Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 61 (2004)

Artikel: Charakterisierung ökologischer Standortfaktoren in alpinen Pflanzengemeinschaften
Autor: Vonlanthen, C. / Bühler, A. / Veit, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-323823

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

C. Vonlanthen[1], A. Bühler[1], H. Veit[1], P. Kammer[2] und W. Eugster[3]

Charakterisierung ökologischer Standortfaktoren in alpinen Pflanzengemeinschaften

Key words:
Klima, Böden, Bodennährstoffe, Geomorphologie, Hydrologie

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Studie über den Einfluss von Stress- und Störungsfaktoren auf die Biodiversität alpiner bzw. subalpiner Pflanzengemeinschaften (Gemmi- und Grimsel-Pass) wurden zum ersten Mal all die Faktoren (Globalstrahlung, UV-B-Strahlung, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Länge der Vegetationsperiode, Saugspannung, Bodennährstoffe, Überschwemmungen, Bodenbewegungen, Lawinenhäufigkeit, Denudation, Auswinterung, Frass, Windschäden und Frosttage), welche potenziell einen Einfluss haben könnten, messtechnisch erfasst. Diese Untersuchung zeigt auf, dass die ökologischen Standortbedingungen in den 14 untersuchten Pflanzengemeinschaften sehr unterschiedlich sind und dass nicht ein einzelner Faktor, sondern das Zusammenspiel einer Vielzahl von Faktoren für das Vorhandensein einer bestimmten Pflanzengemeinschaft verantwortlich ist.

Einleitung

Die Vegetation der alpinen Stufe bildet ein kleinräumiges Mosaik von strukturell und floristisch verschiedenen Pflanzengemeinschaften. Die ökologischen Bedingungen, unter welchen die einzelnen Pflanzengemeinschaften vorkommen, wurden in zahlreichen Büchern beschrieben (z.B. Reisigl & Keller 1994, Favarger & Robert 1995, Ellenberg 1996, Mertz 2000). Meistens basieren diese Beschreibungen auf denselben wenigen Untersuchungen. Vereinzelt sind Studien über Mikroklima (Gigon 1971, Cernusca 1976, Mosimann 1985, Cernusca 1989, Cernusca &

[1] Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern, corinne.vonlanthen@giub.unibe.ch
[2] LLB S1Biologie Universität Bern, Gertrud-Wokerstrasse 5, 3012 Bern
[3] Institut für Pflanzenwissenschaften, ETH Zentrum LFW C55.2, 8092 Zürich

Seeber 1989a, 1989b), Bodennährstoffe und Saugspannungen (z.B. Gigon 1971, Rehder 1970, Rehder 1976, Rehder & Schäfer 1978, Körner et al. 1980, Galland 1982, Fries 1985, Mosimann 1985, Wieser et al. 1989, Körner et al. 1989) vorzufinden. Ullrich (1995) untersuchte den Einfluss von Solifluktionsbewegungen auf alpine Pflanzengemeinschaften. Zusätzlich existieren Untersuchungen über Frass (Cernusca 1989, Dullinger et al. 2003), Länge der Vegetationsperiode (Klug-Pümpel 1982, Wallossek 1990, Kudo 1991) und Lawinen (Erschbamer 1989).

Eine umfassende Studie, die den messtechnisch abgesicherten Vergleich der Standortbedingungen verschiedener Pflanzengemeinschaften ermöglicht, fehlt bisher. Kammer & Möhl (2002) diskutieren die Stressfaktoren (Länge der Vegetationsperiode, hohe und tiefe Temperaturen, tiefe Luftfeuchtigkeit, geringe Bodenfeuchte, Überschwemmungen, hohe Global- und UV-B-Strahlung, geringer Nährstoffgehalt, hohe H^+- und Ca^{2+}-Konzentrationen, Wind, Bodenbewegung) und Störungsfaktoren (Auswinterung, Frost, Erosion, Lawinen, Windschäden, Frass), die einen Einfluss auf alpine Vegetation haben könnten. Im Folgenden sind Stress und Störung nach Grime (2001) definiert: «Stress ist eine externe Einschränkung, welche die Trockenmassenproduktion der gesamten oder Teile der Vegetation limitiert» und «Störung wird als Mechanismus angesehen, welcher die Biomasse limitiert, indem er sie ganz oder teilweise zerstört». In dieser Studie wird Bodenbewegung nicht wie von Kammer & Möhl (2002) vorgeschlagen als Stressfaktor, sondern als Störungsfaktor angesehen.

Ziel dieser Untersuchung ist es, den messtechnisch abgesicherten Vergleich der Standortbedingungen von 14 subalpinen bzw. alpinen Pflanzengemeinschaften zu machen. Dafür werden die von Kammer & Möhl (2002) ausgewählten Stress- und Störungsfaktoren erfasst und ihre Charakteristika diskutiert. Die vorliegende Studie bildet die Grundlage, mit welcher die Bedeutung von Stress- und Störungsfaktoren auf die Biodiversität alpiner Pflanzengemeinschaften ermittelt werden soll.

Untersuchungsgebiete

In dieser Studie wurden nur Pflanzengemeinschaften berücksichtigt, die in den Alpen weit verbreitet vorkommen und in der pflanzensoziologischen Literatur (Landolt & Urbanska 1989, Grabherr & Mucina 1993, Ellenberg 1996) breit abgeschützt sind. Die 14 Pflanzengemeinschaften wurden auf Grund ihrer floristischen Zusammensetzung (Charakterarten, dominierende Arten) in den Untersuchungsgebieten ausgewählt. Sie stimmen in dieser Hinsicht mit der pflanzensoziologischen Literatur überein *(Tab. 1)*.

Die beiden Untersuchungsgebiete (Gemmi- und Grimsel-Pass) liegen im westlichen Teil der Schweizer Zentralalpen. Das Aaremassiv, welches vorwiegend aus Graniten und Gneisen besteht, bildet den geologischen Untergrund des Grimsel-Passes aus. Gemäss Imhof (1965–1978) und Landolt & Urbanska (1989) haben sich

Abk.	*Gesellschaft*	*UG*	*Höhe*	*Exp.*	*Neig.*	*DG*	*Charakterarten*
thl	*Thlaspi repens*–Schuttflur Thlaspietum rotundifolii	Ge	2370	NW	27	32	*Cerastium latifolium, Hutchinsia alpina, Linaria alpina, Moehringia ciliata, Thlaspi repens*
leo	*Leontodon montanus*–Schuttflur Leontodontetum montani	Ge	2280	S	23	11	*Galium megalospermum, Leontodon montanus, Ranunculus parnassifolius, Trisetum distichophyllum, Viola cenisia*
polG	*Polytrichum sexangulare*-Schneetälchen Polytrichetum sexangularis	Gr	2182	–	–	92	*Agrostis schraderiana, Gnaphalium supinum, Polytrichum sexangulare, Salix herbacea, Soldanella pusilla*
sal	*Salix herbacea*-Schneetälchen Salicetum herbaceae	Ge	2460	–	–	85	*Alchemilla pentaphyllea, Cerastium cerastoides, Gnaphalium supinum, Salix herbacea, Taraxacum alpinum*
salG	*Salix herbacea*-Schneetälchen Salicetum herbaceae	Gr	2180	–	–	75	*Arenaria biflora, Carex foetida, Gnaphalium supinum, Salix herbacea, Soldanella pusilla*
ely	*Elyna myosuroides*-Rasen Elynetum myosuroidis	Ge	2275	W	0-5	87	*Agrostis alpina, Arenaria ciliata, Elyna myosuroides, Oxytropis campestris, Potentilla crantzii*
fir	*Carex firma*-Rasen Caricetum firmae	Ge	2255	NW	24	90	*Androsace chamaejasme, Carex firma, Chamorchis alpina, Dryas octopetala, Helianthemum alpestre*
ses	*Sesleria caerulae*-Rasen Seslerio-Caricetum sempervirentis	Ge	2335	SE	27	64	*Aster alpinus, Carduus defloratus, Carex sempervirens, Gentiana clusii, Sesleria caerulea*
fer	*Carex ferruginea*-Rasen Caricetum ferrugineae	Ge	1895	NW	27	100	*Anemone narcissiflora, Astragalus frigidus, Carex ferruginea, Festuca pulchella, Pulsatilla alpina*
fes	*Festuca violacea*-Weide Festuco-Trifolietum thalii	Ge	2130	–	–	98	*Alchemilla vulgaris, Crepis aurea, Festuca violacea, Poa alpina, Trifolium thalii*
nar	*Nardus stricta*-Rasen Sieversio-Nardetum strictae	Ge	2125	SE	22	97	*Arnica montana, Campanula barbata, Gentiana acaulis, Geum montanum, Nardus stricta*
curG	*Carex curvula*-Rasen Caricetum curvulae	Gr	2240	S	0–22	82	*Avenula versicolor, Carex curvula, Luzula lutea, Phyteuma hemisphaericum, Veronica bellidioides*
loiG	*Loiseleuria procumbens*-Zwergstrauchheide Loiseleurio-Cetrarietum	Gr	2215	NE	17	80	*Empetrum hermaphroditum, Hieracium alpinum, Loiseleuria procumbens, Vaccinium gaultherioides, Vaccinium vitis-idaea*
cic	*Cicerbita alpina*-Hochstaudenflur Cicerbitetum alpinae	Ge	1765	SE	15	100	*Achillea macrophylla, Adenostyles alliariae, Peucedanum ostruthium, Saxifraga rotundifolia, Viola biflora*

Tabelle 1: Eigenschaften der 14 alpinen Pflanzengemeinschaften. Erklärungen: Abk: Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften – die in den Abbildungen gebrauchten Namen und Syntaxa-Namen sind auf GRABHERR & MUCINA (1993) zurückzuführen, UG: Untersuchungsgebiete (Ge: Gemmi, Gr: Grimsel), Höhe: Höhe über Meer in Metern, Exp.: Exposition, Neig.: Neigung in Grad, DG: Deckungsgrad der Vegetation in %, Auswahl der Charakterarten, welche in den untersuchten Pflanzengemeinschaften vorkamen.

auf dem silikathaltigen Untergrund Ranker, Silikat-Humus-Böden und Podsole entwickelt.

Beim Grimsel-Hospiz werden seit 1959 Klimadaten aufgezeichnet. Die mittlere jährliche Temperatur beträgt 1.5 °C. Im Juli werden die höchsten (Monatsmittelwert von 9.6 °C) und im Januar die tiefsten Temperaturen (Monatsmittel von –5.6 °C) gemessen. Pro Jahr fällt im Durchschnitt 2150 mm Niederschlag. Beim Grimsel-Hospiz dominieren Winde, welche aus nordwestlicher Richtung kommen (Imhof 1965–1978).

Das Substrat des Gemmi-Passes besteht aus mesozoischem Sedimentgestein mit einem normalerweise hohen Karbonatgehalt. Rendzinen, Kalk-Humus-Böden und alpine Braunerden können in diesem Gebiet ausgeschieden werden (Imhof 1965–1978, Landolt & Urbanska 1989). Die Klimabedingungen im Bereich des Gemmi-Passes sind vergleichbar mit denjenigen des Grimsel-Passes.

Methoden

Klimatologische Stressfaktoren

Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung (kurzwellige einfallende Sonnenstrahlung) und Windgeschwindigkeit wurden während der Vegetationsperioden 2002 und 2003 in jeder Pflanzengemeinschaft gemessen *(Tab. 2)*. Zeit und Daten wurden in MESZ (Mitteleuropäische Sommerzeit = UTC [Universal Time Coordinated] + 2 Stunden) gespeichert. Die relativen Feuchtedaten wurden später in Dampfdruckdefizit (VPD = vapor pressure deficit) umgerechnet (Warnecke 1997). Solarzellen, welche die Globalstrahlung gemessen haben, wurden von Fischer (2002) hergestellt und unter natürlichen Bedingungen anhand eines Pyranometers kalibriert. Der Teil des Klimamastes oberhalb der Solarzelle wurde schwarz angestrichen. Die Solarzellen wurden horizontal, südlich des Mastes, befestigt.

Instrument	*Hersteller/Land*	*Umweltfaktor*	*Messbereich*	*Mess-genauigkeit*	*Installation über Boden*
Anemometer Typ f.555.1.18	Schiltknecht CH-Gossau	Wind-geschwindigkeit	0.7–60 m/s	+/– 0.3 m/s	100 cm
XR440 Datenlogger	Pace Scientific Inc. USA-Mooresville N.C.	Daten-speicherung	Signale bis zu 5 V		
TRH 100	Pace Scientific Inc. USA-Mooresville N.C.	Lufttemperatur Rel. Luftfeuchte	T: -40–85 °C RF: 0–100%	T: +/– 0.15 °C RF:+/– 2%	15 cm
amorphe Solarzelle Sunceram 2+	Conrad, CH-Solothurn; Eigenbau Geographisches Institut, CH-Bern	Globalstrahlung	500–900 nm	+/– 20 W/m^2	40 cm

Tabelle 2: Klimastationen.

Alle 10 Minuten wurde ein Mittelwert abgespeichert. Aus diesen Daten wurden Tagesmittel gebildet. Fehlende Tagesmittel wurden mit Hilfe von linearen Regressionen interpoliert. Die Klimastationen wurden vor der ersten Feldsaison (April 2002), im April 2003 und schliesslich nach der zweiten Feldsaison (Oktober 2003) interkalibriert. Gemäss Körner (1999) hat UV-B- und nicht UV-A-Strahlung das grösste Schädigungspotenzial für Pflanzen. Mit Hilfe eines Modells, welches auf den gemessenen Globalstrahlungsdaten basiert, wurden die UV-B-Daten berechnet. Dieses Modell ist auf eine lineare Regression zurückzuführen, wo der Zusammenhang zwischen UV-B-Strahlung und Globalstrahlung auf dem Weissfluhjoch (2509 m ü.M.) ermittelt wurde (PMOD/WRC 2003).

Länge der Vegetationsperiode

Um die Länge der Vegetationsperiode zu ermitteln, wurden während der beiden Feldsaisons (2002 und 2003) die Ausaperungsmuster innerhalb der abgesteckten Fläche kartiert und das Datum des Einschneiens vermerkt. Eine Pflanzengesellschaft galt als ausgeapert, wenn 80% der im Vorjahr definierten Fläche schneefrei war. Aus den Daten wurde ein Mittelwert gebildet.

Pedologische Stressfaktoren

Gemäss Körner (1994) tritt Wasserstress in Pflanzengemeinschaften oberhalb der Waldgrenze nur in den obersten 5 cm auf. Aus diesem Grund wurden während Trockenperioden mit Hilfe eines Quick-Draw-Tensiometers (Agrolab, Ebikon) Saugspannungen in einer Bodentiefe von 4 cm gemessen. Im Juli und August 2002 und 2003 wurde auf beiden Pässen je eine Messkampagne durchgeführt (insgesamt 4 Kampagnen). Bei jeder Messkampagne wurden in jeder Pflanzengemeinschaft 3 Messungen am selben Tag gemacht. Diese 3 Messungen waren räumlich zufällig über die ganze Pflanzengemeinschaft verteilt. Aus den vorhandenen Daten wurde ein Mittelwert gebildet.

In jeder Pflanzengemeinschaft wurden im Hauptwurzelhorizont, d.h. in den obersten 5 cm der Mineralerde, Ende Juli 2003 5 Bodenproben genommen, die räumlich zufällig über die Pflanzengemeinschaft verteilt waren. Aus diesen 5 Bodenproben wurde eine Mischprobe gebildet. Die Bodennährstoffe (Ntot, NH_4, NO_3, P, Mg, Ca, K) sowie der pH-Wert wurden von der Firma Schweizer Samen AG (Thun) nach den Methoden der FAL (1996) analysiert. Alle Bodenproben für Ntot, NH_4 und NO_3 wurden spätestens 3 Stunden nach der Entnahme in einem Kühlfach (–20 °C) aufbewahrt. Die Konzentrationen von wasserlöslichem K, Mg und Ca wurden mittels Atomadsorptionsspektrometrie, Ntot mit Kjeldahl-Destillation und wasserlöslichem NH_4, NO_3 und P mittels Photometrie gemessen. 20 g Boden wurden mit deionisiertem Wasser versetzt, und nach 18 Stunden wurde der pH mittels Glaselektrode im Extrakt gemessen.

Bodenprofile

Die im August 2003 gegrabenen Bodenprofile wurden gemäss der deutschen Bodenklassifikation (AG Bodenkunde 1994) beschrieben.

Hydrologische Stressfaktoren

Während Regenperioden wurde beobachtet, in welchen Pflanzengemeinschaften die Vegetation unter Wasser stand.

Geomorphologische Störungsfaktoren

Zur Erfassung des Frosthubes *(Abb. 1)* wurde im August 2002 in jeder Pflanzengemeinschaft ein 1,4 m langer Stahlstab 1 m tief vergraben. An den 40 cm des Stahlstabes, welche oberhalb der Bodenoberfläche verblieben, wurden 2 Rohrschellen fixiert. Diese Rohrschellen hielten ein transparentes Röhrchen (28 cm) fest. Das dünnere graue Plastikröhrchen (22 cm), welches in das transparente Röhrchen eingeschoben wurde, konnte sich frei nach oben und nach unten mit dem sich hebenden Boden bewegen. Auf das graue Plastikröhrchen wurde ein Schaumgummistück (3 cm) gesetzt. Das Schaumgummistück konnte sich nur aufwärts, nicht aber abwärts bewegen. Mit diesem Apparat können nur maximale Frosthubbeträge gemessen werden. Diese wurden im August 2003 abgelesen.

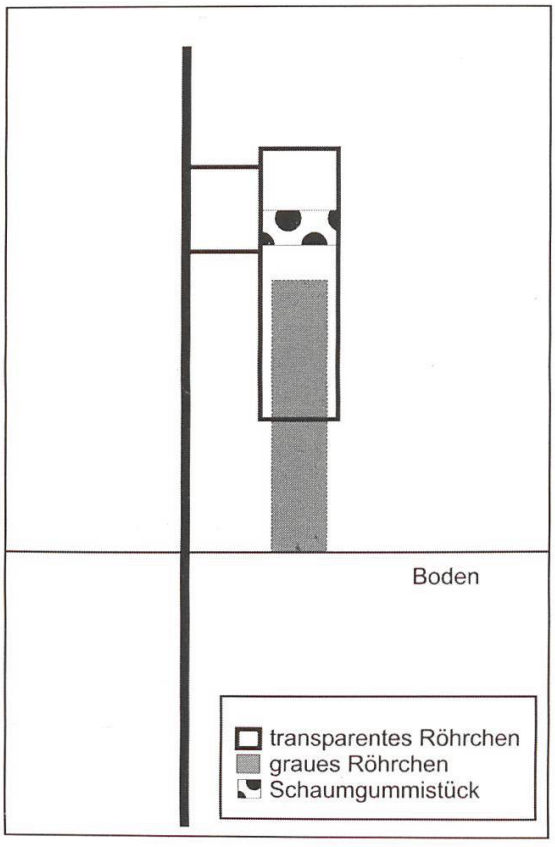

Abbildung 1: Frosthubapparat.

Klasse 0	*Klasse 1*	*Klasse 2*	*Klasse 3*
keine Lawinen	wenige Lawinen	einige Lawinen	viele Lawinen

Tabelle 3: Lawinenklassifikation.

Klasse 0	*Klasse 1*	*Klasse 2*	*Klasse 3*	*Klasse 4*
mehr Akkumulation als Denudation	kleiner Denudationsgrad	mittlerer Denudationsgrad	hoher Denudationsgrad	extrem hoher Denudationsgrad

Tabelle 4: Denudationsklassifikation.

Damit der Apparat gegen Frost geschützt ist, wurde er von einer 41 cm grossen abgedeckten Plastikröhre umgeben.

Um laterale Bodenbewegungen vermessen zu können, wurden Steine markiert und Aluminiumstreifen (40 cm lang, 10 cm breit) im August 2002 lotgerecht vergraben. Die Positionen der markierten Steine und der Aluminiumstreifen wurden mit Hilfe eines Real-Time-GPS (Leica GPS500, Heerbrugg, Messgenauigkeit 1,5 cm) im August 2002 und 2003 eingemessen. Positionsänderungen der Aluminiumstreifen und markierten Steine wurden berechnet. Damit die maximale Bodenbewegung auch im Tiefenprofil sichtbar wurde, wurden Ende August 2003 die Aluminiumstreifen ausgegraben und beschrieben.

Die Anzahl der Lawinenniedergänge wurde im Feld beobachtet *(Tab. 3).* Zusätzlich wurden 10 Personen (Bergführer, Hirten, Bergbahnangestellte usw.) befragt, die mit den Untersuchungsgebieten vertraut sind. Denudation wurde mit Hilfe der Klassifikation auf *Tabelle 4* in allen Pflanzengemeinschaften abgeschätzt. Als Denudation wird der uniforme und flächenhafte Bodenabtrag durch Wasser, Schnee oder Wind angesehen.

Andere Störungsfaktoren

Auswinterungsschäden wurden in je 3 markierten Flächen (0,25 m^2), welche zufällig über die ganze Pflanzengemeinschaft verteilt waren, beobachtet. Diese markierten Flächen wurden zusätzlich alle 2 Wochen während der Vegetationsperiode auf Frassspuren und Windschäden untersucht. Tage mit einer Minimaltemperatur unter 0 °C (gemessen 15 cm über Boden) wurden als Frosttage gekennzeichnet.

Statistische Analysen

Mit Hilfe eines Z-Tests, welcher die zeitliche Abhängigkeit der Daten (Wilks 1995) und Bonferroni-korrigierte Wahrscheinlichkeiten berücksichtigte, wurde getes-

tet, ob die Klimadaten unterschiedliche Mittelwerte aufweisen. Dabei wurde nur die Zeitspanne berücksichtigt, in der alle Klimastationen gemeinsam gemessen haben (12.7.2002 bis 19.9.2002 und 13.7.2003 bis 6.9.2003). Mittelwertvergleiche bei den Saugspannungsdaten wurden mit Hilfe von Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummen-Tests gemacht. Bei den anderen Daten wurden keine Mittelwertvergleiche durchgeführt, da sie einen zu kleinen Stichprobenumfang aufweisen. Die Residuen der Regressionsmodelle wurden auf Normalverteilung und Homoskedastizität überprüft. Ausserdem wurde getestet, ob der Regressionskoeffizient signifikant unterschiedlich von 0 ist.

Resultate und Diskussion

Klimatologische Stressfaktoren

Bei den mittleren Tagesgängen werden hier nur die Kurven vom August 2003 dargestellt. Die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Pflanzengemeinschaften waren in beiden Jahren und Monaten sehr ähnlich den Verhältnissen im August 2003.

Globalstrahlung und UV-B-Strahlung: Im Cicerbitetum alpinae und Caricetum ferrugineae wurden die tiefsten und im Caricetum curvulae und im Salicetum herbaceae (Grimsel-Pass) die höchsten Globalstrahlungsmittel gemessen *(Abb. 2a).* Ab 5 Uhr konnten in beiden Untersuchungsgebieten die ersten Sonnenstrahlen verzeichnet werden *(Abb. 3a, 3b).* Die Globalstrahlungskurve stieg mit Ausnahme der nordexponierten Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass sowie des Cicerbitetum alpinae und des Caricetum curvulae ab 6 Uhr auf dem Grimsel-Pass bzw. ab 7 Uhr auf dem Gemmi-Pass stark an. Während auf dem Grimsel-Pass alle Standorte rasch besonnt wurden, ist auf dem Gemmi-Pass deutlich der Einfluss der Horizonteinschränkung zu erkennen. Ein scharfer Knick der Globalstrahlungskurve einige Stunden nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang zeigt deutlich das Erscheinen der Sonne über dem Horizont an. Damit trifft zusätzlich zur Diffusstrahlung ein Mehrfaches an direkter Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche auf. In den nordexponierten Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass sowie im Cicerbitetum alpinae und im Caricetum curvulae setzt die direkte Sonneneinstrahlung später ein als in den anderen Pflanzengemeinschaften. Dies führt dazu, dass in den nordexponierten Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass tiefere Globalstrahlungsmittel gemessen wurden. Obwohl im Sieversio-Nardetum strictae und Festuco-Trifolietum die höchsten Globalstrahlungswerte (Gemmi-Pass) während des Tages auftraten, wurden hier nicht die höchsten Globalstrahlungsmittel erreicht. In diesen Pflanzengemeinschaften sowie im Polytrichetum sexangularis wurde ab 18 Uhr keine direkte Sonneneinstrahlung mehr gemessen, was durch Schattenwurf bedingt ist. Im Caricetum curvulae

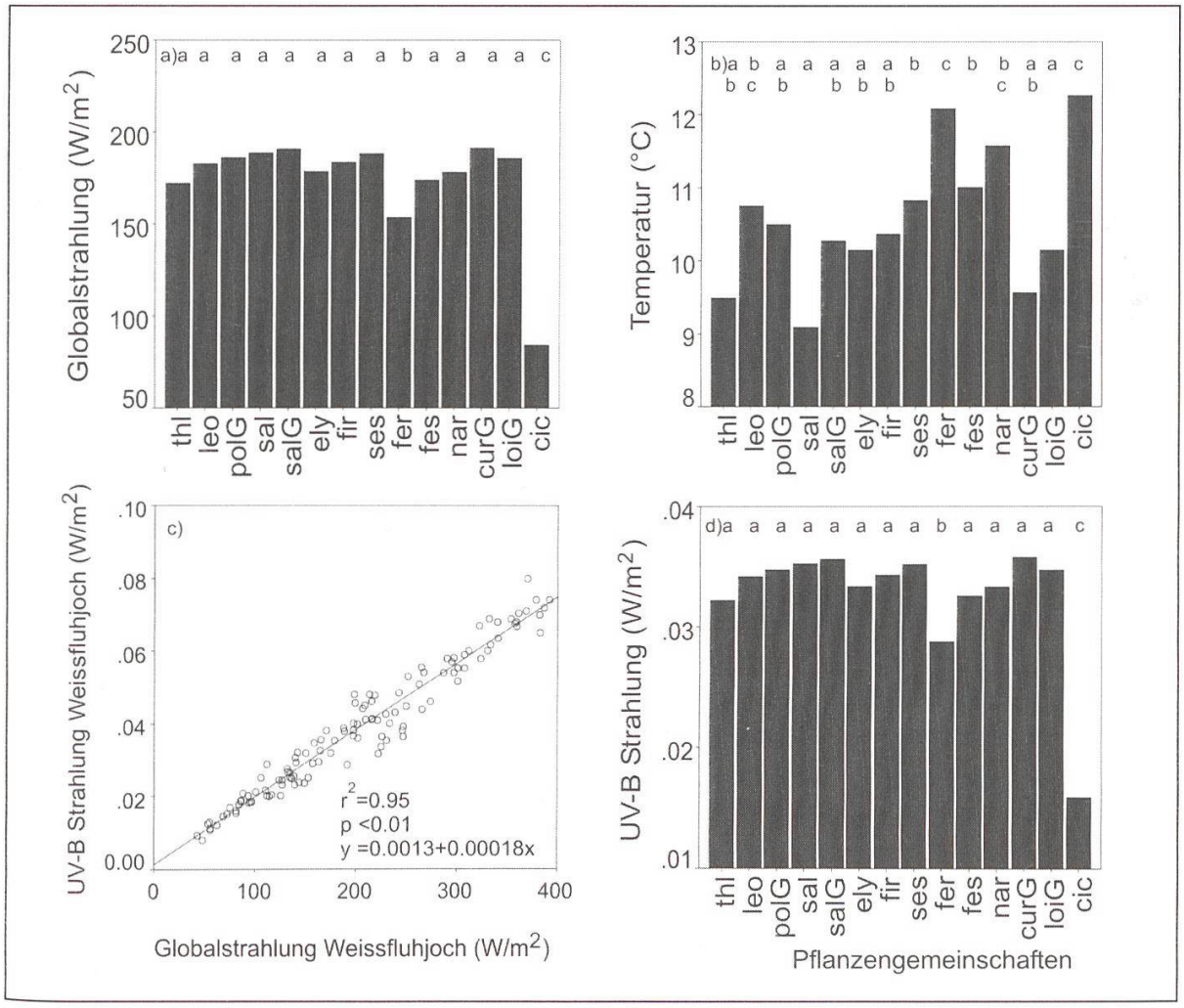

Abbildung 2: Mittelwerte Globalstrahlung, Temperatur, UV-B-Strahlung. a) Globalstrahlung: untersch. Buchstaben geben signifikant untersch. Mittelwerte an (Z-Test, $p < 0.0003$); b) Temperatur: untersch. Buchstaben geben signifikant untersch. Mittelwerte an (Z-Test, $p < 0.0003$); c) Regressionsmodell zur Berechnung der UV-B-Strahlung; d) UV-B-Strahlung: untersch. Buchstaben geben signifikant untersch. Mittelwerte an (Z-Test, $p < 0.0003$). Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

wurden am Morgen zwar tiefere Globalstrahlungswerte gemessen als in den anderen Pflanzengemeinschaften auf dem Grimsel-Pass, aber die Globalstrahlungskurve blieb während längerer Zeit auf höherem Niveau (ca. 3 Std.), was dazu führte, dass das Caricetum curvulae den höchsten Tagesmittelwert aufwies. Mit Ausnahme des Elynetum myosuroidis, Leontodontetum montani und des Caricetum curvulae traten die Globalstrahlungsmaxima zwischen 12 und 13 Uhr auf. In südexponierten Pflanzengemeinschaften wurden mit Ausnahme des Leontodontetum montani und Seslerio-Caricetum sempervirentis höhere Globalstrahlungswerte gemessen als in den anderen Pflanzengemeinschaften. Im Thlaspietum rotundifolii, Caricetum firmae, Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass), Elynetum myosuroidis und Cicerbitetum alpinae zeigen die Globalstrahlungskurven 2 Ta-

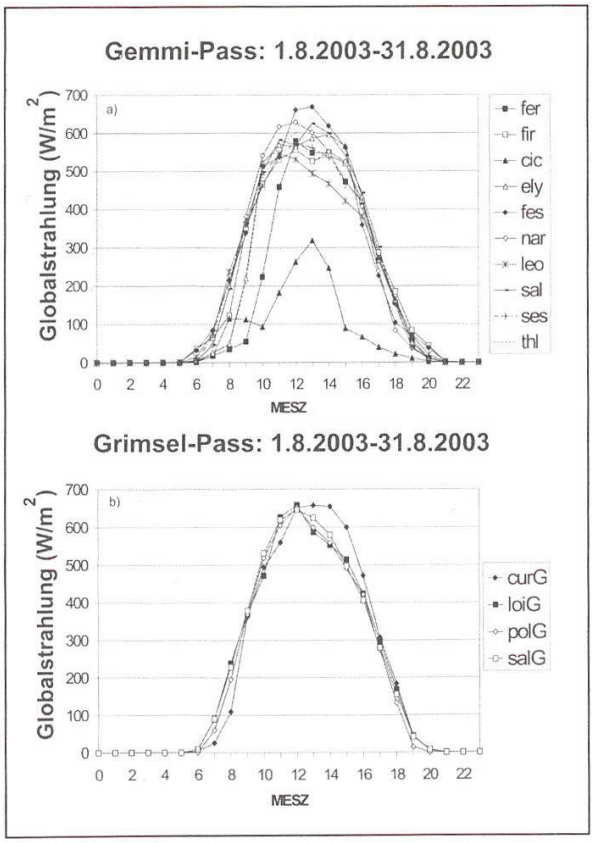

Abbildung 3: Mittlere Tagesgänge: 1.8.2003–31.8.2003. a) Globalstrahlung: Gemmi-Pass; b) Globalstrahlung: Grimsel-Pass. MESZ: mitteleuropäische Sommerzeit. Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

gesspitzen, was durch Schattenwurf bedingt ist. Die tiefen Globalstrahlungswerte im Cicerbitetum alpinae sind ebenfalls auf Schattenwurf (Berge, nahe stehende Bäume) zurückzuführen. Gegen 21 Uhr endet in beiden Untersuchungsgebieten die helle Tagesperiode. Nebst Exposition und Schattenwurf wird die Globalstrahlung auch von der Höhe beeinflusst. Ein Cicerbitetum alpinae, das auf 1765 m ü.M. liegt, hat eine getrübtere Atmosphäre als ein Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass), welches auf 2460 m ü.M. vorkommt. Ausserdem machen sich die unterschiedlichen Neigungen der Pflanzengemeinschaften bemerkbar. Anfang August wäre eine südexponierte Hangneigung von 18.1° (Stull 1988) am idealsten, um am meisten Sonneneinstrahlung zu erhalten. Die gemessenen Globalstrahlungswerte waren in den beiden Untersuchungsgebieten sehr ähnlich.

Abbildung 2c zeigt das Regressionsmodell, mit welchem die UV-B-Daten aus den Globalstrahlungsdaten berechnet wurden. Für die UV-B-Strahlungs-Mittelwerte *(Abb. 2d)* gilt wegen dieser methodischen Abhängigkeit die gleiche Interpretation wie für die Globalstrahlung.

Lufttemperatur: Im Cicerbitetum alpinae und Caricetum ferrugineae wurden die höchsten und im Thlaspietum rotundifolii und Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass) die tiefsten Temperaturmittelwerte ermittelt *(Abb. 2b)*. Der durch Neigung und Exposition bedingte unterschiedliche Strahlungsgenuss beeinflusst die Temperatur stark. Zusätzlich kann nebst Neigung und Exposition vor allem die höhen-

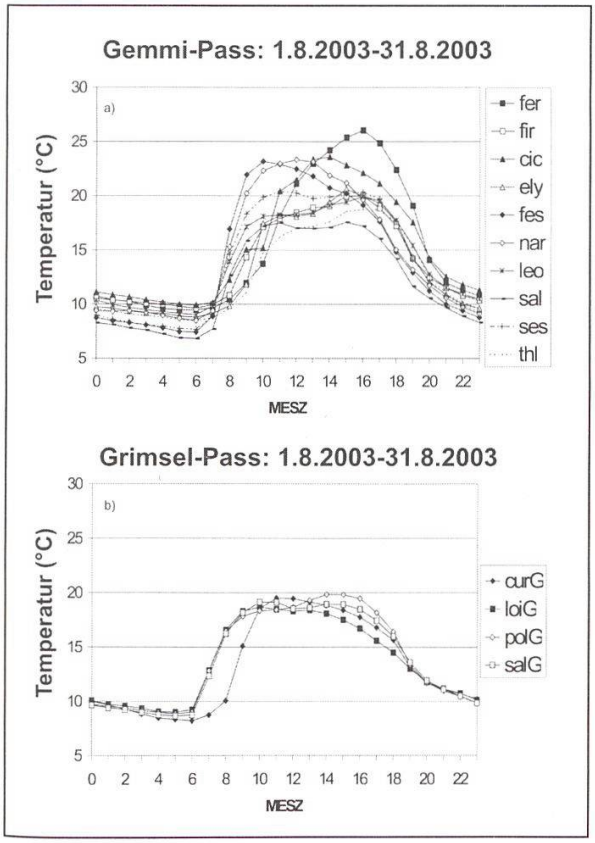

Abbildung 4: Mittlere Tagesgänge: 1.8.2003–31.8.2003. a) Temperatur: Gemmi-Pass; b) Temperatur: Grimsel-Pass. MESZ: mitteleuropäische Sommerzeit. Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

bedingte Temperaturabnahme zur Erklärung der gemessenen Temperaturmittel beitragen. Das Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass), welches auf 2460 m ü.M. liegt, wies einen tieferen Temperaturmittelwert auf als ein Cicerbitetum alpinae, das sich auf 1765 m ü.M. befindet. Die Temperaturmittelwerte im Seslerio-Caricetum sempervirentis und Leontodontetum montani waren im Vergleich mit den anderen Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass zu hoch, d.h. sie lassen sich nicht nur durch die höhenbedingte Temperaturabnahme erklären. Diese beträgt 0.5 bis 0.98 °C pro 100 m. Der unbedeckte Boden hat eine tiefere Albedo als die Vegetation (Weischet 1995). Die Albedo ist ein Mass für die Reflexion der einfallenden Sonnenenergie. Der Boden in den Schutthalden und im Seslerio-Caricetum sempervirentis, welcher nicht voll bedeckt ist, wird während des Tages mehr aufgewärmt als in den Pflanzengemeinschaften, die einen Deckungsgrad von nahezu 100% aufweisen. Die Schutthalden und das Seslerio-Caricetum erfahren dafür in der Nacht eine verstärkte langwellige Wärmeausstrahlung. In den Schutthalden spielt ausserdem auch die spezifische Wärme und die Wärmeleitfähigkeit eine wichtige Rolle. Während des Tages werden die Steine stark aufgewärmt, aber die Wärme wird nicht in das Zentrum der Steine transportiert, was dazu führt, dass die Wärme während der Nacht wieder rasch abgegeben wird. Zudem konnten im Leontodontetum montani sowie im Caricetum firmae der lokale Einfluss einer Temperaturinversion während der Nacht festgestellt werden *(Abb. 4a),* die im Vergleich zu den tiefen Tagesmaxima relativ warme Nachtbedin-

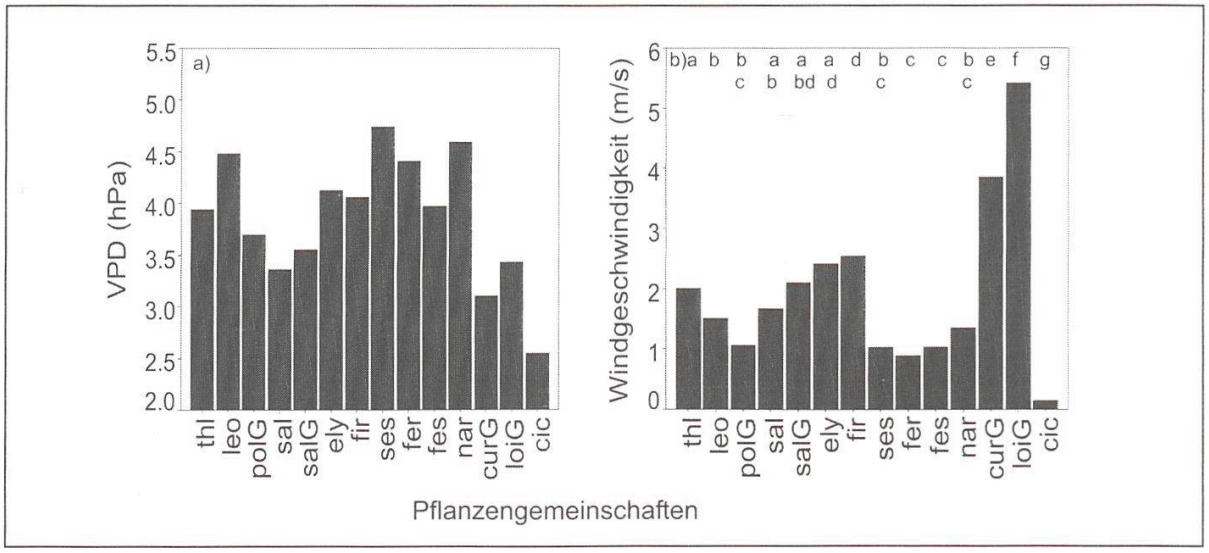

Abbildung 5: Mittelwerte VPD, Windgeschwindigkeit. a) VPD; b) Windgeschwindigkeit: untersch. Buchstaben geben signifikant untersch. Mittelwerte an (Z-Test, $p < 0.0003$). Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

gungen verursachte. Diese beiden Pflanzengemeinschaften liegen somit in einer so genannten warmen Hangzone. Obwohl das Thlaspietum rotundifolii auch eine Schutthalde ist, wurde hier nicht ein übermässig hoher Temperaturmittelwert gemessen. Das Thlaspietum rotundifolii ist im Gegensatz zum Leontodontetum montani und Seslerio-Caricetum sempervirentis nordexponiert und erhielt weniger Globalstrahlung *(Abb. 2a).* Zusätzlich beeinflussen die vergleichsweise hohen Windgeschwindigkeiten *(Abb. 5b),* welche tagsüber im Thlaspietum rotundifolii, Elynetum myosuroidis und im Caricetum firmae sowie in allen Pflanzengemeinschaften auf dem Grimsel-Pass auftraten, die Temperatur. In der Nacht wiesen die mittleren Tagesgänge auf dem Gemmi- und Grimsel-Pass einen ähnlichen Kurvenverlauf auf *(Abb. 4a, 4b).* Die tiefen Temperaturen während der Nacht in den Schneetälchen sowie im Seslerio-Caricetum sempervirentis und im Festuco-Trifolietum thalii waren nebst der höhenbedingten Temperaturabnahme zum Teil auch auf lokale Kaltluftseen mit Temperaturinversion zurückzuführen. All diese Pflanzengemeinschaften befinden sich in Muldenlagen bzw. in kleinen Seitentälern. Im Caricetum curvulae waren die tiefen Temperaturen zwischen 3 bis 9 Uhr vor allem durch vermehrte langwellige Ausstrahlung bedingt. Auf dem Grimsel-Pass stiegen die Temperaturkurven wie die Globalstrahlungskurven ab 6 Uhr und auf dem Gemmi-Pass ab 7 Uhr rasch an. Der Anstieg der Temperaturkurve verlief in den nordexponierten Pflanzengemeinschaften sowie im Caricetum curvulae und im Cicerbitetum alpinae weniger schnell als in den anderen Pflanzengemeinschaften, was durch das spätere Einsetzen der direkten Globalstrahlung bedingt ist. Die nordexponierten Pflanzengemeinschaften und das Leontodontetum montani erreichten ihr Temperaturmaximum später als die südexponierten Pflanzengemeinschaften. Während etwa 5 Stunden lagen die Temperaturen im Caricetum

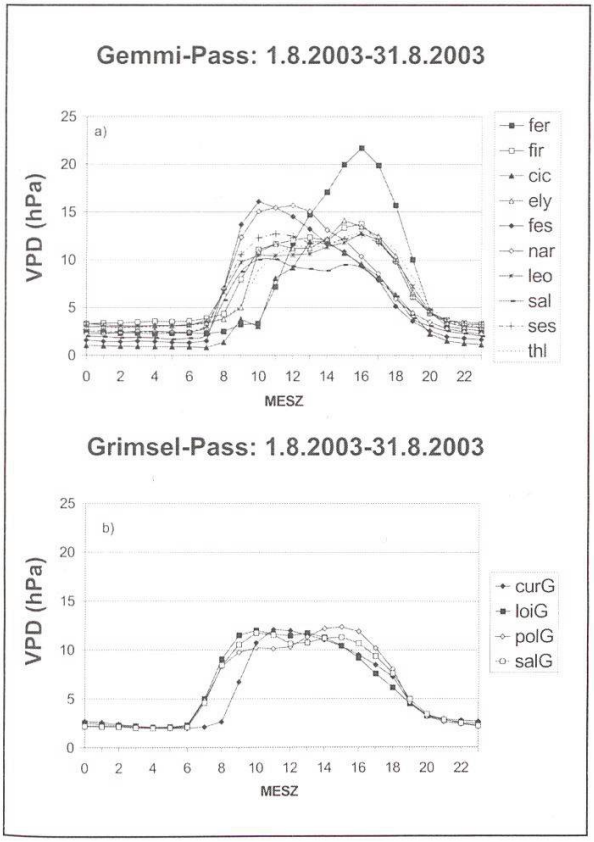

Abbildung 6: Mittlere Tagesgänge: 1.8.2003–31.8.2003. a) VPD: Gemmi-Pass; b) VPD: Grimsel-Pass. MESZ: mitteleuropäische Sommerzeit. Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

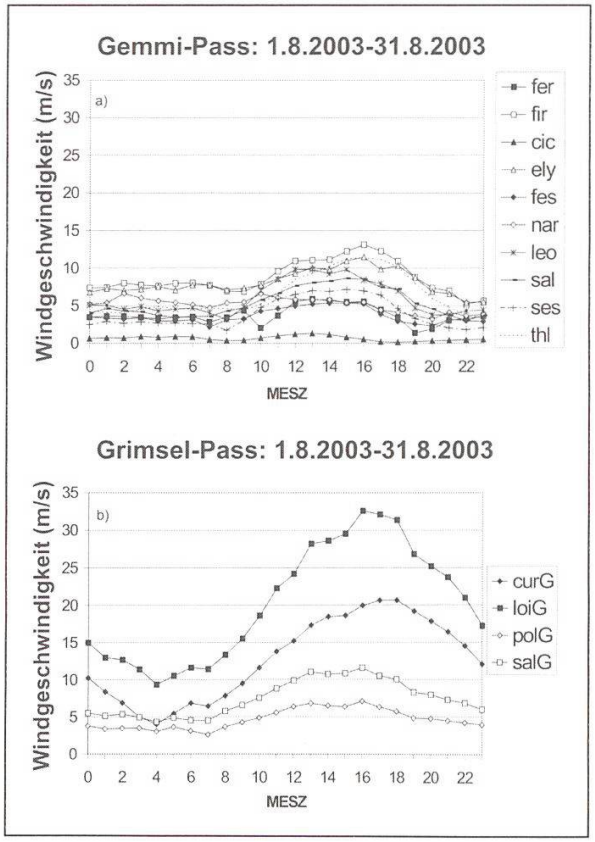

Abbildung 7: Mittlere Tagesgänge: 1.8.2003–31.8.2003. a) Windgeschwindigkeit: Gemmi-Pass; b) Windgeschwindigkeit: Grimsel-Pass. MESZ: mitteleuropäische Sommerzeit. Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

ferrugineae, Sieversio-Nardetum strictae, Festuco-Trifolietum thalii und Cicerbitetum alpinae deutlich über den Werten, welche in den anderen Pflanzengemeinschaften gemessen wurden, was sich in einem hohen Temperaturmittel niederschlug. In den anderen Pflanzengemeinschaften bewegten sich dafür die maximalen Temperaturwerte zwischen 10 und 17 Uhr auf einem ähnlichen Niveau. Die Temperaturkurven zeigen ausserdem im Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass und Grimsel-Pass), Elynetum myosuroidis, Cicerbitetum alpinae und Thlaspietum rotundifolii 2 Tagesspitzen, was durch Schattenwurf bedingt ist. Weil der Boden und in geringem Mass auch die Luft als Wärmespeicher funktionieren, ging die Abkühlung am Abend langsamer vor sich als die Erwärmung am Morgen. Obwohl das Cicerbitetum alpinae das höchste Temperaturmittel aufwies, wurden in dieser Pflanzengemeinschaft die tiefsten Globalstrahlungswerte gemessen. Die grossblättrige Vegetation im Cicerbitetum alpinae wirkt wie eine Isolation für den Boden und verhindert eine starke langwellige Ausstrahlung. Im Cicerbitetum alpinae und Sieversio-Nardetum strictae schwankte die Temperatur-

kurve gleichläufig mit der Globalstrahlungskurve und war nicht wie erwartet um 2 bis 3 Stunden verzögert. Dies deutet auf das Vorhandensein eines thermischen Windsystems hin, welches sofort auf Änderungen der Sonneneinstrahlung reagiert. In allen Pflanzengemeinschaften wurde während des Tages auf dem Grimsel-Pass tiefere Temperaturen gemessen als in den Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass. Dies ist auf die höheren Windgeschwindigkeiten *(Abb. 5b, 7a, 7b)* sowie das offenere Gelände auf dem Grimsel-Pass zurückzuführen.

Luftfeuchte: Das Dampfdruckdefizit (VPD) ist ein Mass dafür, wie viel Wasser der Luft fehlt, um den Sättigungsdampfdruck zu erreichen. Entspricht der aktuelle Dampfdruck dem Sättigungsdampfdruck, so erhält man ein VPD von 0 hPa, die Luft ist also sehr feucht bzw. maximal gesättigt (dies entspricht 100% relativer Feuchte). Im Cicerbitetum alpinae und Caricetum curvulae wurden die tiefsten und im Seslerio-Caricetum sempervirentis und Sieversio-Nardetum strictae die höchsten VPD-Mittelwerte gemessen *(Abb. 5a).* Da sich hier ein komplexes Muster ergibt, wird die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Standorten in *Tabelle 5* aufgezeigt. Das Dampfdruckdefizit ist stark von der Globalstrahlung abhängig, weil vor allem die Sonnenenergie zu hoher Verdunstung bzw. Pflanzentranspiration führt. Die mittleren Tagesgänge zeigen in den beiden Untersuchungsgebieten während der Nacht einen ähnlichen Verlauf *(Abb. 6a, 6b).* Mit Ausnahme des Caricetum curvulae, des Cicerbitetum alpinae und der nordexponierten Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass stiegen die VPD-Kurven auf dem Grimsel-Pass ab 6 Uhr und auf dem Gemmi-Pass ab 7 Uhr rasch an, was auf das Einsetzen der direkten Globalstrahlung zurückzuführen ist. Mit Ausnahme des Leontodontetum montani wurden die maximalen Temperatur- und VPD-Werte in den nordexponierten Pflanzengemeinschaften später gemessen als in den südexponierten. Die mittleren Tagesgänge zeigen, dass die Pflanzen im Sieversio-Nardetum strictae, Festuco-Trifolietum thalii und Caricetum ferrugineae während gut 5 Stunden einem höheren Transpirationspotenzial ausgesetzt waren als die anderen untersuchten Pflanzengemeinschaften. Diese 3 Pflanzengemeinschaften wiesen dafür während der Nacht viel tiefere VPD-Werte auf. Die Taubildung könnte gerade in regenarmen Perioden ein wichtiger Faktor sein im Wasserhaushalt dieser 3 Pflanzengemeinschaften. In den anderen Pflanzengemeinschaften verblieb der maximale VPD-Wert während etwa 6 Stunden auf einem ähnlichen Niveau, wobei im Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass) die tiefsten VPD-Werte auftraten. Im Thlaspietum rotundifolii, Caricetum firmae, Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass), Elynetum myosuroidis und Cicerbitetum alpinae zeigt die VPD-Kurve wie die Globalstrahlungskurve während des Tages 2 Spitzen. Erstaunlicherweise sind kaum föhnbedingte Effekte für die beobachteten Verhältnisse aus den vorliegenden Daten herauszulesen. Am Tag traten in den Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass höhere VPD-Werte und somit trockenere Bedingungen auf als in den Pflanzengemeinschaften auf dem Grimsel-Pass, was vor allem durch die tieferen Temperaturwerte auf dem Grimsel-Pass bedingt ist.

	fer	*fir*	*cic*	*ely*	*fes*	*nar*	*leo*	*sal*	*ses*	*thl*	*curG*	*loiG*	*polG*	*salG*
fer		°	*	°	°	°	°	°	°	°	*	°	°	°
fir	°		°	°	°	°	°	°	°	°	°	°	°	°
cic	*	°		*	*	*	*	°	*	°	°	°	*	°
ely	°	°	*		°	°	°	°	°	°	*	°	°	°
fes	°	°	*	°		*	°	*	*	°	°	°	°	°
nar	°	°	*	°	*		°	*	°	°	*	*	*	*
leo	°	°	*	°	°	°		°	°	°	*	°	°	°
sal	°	°	°	°	*	*	°		*	°	°	°	°	°
ses	°	°	*	°	*	°	°	*		°	*	*	*	*
thl	°	°	°	°	°	°	°	°	°		°	°	°	°
curG	*	°	°	*	°	*	*	°	*	°		°	*	*
loiG	°	°	°	°	°	*	°	°	*	°	°		°	°
polG	°	°	*	°	°	*	°	°	*	°	*	°		°
salG	°	°	°	°	°	*	°	°	*	°	*	°	°	

Tabelle 5: Mittelwerte VPD. Signifikant unterschiedliche Mittelwerte sind mit einem * gekennzeichnet; ° gibt an, dass die Mittelwerte nicht signifikant unterschiedlich sind (Z-Test, $p < 0.0003$). Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

Windgeschwindigkeit: Im Loiseleurio-Cetrarietum und Caricetum curvulae wurden die höchsten und im Cicerbitetum alpinae und Caricetum ferrugineae die tiefsten Windgeschwindigkeitsmittel gemessen *(Abb. 5b).* Die mittleren Tagesgänge zeigen, dass in allen Pflanzengemeinschaften am späteren Nachmittag die höchsten Windgeschwindigkeiten auftraten, was charakteristisch ist für ein ausgeprägtes Talwindregime *(Abb. 7a, 7b).* Im Sieversio-Nardetum strictae und Cicerbitetum alpinae war diese Windgeschwindigkeitsspitze weniger stark ausgeprägt. Auf dem Gemmi-Pass zwischen 8 und10 Uhr und auf dem Grimsel-Pass ab 7 Uhr war ein Anstieg der mittleren Tagesgänge der Windgeschwindigkeit zu vermerken. Je weiter weg sich eine Pflanzengemeinschaft vom Tal befindet, desto höhere Windgeschwindigkeiten wurden gemessen. Das gleiche Phänomen, aber mit umgekehrter Richtung, tritt bei den Bergwinden während der Nacht auf. Bergwinde sind in diesen Hochlagen aber viel weniger stark ausgeprägt als die Talwinde. Aus diesem Grund wurden in allen Pflanzengemeinschaften während der Nacht tiefere Windgeschwindigkeiten gemessen. Die mittleren Tagesgänge zeigen während der Nacht einen ähnlichen Kurvenverlauf auf. Auf dem Gemmi-Pass erfahren Tal- und Bergwinde eine topografische Verengung auf der Höhe des Caricetum firmae. Durch die topografische Verengung entsteht lokal ein

verstärkter Druckgradient, was dazu führt, dass die Luft durch die Verengung beschleunigt wird. Dieses Phänomen wird Venturi- oder Bernoulli-Effekt genannt (Whiteman 2000). Aus diesem Grund wurden auf dem Gemmi-Pass im Caricetum firmae während des ganzen Tages die höchsten Windgeschwindigkeiten verzeichnet. Nebst Tal- und Bergwinden spielt auch das Relief eine grosse Rolle bei der Erklärung der Windgeschwindigkeiten. Die tiefen Windgeschwindigkeiten im Cicerbitetum alpinae, Seslerio-Caricetum sempervirentis, Caricetum ferrugineae, Sieversio-Nardetum strictae, Polytrichetum sexangularis, Salicetum herbaceae (Grimsel-Pass) und im Festuco-Trifolietum thalii sind auf die umgebenden Berge bzw. Hügel zurückzuführen, welche die Pflanzengemeinschaften gegen den Wind abschirmen. Zusätzlich wird die Windgeschwindigkeit im Cicerbitetum alpinae auch durch die umstehenden Bäume beeinflusst, was dazu führt, dass in dieser Pflanzengemeinschaft die tiefsten Windgeschwindigkeiten auftraten. Das Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass) befindet sich zwar in einer Mulde, welche aber in der Hauptwindrichtung der Berg- und Talwinde liegt, was die vergleichsweise hohen Windgeschwindigkeitswerte erklärt. Loiseleurio-Cetrarietum, Elynetum myosuroidis, Caricetum firmae, Caricetum curvulae und Thlaspietum rotundifolii, welche auf exponierten Stellen vorkommen, wiesen die höchsten Windgeschwindigkeiten auf. Gemäss Döbeli (1997) und Schwab (2001) ist die Hauptwindrichtung auf dem Gemmi-Pass N (Lämmerenboden) bzw. NNW bis N (Furggentälti). Synoptische Winde, welche vorwiegend eine W- bis SW-Richtung haben, scheinen auf dem Gemmi-Pass nicht so eine wichtige Rolle zu spielen. Bühler (2004) macht die gleiche Feststellung für den Grimsel-Pass. Wie stark die Windgeschwindigkeiten in den Untersuchungsgebieten durch Hangauf- und -abwinde sowie durch die Ausgleichsströmung über die Pässe beeinflusst wird, kann mit den gemessenen Daten nicht beurteilt werden, da die Windrichtung nicht mitgemessen wurde. Mit Ausnahme des Polytrichetum sexangularis traten auf dem Grimsel-Pass aber höhere Windgeschwindigkeiten auf als auf dem Gemmi-Pass, was auf das offenere Gelände zurückzuführen ist.

Klimabedingungen: Verglichen mit dem 30-jährigen Mittel der Klimastation Grimsel-Hospiz waren die Temperaturtagesmittel auf dem Grimsel-Pass vor allem Mitte Juli und Anfang August 2003 deutlich zu hoch *(Abb. 8a).* Die Temperaturtagesmittel der Vegetationsperiode 2002 waren Anfang August deutlich zu tief, ansonsten konnten keine ausserordentlichen Abweichungen vom 30-jährigen Mittel festgestellt werden. Mit Ausnahme weniger Tage Anfang August 2003 bewegten sich die absoluten Feuchtewerte der Vegetationsperiode 2002 und 2003 innerhalb des 30-jährigen Mittels *(Abb. 8b).* Im Vergleich wies die Vegetationsperiode 2002 vermehrt tiefere Temperaturwerte auf als die Vegetationsperiode 2003. Die gemessenen Globalstrahlungswerte wichen vor allem Mitte Juli und Mitte August sowie Anfang September (2002/2003) deutlich vom 30-jährigen Mittel ab *(Abb. 8c).* Dies ist vor allem sichtbar an den Tagen mit starker Bewölkung und dementsprechend geringer Sonneneinstrahlung.

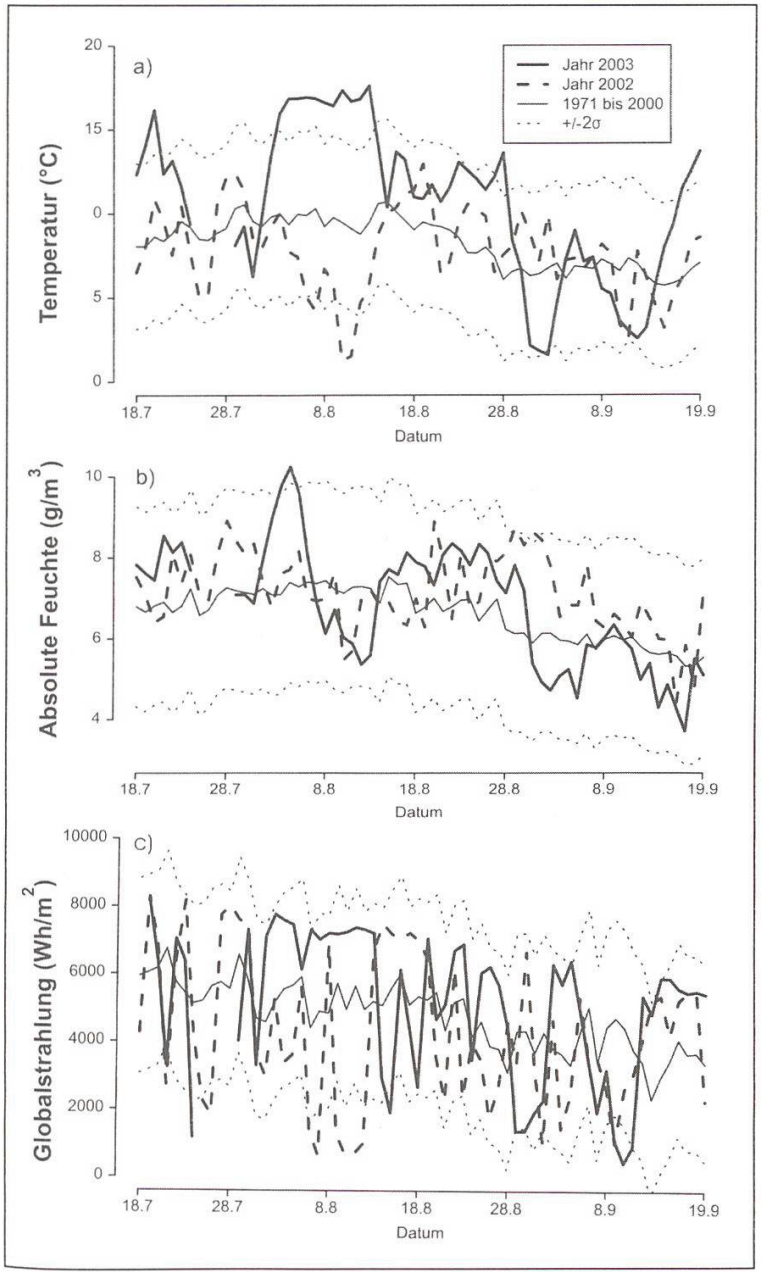

Abbildung 8: Vergleich der gemessenen Klimadaten (Grimsel-Pass) im 30-jährigen Mittel. a) Temperatur (Tagesmittelwerte); b) absolute Feuchte (Tagesmittelwerte); c) Globalstrahlung (Tagessummen), σ = Standardabweichung.
(Quelle: Bühler 2004)

Länge der Vegetationsperiode und Ausaperung

Loiseleurio-Cetrarietum und Elynetum myosuroidis, welche auf windausgesetzten Kuppen vorkommen, waren die Pflanzengemeinschaften, die am spätesten eingeschneit wurden und am frühesten ausaperten *(Abb. 9a)*. Obwohl das Sieversio-Nardetum strictae höher gelegen ist als das Caricetum ferrugineae und Cicerbitetum alpinae aperte es früher aus, was auf die Südexposition und die grössere Hangneigung im Sieversio-Nardetum strictae zurückzuführen ist. Im Cicerbitetum alpinae macht sich zusätzlich auch der die Ausaperung verzögernde Effekt des Schattenwurfs der Bäume bemerkbar. Die nächsten Pflanzengemeinschaften, die schneefrei waren, sind das Caricetum firmae, gefolgt vom Seslerio-Caricetum sempervirentis und Leontodontetum montani. Obwohl Seslerio-Caricetum sem-

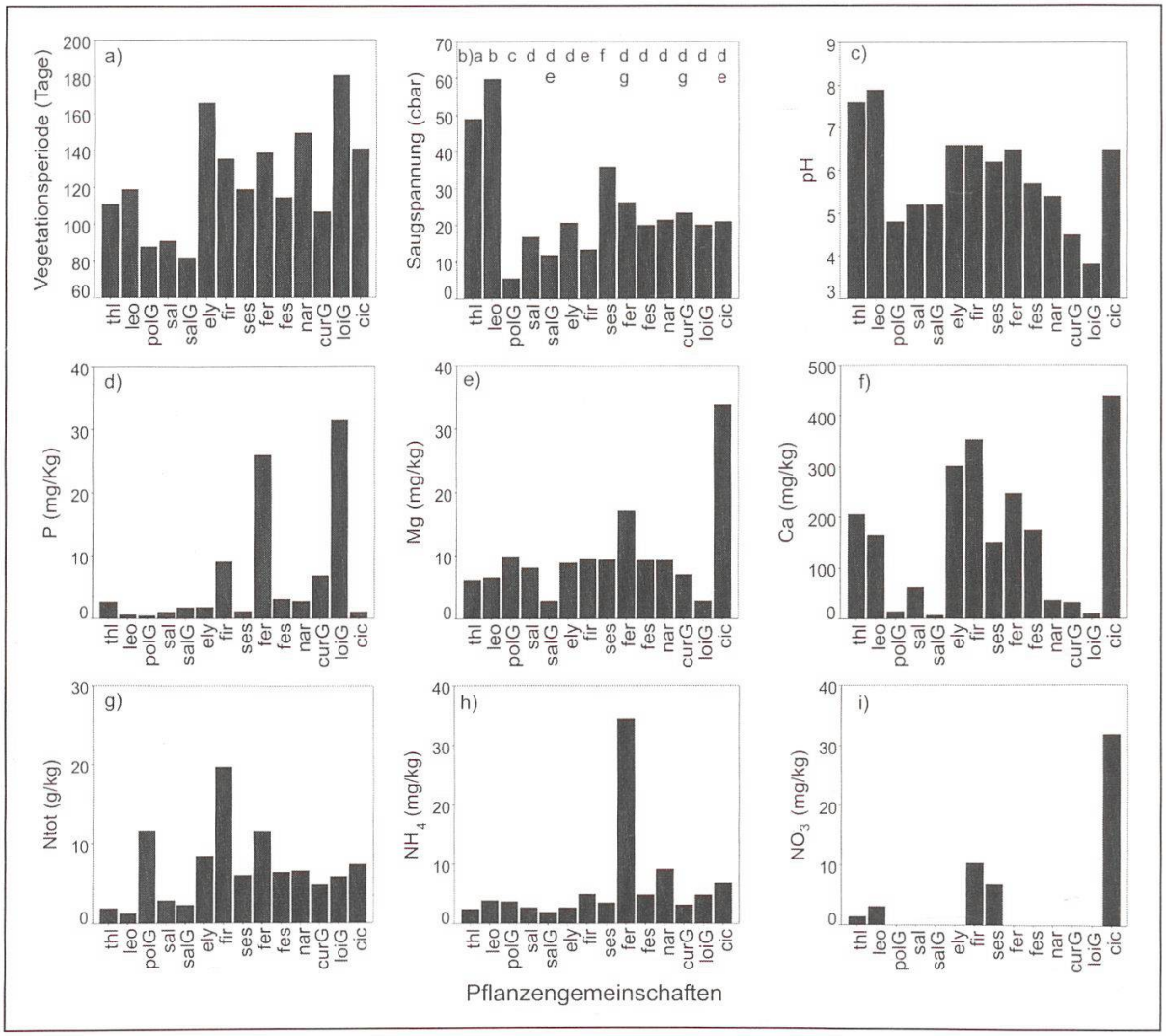

Abbildung 9: Stressfaktoren. a) Länge der Vegetationsperiode (Mittelwert '02, '03); b) Saugspannung (Mittelwert '02, '03): untersch. Buchstaben geben signifikant untersch. Mittelwerte an (Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummen-Test, $p < 0.05$); c) pH; d) P; e) Mg; f) Ca; g) Ntot; h) NH_4; i) NO_3. Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

pervirentis und Leontodontetum montani höher gelegen sind als das Festuco-Trifolietum thalii, aperten sie früher aus. Seslerio-Caricetum sempervirentis und Leontodontetum montani sind südexponiert und weisen grössere Hangneigungen auf als das Festuco-Trifolietum thalii, welches in einer Mulde liegt. Unterschiedliche Neigungen und Expositionen bewirken, dass das Thlaspietum rotundifolii vor dem Caricetum curvulae schneefrei war. Die kurze Vegetationsperiode der Schneetälchen ist durch ihre Reliefposition bedingt, wo in Mulden Schnee akkumuliert wird. Mit Ausnahme der Schneetälchen und des Loiseleurio-Cetrarietum sowie des Elynetum myosuroidis wiesen die untersuchten Pflanzengemeinschaften fast gleichzeitig eine bleibende Schneedecke auf, so dass die unterschiedliche Dauer der Vegetationsperiode fast ausschliesslich durch die Ausaperungsbedingungen erklärt werden kann.

Bodenprofile

In den *Abbildungen 10 und 11* sind die Bodenprofile der einzelnen Pflanzengemeinschaften dargestellt. Auf dem Gemmi-Pass konnten Braunerden, Felshumusböden, Skeletthumusböden, Haftnässepseudogleye und Gleyrendzinen ausgeschieden werden. Podsole wurden nur in den Pflanzengemeinschaften auf dem Grimsel-Pass vorgefunden. Deckschichten verhüllen meistens das anstehende Gestein und sind durch gelisolifluidale und -mixtive sowie äolische Prozesse entstanden (Veit 2002, Veit et al. 2002). Nur in den vier Pflanzengemeinschaften auf dem Grimsel-Pass und im Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass) konnten Deckschichten festgestellt werden.

Pedologische Stressfaktoren

Saugspannung: Die tiefen Saugspannungswerte in den Schneetälchen sind auf ihre Reliefposition (Muldenlage) zurückzuführen, wo oft Wasser akkumuliert wird *(Abb. 9b).* Kalkhaltiger Untergrund hält das Wasser weniger gut zurück als silikathaltiger Untergrund, was dazu führt, dass im Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass) normalerweise höhere Saugspannungswerte gemessen wurden als in den beiden anderen Schneetälchen auf dem Grimsel-Pass. Der hohe Humusgehalt im Caricetum firmae erklärt den tiefen Saugspannungswert von 13.55 cbar. Böden mit viel Humus, Ton oder Schluff weisen die meisten Poren mittlerer Grösse (0.2–50 µm) auf, welche pflanzenverfügbares Wasser enthalten (Gisi 1997, Döbeli 1997). In den beiden Schutthalden traten die höchsten Saugspannungswerte auf, was auf den hohen Sandgehalt und die Neigung von 23° bzw. 27° zurückzuführen ist. Das Leontodontetum montani ist südexponiert und hat daher auch eine höhere Evapotranspiration als das nordexponierte Thlaspietum rotundifolii. Der Saugspannungswert von 35.84 cbar im Seslerio-Caricetum sempervirentis ist durch die Südexposition, die Neigung von 27° und die vielen Steine in den obersten 5 cm der Mineralerde bedingt, welche die Porengrösse beeinflussen. Obwohl das Caricetum ferrugineae einen hohen Humusgehalt aufweist und nordexponiert ist, wurde ein Saugspannungswert von 26.18 cbar gemessen. Dieser hohe Saugspannungswert ist auf die vielen Steine in den obersten 5 cm der Mineralerde zurückzuführen. Im Festuco-Trifolietum thalii, Sieversio-Nardetum strictae, Loiseleurio-Cetrarietum, Cicerbitetum alpinae, Elynetum myosuroidis und im Caricetum curvulae sind die Mittelwerte nicht signifikant unterschiedlich *(Abb. 9b).*

pH-Wert: Mit Ausnahme des Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass) wiesen die Pflanzengemeinschaften auf Silikat einen tieferen pH-Wert auf als die Pflanzengemeinschaften auf Kalk *(Abb. 9c).* Die Pflanzengemeinschaften auf dem Grimsel-Pass haben alle als geologischen Untergrund Granit (Labhart 2001). Somit wird der pH-Wert vor allem durch die Länge der Vegetationsperiode bzw. durch die Zeitspanne, in der freigesetzte Basen ausgewaschen werden können, beeinflusst. Das

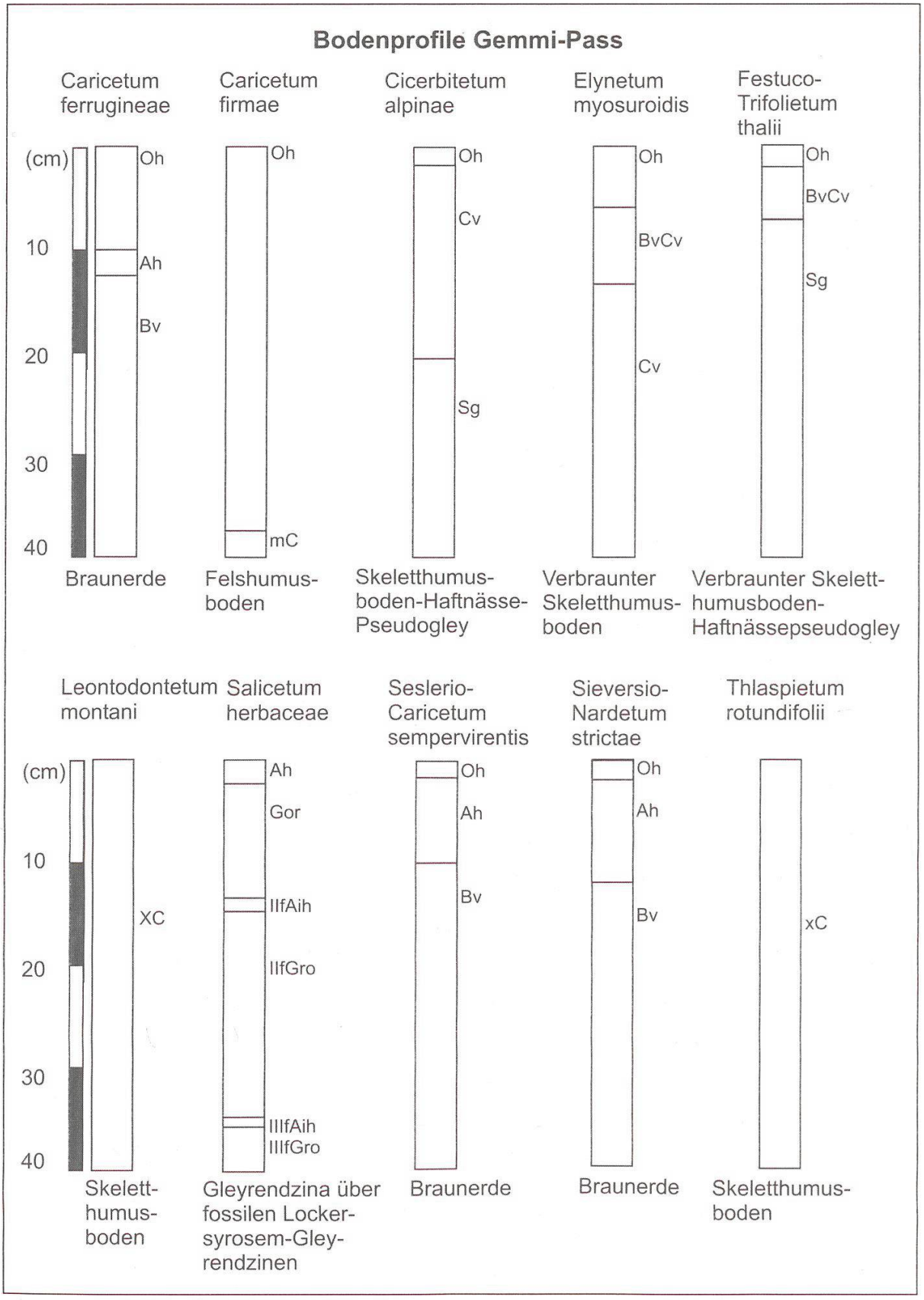

Abbildung 10: Bodenprofile Gemmi-Pass. Bodenprofile und Bodenhorizonte wurden mit Hilfe der deutschen Bodenklassifikation bezeichnet. IIf zeigt an, dass diese Böden fossil sind bzw. von Deckschichten überflossen wurden.

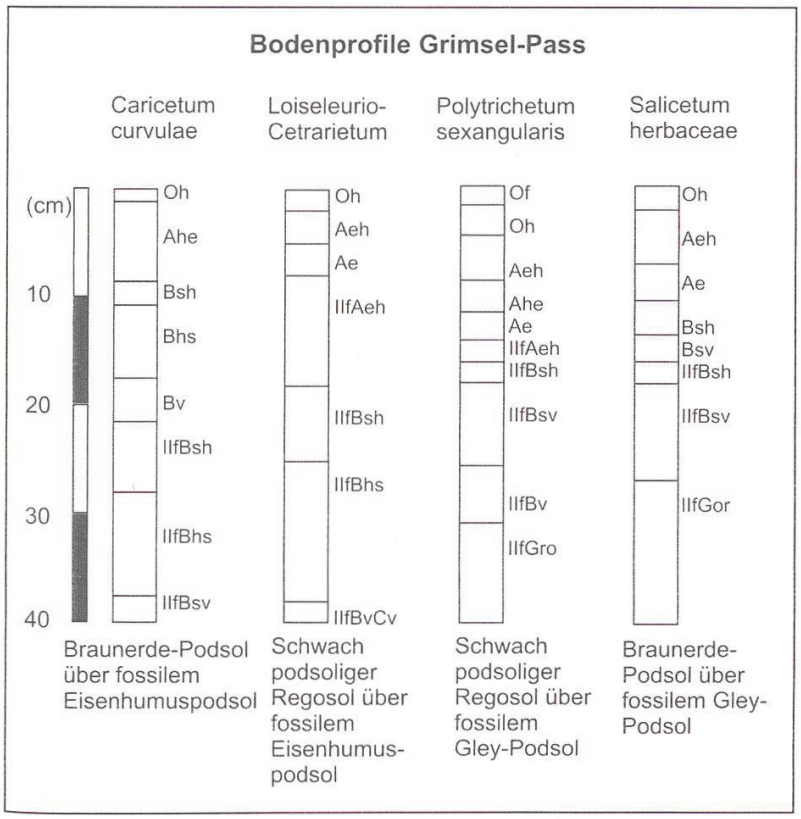

Abbildung 11: Bodenprofile Grimsel-Pass. Bodenprofile und Bodenhorizonte wurden mit Hilfe der deutschen Bodenklassifikation bezeichnet. IIf zeigt an, dass diese Böden fossil sind bzw. von Deckschichten überflossen wurden.

Loiseleurio-Cetrarietum, welches die längste Vegetationsperiode aufwies, hatte den tiefsten pH-Wert, und im Salicetum herbaceae mit der kürzesten Vegetationsperiode wurde der höchste pH-Wert gemessen. Möglicherweise macht sich auch der höhere Huminsäurenanteil bemerkbar. Zusätzlich wurde in allen 3 Schneetälchen während der Schneeschmelze und Regenperioden vermehrt Wasser akkumuliert, was zu einer verstärkten Auswaschung führt. Auf dem Gemmi-Pass haben nicht alle Pflanzengemeinschaften denselben geologischen Untergrund. In Pflanzengemeinschaften auf der Südseite (Caricetum ferrugineae, Cicerbitetum alpinae, Caricetum firmae, Elynetum myosuroidis) wurde ein pH-Wert zwischen 6.5 und 6.6 gemessen. Mit Ausnahme des Elynetum myosuroidis (Moräne) haben alle Pflanzengemeinschaften Malm-Kalk (Furrer 1962, Döbeli 1997) als geologischen Untergrund, welcher von glazialen, periglazialen und gravitativen Ablagerungen bedeckt sein kann. Diese 4 Pflanzengemeinschaften hatten zwar unterschiedlich lange Vegetationszeiten, was sich aber nicht im pH-Wert bemerkbar macht. Im Salicetum herbaceae wird als geologischer Untergrund vorwiegend Kieselkalk ausgewiesen. Aus diesem Grund wurde in dieser Pflanzengemeinschaft der tiefste pH-Wert auf dem Gemmi-Pass gemessen. Die anderen Pflanzengemeinschaften auf der Nordseite haben nicht nur Kieselkalk als geologischen Untergrund, was die unterschiedlichen pH-Werte erklärt. Zudem könnte auch die unterschiedlich lange Vegetationsperiode einen Einfluss auf den pH-Wert haben. Junge, kaum entwickelte Böden und unterschiedlicher geologischer Untergrund sind die Erklärung für die hohen pH-Werte in den Schutthalden.

Bodennährstoffe: Im Loiseleurio-Cetrarietum und Caricetum ferrugineae wurden die höchsten und im Polytrichetum sexangularis die tiefsten P-Werte gemessen *(Abb. 9d).* Die tiefsten Mg-Werte traten im Loiseleurio-Cetrarietum, im Salicetum herbaceae (Grimsel-Pass) und in den Schutthalden auf *(Abb. 9e).* Höchste Mg-Werte kamen im Caricetum ferrugineae und Cicerbitetum alpinae vor. Pflanzengemeinschaften auf Silikatgestein hatten einen tieferen Ca-Gehalt als Pflanzengemeinschaften auf Kalkgestein *(Abb. 9f).* Im Elynetum myosuroidis, Caricetum firmae, Caricetum ferrugineae, Cicerbitetum alpinae und im Thlaspietum rotundifolii wurden höhere Ca-Gehalte gemessen als in den anderen Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass. NO_3 konnte nur in 5 Pflanzengemeinschaften festgestellt werden *(Abb. 9i).* Im Gegensatz dazu wurden in beiden Untersuchungsgebieten hohe Ntot- und NH_4-Werte gemessen *(Abb. 9g, 9h).* Mit Ausnahme des Caricetum ferrugineae und Sieversio-Nardetum strictae waren die K-Gehalte in den Pflanzengemeinschaften auf Silikat höher als in denen, welche auf Kalkgestein vorkommen *(Abb. 12a).* Verglichen mit den anderen untersuchten Pflanzengemeinschaften wiesen das Caricetum firmae, Caricetum ferrugineae und das Cicerbitetum alpinae die beste und die Schneetälchen die schlechteste Nährstoffversorgung auf. Gemäss Döbeli (1997) ist es auf dem Gemmi-Pass nicht möglich, eine räumliche Interpretation der Ca-, Mg-, Ntot-, NH_4-, NO_3-, P- und K-Werte zu machen, weil sich Neigung, Vegetation, Bodenfeuchte, Bodentextur, Geologie und der Entwicklungsgrad der Böden in den einzelnen Pflanzengemeinschaften unterscheiden. Durch Erosion kann in Hanglagen P lateral umverteilt werden (Scheffer & Schachtschabel 1998). Generell sind aber hohe NH_4- und tiefe NO_3-Gehalte typisch für alpine oder arktische Böden. Die Nitrifikation wird gebremst durch die tiefen Temperaturen und die vorwiegend schlecht durchlüfteten Böden (Scheffer & Schachtschabel 1998). Die hohen NH_4-, P- und K-Werte im Caricetum ferrugineae sind grösstenteils durch die Kühe erklärbar, die nur in dieser Pflanzengemeinschaft beobachtet wurden. Alle untersuchten Pflanzengemeinschaften wiesen hohe Ntot- und NH_4-Werte auf, was auf die relativ hohe Bestockung mit Schafen zurückzuführen ist. Der Ca-Gehalt hängt vom pH-Wert bzw. vom geologischen Untergrund ab. Daher ist es nicht verwunderlich, dass tiefere Ca-Werte in den Pflanzengemeinschaften auf dem Grimsel-Pass vorkamen. Im Elynetum myosuroidis, Caricetum firmae, Caricetum ferrugineae, Cicerbitetum alpinae und im Thlaspietum rotundifolii, welche auf Malmkalk vorkommen, wurden höhere Ca-Gehalte gemessen als in den anderen Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass, die vorwiegend auf Kieselkalk liegen.

Hydrologische Stressfaktoren

Überschwemmung: Die Vegetation in den Schneetälchen stand während der Regenperioden unter Wasser. Dieses Phänomen konnte in den anderen Pflanzengemeinschaften nicht beobachtet werden *(Abb. 12b).* Im Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass) waren noch bis maximal drei Tage nach dem Regenfall 100% der

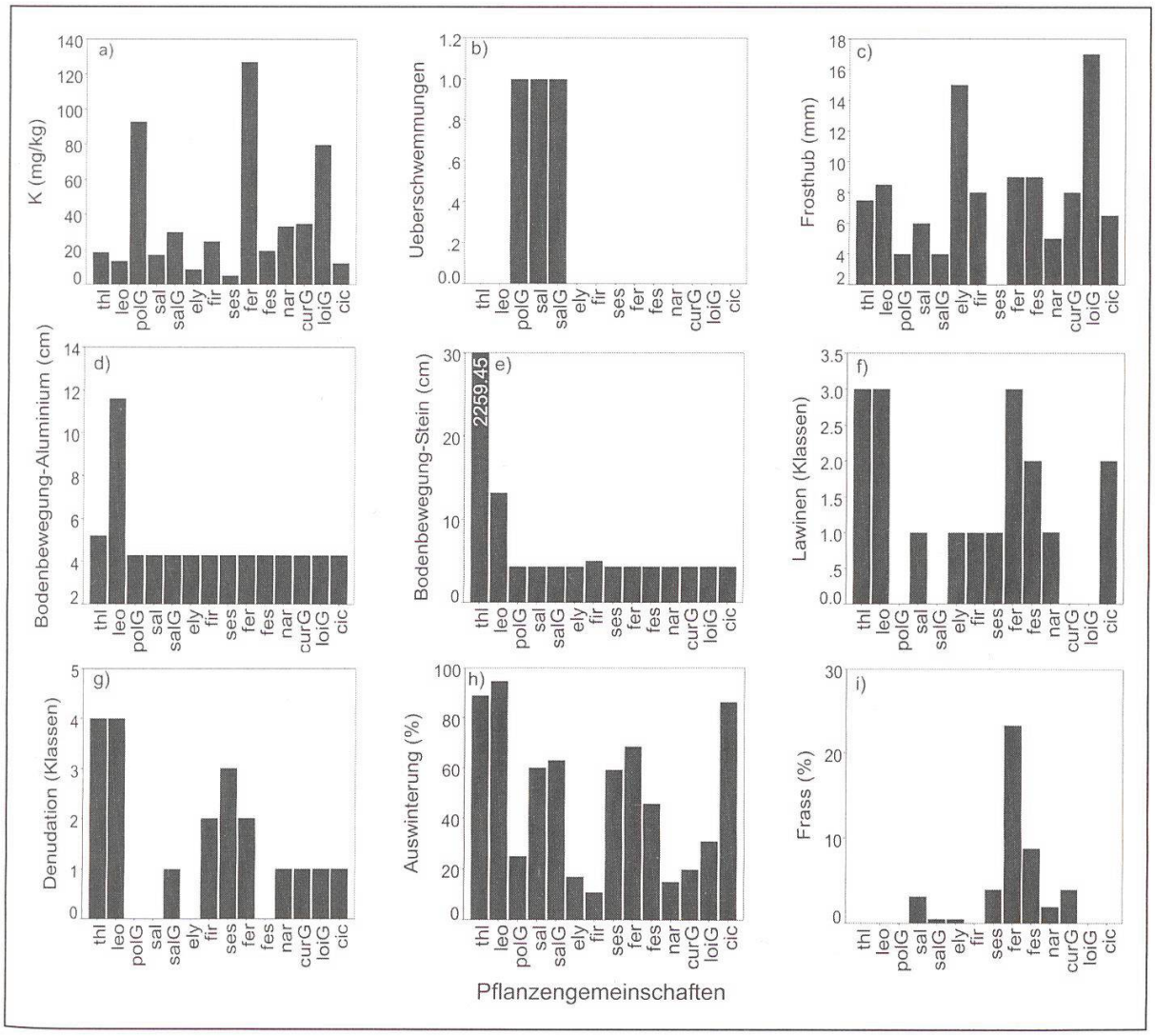

Abbildung 12: Stress- und Störungsfaktoren. a) K; b) Überschwemmung; c) Frosthub; d) Bodenbewegung – Aluminium; e) Bodenbewegung – Stein; f) Lawinen; g) Denudation; h) Auswinterung (Mittelwert '02, '03); i) Frass (Mittelwert '02, '03). Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

abgesteckten Fläche der Pflanzengemeinschaft unter Wasser. Während der Regenperioden waren im Salicetum herbaceae (Grimsel-Pass) 10% und im Polytrichetum sexangularis 40% der markierten Fläche von Wasser bedeckt. Im Polytrichetum sexangularis war auch während der Trockenperioden 10% der Vegetation unter Wasser.

Geomorphologische Störungsfaktoren

Frosthub: Die grössten Frosthubbeträge wurden im Loiseleurio-Cetrarietum und Elynetum myosuroidis gemessen *(Abb. 12c).* In den Schneetälchen und im Sieversio-Nardetum strictae traten die kleinsten Frosthubbeträge auf. Der Frosthubapparat wurde im Seslerio-Caricetum sempervirentis während des Winters 2002/

2003 von Lawinen zerstört. Die gemessenen Frosthubbeträge waren umso grösser, je länger die Pflanzengemeinschaften nicht von Schnee bedeckt waren. Ausnahmen von dieser Regel bilden das Cicerbitetum alpinae, Sieversio-Nardetum strictae, Caricetum curvulae und das Festuco-Trifolietum thalii. Der Spearman-Korrelations-Koeffizient zwischen Länge der Vegetationsperiode und Frosthub beträgt 0.63 ($p < 0.05$). Im Herbst waren Elynetum myosuroidis und Loiseleurio-Cetrarietum die Pflanzengemeinschaften, welche am spätesten eingeschneit wurden und somit die günstigsten Bedingungen für das Eindringen des Frostes in den Boden aufwiesen. Frosthub findet solange statt, wie der Boden gefroren ist und die Bodenfeuchte-Gehalte hoch sind. Frosthub während der Schneeschmelze kann bis zu 40% des jährlichen Frosthubbetrages ausmachen (Jaesche et al. 2003). Schneetälchen waren erst im Juli schneefrei und daher nicht mehr den tiefen Temperaturen ausgesetzt, welche Elynetum myosuroidis und Loiseleurio-Cetrarietum angetroffen haben, als sie im April ausaperten. Mit den höheren Temperaturen im Juli verschwindet auch der Bodenfrost in den Schneetälchen bedeutend schneller als im Elynetum myosuroidis und Loiseleurio-Cetrarietum. Obwohl das Sieversio-Nardetum strictae eine lange Vegetationsperiode aufwies, wurde nur ein Frosthubbetrag von 5 mm gemessen, weil hier das Wasser für den Frosthub fehlte, was durch die Reliefposition bedingt ist. Die Frosthubbeträge im Festuco-Trifolietum thalii und Caricetum curvulae waren höher als erwartet, was auf die extrem tiefen Temperaturen in der Nacht *(Abb. 4a, 4b)* und genügend Bodenfeuchte zurückzuführen ist. Der kleine Frosthubbetrag im Cicerbitetum alpinae ist durch den umgebenden Wald erklärbar, der ein ausgeglicheneres Temperaturregime im Boden schafft.

Laterale Bodenbewegung (Aluminium): Laterale Bodenbewegungen konnten nur in den Schutthalden festgestellt werden, wo die vergrabenen Aluminiumstreifen mehr als 4,3 cm bewegt wurden *(Abb. 12d).* In den anderen Pflanzengemeinschaften betrug die Bodenbewegung zwischen 0 und 4,3 cm. Wegen der Messgenauigkeit des GPS können Bodenbewegungen zwischen 0 und 4,3 cm nicht signifikant ausgeschieden werden. Die ausgegrabenen Aluminiumstreifen zeigten in den Schutthalden nicht die charakteristischen Verbiegungen, die auf Solifluktion zurückzuführen wären. Die Bewegung des vergrabenen Aluminiums ist daher durch gravitatives Hangkriechen bedingt.

Laterale Bodenbewegung (Steine): Die markierten Steine wurden nur in den Schutthalden und im Caricetum firmae bewegt *(Abb. 12e).* Im Thlaspietum rotundifolii wurden die markierten Steine im Mittel um 22,59 m verschoben. Die extrem hohe Bewegung der markierten Steine ist zum grössten Teil auf ein Gewitter (14.6.2003) zurückzuführen, welches die Steine weggewaschen hatte.

Lawinen: Auf dem Gemmi-Pass wurden die nordexponierten Pflanzengemeinschaften (Caricetum ferrugineae, Thlaspietum rotundifolii) mit einer Neigung um

30° sehr stark durch Lawinen beeinträchtigt *(Abb. 12f).* Lawinen treten vermehrt auf Nordhängen mit einer Hangneigung um 30° auf (Munter 1992). Obwohl das Leontodontetum montani eine südexponierte Pflanzengemeinschaft ist, wurden viele Lawinen beobachtet, weil hier die Lawinen von der talgegenüberliegenden Seite kamen (Daubenhorn). Im Festuco-Trifolietum thalii und Cicerbitetum alpinae konnten vermehrt Lawinen vermerkt werden. Die anderen Pflanzengemeinschaften auf dem Gemmi-Pass wurden kaum durch Lawinen beeinträchtigt. Pflanzengemeinschaften auf dem Grimsel-Pass wurden nicht durch Lawinen gestört.

Denudation: Schutthalden mit einer Neigung von 23 bis 27° und einem Vegetationsdeckungsgrad kleiner als 33% sind die Pflanzengemeinschaften, die am meisten durch Denudation beeinträchtigt wurden *(Abb. 12g).* Keine der untersuchten Pflanzengemeinschaften weist eine grössere Neigung als 27° auf. Denudation hängt vom Relief (Neigung, Länge, Form), Bodendeckungsgrad, von der Bodentextur und der Bodenfeuchte ab (Schmidt 1979). Das Seslerio-Caricetum sempervirentis zeichnet sich durch eine Neigung von 27° und einen Vegetationsdeckungsgrad von 64% aus und wurde deshalb der Denudations-Klasse 3 zugewiesen *(Tab. 4).* Mit einer Neigung von 24° bis 27° und einem Vegetationsdeckungsgrad von grösser als 89% waren das Caricetum firmae und Caricetum ferrugineae weniger durch Denudation gestört als ein Seslerio-Caricetum sempervirentis. Die Vegetation im Cicerbitetum alpinae, Caricetum curvulae, Loiseleurio-Cetrarietum, Sieversio-Nardetum strictae und im Salicetum herbaceae (Grimsel-Pass) wurde nur gering durch Denudation beeinträchtigt. Im Elynetum myosuroidis, Festuco-Trifolietum thalii, Salicetum herbaceae (Gemmi-Pass) und im Polytrichetum sexangularis wurde mehr Bodenmaterial akkumuliert als abgetragen.

Andere Störungsfaktoren

Auswinterung: In den Schutthalden und im Cicerbitetum alpinae war nach der Schneeschmelze fast die ganze Oberfläche vegetationsfrei *(Abb. 12h).* Die offene Fläche in den Schutthalden bestand zum grössten Teil aus Steinen und wurde kaum von Pflanzen besiedelt. Im Cicerbitetum alpinae war während des Sommers die ganze Fläche von Pflanzen bedeckt. Nach der Schneeschmelze wiesen das Caricetum firmae, Caricetum curvulae, Elynetum myosuroidis, Sieversio-Nardetum strictae, Polytrichetum sexangularis und das Loiseleurio-Cetrarietum einen hohen Deckungsgrad auf. Dies ist auf die dominierenden Gräser bzw. Moose zurückzuführen, welche schon nach der Schneeschmelze da waren.

Frass: Die 23% Frassspuren im Caricetum ferrugineae sind auf Kühe zurückzuführen, welche dort jedes Jahr im September drei Wochen geweidet haben *(Abb. 12i).* In Pflanzengemeinschaften, wo die Schafe die Nacht verbrachten (Elynetum myosuroidis, Festuco-Trifolietum thalii, Salicetum herbaceae Gemmi-Pass) oder

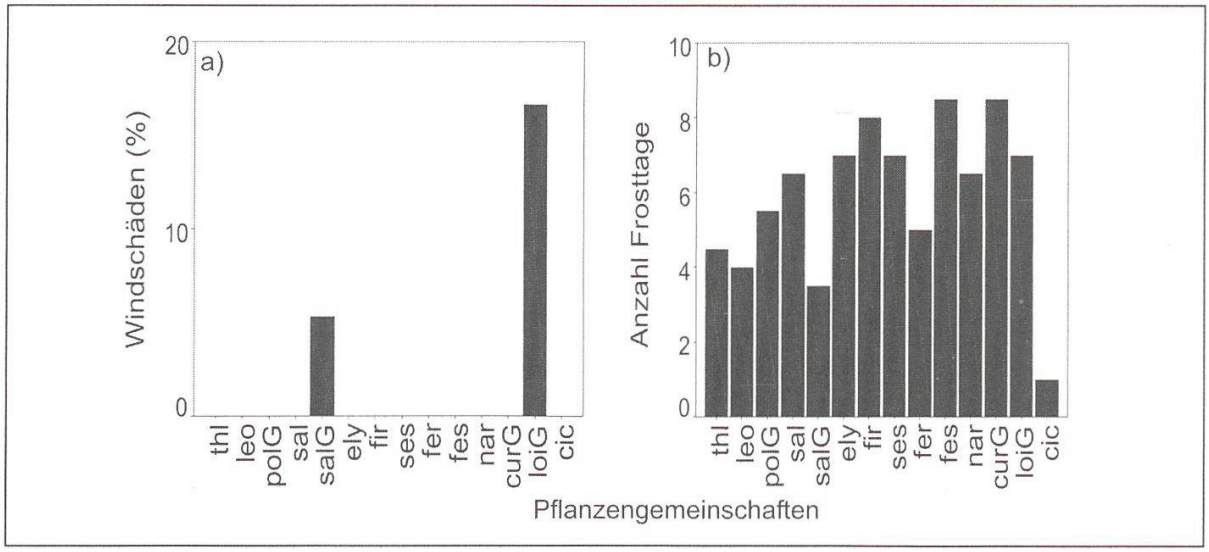

Abbildung 13: Störungsfaktoren. a) Windschäden (Mittelwert '02, '03); b) Anzahl Frosttage (Mittelwert '02, '03). Die Abkürzungen der Pflanzengemeinschaften sind in *Tabelle 1* erklärt.

wo sie während des Tages vermehrt durchliefen (Seslerio-Caricetum sempervirentis, Sieversio-Nardetum strictae, Caricetum curvulae, Salicetum herbaceae Grimsel-Pass), wiesen einen höheren Prozentanteil an Frassspuren auf. Es scheint, dass die anderen Pflanzengemeinschaften kaum durch Frass gestört waren.

Windschäden: Windschäden konnten nur im Loiseleurio-Cetrarietum und im Salicetum herbaceae (Grimsel-Pass) beobachtet werden *(Abb. 13a).* In beiden Gesellschaften wurde die Erde, welche die Wurzeln bedeckte, weggeblasen. Es waren keine anderen Windschäden sichtbar.

Frosttage: Im Caricetum curvulae, Festuco-Trifolietum thalii und im Caricetum firmae wurden am meisten Frosttage gemessen *(Abb. 13b).* Am wenigsten durch Frost beeinträchtigt wurden die Pflanzen im Salicetum herbaceae (Grimsel-Pass), Cicerbitetum alpinae und Leontodontetum montani.

Schlussfolgerungen

Im Rahmen einer Studie über den Einfluss von Stress- und Störungsfaktoren auf die Biodiversität alpiner Pflanzengemeinschaften wurden zum ersten Mal all die Faktoren, welche potenziell einen Einfluss haben könnten, messtechnisch erfasst. Diese Untersuchung zeigt auf, dass die ökologischen Standortbedingungen in den einzelnen Pflanzengemeinschaften sehr unterschiedlich sind und dass nicht ein einzelner Faktor, sondern das Zusammenspiel einer Vielzahl von Faktoren für das Vorhandensein einer bestimmten Pflanzengemeinschaft verantwortlich ist. Das pflanzensoziologische System, welches für die Pflanzengemeinschaften un-

terschiedliche Standortbedingungen vorsieht, wird somit bestätigt. Mittels multivariater Untersuchungen sollen nun diese Zusammenhänge zwischen Vegetation und Umweltbedingungen quantitativ beschrieben werden.

Die 14 untersuchten Pflanzengemeinschaften liegen alle in den Zentralalpen (Gemmi- und Grimsel-Pass). Es wäre wünschenswert, den hier vorgestellten Ansatz in anderen alpinen Untersuchungsgebieten (z.B. Ost- und Westalpen) anzuwenden, um die Datengrundlage für quantitative Untersuchungen noch weiter zu verbessern.

Danksagung:
Dieses Projekt wurde finanziell unterstützt von der Stiftung zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung an der Universität Bern.

Literatur

AG Bodenkunde (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (4. Auflage).

Bühler, A. (2004): Klimatische Stressfaktoren und mikrotopographische Differenzierungen innerhalb eines Schneetälchens (*Salicetum herbaceae*) auf der Grimsel. Diplomarbeit, Universität Bern (in Vorbereitung).

Cernusca, A. (1976): Bestandesstruktur, Bioklima und Energiehaushalt von alpinen Zwergstrauchbeständen. Oecol. Plant. 11(1): 71–102.

Cernusca, A. (1989): Ecosystem research in the Austrian central Alps (Hohe Tauern). In: Cernusca, A., Struktur und Funktion von Graslandökosystemen im Nationalpark Hohe Tauern. Veröffent. Österr. MAB-Programm 13: 587–625. Innsbruck: Wagner.

Cernusca, A. & Seeber, M.C. (1989a): Mesoklimatische Hinweise und Beschreibung von Witterungsablauf und Phänologie während der Ökosystemstudie «Höhentransekt» in den Hohen Tauern. In: Cernusca, A., Struktur und Funktion von Graslandökosystemen im Nationalpark Hohe Tauern. Veröffent. Österr. MAB-Programm 13: 311–330. Innsbruck: Wagner.

Cernusca, A. & Seeber, M.C. (1989b): Phytomasse, Bestandesstruktur und Mikroklima von Grasland-Ökosystemen zwischen 1612 und 2300 m in den Alpen. In Cernusca A.: Struktur und Funktion von Graslandökosystemen im Nationalpark Hohe Tauern. Veröffent. Österr. MAB-Programm 13: 419–461. Innsbruck: Wagner.

Döbeli, C. (1997): Das hochalpine Geoökosystem der Gemmi (Walliser Alpen). Dissertation, Universität Basel.

Dullinger, S., Dirnböck, T., Greimler, J. & Grabherr, G. (2003): A resampling approach for evaluating effects of pasture abandonment on subalpine plant species diversity. Journal of Vegetation Science 14 (2): 243–252.

Ellenberg, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Stuttgart: Ulmer (5. Auflage).

Erschbamer, B. (1989): Vegetation on avalanche paths in the Alps. Vegetatio 80: 139–146.

FAL, 1996: Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 1. Zürich Reckenholz.

Favarger, Cl. & Robert, P.-A. (1995): Flore et végétation des Alpes – étage alpin. Lausanne: Delachaux et Niestlé S.A. (3e édition).

Fischer, E. (2002): Globalstrahlungsmessung mit Solarzellen. Seminararbeit, Universität Bern.

Fries, M. (1985): Bodenkundliche Studien unter einem *Caricetum firmae* auf dem Munt la Schera im Schweizer Nationalpark. Physische Geographie 18. Zürich: Geogr. Institut der Universität Zürich.

Furrer, H. (1962): Erläuterungen zum geologischen Atlas der Schweiz, Blatt 32 «Gemmi», Schweiz. Geol. Kommission.

Galland, P. (1982): Etude de la végétation des pelouses alpines au parc national suisse. Thèse, Université de Neuchâtel.

Gigon, A. (1971): Vergleich alpiner Rasen auf Silikat- und auf Karbonatboden. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel Zürich 48. Zürich: Stiftung Rübel.

Gisi, U. (1997): Bodenökologie. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag (2. Auflage).

Grabherr, G. & Mucina, L. (1993): Die Pflanzengesellschaften Österreichs. Teil 2. Natürliche waldfreie Vegetation. Jena: Fischer.

Grime, J.P. (2001): Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties. Chichester: John Wiley (2nd edition).

Imhof, E. (Hrsg.) (1965–1978): Atlas der Schweiz. Bern: Bundesamt für Landestopographie.

Jaesche, P., Veit, H. & Huwe, B. (2003): Snow Cover and Soil Moisture Controls on Solifluction in an Area of Seasonal Frost, Eastern Alps. Permafrost and Perigl. Process. 14: 399–410.

Kammer, P.M. & Möhl, A. (2002): Factors Controlling Species Richness in Alpine Plant Communities. An Assessment of the Importance of Stress and Disturbance. Artic, antarctic, and alpine research 34 (4): 398–407.

Klug-Pümpel, B. (1982): Effects of microrelief on species distribution and phytomass variations in a *Caricetum curvulae* stand. Vegetatio 48: 249–254.

Körner, C. (1994): Impact of atmospheric changes on high mountain vegetation. In: Beniston, M., Mountain environments in changing climates: 155–166. London, New York: Routledge.

Körner, C. (1999): Alpine plant life. Berlin, Heidelberg: Springer.

Körner, C., Wieser, G. & Guggenberger, H. (1980): Der Wasserhaushalt eines alpinen Rasens in den Zentralalpen. In Franz H.: Untersuchungen an alpinen Böden in den hohen Tauern 1974–1978: Stoffdynamik und Wasserhaushalt. Veröffent. Österr. MAB-Programm 3: 243–264. Innsbruck: Wagner.

Körner, C., Wieser, G. & Cernusca, A. (1989): Der Wasserhaushalt waldfreier Gebiete in den Österreichischen Alpen zwischen 600 und 2600 m Höhe. In Cernusca A.: Struktur und Funktion von Graslandökosystemen im Nationalpark Hohe Tauern. Veröffent. Österr. MAB-Programm 13: 119–153. Innsbruck: Wagner.

Kudo, G. (1991): Effects of snow-free period on the phenology of alpine plants inhabiting snow patches. Arctic, Alpine Research 23 (4): 436–443.

Labhart, T. (2001): Geologie der Schweiz. Thun: Ott. (5. Auflage).

Landolt, E. & Urbanska, K.M. (1989): Our alpine flora. Chur: SAC.

Mertz, P. (2000): Pflanzengesellschaften Mitteleuropas und der Alpen. Landsberg, Lech: Ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co.

Mosimann, T. (1985): Untersuchungen zur Funktion subarktischer und alpiner Geoökosysteme Finnmark (Norwegen) und Schweizer Alpen. Physiogeographica 7. Basel: Geogr. Institut.

Munter, W. (1992): Neue Lawinenkunde. Bern: SAC (2. Auflage).

PMOD/WRC (2003): Physico-Meteorological Observatory Davos and World Radiation Center. Davos.

Rehder, H. (1970): Zur Ökologie, insbesondere Stickstoffversorgung subalpiner und alpiner Pflanzengesellschaften im Naturschutzgebiet Schachen (Wettersteingebirge). Diss. Bot. 6. Stuttgart: Cramer.

Rehder, H. (1976): Nutrient Turnover Studies in Alpine Ecosystems. Oecologia 22: 411–423.

Rehder, H. & Schäfer, A. (1978): Nutrient Turnover Studies in Alpine Ecosystems. Oecologia 34: 309–327.

Reisigl, H. & Keller, R. (1994): Alpenpflanzen im Lebensraum. Stuttgart, Jena, NY: Gustav Fischer Verlag (2. Auflage).

Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart: F. Enke (14. Auflage).

Schmidt, R.-G. (1979): Probleme der Erfassung und Quantifizierung von Ausmass und Prozessen der aktuellen Bodenerosion (Abspülung) auf Ackerflächen. Physiogeographica 1. Basel: Geogr. Institut.

Schwab, S. (2001): Untersuchungen zur Lokalklimatologie und zur raum-zeitlichen Dynamik der Permafrostverteilung im periglazialen Testgebiet Furggentälti (Gemmi-Pass VS). Diplomarbeit, Universität Bern.

Stull, R.B. (1988): An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Kluwer.

Ullrich, A. (1995): Kleinräumige Vegetationsdifferenzierung auf Solifluktionsstandorten der südlichen Glocknergruppe. Diplomarbeit, Universität Bayreuth.

Veit, H. (2002): Die Alpen – Geoökologie und Landschaftsentwicklung. Stuttgart: Ulmer.

Veit, H., Mailänder, R. & Vonlanthen, C. (2002): Periglaziale Deckschichten im Alpenraum: bodenkundliche und landschaftsgeschichtliche Bedeutung. Petermanns Geographische Mitteilungen 146 (4): 6–14.

Wallossek, C. (1990):Vegetationskundlich-ökologische Untersuchungen in der alpinen Stufe am SW-Rand der Dolomiten (Prov. Bozen und Trient). Diss. Bot. 154. Stuttgart: Cramer.

Warnecke, G. (1997): Meteorologie und Umwelt – eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer (2. Auflage).

Weischet, W. (1995): Einführung in die allgemeine Klimatologie. Stuttgart: Teubner.

Whiteman, C.D. (2000): Mountain meteorology: fundamentals and applications. New York: Oxford University Press.

Wieser, G., Neuwinger, I. & Cernusca, A. (1989): Der Bodenwasserhaushalt alpiner Graslandgesellschaften zwischen 1600 und 2600 m Höhe. In Cernusca A.: Struktur und Funktion von Graslandökosystemen im Nationalpark Hohe Tauern. Veröffent. Österr. MAB-Programm 13: 95–118. Innsbruck: Wagner.

Wilks, D.S. (1995): Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction. San Diego, California: Academic Press.