8	26.0	34.0	34.0	12.3	21.0	19.4	46.0	71.0	85.0	71.3	36.7	8.5	4.5	2.5	5.3	1.0	2.0	1.5	6.0	3.5	3.0	11.0	6.5	7.5	5.0	1.4	5.0	2.7	6.2	5.0	13.0	22.0	
15.10.1996	9.7	17.0	26.2	34.5	38.0	14.5	30.0	20.1	46.0	72.0	85.0	73.7	38.7	8.6	4.8	2.5	2.5	1.0	1.5	-	13.4	3.3	1.7	12.0	6.5	9.5	5.5	1.4	6.4	3.0	6.0	6.5	14.5	27.0	
18.10.1996	16.8	41.2	39.0	42.0	36.0	22.0	30.5	29.1	46.4	70.4	85.0	72.6	36.8	11.5	6.0	1.5	4.3	1.0	2.5	1.0	11.0	2.9	1.9	17.2	6.5	11.0	5.5	0.4	5.7	3.0	6.3	32.5	12.7	36.5	
20.10.1996	17.8	33.0	35.6	40.9	38.7	18.5	22.6	25.2	44.5	70.2	85.0	72.0	36.8	8.5	0.8	0.8	0.8	0.5	2.5	-	18.0	3.5	2.9	19.0	7.0	16.4	0.7	0.7	5.5	2.5	6.0	19.5	20.0	32.6	
22.10.1996	19.0	31.0	34.5	40.9	37.6	18.5	22.6	24.6	45.5	70.2	85.0	72.0	36.5	8.5	-	0.8	0.8	0.8	4.0	-	17.0	3.0	2.0	18.5	7.5	16.0	-	-	7.0	-	6.5	18.0	20.0	31.5	
23.10.1996	17.0	31.0	34.5	40.9	37.5	17.9	23.0	24.4	45.4	70.4	85.0	72.2	37.0	8.5	-	-	-	-	1.5	-	17.0	0.8	-	18.5	7.3	16.0	-	-	5.2	1.0	5.8	17.5	20.0	31.8	
25.10.1996	14.6	30.9	34.0	40.7	37.5	15.3	23.0	23.3	44.5	69.5	85.0	72.0	37.2	8.8	-	-	-	-	-	-	15.0	-	-	18.0	6.5	15.3	-	-	2.7	-	-	16.5	17.5	30.3	
27.10.1996	15.5	30.0	34.0	40.5	36.8	14.9	23.8	23.6	45.0	70.4	85.0	72.8	37.2	7.5	-	-	-	-	-	-	14.4	-	-	17.5	-	15.0	-	-	-	-	15.0	18.0	29.7		
29.10.1996	5.5	19.4	24.8	33.5	33.0	8.2	16.6	15.6	36.4	62.0	82.5	61.5	26.5	-	-	-	-	-	-	-	4.3	-	-	9.9	-	7.5	-	-	-	-	4.0	11.0	20.0	-	
1.11.1996	-	5.6	14.0	21.5	21.0	-	2.6	-	21.0	36.5	55.0	36.0	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.5	-
5.11.1996	4.2	0.5	8.5	15.5	10.6	-	5.0	2.6	15.4	29.4	39.5	21.5	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	-	-	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.0	-
7.11.1996	-	-	-	14.2	-	-	-	-	13.4	23.0	36.5	15.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10.11.1996	-	-	-	12.0	9.4	-	-	-	13.0	22.8	36.0	15.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11.11.1996	-	-	-	10.9	-	-	-	-	12.4	23.0	36.0	11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13.11.1996	3.7	1.3	4.0	12.0	7.4	2.0	4.0	20.6	11.0	25.0	39.0	15.5	0.5	2.0	-	3.0	7.0	0.5	0.5	-	1.0	8.0	0.5	0.5	3.5	0.5	-	0.5	-	-	1.5	0.5	0.5	3.0	-
16.11.1996	3.0	-	-	10.0	1.2	-	-	-	10.5	24.0	35.0	12.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19.11.1996	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.0	21.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22.11.1996	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.5	13.5	-	-	-	-	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24.11.1996	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.0	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27.11.1996	9.0	1.5	8.0	4.1	8.5	5.5	9.5	28.1	5.0	14.0	23.7	3.5	5.8	9.0	-	9.5	5.5	5.5	7.3	-	12.0	5.0	8.0	7.5	5.0	4.0	*	1.5	7.0	3.5	3.0	6.0	1.0	6.0	
28.11.1996	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.12.1996	-	-	-	-	-	-	-	10.1	-	-	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6.12.1996	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27.12.1996	-	-	-	-	-	-	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6.01.1997	-	-	-	-	-	-	14.0	17.6	-	4.0	10.4	-	2.0	29.5	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.0
7.01.1997	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28.01.1997	7.5	4.5	8.0	1.5	8.0	6.5	3.0	18.6	-	4.5	7.0	3.0	7.5	5.0	11.0	16.0	6.5	5.5	7.5	*	10.0	*	-	2.5	9.5	4.5	3.0	-	-	*	-	-	-	8.5	
29.01.1997	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle I: Manuell gemessene Schneehöhen (cm) an den Schneepegeln im Transekt I zwischen dem 15.06.1996 und dem 29.01.1997 (\*: nicht gemessen; -: aper)

**Tabelle II:** Manuell gemessene Schneehöhen (cm) an den Schneepegeln T2 B – T2 E im Transekt 2 zwischen dem 01.11.1996 und dem 24.02.1997 (\*: nicht gemessen; -: aper)

Datum	T2B	T2C	T2D	T2E
1.11.1996	33,0	115,0	*	68,5
5.11.1996	19,3	102,5	*	56,5
7.11.1996	16,0	97,5	*	53,0
10.11.1996	16,0	97,5	*	51,5
11.11.1996	15,0	96,5	*	51,0
13.11.1996	14,0	97,0	*	52,0
16.11.1996	12,5	96,0	*	51,0
19.11.1996	-	81,0	*	36,5
22.11.1996	-	80,0	72,5	43,5
24.11.1996	-	76,5	69,5	40,0
27.11.1996	-	80,0	73,0	41,5
28.11.1996	-	65,0	62,5	31,0
2.12.1996	-	63,0	64,5	27,0
6.12.1996	-	47,5	55,0	12,0
10.12.1996	-	22,5	37,0	-
12.12.1996	-	19,5	36,0	-
14.12.1996	-	6,5	26,0	-
17.12.1996	-	-	11,0	-
19.12.1996	-	-	2,0	-
21.12.1996	-	-	-	-
27.12.1996	-	-	-	1,0
31.12.1996	-	-	-	-
6.01.1997	-	-	12,5	-
7.01.1997	-	-	-	-
24.02.1997	-	-	3,5	10,0

Aufnahmebezeichnung Artenzahl	Cluster I			Cluster II (Senke)					Cluster III (Übergang)							Cluster IV (Kuppe)					Cluster V (südl. Transektbereich)								
	P5-v 5	P6a-v 5	P6b-GB 9	P4 11	P5/1 2	P6 4	P6a-h 3	P6b-h 5	P2 14	P3 14	P7 12	P8 10	P9 10	P10 14	P11 16	P22 10	P1 15	P12 22	P13 22	P14 19	P17 22	P19 12	P19a 20	P19b 22	P20 22	P20a 22	P21 16	P21a 13	
<i>Sanionia uncinata</i>	24			61,0	100	71,0	42,0	61,0	4,5	4,0	42,0	73,5	18,5		1,8	49,8	13,8	2,3	0,5	1,3	8,8	22,8	26,0	32,3	6,3	18,3	6,8	24,3	
<i>Ochrolechia frigida</i>	22		59,0	2,0			1,0		3,5	14,5	4,8	13,3	4,3	3,0	5,0		12,5	34,8	35,0	8,3	14,3	1,8	26,3	11,0	38,5	15,0	7,5	7,8	
<i>Andreaea regularis</i>	21			8,3			2,5		24,8	44,8	16,3	32,8	67,5	20,0	33,5	75,3		29,5	11,5	0,3	30,3	85,3	38,8	18,8	54,5	92,8	55,5	75,3	
<i>Psoroma hypnorum</i>	20		3,0							0,3	3,0	7,0	7,8	10,5	20,8	14,3	1,5	17,5	9,0	13,8	9,8	20,3	15,3	18,5	3,8	10,8	19,8	32,5	
<i>Arthonia cf. excentrica</i>	18			0,3							10,8	1,5	54,3	78,5	34,3	13,0		17,8	13,0	0,3	6,0	12,8	5,3	5,8	25,5	10,0	74,0	76,3	
<i>Polytrichastrum alpinum</i>	18			5,0			14,5		12,8	14,3				29,5	10,0	1,0	15,8	28,5	44,8	24,8	41,8	40,3	30,0	41,3	32,0	1,5	1,5		
<i>Warnstorfia sarmentosa</i>	3				30,0	89,0	93,5																						
<i>Lecidea sciatriapha</i>	13	60,0	26,5		9,0		2,0	5,0		6,5	23,3	3,8		4,8	6,3	9,8		2,0									2,3		
<i>Lecanora cf. polytropa</i>	10	37,0			1,5					2,0	4,8	13,0	8,5	8,3	6,8	6,0											0,3		
<i>Rhizocarpon cf. geminatum</i>	9	19,0	2,5	5,0								13,3		5,5	7,5	20,0											0,5		
<i>Rhizocarpon geographicum</i>	6		11,0	4,0						1,0	4,5										1,0						0,3		
<i>Andreaea gainii</i>	6	3,0	34,5	64,0														12,5		15,3	0,3								
<i>Herzogobryum teres</i>	12									62,3					0,3	2,3	1,8					35,0	47,0	67,8	1,3				
<i>Cladonia cf. borealis</i>	15									5,0	0,5			4,0	2,5			1,5	6,5	1,8	4,0	0,8	5,8	1,5	3,5	2,8	20,0	0,3	
<i>Usnea aurantiaco-atra</i>	14		1,5	59,0											0,3			74,8	41,5	39,5	66,3	37,3		15,5	10,3	8,5	11,8	3,3	1,0
<i>Himantornia lugubris</i>	12																	17,8	12,3	8,8	14,8	5,5	14,0	60,5	38,5	5,0	7,3	2,5	3,5
<i>Cladonia cf. subulata</i>	12									5,0								5,5	15,3	25,0	9,0	23,0		1,0	0,8		26,5	22,3	
<i>Ditrichum hyalinum</i>	12									4,3				6,3	1,3			33,0	2,0	1,0	7,3	6,3		6,0	31,8	6,8		5,8	0,5
<i>Sphaerophorus globosus</i>	10			1,0														0,3	28,0	43,8	13,0	50,0				0,3	0,5	0,8	0,3
<i>Stereocaulon alpinum</i>	9									20,0									6,0	4,3	4,0			2,8	7,8	1,8	12,3	6,3	
<i>Usnea antarctica</i>	7																		7,0	12,5	13,3	20,0		1,0		1,0	14,3		
<i>Pseudophebe pubescens</i>	6																		26,8	30,8	32,3	47,3		1,8	0,8				
<i>Pohlia cf. drummondii</i>	4				1,3			3,0			1,3										1,0								
<i>Cephaloziella vanans</i>	5				44,8							1,8							0,8	2,5		3,3							
<i>Anthelia juratzkana</i>	2				1,5					3,3																			
<i>Leptogium puberulum</i>	2					0,3					2,8																		
<i>Lecidiella spec.</i>	8				2,5					11,3	5,8				3,0								3,5	3,3	1,3		4,3		
<i>Dicranoweisia sp.</i>	3									0,3	1,0		0,5																
<i>Ceratodon purpureus</i>	1											1,8																	
<i>Lophozia excisa</i>	2									1,5					0,5														
<i>Rinodina olivaceobrunnea</i>	3										3,8	2,5									0,3								
<i>Rinodina sp.</i>	5		3,0												0,8	3,0					0,8				1,3			0,3	
<i>Pohlia cruda</i>	6												0,3	2,8		0,5								0,3	0,8				
<i>Chorisodontium aciphyllum</i>	9										0,3		0,3	5,0	3,3				3,5	12,5		2,8		9,5	4,8		22,0		
<i>Hygrolembidium ventrosum</i>	7									1,3												3,3	3,8	2,0	0,8	4,5	1,8		
<i>Barbilophozia hatcheri</i>	6																		0,3			10,5	2,8	10,3			2,0	2,5	
<i>Pachygllossa dissitifolia</i>	6									1,0						0,5							1,8	1,8	8,8				
<i>Corniculana aculeata</i>	6																		1,3	1,8	2,8	1,8		0,3	0,3				
<i>Bartramia patens</i>	3																			0,3	0,8	0,8							
<i>Cladonia spec.</i>	2		4,0																			6,5							
<i>Physconia muscigena</i>	4																							0,5	1,5		8,3	1,0	
<i>Plecoopsis contortuplicata</i>	2																								3,8	0,5			
<i>Conostomum magellanicum</i>	1																										1,0		
<i>Meesia uliginosa</i>	1																										0,8		
<i>Prasiola cnspa</i>	2																								0,8	0,3			
<i>Dechampsia antarctica</i>	1																							2,3					

Tabelle III: Vegetationstabelle des Transekts I. Frequenzen der Arten in den Aufnahmeflächen. Die Werte der dominanten Arten sind in den einzelnen Aufnahmeflächen fettgedruckt.

Tabelle IV: Vegetationstabelle des Transekts I. **Deckungsgrade** der Arten in den Aufnahme­flächen. Die Werte der dominanten Arten sind in den einzelnen Aufnahme­flächen fettgedruckt.

Aufnahmebezeichnung Gesamtdeckung Lichter-Anten	Cluster I					Cluster II (Senke)					Cluster III (Übergang)					Cluster IV (Kuppe)					Cluster V (südl. Transektbereich)							
	P5v 52	P5av 73	P6b-06 79	P4 71	P5h 100	P6 90	P6h 95	P6b-h 51	P2 28	P3 51	P7 31	P8 52	P9 53	P10 35	P11 31	P22 81	P1 62	P12 51	P13 73	P14 76	P17 74	P19 88	P19a 75	P19b 72	P20 40	P21 97	P21a 73	P21b 67
<i>Saxifraga hypnifolia</i>																												
<i>Ochrolechia frigida</i>	19																											
<i>Androsia regularis</i>																												
<i>Psoroma hypnorum</i>																												
<i>Arthonia cf. excentrica</i>																												
<i>Polytrichum alpinum</i>																												
<i>Warnstorfia sarmentosa</i>	3																											
<i>Lecidea sciatrapha</i>	43	41																										
<i>Lecanora cf. polyropa</i>	3																											
<i>Rhizocarpon cf. germinatum</i>	5	1	<1																									
<i>Rhizocarpon geographicum</i>	6	10	<1																									
<i>Androsia gainii</i>	<1	20	22																									
<i>Herzogobryum lutes</i>	12																											
<i>Cladonia cf. borealis</i>	15																											
<i>Usnea aurantiaco-atra</i>	14																											
<i>Himantonia lugubris</i>	12	1	35																									
<i>Cladonia cf. subulata</i>																												
<i>Dilrichum hyalinum</i>	12																											
<i>Sphaeroporus globosus</i>	10																											
<i>Stereocaulon alpinum</i>	9																											
<i>Usnea antarctica</i>	7																											
<i>Pseudephebe pubescens</i>	6																											
<i>Pohlia cf. drummondii</i>	4																											
<i>Cephalozella varians</i>	5																											
<i>Anthelia juratzkana</i>	2																											
<i>Lepogium puberulum</i>	2																											
<i>Lecidella spec.</i>	8																											
<i>Dicranoweisia sp.</i>	3																											
<i>Ceratodon purpureus</i>	1																											
<i>Lophozia excisa</i>	2																											
<i>Rinodina olivaceobrunnea</i>	3																											
<i>Rinodina sp.</i>	5																											
<i>Pohlia cruda</i>	6																											
<i>Chorisodontium aciphyllum</i>	9																											
<i>Hygroambidium ventrosum</i>	7																											
<i>Barbilophzia hutchinsii</i>	6																											
<i>Pachyglotta dissitifolia</i>	6																											
<i>Comiculana aculeata</i>	6																											
<i>Bartramia patens</i>	3																											
<i>Cladonia spec.</i>	2																											
<i>Physconia muscigena</i>	4																											
<i>Pliacopsis contortuplicata</i>	2																											
<i>Conostomum magellanicum</i>	1																											
<i>Meesia uliginosa</i>	1																											
<i>Prasiola crispa</i>	2																											
<i>Declampsia antarctica</i>	1																											



## DANKSAGUNG

Mein herzlichster Dank geht zuerst an meinen akademischen Lehrer Herrn Prof. L. Kappen für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit sowie für kritische Diskussionen und hilfreiche Kommentare, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Er ermöglichte mir als Voraussetzung für diese Arbeit drei Expeditionen in die Antarktis. Vielen Dank für die Chance zu dieser schönen Erfahrung und für das mir entgegen gebrachte Vertrauen!

Mein Dank gilt auch Dr. Burkhard Schroeter für seine Diskussionsbereitschaft und Anregungen. Er stellte mir freundlicherweise das Reaktionsmodell der Photosynthese von *Usnea aurantiaco-atra* zur Verfügung.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Florian Schulz für viele nützliche Kommentare und seine Hilfe bei der Bestimmung der Moose. Durch „Floris kleinen Ratgeber“ und viele seiner Tipps und Tricks war es mir vor Ort möglich, die meisten technischen Probleme und Geräteausfälle zu lö(t)sen.

Ein großes Dankeschön geht an F.-P. Rapp, der bei der Entwicklung und Konstruktion der automatischen Schneepegelsensoren und der Lösung vieler großer und kleiner technischer Probleme eine unentbehrliche Hilfe war.

Klaus und Gudrun machten sich mit unendlicher Geduld und Elan auf die Suche nach kurzen und langen Binde-, Gedanken- und Trennstrichen und korrigierten das Manuskript; auch hatten sie immer ein offenes Ohr für die kleinen Sorgen – DANKE!

Besonderer Dank für ihre Unterstützung und Hilfe während der Expeditionen gilt Gritta und Michaela, Jensito, Stephan, Nils, Ritschie, Horst sowie Laura, Patricia, Coquito, Nacho, Pablo und Jorge und all den anderen „Dallmännern“ und Jubanitos für die gute Atmosphäre. Jorge Calcagno gelang es trotz sprachlicher Barrieren und fehlender Schaltpläne den Schneepegellogger wiederzubeleben ¡gracias!

Bedanken möchte ich mich bei Michaela auch, dass sie mich nicht nur in der gemeinsamen Zeit in Jubany sondern auch in Kiel immer wieder motiviert und mit guten Ratschlägen aus dem wirklichen Leben aufgemuntert hat.

Ein weiteres Dankeschön geht an Martin, der auch nach der Flucht vor den „Kommentaren aus der letzten Reihe“ bereit war, Teile der Arbeit zu korrigieren.

Für die Bestimmung der Schneehöhen an einigen Terminen im Winter 1996 und Winter 1997 bedanke ich mich bei E. Besnati und J. Marcelo (IAA, Buenos Aires).

Allen IPÖ's und der Arbeitsgruppe Ökophysiologie am Botanischen Institut danke ich für das gute Arbeitsklima und die freundschaftliche Hilfsbereitschaft.

Der deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich an dieser Stelle für die Fördermittel die für die Expeditionen bereitgestellt wurden.

Dem Alfred-Wegener-Institut (AWI), Bremerhaven und dem Instituto Antártico Argentino (IAA) danke ich für die logistische Unterstützung während der Expeditionen zum Dallmann-Labor.



## Folgende Hefte der Reihe „Berichte zur Polarforschung“ sind bisher erschienen:

- \* **Sonderheft Nr. 1/1981** – „Die Antarktis und ihr Lebensraum“  
Eine Einführung für Besucher – Herausgegeben im Auftrag von SCAR
- \* **Heft Nr. 1/1982** – „Die Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“  
zusammengestellt von Heinz Kohnen
- \* **Heft Nr. 2/1982** – „Deutsche Antarktis-Expedition 1980/81 mit FS ‚Meteor‘“  
First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Liste der Zooplankton- und Mikronektonnetzfüge  
zusammengestellt von Norbert Klages
- \* **Heft Nr. 3/1982** – „Digitale und analoge Krill-Echolot-Rohdatenerfassung an Bord des Forschungsschiffes ‚Meteor‘“ (im Rahmen von FIBEX 1980/81, Fahrtabschnitt ANT III), von Bodo Morgenstern
- \* **Heft Nr. 4/1982** – „Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“  
Liste der Planktonfänge und Lichtstärkemessungen  
zusammengestellt von Gerd Hubold und H. Eberhard Drescher
- \* **Heft Nr. 5/1982** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982“  
by G. Hempel and R. B. Heywood
- \* **Heft Nr. 6/1982** – „Antarktis-Expedition 1981/82 (Unternehmen ‚Eiswarte‘)“  
zusammengestellt von Gode Gravenhorst
- \* **Heft Nr. 7/1982** – „Marin-Biologisches Begleitprogramm zur Standorterkundung 1979/80 mit MS ‚Polarstern‘ (Pre-Site Survey)“ – Stationslisten der Mikronekton- und Zooplanktonfänge sowie der Bodenfischerei  
zusammengestellt von R. Schneppenheim
- \* **Heft Nr. 8/1983** – „The Post-Fibex Data Interpretation Workshop“  
by D. L. Cram and J.-C. Freytag with the collaboration of J. W. Schmidt, M. Mall, R. Kresse, T. Schwinghammer
- \* **Heft Nr. 9/1983** – „Distribution of some groups of zooplankton in the inner Weddell Sea in summer 1979/80“  
by I. Hempel, G. Hubold, B. Kaczmaruk, R. Keller, R. Weigmann-Haass
- \* **Heft Nr. 10/1983** – „Fluor im antarktischen Ökosystem“ – DFG-Symposium November 1982  
zusammengestellt von Dieter Adelung
- \* **Heft Nr. 11/1983** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982 (II)“  
Data of micronekton and zooplankton hauls, by Uwe Piatkowski
- \* **Heft Nr. 12/1983** – „Das biologische Programm der ANTARKTIS-I-Expedition 1983 mit FS ‚Polarstern‘“  
Stationslisten der Plankton-, Benthos- und Grundschleppnetzfüge und Liste der Probennahme an Robben und Vögeln, von H. E. Drescher, G. Hubold, U. Piatkowski, J. Plötz und J. Voß
- \* **Heft Nr. 13/1983** – „Die Antarktis-Expedition von MS ‚Polarbjörn‘ 1982/83“ (Sommerkampagne zur Atka-Bucht und zu den Kraul-Bergen), zusammengestellt von Heinz Kohnen
- \* **Sonderheft Nr. 2/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition von FS ‚Polarstern‘ (Kapstadt, 20. Januar 1983 – Rio de Janeiro, 25. März 1983)“, Bericht des Fahrtleiters Prof. Dr. Gotthilf Hempel
- \* **Sonderheft Nr. 3/1983** – „Sicherheit und Überleben bei Polarexpeditionen“  
zusammengestellt von Heinz Kohnen
- \* **Heft Nr. 14/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition (ANTARKTIS I) von FS ‚Polarstern‘ 1982/83“  
herausgegeben von Gotthilf Hempel
- \* **Sonderheft Nr. 4/1983** – „On the Biology of Krill *Euphausia superba*“ – Proceedings of the Seminar and Report of the Krill Ecology Group, Bremerhaven 12. - 16. May 1983, edited by S. B. Schnack
- \* **Heft Nr. 15/1983** – „German Antarctic Expedition 1980/81 with FRV ‚Walther Herwig‘ and RV ‚Meteor‘“ – First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Data of micronekton and zooplankton hauls  
by Uwe Piatkowski and Norbert Klages
- \* **Sonderheft Nr. 5/1984** – „The observatories of the Georg von Neumayer Station“, by Ernst Augstein
- \* **Heft Nr. 16/1984** – „FIBEX cruise zooplankton data“  
by U. Piatkowski, I. Hempel and S. Rakusa-Suszczewski
- \* **Heft Nr. 17/1984** – „Fahrtbericht (cruise report) der ‚Polarstern‘-Reise ARKTIS I, 1983“  
von E. Augstein, G. Hempel und J. Thiede
- \* **Heft Nr. 18/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,  
Bericht von den Fahrtabschnitten 1, 2 und 3, herausgegeben von D. Fütterer
- \* **Heft Nr. 19/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,  
Bericht vom Fahrtabschnitt 4, Punta Arenas-Kapstadt (Ant-II/4), herausgegeben von H. Kohnen
- \* **Heft Nr. 20/1984** – „Die Expedition ARKTIS II des FS ‚Polarstern‘ 1984, mit Beiträgen des FS ‚Valdivia‘ und des Forschungsflugzeuges ‚Falcon 20‘ zum Marginal Ice Zone Experiment 1984 (MIZEX)“  
von E. Augstein, G. Hempel, J. Schwarz, J. Thiede und W. Weigel
- \* **Heft Nr. 21/1985** – „Euphausiid larvae in plankton from the vicinity of the Antarctic Peninsula, February 1982“ by Sigrid Marschall and Elke Mizdalski
- \* **Heft Nr. 22/1985** – „Maps of the geographical distribution of macrozooplankton in the Atlantic sector of the Southern Ocean“ by Uwe Piatkowski
- \* **Heft Nr. 23/1985** – „Untersuchungen zur Funktionsmorphologie und Nahrungsaufnahme der Larven des Antarktischen Krills *Euphausia superba* Dana“ von Hans-Peter Marschall

- Heft Nr. 24/1985** – „Untersuchungen zum Periglazial auf der König-Georg-Insel Südshetlandinseln/ Antarktika. Deutsche physiogeographische Forschungen in der Antarktis. – Bericht über die Kampagne 1983/84“ von Dietrich Barsch, Wolf-Dieter Blümel, Wolfgang Flügel, Roland Mäusbacher, Gerhard Stäblein, Wolfgang Zick
- \* **Heft Nr. 25/1985** – „Die Expedition ANTARKTIS III mit FS ‚Polarstern‘ 1984/1985“ herausgegeben von Gotthilf Hempel.
- \* **Heft Nr. 26/1985** – „The Southern Ocean“; A survey of oceanographic and marine meteorological research work by Hellmer et al.
- \* **Heft Nr. 27/1986** – „Spätpleistozäne Sedimentationsprozesse am antarktischen Kontinentalhang vor Kapp Norvegia, östliche Weddell-See“ von Hannes Grobe
- Heft Nr. 28/1986** – „Die Expedition ARKTIS III mit ‚Polarstern‘ 1985“ mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer, herausgegeben von Rainer Gersonde
- \* **Heft Nr. 29/1986** – „5 Jahre Schwerpunktprogramm ‚Antarktisforschung‘ der Deutschen Forschungsgemeinschaft.“ Rückblick und Ausblick. Zusammengestellt von Gotthilf Hempel, Sprecher des Schwerpunktprogramms
- Heft Nr. 30/1986** – „The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1981 and 1982“ by Marianne Gube and Friedrich Obleitner
- \* **Heft Nr. 31/1986** – „Zur Biologie der Jugendstadien der Notothenioidei (Pisces) an der Antarktischen Halbinsel“ von A. Kellermann
- \* **Heft Nr. 32/1986** – „Die Expedition ANTARKTIS IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86“ mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer, herausgegeben von Dieter Fütterer
- Heft Nr. 33/1987** – „Die Expedition ANTARKTIS-IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86 – Bericht zu den Fahrtabschnitten ANT-IV/3-4“ von Dieter Karl Fütterer
- Heft Nr. 34/1987** – „Zoogeographische Untersuchungen und Gemeinschaftsanalysen an antarktischen Makroplankton“ von U. Piatkowski
- Heft Nr. 35/1987** – „Zur Verbreitung des Meso- und Makrozooplanktons in Oberflächenwasser der Weddell See (Antarktis)“ von E. Boysen-Ennen
- Heft Nr. 36/1987** – „Zur Nahrungs- und Bewegungsphysiologie von *Salpa thompsoni* und *Salpa fusiformis*“ von M. Reinke
- Heft Nr. 37/1987** – „The Eastern Weddell Sea Drifting Buoy Data Set of the Winter Weddell Sea Project (WWSP)“ 1986 by Heinrich Hoerber und Marianne Gube-Lehnhardt
- Heft Nr. 38/1987** – „The Meteorological Data of the Georg von Neumayer Station for 1983 and 1984“ by M. Gube-Lehnhardt
- Heft Nr. 39/1987** – „Die Winter-Expedition mit FS ‚Polarstern‘ in die Antarktis (ANT V/1-3)“ herausgegeben von Sigrid Schnack-Schiel
- Heft Nr. 40/1987** – „Weather and Synoptic Situation during Winter Weddell Sea Project 1986 (ANT V/2) July 16. - September 10. 1986“ by Werner Rabe
- Heft Nr. 41/1988** – „Zur Verbreitung und Ökologie der Seegurken im Weddellmeer (Antarktis)“ von Julian Gutt
- Heft Nr. 42/1988** – „The zooplankton community in the deep bathyal and abyssal zones of the eastern North Atlantic“ by Werner Beckmann
- \* **Heft Nr. 43/1988** – „Scientific cruise report of Arctic Expedition ARK IV/3“ Wissenschaftlicher Fahrtbericht der Arktis-Expedition ARK IV/3, compiled by Jörn Thiede
- \* **Heft Nr. 44/1988** – „Data Report for FV ‚Polarstern‘ Cruise ARK IV/1, 1987 to the Arctic and Polar Fronts“ by Hans-Jürgen Hirche
- Heft Nr. 45/1988** – „Zoogeographie und Gemeinschaftsanalyse des Makrozoobenthos des Weddellmeeres (Antarktis)“ von Joachim Voß
- Heft Nr. 46/1988** – „Meteorological and Oceanographic Data of the Winter-Weddell-Sea Project 1986 (ANT V/3)“ by Eberhard Fahrbach
- Heft Nr. 47/1988** – „Verteilung und Herkunft glazial-mariner Gerölle am Antarktischen Kontinentalrand des östlichen Weddellmeeres“ von Wolfgang Oskierski
- Heft Nr. 48/1988** – „Variationen des Erdmagnetfeldes an der GvN-Station“ von Arnold Brodscholl
- \* **Heft Nr. 49/1988** – „Zur Bedeutung der Lipide im antarktischen Zooplankton“ von Wilhelm Hagen
- \* **Heft Nr. 50/1988** – „Die gezeitenbedingte Dynamik des Ekström-Schelfeises, Antarktis“ von Wolfgang Kobarg
- Heft Nr. 51/1988** – „Ökomorphologie nototheniider Fische aus dem Weddellmeer, Antarktis“ von Werner Ekau
- Heft Nr. 52/1988** – „Zusammensetzung der Bodenfauna in der westlichen Fram-Straße“ von Dieter Piepenburg
- \* **Heft Nr. 53/1988** – „Untersuchungen zur Ökologie des Phytoplanktons im südöstlichen Weddellmeer (Antarktis) im Jan./Febr. 1985“ von Eva-Maria Nöthig
- Heft Nr. 54/1988** – „Die Fischfauna des östlichen und südlichen Weddellmeeres: geographische Verbreitung, Nahrung und tropische Stellung der Fischarten“ von Wiebke Schwarzbach
- Heft Nr. 55/1988** – „Weight and length data of zooplankton in the Weddell Sea in austral spring 1986 (Ant. V/3)“ by Elke Mizdalski
- Heft Nr. 56/1989** – „Scientific cruise report of Arctic expeditions ARK IV/1, 2 & 3“ by G. Krause, J. Meinke und J. Thiede

- Heft Nr. 57/1989** – „Die Expedition ANTARKTIS V mit FS ‚Polarstern‘ 1986/87“  
Bericht von den Fahrtabschnitten ANT V/4-5 von H. Miller und H. Oerter
- \* **Heft Nr. 58/1989** – „Die Expedition ANTARKTIS VI mit FS ‚Polarstern‘ 1987/88“  
von D. K. Fütterer
- Heft Nr. 59/1989** – „Die Expedition ARKTIS V/1a, 1b und 2 mit FS ‚Polarstern‘ 1988“  
von M. Spindler
- Heft Nr. 60/1989** – „Ein zweidimensionales Modell zur thermohalinen Zirkulation unter dem Schelfeis“  
von H. H. Hellmer
- Heft Nr. 61/1989** – „Die Vulkanite im westlichen und mittleren Neuschwabenland, Vestfjella und Ahlmannryggen, Antarktika“ von M. Peters
- \* **Heft Nr. 62/1989** – „The Expedition ANTARKTIS VII/1 and 2 (EPOS I) of RV ‚Polarstern‘ in 1988/89“, by I. Hempel
- Heft Nr. 63/1989** – „Die Eisalgenflora des Weddellmeeres (Antarktis): Artenzusammensetzung und Biomasse sowie Ökophysiologie ausgewählter Arten“ von Annette Bartsch
- Heft Nr. 64/1989** – „Meteorological Data of the G.-v.-Neumayer-Station (Antarctica)“ by L. Helmes
- Heft Nr. 65/1989** – „Expedition Antarktis VII/3 in 1988/89“ by I. Hempel, P. H. Schalk, V. Smetacek
- Heft Nr. 66/1989** – „Geomorphologisch-glaziologische Detailkartierung des arid-hochpolaren Borgmassivet, Neuschwabenland, Antarktika“ von Karsten Brunk
- Heft Nr. 67/1990** – „Identification key and catalogue of larval Antarctic fishes“,  
edited by Adolf Kellermann
- Heft Nr. 68/1990** – „The Expedition Antarktis VII/4 (Epos leg 3) and VII/5 of RV ‚Polarstern‘ in 1989“,  
edited by W. Arntz, W. Ernst, I. Hempel
- Heft Nr. 69/1990** – „Abhängigkeiten elastischer und rheologischer Eigenschaften des Meereises vom Eisgefüge“, von Harald Hellmann
- \* **Heft Nr. 70/1990** – „Die beschilderten benthischen Mollusken (Gastropoda und Bivalvia) des Weddellmeeres, Antarktis“, von Stefan Hain
- Heft Nr. 71/1990** – „Sedimentologie und Paläomagnetik an Sedimenten der Maudkuppe (Nordöstliches Weddellmeer)“, von Dieter Cordes
- Heft Nr. 72/1990** – „Distribution and abundance of planktonic copepods (Crustacea) in the Weddell Sea in summer 1980/81“, by F. Kurbjewit and S. Ali-Khan
- Heft Nr. 73/1990** – „Zur Frühdiagenese von organischem Kohlenstoff und Opal in Sedimenten des südlichen und östlichen Weddellmeeres“, von M. Schlüter
- Heft Nr. 74/1990** – „Expeditionen ANTARKTIS-VIII/3 und VIII/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1989“  
von Rainer Gersonde und Gotthilf Hempel
- Heft Nr. 75/1991** – „Quartäre Sedimentationsprozesse am Kontinentalhang des Süd-Orkey-Plateaus im nordwestlichen Weddellmeer (Antarktis)“, von Sigrun Grünig
- Heft Nr. 76/1990** – „Ergebnisse der faunistischen Arbeiten im Benthal von King George Island (Südshetlandinseln, Antarktis)“, von Martin Rauschert
- Heft Nr. 77/1990** – „Verteilung von Mikroplankton-Organismen nordwestlich der Antarktischen Halbinsel unter dem Einfluß sich ändernder Umweltbedingungen im Herbst“, von Heinz Klöser
- Heft Nr. 78/1991** – „Hochauflösende Magnetostratigraphie spätquartärer Sedimente arktischer Meeresgebiete“, von Norbert R. Nowaczyk
- Heft Nr. 79/1991** – „Ökophysiologische Untersuchungen zur Salinitäts- und Temperaturtoleranz antarktischer Grünalgen unter besonderer Berücksichtigung des  $\beta$ -Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP) - Stoffwechsels“, von Ulf Karsten
- Heft Nr. 80/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“,  
herausgegeben von Jörn Thiede und Gotthilf Hempel
- Heft Nr. 81/1991** – „Paläoglaziologie und Paläozoographie im Spätquartär am Kontinentalrand des südlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Martin Melles
- Heft Nr. 82/1991** – „Quantifizierung von Meereseigenschaften: Automatische Bildanalyse von Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsverteilungen“, von Hajo Eicken
- Heft Nr. 83/1991** – „Das Fließen von Schelfeisen - numerische Simulationen mit der Methode der finiten Differenzen“, von Jürgen Determann
- Heft Nr. 84/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII/1-2, 1989 mit der Winter Weddell Gyre Study der Forschungsschiffe ‚Polarstern‘ und ‚Akademik Fedorov‘“, von Ernst Augstein, Nikolai Bagriantsev und Hans Werner Schenke
- Heft Nr. 85/1991** – „Zur Entstehung von Unterwassereis und das Wachstum und die Energiebilanz des Meereises in der Atka Bucht, Antarktis“, von Josef Kipfstuhl
- \* **Heft Nr. 86/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-VIII/5“, von Heinz Miller und Hans Oerter
- Heft Nr. 87/1991** – „Scientific cruise reports of Arctic expeditions ARK VI/1-4 of RV ‚Polarstern‘ in 1989“, edited by G. Krause, J. Meincke & H. J. Schwarz
- Heft Nr. 88/1991** – „Zur Lebensgeschichte dominanter Copepodenarten (*Calanus finmarchicus*, *C. glacialis*, *C. hyperboreus*, *Metridia longa*) in der Framstraße“, von Sabine Diel

- Heft Nr. 89/1991** – „Detaillierte seismische Untersuchungen am östlichen Kontinentalrand des Weddell-Meereres vor Kapp Norvegia, Antarktis“, von Norbert E. Kaul
- Heft Nr. 90/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-VIII/6-7“, herausgegeben von Dieter Karl Fütterer und Otto Schrems
- Heft Nr. 91/1991** – „Blood physiology and ecological consequences in Weddell Sea fishes (Antarctica)“, by Andreas Kunzmann
- Heft Nr. 92/1991** – „Zur sommerlichen Verteilung des Mesozooplanktons im Nansen-Becken, Nordpolarmeer“, von Nicolai Mumm
- Heft Nr. 93/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII mit FS ‚Polarstern‘, 1990. Bericht vom Fahrtabschnitt ARK VII/2“, herausgegeben von Gunther Krause
- Heft Nr. 94/1991** – „Die Entwicklung des Phytoplanktons im östlichen Weddellmeer (Antarktis) beim Übergang vom Spätwinter zum Frühjahr“, von Renate Scharek
- Heft Nr. 95/1991** – „Radioisotopenstratigraphie, Sedimentologie und Geochemie jungquartärer Sedimente des östlichen Arktischen Ozeans“, von Horst Bohrmann
- Heft Nr. 96/1991** – „Holozäne Sedimentationsentwicklung im Scoresby Sund, Ost-Grönland“, von Peter Marienfeld
- Heft Nr. 97/1991** – „Strukturelle Entwicklung und Abkühlungsgeschichte von Heimfrontfjella (Westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Joachim Jacobs
- Heft Nr. 98/1991** – „Zur Besiedlungsgeschichte des antarktischen Schelfes am Beispiel der Isopoda (Crustacea, Malacostraca)“, von Angelika Brandt
- \* **Heft Nr. 99/1992** – „The Antarctic ice sheet and environmental change: a three-dimensional modelling study“, by Philippe Huybrechts
- \* **Heft Nr. 100/1992** – „Die Expeditionen ANTARKTIS IX/1-4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1990/91“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Meinhard Schulz-Baldes, Eberhard Fahrbach, Victor Smetacek und Hans-Wolfgang Hubberten
- Heft Nr. 101/1992** – „Wechselbeziehungen zwischen Schwermetallkonzentrationen (Cd, Cu, Pb, Zn) im Meerwasser und in Zooplanktonorganismen (Copepoda) der Arktis und des Atlantiks“, von Christa Pohl
- Heft Nr. 102/1992** – „Physiologie und Ultrastruktur der antarktischen Grünalge *Prasiola crispa* ssp. *antarctica* unter osmotischem Streß und Austrocknung“, von Andreas Jacob
- \* **Heft Nr. 103/1992** – „Zur Ökologie der Fische im Weddellmeer“ von Gerd Hubold
- Heft Nr. 104/1992** – „Mehrkanalige adaptive Filter für die Unterdrückung von multiplen Reflexionen in Verbindung mit der freien Oberfläche in marinen Seismogrammen“, von Andreas Rosenberger
- Heft Nr. 105/1992** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1991 (REFLEX I)“, von Jörg Hartmann, Christoph Kottmeier und Christian Wamser
- Heft Nr. 106/1992** – „Ostracoden im Epipelagial vor der Antarktischen Halbinsel – ein Beitrag zur Systematik sowie zur Verbreitung und Populationsstruktur unter Berücksichtigung der Saisonalität“, von Rüdiger Kock
- \* **Heft Nr. 107/1992** – „ARCTIC '91: Die Expedition ARK-VIII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“, von Dieter K. Fütterer
- Heft Nr. 108/1992** – „Dehnungsbeben an einer Störungszone im Ekström-Schelfeis nördlich der Georg-von-Neumayer-Station, Antarktis. – Eine Untersuchung mit seismologischen und geodätischen Methoden“, von Uwe Nixdorf
- \* **Heft Nr. 109/1992** – „Spätquartäre Sedimentation am Kontinentalrand des südöstlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Michael Weber
- \* **Heft Nr. 110/1992** – „Sedimentfazies und Bodenwasserstrom am Kontinentalhang des nordwestlichen Weddellmeeres“, von Isa Brehme
- Heft Nr. 111/1992** – „Die Lebensbedingungen in den Solekanälchen des antarktischen Meereises“, von Jürgen Weissenberger
- Heft Nr. 112/1992** – „Zur Taxonomie von rezenten benthischen Foraminiferen aus dem Nansen Becken, Arktischer Ozean“, von Jutta Wollenburg
- Heft Nr. 113/1992** – „Die Expedition ARKTIS VIII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“ herausgegeben von Gerhard Kattner
- \* **Heft Nr. 114/1992** – „Die Gründungsphase deutscher Polarforschung, 1865 - 1875“, von Reinhard A. Krause
- Heft Nr. 115/1992** – „Scientific Cruise Report of the 1991 Arctic Expedition ARK VIII/2 of RV ‚Polarstern‘ (EPOS II)“, by Eike Rachor
- Heft Nr. 116/1992** – „The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station (Antarctica) for 1988, 1989, 1990 and 1991“, by Gert König-Langlo
- Heft Nr. 117/1992** – „Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der zentralen Heimfrontfjella (westliches Dronning Maud Land / Antarktis)“, von Peter Schulze
- Heft Nr. 118/1993** – „Die mafischen Gänge der Shackleton Range / Antarktika: Petrographie, Geochemie, Isotopengeochemie und Paläomagnetik“, von Rüdiger Hotten
- \* **Heft Nr. 119/1993** – „Gefrierschutz bei Fischen der Polarmeere“, von Andreas P. A. Wöhrmann

- \* **Heft Nr. 120/1993** – "East Siberian Arctic Region Expedition '92: The Laptev Sea – its Significance for Arctic Sea-Ice Formation and Transpolar Sediment Flux", by D. Dethleff, D. Nürnberg, E. Reimnitz, M. Saarlo and Y. P. Sacchenko – "Expedition to Novaja Zemlja and Franz Josef Land with RV 'Dalnie Zelentsy'", by D. Nürnberg and E. Groth
- \* **Heft Nr. 121/1993** – „Die Expedition ANTARKTIS X/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Michael Spindler, Gerhard Dieckmann und David Thomas  
**Heft Nr. 122/1993** – „Die Beschreibung der Korngestalt mit Hilfe der Fourier-Analyse: Parametrisierung der morphologischen Eigenschaften von Sedimentpartikeln“, von Michael Diepenbroek
- \* **Heft Nr. 123/1993** – „Zerstörungsfreie hochauflösende Dichteuntersuchungen mariner Sedimente“, von Sebastian Gerland  
**Heft Nr. 124/1993** – „Umsatz und Verteilung von Lipiden in arktischen marinen Organismen unter besonderer Berücksichtigung unterer trophischer Stufen“, von Martin Graeve  
**Heft Nr. 125/1993** – „Ökologie und Respiration ausgewählter arktischer Bodenfischarten“, von Christian F. von Dorrien  
**Heft Nr. 126/1993** – „Quantitative Bestimmung von Paläoumweltparametern des Antarktischen Oberflächenwassers im Spätquartier anhand von Transferfunktionen mit Diatomeer“, von Ulrich Zielinski
- \* **Heft Nr. 127/1993** – „Sedimenttransport durch das arktische Meereis: Die rezente lithogene und biogene Materialfracht“, von Ingo Wollenburg  
**Heft Nr. 128/1993** – „Cruise ANTARKTIS X/3 of RV ‚Polarstern‘: CTD-Report“, von Marek Zwierz  
**Heft Nr. 129/1993** – „Reproduktion und Lebenszyklen dominanter Copepodenarten aus dem Weddellmeer, Antarktis“, von Frank Kurbjeweit  
**Heft Nr. 130/1993** – „Untersuchungen zu Temperaturregime und Massenhaushalt des Filchner-Ronne-Schelfeises, Antarktis, unter besonderer Berücksichtigung von Anfrier- und Abschmelzprozessen“, von Klaus Grosfeld  
**Heft Nr. 131/1993** – „Die Expedition ANTARKTIS X/5 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Rainer Gersonde  
**Heft Nr. 132/1993** – „Bildung und Abgabe kurzketziger halogener Kohlenwasserstoffe durch Makroalgen der Polarregionen“, von Frank Laturnus  
**Heft Nr. 133/1994** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1993 (*REFLEX II*)“, by Christoph Kottmeier, Jörg Hartmann, Christian Wamser, Axel Bochert, Christof Lüpkes, Dietmar Freese and Wolfgang Cohrs
- \* **Heft Nr. 134/1994** – „The Expedition ARKTIS-IX/1“, edited by Hajo Eicken and Jens Meincke  
**Heft Nr. 135/1994** – „Die Expedition ANTARKTIS X/6-8“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek, Hein de Baar, Eberhard Fahrback und Gunter Krause  
**Heft Nr. 136/1994** – „Untersuchungen zur Ernährungsökologie von Kaiserpinguinen (*Aptenodytes forsteri*) und Königspinguinen (*Aptenodytes patagonicus*)“, von Klemens Pütz
- \* **Heft Nr. 137/1994** – „Die kanozoische Vereisungsgeschichte der Antarktis“, von Werner U. Ehrmann  
**Heft Nr. 138/1994** – „Untersuchungen stratosphärischer Aerosole vulkanischen Ursprungs und polarer stratosphärischer Wolken mit einem Mehrwellenlängen-Lidar auf Spitzbergen (79° N, 12° E)“, von Georg Beyerle  
**Heft Nr. 139/1994** – „Charakterisierung der Isopodenfauna (Crustacea, Malacostraca) des Scotia-Bogens aus biogeographischer Sicht: Ein multivariater Ansatz“, von Holger Winkler  
**Heft Nr. 140/1994** – „Die Expedition ANTARKTIS X/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Peter Lemke  
**Heft Nr. 141/1994** – „Satellitenaltimetrie über Eis – Anwendung des GEOSAT-Altimeters über dem Ekströmisen, Antarktis“, von Clemens Heidland  
**Heft Nr. 142/1994** – „The 1993 Northeast Water Expedition. Scientific cruise report of RV ‚Polarstern‘ Arctic cruises ARK IX/2 and 3, USCG ‚Polar Bear‘ cruise NEWP and the NEWLand expedition“, edited by Hans-Jürgen Hirche and Gerhard Kattner  
**Heft Nr. 143/1994** – „Detaillierte refraktionsseismische Untersuchungen im inneren Scoresby Sund Ost-Grönland“, von Notker Fechner  
**Heft Nr. 144/1994** – „Russian-German Cooperation in the Siberian Shelf Sea: Geo-System Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens, Hans-Wolfgang Hubberten, Sergey M. Pryamikov and Rüdiger Stein
- \* **Heft Nr. 145/1994** – „The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report of RV ‚Polarstern‘ Arctic Cruises IX/2 and 3“, edited by Gerhard Kattner and Hans-Jürgen Hirche.  
**Heft Nr. 146/1994** – „Radiation Measurements at the German Antarctic Station Neumayer 1982 - 1992“, by Torsten Schmidt and Gerd König-Langlo  
**Heft Nr. 147/1994** – „Krustenstrukturen und Verlauf des Kontinentalrandes im Weddell-See / Antarktis“, von Christian Hübscher
- \* **Heft Nr. 148/1994** – „The expeditions NORILSK/TAYMYR 1993 and BUNGER OASIS 1993/94 of the AWI Research Unit Potsdam“, edited by Martin Melles
- \*\* **Heft Nr. 149/1994** – „Die Expedition ARKTIS '93. Der Fahrtabschnitt ARK-IX/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1993“, herausgegeben von Dieter K. Fütterer

- Heft Nr. 150/1994** – „Der Energiebedarf der Pygoscelis-Pinguine: eine Synopse“, von Boris M. Culik
- Heft Nr. 151/1994** – „Russian-German Cooperation: The Transdrift I Expedition to the Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens and Valeriy Y. Karpiy
- Heft Nr. 152/1994** – „Die Expedition ANTARKTIS-X mit FS ‚Polarstern‘ 1992. Bericht von den Fahrtabschnitten / ANT-X / 1a und 2“, herausgegeben von Heinz Miller
- Heft Nr. 153/1994** – „Aminosäuren und Huminstoffe im Stickstoffkreislauf polarer Meere“, von Ulrike Hubberten
- Heft Nr. 154/1994** – „Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea“, by Claudio Richter
- Heft Nr. 155/1995** – „Benthos in polaren Gewässern“, herausgegeben von Christian Wiencke und Wolf Arntz
- Heft Nr. 156/1995** – „An adjoint model for the determination of the mean oceanic circulation, air-sea fluxes and mixing coefficients“, by Reiner Schlitzer
- Heft Nr. 157/1995** – „Biochemische Untersuchungen zum Lipidstoffwechsel antarktischer Copepoden“, von Kirsten Fahl
- \*\*Heft Nr. 158/1995** – „Die Deutsche Polarforschung seit der Jahrhundertwende und der Einfluß Erich von Drygalskis“, von Cornelia Lüdecke
- \* Heft Nr. 159/1995** – „The distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in the Arctic Ocean: Implications for the freshwater balance of the halocline and the sources of deep and bottom waters“, by Dorothea Bauch
- \* Heft Nr. 160/1995** – „Rekonstruktion der spätquartären Tiefenwasserzirkulation und Produktivität im östlichen Südatlantik anhand von benthischen Foraminiferenvergesellschaftungen“, von Gerhard Schmiedl
- Heft Nr. 161/1995** – „Der Einfluß von Salinität und Lichtintensität auf die Osmolytkonzentrationen, die Zellvolumina und die Wachstumsraten der antarktischen Eisdiatomeen *Chaetoceros sp.* und *Navicula sp.* unter besonderer Berücksichtigung der Aminosäuren Prolin“, von Jürgen Nothnagel
- Heft Nr. 162/1995** – „Meereistransportiertes lithogenes Feinmaterial in spätquartären Tiefseesedimenten des zentralen östlichen Arktischen Ozeans und der Framstraße“, von Thomas Letzig
- Heft Nr. 163/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/2 mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94“, herausgegeben von Rainer Gersonde
- Heft Nr. 164/1995** – „Regionale und altersabhängige Variation gesteinsmagnetischer Parameter in marinen Sedimenten der Arktis“, von Thomas Frederichs
- Heft Nr. 165/1995** – „Vorkommen, Verteilung und Umsatz biogener organischer Spurenstoffe: Sterole in antarktischen Gewässern“, von Georg Hanke
- Heft Nr. 166/1995** – „Vergleichende Untersuchungen eines optimierten dynamisch-thermodynamischen Meereismodells mit Beobachtungen im Weddellmeer“, von Holger Fischer
- Heft Nr. 167/1995** – „Rekonstruktionen von Paläo-Umweltparametern anhand von stabilen Isotopen und Faunen-Vergesellschaftungen planktischer Foraminiferen im Südatlantik“, von Hans-Stefan Niebler
- Heft Nr. 168/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS XII mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT XII/1 und 2“, herausgegeben von Gerhard Kattner und Dieter Karl Fütterer
- Heft Nr. 169/1995** – „Medizinische Untersuchung zur Circadianrhythmik und zum Verhalten bei Überwinterern auf einer antarktischen Forschungsstation“, von Hans Wortmann
- Heft Nr. 170/1995** – DFG-Kolloquium: Terrestrische Geowissenschaften – Geologie und Geophysik der Antarktis
- Heft Nr. 171/1995** – „Strukturentwicklung und Petrogenese des metamorphosen Grundgebirges der nördlichen Heimfrontjella (westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Wilfried Bauer
- Heft Nr. 172/1995** – „Die Struktur der Erdkruste im Bereich des Scoresby Sund, Ostgrönland: Ergebnisse refraktionsseismischer und gravimetrischer Untersuchungen“, von Holger Mandler
- Heft Nr. 173/1995** – „Paläozoische Akkretion am paläopazifischen Kontinentalrand der Antarktis in Nordvictorialand – P-T-G-Geschichte und Deformationsmechanismen im Bowers Terrane“, von Stefan Matzer
- Heft Nr. 174/1995** – „The Expedition ARKTIS-X/2 of RV ‚Polarstern‘ in 1994“, edited by Hans-W. Hubberten
- Heft Nr. 175/1995** – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1994“, edited by Christine Siegert and Gmitry Bolshiyayov
- \* Heft Nr. 176/1995** – „Russian-German Cooperation: Laptev Sea System“, edited by Heidemarie Kassens, Dieter Piepenburg, Jörn Thiede, Leonid Timokhov, Hans-Wolfgang Hubberten and Sergey M. Priamikov
- Heft Nr. 177/1995** – „Organischer Kohlenstoff in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans: Terrigener Eintrag und marine Produktivität“, von Carsten J. Schubert
- Heft Nr. 178/1995** – „Cruise ANTARKTIS XII/4 of RV ‚Polarstern‘ in 1995: CTD-Report“, by Jüri Sildam
- Heft Nr. 179/1995** – „Benthische Foraminiferenfaunen als Wassermassen-, Produktions- und Eisdriftanzeiger im Arktischen Ozean“, von Jutta Wollenburg
- Heft Nr. 180/1995** – „Biogenopal und biogenes Barium als Indikatoren für spätquartäre Produktivitätsänderungen am antarktischen Kontinentalhang, atlantischer Sektor“, von Wolfgang J. Bonn
- Heft Nr. 181/1995** – „Die Expedition ARKTIS X/1 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach
- Heft Nr. 182/1995** – „Laptev Sea System: Expeditions in 1994“, edited by Heidemarie Kassens
- Heft Nr. 183/1996** – „Interpretation digitaler Parasound Echolotaufzeichnungen im östlichen Arktischen Ozean auf der Grundlage physikalischer Sedimenteigenschaften“, von Uwe Bergmann



- Heft Nr. 184/1996** – "Distribution and dynamics of inorganic nitrogen compounds in the troposphere of continental, coastal, marine and Arctic areas", by María Dolores Andrés Hernández
- Heft Nr. 185/1996** – „Verbreitung und Lebensweise der Aphroditen und Polynoiden (Polychaeta) im östlichen Weddellmeer und im Lazarevmeer (Antarktis)", von Michael Stiller
- Heft Nr. 186/1996** – "Reconstruction of Late Quaternary environmental conditions applying the natural radionuclides  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{231}\text{Pa}$  and  $^{238}\text{U}$ : A study of deep-sea sediments from the eastern sector of the Antarctic Circumpolar Current System", by Martin Frank
- Heft Nr. 187/1996** – "The Meteorological Data of the Neumayer Station (Antarctica) for 1992, 1993 and 1994", by Gert König-Langlo and Andreas Herber
- Heft Nr. 188/1996** – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1994", herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe
- Heft Nr. 189/1996** – „Die Expedition ARKTIS-VIII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1990", herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe
- Heft Nr. 190/1996** – "Cruise report of the Joint Chilean-German-Italian Magellan ‚Victor Hensen‘ Campaign in 1994", edited by Wolf Arntz and Matthias Gorny
- Heft Nr. 191/1996** – „Leitfähigkeits- und Dichtemessung an Eisbohrkernen", von Frank Wilhelms
- Heft Nr. 192/1996** – „Photosynthese-Charakteristika und Lebensstrategie antarktischer Makroalgen", von Gabriele Weykam
- Heft Nr. 193/1996** – „Heterogene Reaktionen von  $\text{N}_2\text{O}_5$  und Hbr und ihr Einfluß auf den Ozonabbau in der polaren Stratosphäre", von Sabine Seisel
- Heft Nr. 194/1996** – „Ökologie und Populationsdynamik antarktischer Ophiuroiden (Echinodermata)", von Corinna Dahm
- Heft Nr. 195/1996** – „Die planktische Foraminifere *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg) im Weddellmeer, Antarktis", von Doris Berberich
- Heft Nr. 196/1996** – „Untersuchungen zum Beitrag chemischer und dynamischer Prozesse zur Variabilität des stratosphärischen Ozons über der Arktis", von Birgit Hesse
- Heft Nr. 197/1996** – "The Expedition ARKTIS-XI/2 of ‚Polarstern‘ in 1995", edited by Gunther Krause
- Heft Nr. 198/1996** – „Geodynamik des Westantarktischen Riftsystems basierend auf Apatit-Spaltspuranalysen", von Frank Lisker
- Heft Nr. 199/1996** – "The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report on CTD Measurements of RV ‚Polarstern‘ Cruises ARKTIS IX/2 and 3", by Gerion Budéus and Wolfgang Schneider
- Heft Nr. 200/1996** – "Stability of the Thermohaline Circulation in analytical and numerical models", by Gerrit Lohmann
- Heft Nr. 201/1996** – „Trophische Beziehungen zwischen Makroalgen und Herbivoren in der Potter Cove (King George-Insel, Antarktis)", von Katrin Iken
- Heft Nr. 202/1996** – „Zur Verbreitung und Respiration ökologisch wichtiger Bodentiere in den Gewässern um Svalbard (Arktis)", von Michael K. Schmid
- \* **Heft Nr. 203/1996** – „Dynamik, Rauigkeit und Alter des Meereises in der Arktis – Numerische Untersuchungen mit einem großskaligen Modell", von Markus Harder
- Heft Nr. 204/1996** – „Zur Parametrisierung der stabilen atmosphärischen Grenzschicht über einem antarktischen Schelfeis", von Dörthe Handorf
- Heft Nr. 205/1996** – "Textures and fabrics in the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation", by Thorsteinn Thorsteinsson
- Heft Nr. 206/1996** – „Der Ozean als Teil des gekoppelten Klimasystems: Versuch der Rekonstruktion der glazialen Zirkulation mit verschiedenen komplexen Atmosphärenkomponenten", von Kerstin Fieg
- Heft Nr. 207/1996** – „Lebensstrategien dominanter antarktischer Oithonidae (Cyclopoida, Copepoda) und Oncaeiidae (Poecilostomatoida, Copepoda) im Bellingshausenmeer", von Cornelia Metz
- Heft Nr. 208/1996** – „Atmosphäreneinfluß bei der Fernerkundung von Meereis mit passiven Mikrowellenradiometern", von Christoph Oelke
- Heft Nr. 209/1996** – „Klassifikation von Radarsatellitendaten zur Meereiserkennung mit Hilfe von Line-Scanner-Messungen", von Axel Bochert
- Heft Nr. 210/1996** – „Die mit ausgewählten Schwämmen (Hexactinellida und Demospongiae) aus dem Weddellmeer, Antarktis, vergesellschaftete Fauna", von Kathrin Kunzmann
- Heft Nr. 211/1996** – "Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1995 and the Expedition KOLYMA 1995", by Dima Yu. Bolshiyarov and Hans-W. Hubberten
- Heft Nr. 212/1996** – "Surface-sediment composition and sedimentary processes in the central Arctic Ocean and along the Eurasian Continental Margin", by Ruediger Stein, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan and Kirsten Fahl
- Heft Nr. 213/1996** – „Gonadenentwicklung und Eiproduktion dreier *Calanus*-Arten (Copepoda): Freilandbeobachtungen, Histologie und Experimente", von Barbara Niehoff
- Heft Nr. 214/1996** – „Numerische Modellierung der Übergangszone zwischen Eisschild und Eisschelf", von Christoph Mayer
- Heft Nr. 215/1996** – „Arbeiten der AWI-Forschungsstelle Potsdam in Antarktika, 1994/95", herausgegeben von Ulrich Wand

**Heft Nr. 216/1996** – „Rekonstruktion quartärer Klimaänderungen im atlantischen Sektor des Südpolarmeeres anhand von Radiolarien“, von Uta Brathauer

**Heft Nr. 217/1996** – „Adaptive Semi-Lagrange-Finite-Elemente-Methode zur Lösung der Flachwassergleichungen: Implementierung und Parallelisierung“, von Jörn Behrens

**Heft Nr. 218/1997** – “Radiation and Eddy Flux Experiment 1995 (REFLEX III)”, by Jörg Hartmann, Axel Bochert, Dietmar Freese, Christoph Kottmeier, Dagmar Nagel and Andreas Reuter

**Heft Nr. 219/1997** – „Die Expedition ANTARKTIS-XII mit FS ‚Polarstern‘ 1995. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XII/3“, herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter

**Heft Nr. 220/1997** – „Ein Beitrag zum Schwerfeld im Bereich des Weddellmeeres, Antarktis. Nutzung von Altimetermessungen des GEOSAT und ERS-1“, von Tilo Schöne

**Heft Nr. 221/1997** – „Die Expeditionen ANTARKTIS-XIII/1-2 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1995/96“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Mike Lukas und Victor Smetacek

**Heft Nr. 222/1997** – “Tectonic Structures and Glaciomarine Sedimentation in the South-Eastern Weddell Sea from Seismic Reflection Data”, by László Oszkó

**Heft Nr. 223/1997** – „Bestimmung der Meereisdicke mit seismischen und elektromagnetisch-induktiven Verfahren“, von Christian Haas

**Heft Nr. 224/1997** – „Troposphärische Ozonvariationen in Polarregionen“, von Silke Wessel

**Heft Nr. 225/1997** – „Biologische und ökologische Untersuchungen zur kryopelagischen Amphipodenfauna des arktischen Meereises“, von Michael Poltermann

**Heft Nr. 226/1997** – “Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XI/1 of RV ‚Polarstern‘ in 1995“, edited by Eike Rachor

**Heft Nr. 227/1997** – „Der Einfluß kompatibler Substanzen und Kryoprotektoren auf die Enzyme Malatdehydrogenase (MDH) und Glucose-6-phosphat-Dehydrogenase (G6P-DH) aus *Acrosiphonia arcta* (Chlorophyta) der Arktis“, von Katharina Kück

**Heft Nr. 228/1997** – „Die Verbreitung epibenthischer Mollusken im chilenischen Beagle-Kanal“, von Katrin Linse

**Heft Nr. 229/1997** – „Das Mesozooplankton im Laptevmeer und östlichen Nansen-Becken – Verteilung und Gemeinschaftsstruktur im Spätsommer“, von Hinrich Hanssen

**Heft Nr. 230/1997** – „Modell eines adaptierbaren, rechnergestützten, wissenschaftlichen Arbeitsplatzes am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung“, von Lutz-Peter Kurdelski

**Heft Nr. 231/1997** – „Zur Ökologie arktischer und antarktischer Fische: Aktivität, Sinnesleistungen und Verhalten“, von Christopher Zimmermann

**Heft Nr. 232/1997** – „Persistente chlororganische Verbindungen in hochantarktischen Fischen“, von Stephan Zimmermann

**Heft Nr. 233/1997** – „Zur Ökologie des Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP)-Gehaltes temperierter und polarer Phytoplanktongemeinschaften im Vergleich mit Laborkulturen der Coccolithophoride *Emiliania huxleyi* und der antarktischen Diatomee *Nitzschia lecontei*“, von Doris Meyerdierks

**Heft Nr. 234/1997** – „Die Expedition ARCTIC '96 des FS ‚Polarstern‘ (ARK XIII) mit der Arctic Climate System Study (ACSYS)“, von Ernst Augstein und den Fahrteilnehmern

**Heft Nr. 235/1997** – „Polonium-210 und Blei-210 im Südpolarmeer: Natürliche Tracer für biologische und hydrographische Prozesse im Oberflächenwasser des Antarktischen Zirkumpolarstroms und des Weddellmeeres“, von Jana Friedrich

**Heft Nr. 236/1997** – “Determination of atmospheric trace gas amounts and corresponding natural isotopic ratios by means of ground-based FTIR spectroscopy in the high Arctic”, by Arndt Meier

**Heft Nr. 237/1997** – “Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR/SEVERNAYA ZEMLYA 1996“, edited by Martin Melles, Birgit Hagedorn and Dmitri Yu. Bolshiyarov

**Heft Nr. 238/1997** – “Life strategy and ecophysiology of Antarctic macroalgae”, by Iván M. Gómez

**Heft Nr. 239/1997** – „Die Expedition ANTARKTIS XIII/4-5 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1996“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach und Dieter Gerdes

**Heft Nr. 240/1997** – „Untersuchungen zur Chrom-Speziation in Meerwasser, Meereis und Schnee aus ausgewählten Gebieten der Arktis“, von Heide Giese

**Heft Nr. 241/1997** – “Late Quaternary glacial history and paleoceanographic reconstructions along the East Greenland continental margin: Evidence from high-resolution records of stable isotopes and ice-rafted debris“, by Seung-Il Nam

**Heft Nr. 242/1997** – “Thermal, hydrological and geochemical dynamics of the active layer at a continuous permafrost site, Taymyr Peninsula, Siberia“, by Julia Boike

**Heft Nr. 243/1997** – „Zur Paläoozeanographie hoher Breiten: Stellvertreterdaten aus Foraminiferen“, von Andreas Mackensen

**Heft Nr. 244/1997** – “The Geophysical Observatory at Neumayer Station, Antarctica, Geomagnetic and seismological observations in 1995 and 1996“, by Alfons Eckstaller, Thomas Schmidt, Viola Graw, Christian Müller and Johannes Rogenhagen

**Heft Nr. 245/1997** – „Temperaturbedarf und Biogeographie mariner Makroalgen – Anpassung mariner Makroalgen an tiefe Temperaturen“, von Bettina Bischoff-Bäsmann

**Heft Nr. 246/1997** – „Ökologische Untersuchungen zur Fauna des arktischen Meereises“, von Christine Friedrich

**Heft Nr. 247/1997** – „Entstehung und Modifizierung von marinen gelösten organischen Substanzen“, von Berit Kirchoff

- Heft Nr. 248/1997** – "Laptev Sea System: Expeditions in 1995", edited by Heidemarie Kassens
- Heft Nr. 249/1997** – "The Expedition ANTARKTIS XIII/3 (EASIZ I) of RV 'Polarstern' to the eastern Weddell Sea in 1996", edited by Wolf Arntz and Julian Gutt
- Heft Nr. 250/1997** – „Vergleichende Untersuchungen zur Ökologie und Biodiversität des Mega-Epibenthos der Arktis und Antarktis“, von Adreas Starmans
- Heft Nr. 251/1997** – „Zeitliche und räumliche Verteilung von Mineralvergesellschaftungen in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans und ihre Nützlichkeit als Klimaindikatoren während der Glazial/Inter-glazial-Wechsel“, von Christoph Vogt
- Heft Nr. 252/1997** – „Solitäre Ascidien in der Potter Cove (King Georg Island, Antarktis). Ihre ökologische Bedeutung und Populationsdynamik“, von Stephan Kühne
- Heft Nr. 253/1997** – "Distribution and role of microprotozoa in the Southern Ocean", by Christine Klaas
- Heft Nr. 254/1997** – „Die spätquartäre Klima- und Umweltgeschichte der Bunge-Oase, Ostantarktis“, von Thomas Kulbe
- Heft Nr. 255/1997** – "Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/2 of RV 'Polarstern' in 1997", edited by Ruediger Stein and Kirsten Fahl
- Heft Nr. 256/1998** – „Das Radionuklid Tritium im Ozean: Meßverfahren und Verteilung von Tritium im Südatlantik und im Weddellmeer“, von Jürgen Soltenfuß
- Heft Nr. 257/1998** – „Untersuchungen der Saisonalität von atmosphärischem Dimethylsulfid in der Arktis und Antarktis“, von Christoph Kleefeld
- Heft Nr. 258/1998** – „Bellingshausen- und Amundsenmeer: Entwicklung eines Sedimentationsmodells“, von Frank-Oliver Nitsche
- Heft Nr. 259/1998** – "The Expedition ANTARKTIS-XIV/4 of RV 'Polarstern' in 1997", by Dieter K. Fütterer
- \* **Heft Nr. 260/1998** – „Die Diatomeen der Laptevsee (Arktischer Ozean): Taxonomie und biogeographische Verbreitung“, von Holger Cremer
- Heft Nr. 261/1998** – „Die Krustenstruktur und Sedimentdecke des Eurasischen Beckens, Arktischer Ozean: Resultate aus seismischen und gravimetrischen Untersuchungen“, von Estella Weigelt
- Heft Nr. 262/1998** – "The Expedition ARKTIS-XIII/3 of RV 'Polarstern' in 1997", by Gunther Krause
- Heft Nr. 263/1998** – „Thermo-tektonische Entwicklung von Oates Land und der Shackleton Range (Antarktis) basierend auf Spaltspurenanalysen“, von Thorsten Schäfer
- Heft Nr. 264/1998** – „Messungen der stratosphärischen Spurengase ClO, HCl, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O und OH mittels flugzeuggetragener Submillimeterwellen-Radiometrie“, von Joachim Urban
- Heft Nr. 265/1998** – „Untersuchungen zu Massenhaushalt und Dynamik des Ronne Ice Shelves, Antarktis“, von Astrid Lambrecht
- Heft Nr. 266/1998** – "Scientific Cruise Report of the Kara Sea Expedition of RV 'Akademic Boris Petrov' in 1997", edited by Jens Matthiessen and Oleg Stepanets
- Heft Nr. 267/1998** – „Die Expedition ANTARKTIS-XIV mit FS 'Polarstern' 1997. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XIV/3“, herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter
- Heft Nr. 268/1998** – „Numerische Modellierung der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Meereis in der arktischen Eisrandzone“, von Gerit Birnbaum
- Heft Nr. 269/1998** – "Katabatic wind and Boundary Layer Front Experiment around Greenland (KABEG '97)", by Günther Heinemann
- Heft Nr. 270/1998** – "Architecture and evolution of the continental crust of East Greenland from integrated geophysical studies", by Vera Schlindwein
- Heft Nr. 271/1998** – "Winter Expedition to the Southwestern Kara Sea – Investigations on Formation and Transport of Turbid Sea-Ice", by Dirk Dethleff, Per Loewe, Dominik Weiel, Hartmut Nies, Gesa Kuhlmann, Christian Bahe and Gennady Tarasov
- Heft Nr. 272/1998** – „FTIR-Emissionsspektroskopische Untersuchungen der arktischen Atmosphäre“, von Edo Becker
- Heft Nr. 273/1998** – „Sedimentation und Tektonik im Gebiet des Agulhas Rückens und des Agulhas Plateaus („SETA-RAP“)“, von Gabriele Uenzelmann-Neben
- Heft Nr. 274/1998** – "The Expedition ANTARKTIS XIV/2", by Gerhard Kattner
- Heft Nr. 275/1998** – „Die Auswirkung der ‚NorthEastWater‘-Polynya auf die Sedimentation von NO-Grönland und Untersuchungen zur Paläo-Ozeanographie seit dem Mittelweichsel“, von Hanne Notholt
- Heft Nr. 276/1998** – „Interpretation und Analyse von Potentialfelddaten im Weddellmeer, Antarktis: der Zerfall des Superkontinents Gondwana“, von Michael Studinger
- Heft Nr. 277/1998** – „Koordiniertes Programm Antarktisforschung“. Berichtskolloquium im Rahmen des Koordinierten Programms „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten“, herausgegeben von Hubert Miller
- Heft Nr. 278/1998** – „Messung stratosphärischer Spurengase über Ny-Ålesund, Spitzbergen, mit Hilfe eines bodengebundenen Mikrowellen-Radiometers“, von Uwe Raffalski
- Heft Nr. 279/1998** – "Arctic Paleo-River Discharge (APARD). A New Research Program of the Arctic Ocean Science Board (AOSB)", edited by Ruediger Stein
- Heft Nr. 280/1998** – „Fernerkundungs- und GIS-Studien in Nordostgrönland“ von Friedrich Jung-Rothenhäusler

- Heft Nr. 281/1998** – „Rekonstruktion der Oberflächenwassermassen der östlichen Laptevsee im Holozän anhand von aquatischen Palynomorphen“, von Martina Kunz-Pirrung
- Heft Nr. 282/1998** – “Scavenging of  $^{231}\text{Pa}$  and  $^{230}\text{Th}$  in the South Atlantic: Implications for the use of the  $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  ratio as a paleoproductivity proxy”, by Hans-Jürgen Walter
- Heft Nr. 283/1998** – „Sedimente im arktischen Merreis - Eintrag, Charakterisierung und Quantifizierung“, von Frank Lindemann
- Heft Nr. 284/1998** – „Langzeitanalyse der antarktischen Meereisbedeckung aus passiven Mikrowellendaten“, von Christian H. Thomas
- Heft Nr. 285/1998** – „Mechanismen und Grenzen der Temperaturanpassung beim Pierwurm *Arenicola marina* (L.)“, von Angela Sommer
- Heft Nr. 286/1998** – „Energieumsätze benthischer Filtrierer der Potter Cove (King Georg Island, Antarktis)“, von Jens Kowalke
- Heft Nr. 287/1998** – “Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Research from the Barents Sea up to the Laptev Sea”, edited by Eike Rachor
- Heft Nr. 288/1998** – „Alfred Wegener. Kommentiertes Verzeichnis der schriftlichen Dokumente seines Lebens und Wirkens“, von Ulrich Wutzke
- Heft Nr. 289/1998** – “Retrieval of Atmospheric Water Vapor Content in Polar Regions Using Spaceborne Microwave Radiometry”, by Jungang Miao
- Heft Nr. 290/1998** – „Strukturelle Entwicklung und Petrogenese des nördlichen Kristallingürtels der Shackleton Range, Antarktis: Proterozoische und Ross-orogene Krustendynamik am Rand des Ostantarktischen Kratons“, von Axel Brommer
- Heft Nr. 291/1998** – „Dynamik des arktischen Meereises – Validierung verschiedener Rheologieansätze für die Anwendung in Klimamodellen“, von Martin Kreyscher
- Heft Nr. 292/1998** – „Anthropogene organische Spurenstoffe im Arktischen Ozean, Untersuchungen chlorierter Biphenyle und Pestizide in der Laptevsee, technische und methodische Entwicklungen zur Probenahme in der Arktis und zur Spurenstoffanalyse“, von Sven Utschakowski
- Heft Nr. 293/1998** – „Rekonstruktion der spätquartären Klima- und Umweltgeschichte der Schirmacher Oase und des Wohlthat Massivs (Ostantarktika)“, von Markus Julius Schwab
- Heft Nr. 294/1998** – „Besiedlungsmuster der benthischen Makrofauna auf dem ostgrönländischen Kontinentalhang“, von Klaus Schnack
- Heft Nr. 295/1998** – „Gehäuseuntersuchungen an planktischen Foraminiferen hoher Breiten: Hinweise auf Umweltveränderungen während der letzten 140.000 Jahre“, von Harald Hommers
- Heft Nr. 296/1998** – “Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/1 of RV 'Polarstern' in 1997”, edited by Michael Spindler, Wilhelm Hagen and Dorothea Stübing
- Heft Nr. 297/1998** – „Radiometrische Messungen im arktischen Ozean – Vergleich von Theorie und Experiment“, von Klaus-Peter Johnsen
- Heft Nr. 298/1998** – “Patterns and Controls of  $\text{CO}_2$  Fluxes in Wet Tundra Types of the Taimyr Peninsula, Siberia – the Contribution of Soils and Mosses”, by Martin Sommerkorn
- Heft Nr. 299/1998** – “The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica. Synopsis of research performed within the frame of the Argentinean-German Cooperation at the Dallmann Laboratory and Jubany Station (King George Island, Antarctica, 1991-1997)”, by Christian Wiencke, Gustavo Ferreyra, Wolf Arntz & Carlos Rinaldi
- Heft Nr. 300/1999** – “The Kara Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' 1997: First Results of a Joint Russian-German Pilot Study”, edited by Jens Matthiessen, Oleg V. Stepanets, Ruediger Stein, Dieter K. Fütterer and Eric M. Galimov
- Heft Nr. 301/1999** – “The Expedition ANTARKTIS XV/3 (EASIZ II)”, edited by Wolf E. Arntz and Julian Gutt
- Heft Nr. 302/1999** – „Sterole im herbstlichen Weddellmeer (Antarktis): Großräumige Verteilung, Vorkommen und Umsatz“, von Anneke Mühlebach
- Heft Nr. 303/1999** – „Polare stratosphärische Wolken: Lidar-Beobachtungen, Charakterisierung von Entstehung und Entwicklung“, von Jens Biele
- Heft Nr. 304/1999** – „Spätquartäre Paläoumweltbedingungen am nördlichen Kontinentalrand der Barents- und Kara-See. Eine Multi-Parameter-Analyse“, von Jochen Kries
- Heft Nr. 305/1999** – “Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study (ARTIST)”, by Jörg Hartmann, Frank Albers, Stefania Argentini, Axel Bochert, Ubaldo Bonafé, Wolfgang Cohrs, Alessandro Conidi, Dietmar Freese, Teodoro Georgiadis, Alessandro Ippoliti, Lars Kaleschka, Christof Lüpkes, Uwe Maixner, Giangiuseppe Mastrantonio, Fabrizio Ravegnani, Andreas Reuter, Giuliano Trivellone and Angelo Viola
- Heft Nr. 306/1999** – “German-Russian Cooperation: Biogeographic and biostratigraphic investigations on selected sediment cores from the Eurasian continental margin and marginal seas to analyze the Late Quaternary climatic variability”, edited by Robert R. Spielhagen, Max S. Barash, Gennady I. Ivanov and Jörn Thiede
- Heft Nr. 307/1999** – „Struktur und Kohlenstoffbedarf des Makrobenthos am Kontinentalhang Ostgrönlands“, von Dan Seiler
- Heft Nr. 308/1999** – “ARCTIC '98: The Expedition ARK-XIV/1a of RV 'Polarstern' in 1998”, edited by Wilfried Jokat
- Heft Nr. 309/1999** – „Variabilität der arktischen Ozonschicht: Analyse und Interpretation bodengebundener Millimeterwellenmessungen“, von Björn-Martin Sinnhuber

- Heft Nr. 310/1999** – „Rekonstruktion von Meereisdrift und terrigenem Sedimenteintrag im Spätquartär: Schwermineralassoziationen in Sedimenten des Laptev-See-Kontinentalrandes und des zentralen Arktischen Ozeans“, von Marion Behrends
- Heft Nr. 311/1999** – „Parameterisierung atmosphärischer Grenzschichtprozesse in einem regionalen Klimamodell der Arktis“, von Christoph Abegg
- Heft Nr. 312/1999** – „Solare und terrestrische Strahlungswechselwirkung zwischen arktischen Eisflächen und Wolken“, von Dietmar Freese
- Heft Nr. 313/1999** – „Snow accumulation on Ekströmsen, Antarctica“, by Elisabeth Schlosser, Hans Oerter and Wolfgang Graf
- Heft Nr. 314/1999** – „Die Expedition ANTARKTIS XV/4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach
- Heft Nr. 315/1999** – „Expeditions in Siberia in 1998“, edited by Volker Rachold
- Heft Nr. 316/1999** – „Die postglaziale Sedimentationsgeschichte der Laptevsee: schwermineralogische und sedimentpetrographische Untersuchungen“, von Bernhard Peregovich
- Heft Nr. 317/1999** – „Adaption an niedrige Temperaturen: Lipide in Eisdiatomeen“, von Heidi Lehmal
- Heft Nr. 318/1999** – „Effiziente parallele Lösungsverfahren für elliptische partielle Differentialgleichungen in der numerischen Ozeanmodellierung“, von Natalja Rakowsky
- Heft Nr. 319/1999** – „The Ecology of Arctic Deep-Sea Copepods (Euchaetidae and Aetideidae). Aspects of their Distribution Trophodynamics and Effect on the Carbon Flux“, by Holger Auel
- Heft Nr. 320/1999** – „Modellstudien zur arktischen stratosphärischen Chemie im Vergleich mit Meßdaten“, von Veronika Eyring
- Heft Nr. 321/1999** – „Analyse der optischen Eigenschaften des arktischen Aerosols“, von Dagmar Nagel
- Heft Nr. 322/1999** – „Messungen des arktischen stratosphärischen Ozons: Vergleich der Ozonmessungen in Ny-Ålesund, Spitzbergen, 1997 und 1998“, von Jens Langer
- Heft Nr. 323/1999** – „Untersuchung struktureller Elemente des südöstlichen Weddelmeeres/Antarktis auf der Basis mariner Potentialfelddaten“, von Uwe F. Meyer
- Heft Nr. 324/1999** – „Geochemische Verwitterungstrends eines basaltischen Ausgangsgesteins nach dem spätpleistozänen Gletscherrückzug auf der Taimyrhalbinsel (Zentralsibirien) – Rekonstruktion an einer sedimentären Abfolge des Lama Sees“, von Stefanie K. Harwart
- Heft Nr. 325/1999** – „Untersuchungen zur Hydrologie des arktischen Meereises – Konsequenzen für den kleinskaligen Stofftransport“, von Johannes Freitag
- Heft Nr. 326/1999** – „Die Expedition ANTARKTIS XIV/2 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach
- Heft Nr. 327/1999** – „Gemeinschaftsanalytische Untersuchungen der Harpacticoidenfauna der Magellanregion, sowie erste similaritätsanalytische Vergleiche mit Assoziationen aus der Antarktis“, von Kai Horst George
- Heft Nr. 328/1999** – „Rekonstruktion der Paläo-Umweltbedingungen am Laptev-See-Kontinentalrand während der beiden letzten Glazial/Interglazial-Zyklen anhand sedimentologischer und mineralogischer Untersuchungen“, von Claudia Müller
- Heft Nr. 329/1999** – „Räumliche und zeitliche Variationen atmosphärischer Spurengase aus bodengebundenen Messungen mit Hilfe eines Michelson Interferometers“, von Justus Notholt
- Heft Nr. 330/1999** – „The 1998 Danish-German Excursion to Disko Island, West Greenland“, edited by Angelika Brandt, Helge A. Thomsen, Henning Heide-Jørgensen, Reinhardt M. Kristensen and Hilke Ruhberg
- Heft Nr. 331/1999** – „Poseidon“ Cruise No. 243 (Reykjavik - Greenland - Reykjavik, 24. August - 11. September 1998): Climate change and the Viking-age fjord environment of the Eastern Settlement, sw Greenland“, by Gerd Hoffmann, Antoon Kuijpers and Jörn Thiede
- Heft Nr. 332/1999** – „Modeling of marine biogeochemical cycles with an emphasis on vertical particle fluxes“, by Regina Usbeck
- Heft Nr. 333/1999** – „Die Tanaidaceenfauna des Beagle-Kanals und ihre Beziehungen zur Fauna des antarktischen Festlandsockels“, von Anja Schmidt
- Heft Nr. 334/1999** – „D-Aminosäuren als Tracer für biogeochemische Prozesse im Fluß-Schelf-Ozean-System der Arktis“, von Hans Peter Fitzner
- Heft Nr. 335/1999** – „Ökophysiologische Ursachen der limitierten Verbreitung reptanter decapoder Krebse in der Antarktis“, von Markus Frederich
- Heft Nr. 336/1999** – „Ergebnisse der Untersuchung des grönländischen Inlandeises mit dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren in der Umgebung von NGRIP“, von Fidan Göktas
- Heft Nr. 337/1999** – „Paleozoic and mesozoic tectono-thermal history of central Dronning Maud Land, East Antarctica, – evidence from fission-track thermochronology“, by Stefanie Meier
- Heft Nr. 338/1999** – „Probleme hoher Stoffwechselraten bei Cephalopoden aus verschiedenen geographischen Breiten“, von Susanne Zielinski
- Heft Nr. 339/1999** – „The Expedition ARKTIS XV/1“, edited by Gunther Krause
- Heft Nr. 340/1999** – „Microbial Properties and Habitats of Permafrost Soils on Taimyr Peninsula, Central Siberia“, by Nicolé Schmidt
- Heft Nr. 341/1999** – „Photoacclimation of phytoplankton in different biogeochemical provinces of the Southern Ocean and its significance for estimating primary production“, by Astrid Bracher

- Heft Nr. 342/1999** – "Modern and Late Quaternary Depositional Environment of the St. Anna Trough Area, Northern Kara Sea", edited by Ruediger Stein, Kirsten Fahl, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan and Gennady Tarasov
- Heft Nr. 343/1999** – "ESF-IMPACT Workshop/Oceanic impacts: mechanisms and environmental perturbations, 15.-17. April 1999 in Bremerhaven", edited by Rainer Gersonde and Alexander Deutsch
- Heft Nr. 344/1999** – „Die Klimageschichte der hohen nördlichen Breiten seit dem mittleren Miozän: Hinweise aus sedimentologischen-tonmineralogischen Analysen (ODP Leg 151, zentrale Framstraße)", von Amelie Winkler
- Heft Nr. 345/1999** – „Kurzfristige Klimaschwankungen im Scotiameer und Ergebnisse zur Kalbungsgeschichte der Antarktis während der letzten 200 000 Jahre", von Annette Hofmann
- Heft Nr. 346/2000** – „Glazialmarine Sedimentationsentwicklung am westantarktischen Kontinentalrand im Amundsen- und Bellingshausenmeer – Hinweise auf Paläumweltveränderungen während der quartären Klimazyklen", von Claus-Dieter Hillenbrand
- Heft Nr. 347/2000** – „Zur Ökologie des Phytoplanktons im arktischen Laptevmeer – ein jahreszeitlicher Vergleich", von Kirsten Tuschling
- Heft Nr. 348/2000** – „Untersuchungen zum Fettstoffwechsel des Südlichen See-Elefanten (*Mirounga leonina* L.) in der Antarktis", von Sven Ramdohr
- Heft Nr. 349/2000** – „Licht- und Temperatureinfluß auf den enzymatischen Oxidationsschutz der antarktischen Eisdiatomee *Entomoneis kufferathii* Manguin", von Raimund Schriek
- Heft Nr. 350/2000** – „Die Expedition ARKTIS XV/3 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1999", herausgegeben von Ursula Schauer
- Heft Nr. 351/2000** – "Dissolution kinetics of biogenic silica in marine environments", by Dirk Rickert
- Heft Nr. 352/2000** – „Geometrie und Kinematik des tertiären Deckenbaus im West Spitzbergen Falten- und Überschiebungsgürtel, Brøggerhalvøya, Svalbard", von Kerstin Saalmann
- Heft Nr. 353/2000** – „Zur Ökologie der Benthos-Foraminiferen der Potter Cove (King George Island, Antarktis)", von Michael Mayer
- Heft Nr. 354/2000** – "Expeditions in Siberia in 1999", edited by Volker Rachold
- Heft Nr. 355/2000** – „Temperaturrekonstruktion im Tropischen Atlantik für das Letzte Glaziale Maximum: CLIMAP neu betrachtet.", von Carsten Porthun
- Heft Nr. 356/2000** – „Niederfrequente Variabilität großräumiger atmosphärischer Zirkulationsstrukturen in spektralen Modellen niedriger Ordnung", von Antje Weisheimer
- Heft Nr. 357/2000** – "Late Quaternary paleoclimatic reconstructions along the Eurasian continental margin", by Hans Peter Kleiber
- Heft Nr. 358/2000** – "Holocene environmental history of East Greenland - evidence from lake sediments", by Bernd Wagner
- Heft Nr. 359/2000** – "Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Ecology of the White Sea with Emphasis on its Deep Basin", edited by Eike Rachor
- Heft Nr. 360/2000** – "Scientific Cruise Report of the Joint Russian-German Kara-Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' in 1999", edited by Ruediger Stein and Oleg Stepanets
- Heft Nr. 361/2000** – "Planktic foraminifer ecology and stable isotope geochemistry in the Arctic Ocean: implications from water column and sediment surface studies for quantitative reconstructions of oceanic parameters", by Renate Volkmann
- Heft Nr. 362/2000** – „Eisbohrkernuntersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität von Temperatur und Niederschlagsrate im Spätholozän in Nordgrönland", von Matthias Schwager
- Heft Nr. 363/2000** – „Benthische Peracarida (Crustacea, Malacostraca) des arktischen Mellemfjordes, West-Grönland", von Anne-Nina Lörz
- Heft Nr. 364/2000** – „Die Expedition ANTARKTIS XVI/3-4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1999", herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek und Manfred Reinke
- Heft Nr. 365/2000** – "Organic carbon in Late Quaternary sediments: Responses to paleoenvironmental changes in the Laptev and Kara seas (Arctic Ocean)", by Bettina Boucsein
- Heft Nr. 366/2000** – „Flugzeuggestützte Topographie- und Schweremessung: Meßsystem und Anwendung auf die Region Framstraße, Spitzbergen und Nordostgrönland", von Tobias Boebel
- Heft Nr. 367/2000** – „Messung dielektrischer Eigenschaften polarer Eiskerne", von Frank Wilhelms
- Heft Nr. 368/2000** – "The Expedition ARKTIS-XV/2 of RV 'Polarstern' in 1999", edited by Wilfried Jokat
- Heft Nr. 369/2000** – „Interpretation seismischer und gravimetrischer Daten des Weddellmeeres, Antarktis", von Johannes Rogenhagen
- Heft Nr. 370/2000** – „Struktureigenschaften und Nahrungsbedarf der Zoobenthosgemeinschaften im Bereich des Lomonossowrückens im Arktischen Ozean", von Hendrik Deubel
- Heft Nr. 371/2000** – „Die Rolle der Schneebedeckung für die Kryptogamen-Vegetation in der maritimen Antarktis (Potter-Halbinsel, King George Island)", von Jana Barbro Winkler

\* vergriffen/out of print.

\*\* nur noch beim Autor/only from the author.