Die Eppaner Eislöcher - eine Kälteinsel im Weingebiet Südtirols

Conradin A. Burga, Nancy Voser & Dietmar Grebner

Abstract

The cold air pool of Eppan – a cold anomaly within the wine region of South Tyrol

There is a free circulation of air within the talus of a former rock fall near Eppan, South Tyrol (Italy). During times of mainly down-slope air streams the out-flowing air at the lower edge of the talus is strongly cooled down. It gathers in a hollow and forms a permanent cold-air pool of 4-5m in depth. Measurements were taken, from May 2002 to June 2003, of the vertical temperature profile from the depression to the upper part of the talus, as well as of the micro-climate in the ice hole and the surrounding alpine grassland. During the growing season, the observed difference between the monthly mean temperature within the depression and the surrounding (not influenced) areas rises towards 20 °C. Above the cold-air pool conditions revert to normal. For the main winter months, the difference decreases to below 5 °C. In contrast to expectations, measurable winds blew predominantly down-slope and out of the ice holes for 11 of the 12 project months. This contributes substantially to the durability of the cold-air pool and sets up the conditions necessary for an extrazonal and inverse vegetation pattern. This is subdivided into the following four altitudinal zones: subalpine/alpine grassland, moss cushions at ice hole edges, stunted conifers with dwarf shrubs and a transition zone of submediterranean broadleaved forest. Spermatophytes and moss plants are found to grow within the cold-air pool. These normally grow in cold, cool or rather cool climates and indicate a zonal range of 1000 to 1500m higher than the investigated site. *Polytrichum alpinum* and *Plagiomnium medium* are indicators of cold climate and are considered to be a glacial-relict moss plant species.

Keywords: local wind circulation, cold-air pool, azonal vegetation pattern, subalpine-alpine grassland, stunted conifers, glacial relict mosses.

1. Einleitung

Südtirol stellt ein Füllhorn voller Geschichte und Naturschönheiten dar. Zu letzteren zählt bei St. Michael/Eppan auch ein thermisches Phänomen – die Eislöcher von Eppan. Durch einen spätglazialen oder frühholozänen Felssturz vom Gandberg (935 m) im Bereich der Ostflanke des Mendel-Bergkamms entstand an dessen Ostfuß eine Ablagerung aus Fels- und Schuttmaterial mit durchgehenden Lufträumen (Foto 1). Thermische und meteorologische Randbedingungen sorgen für eine Durchströmung mit Luft, zeitweise hangaufwärts, zeitweise hangabwärts. Im Fall von abwärts gerichteter Strömung tritt die Luft am Fuß der Schutthalde gegenüber der Umgebung deutlich unterkühlt aus und sammelt sich in einer Geländemulde als kleiner Kaltluftsee. Diese thermische Singularität im regionalen Temperaturfeld hat signifikante Einflüsse auf die lokale Pflanzendecke zur Folge. Das auffälligste Merkmal des lokalen Vegetationsmosaiks im Bereich des Kaltlufteinflusses ist eine im Wesentlichen inverse Zonation bzw. Höhenstufung; d.h. mitten im Südtiroler Weingebiet bzw. im Bereich thermophiler

Laubwälder (Mannaeschen-Hopfenbuchen- und Edelkastanienwald) von Überetsch südwestlich Bozen treten Arten aus subalpinen und alpinen Wald- und Rasengesellschaften – z.B. *Picea abies, Larix decidua, Clematis alpina, Rhododenron ferrugineum, Lonicera nigra, Poa alpina, Calamagrostis villosa, Campanula scheuchzeri, Homogyne alpina* und *Alchemilla vulgaris* s.l. – ferner verschiedene Moos- und Flechtenarten auf.

Phänomene dieser Art sind weltweit von zahlreichen Orten bekannt (Burga & Voser 2002, Voser 2003, Kuhn 2003/04, zum Permafrost auf geringer Meereshöhe vgl. Wegmann 1995). Vor allem das Pflanzenartenspektrum, das Vegetationsmosaik und deren Höhenverbreitung aufgrund der besonderen Mikroklimatologie von Blockhalden wurden an vielen Standorten untersucht und beschrieben (z.B. Beck von Mannagetta 1906, Kobiendza 1928, Streiff-Becker 1945, Furrer 1961, 1966, 1972, Moor 1957, Mayer 1961, 1962, Prosser 1991, Bauermeister, 2002, Rist 2002, Schudel 2002). Auch für die Eislöcher von Eppan liegen sowohl Betrachtungen der Vegetation in Abhängigkeit der Temperatursingularität vor (Pfaff, 1933, Morton, 1959, Sieghardt et al., 2000), als auch Beschreibungen der Durchströmung der Schutthalde sowie der Abkühlung der Luft im hangabwärtsgerichteten Fall, die letztlich den Kaltluftsee bildet (z.B. Punz et al., 1983, Wakonigg, 1996). Den Betrachtungen zu Flora und Vegetation standen aber bisher nur stichprobenhaft Messungen des Mikroklimas gegenüber. Eine Vorstellung von den Jahresgängen der Klimavariablen wurde von der Thermik an Hängen oder auch aus den Erfahrungen mit Ventilationen in Höhlen übernommen.

Im Rahmen einer Diplomarbeit (Voser 2003) wurde zwischen Mai 2002 und Juni 2003 in einem Profil vom Muldenboden bis zum oberen Rand der Schutthalde ein digitales, mikroklimatologisches Messnetz betrieben (Kap. 3). Ziel war es, über einen gesamten Jahresgang die Temperaturverhältnisse im Profil und die Eigenschaften der Ventilation und Luftfeuchte in einem Eisloch in der Mulde zu erfassen. Dazu wurde das lokale, durch die Kaltlufteinwirkung geprägte Vegetationsmosaik kartiert. Die gut 12-monatigen mikroklimatischen Messreihen besitzen natürlich Abweichungen von vieljährigen klimatischen Mitteln. Jedoch zumindest die räumlich und zeitlich relativen Feststellungen geben durchaus eine repräsentatives und für die Vegetation systematisches Bild. Die herausragenden Eigenschaften des Hitzesommers 2003 wirken sich in der Messperiode kaum aus (Kap. 3.1 und Kap. 5).

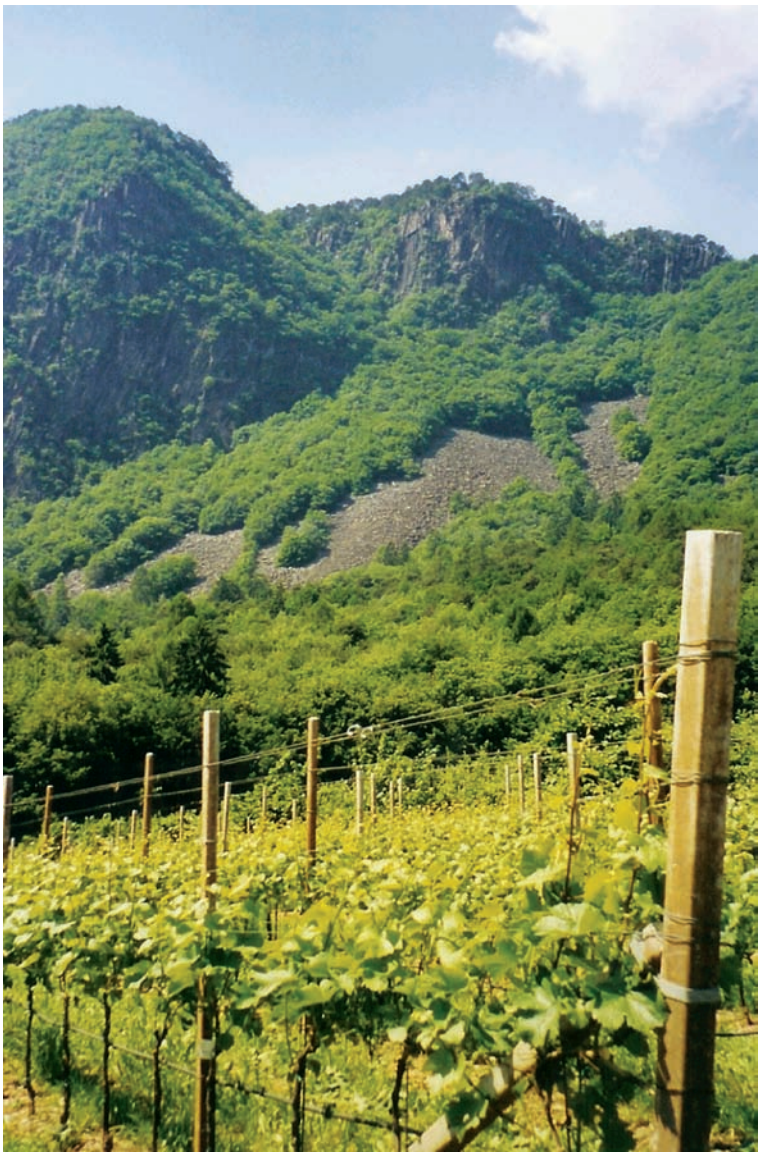


Foto 1:
Übersicht zur Lage der Eislöcher im Weingebiet St. Michael / Eppan. Links der Gandberg (935 m) mit der zum Teil bewaldeten Felssturzhalde.
(Foto D.Grebner 2003)

2. Untersuchungsgebiet

2.1 Klima im Raum Eppan

Die Eislöcher liegen im Etschtal auf 530 m ü. M. Der meridionale Verlauf des oberen Etschtals zwischen Meran und Verona ermöglicht den Zufluss mediterraner Luftmassen. Die Lufttemperatur steigt in Bozen (271 m ü. M.) als hier verwendbare klimatische Referenzstation im Sommer auf Monatswerte um 22 °C und sinkt im Winter auf annähernd 0 °C ab (Abb. 1). Diese Extreme stellen sich wie kontinental üblich im Juli bzw. im Januar ein. Das Jahresmittel liegt bei 13.5 °C (Müller et al. 1996).

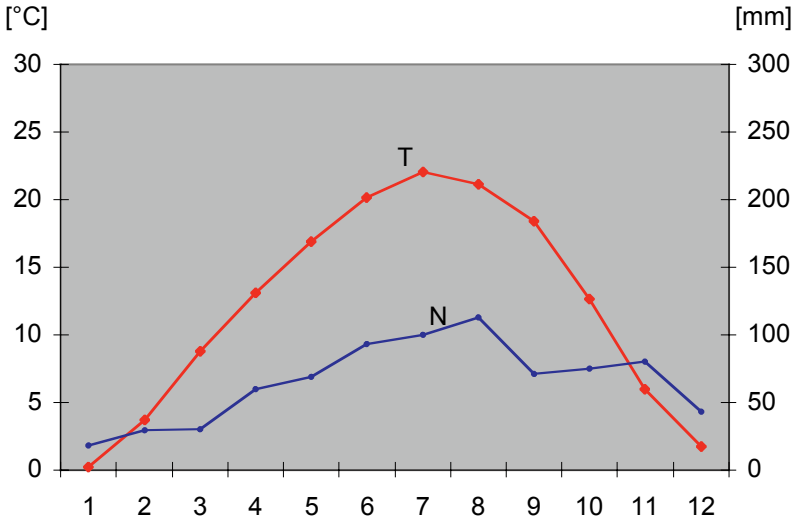


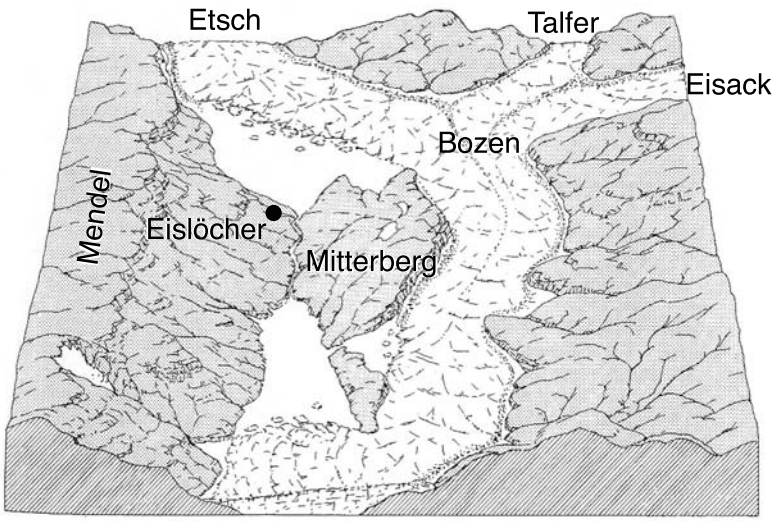
Abb. 1: Mittlerer Jahresgang von Temperatur (T) und Niederschlag (N) in Bozen (271 m ü.M.) als Referenzstation für die Region der Eislöcher (Daten aus Müller et al., 1996).

Der Jahresgang des Niederschlags hat in dieser Region sein Maximum im Sommer. Die Niederschlagsmengen sind für südalpine Verhältnisse nur mässig (Abb. 1). Die Monatsmittel schwanken zwischen etwa 15 mm im Winter (Januar) und dem Höchstwert von 115 mm im August. Die Jahressumme bleibt unter 800 mm.

2.2 Zur Geologie des Raums Eppan

Der Untergrund der Region besteht aus der sogenannten permischen Bozener Quarzporphyrplatte mit einer Ausdehnung von etwa 2000 km². Darüber folgen triadische Schichten, insbesondere die den Mendel-Kamm dominierenden Dolomiten (Tirol-Atlas 1980, Heissel 1982, Staindl 2000). Anfangs des Spätwürms lag das Gebiet unter einer bis zu 2000 m mächtigen Eisdecke des vereinigten Etsch- und Eisackgletschers (Habbe 1969, van Husen 1987, Hantke 1983, Abb. 2).

Abb. 2: Der Etsch-Eisackgletscher im Spätwürm südlich Bozen (aus Hantke, 1983) und die Position der heutigen Eislöcher.



Eine der Theorien zur Entstehung des erwähnten Felssturzes geht vom Rückzug des Etschgletschers im Spätglazial aus (Ebers 1972, Fliri 1974). Die der Erwärmung folgenden Temperatur- und Druckänderungen im Gestein der Seitenhänge, die zuvor durch oder im Gletschereis abgestützt waren, sorgten für Instabilitäten und Massenbewegungen. Nach dieser Auffassung ordnet sich das Alter des Schutthangs mit den Eppaner Eislöchern zwischen rund 15'000 und 10'000 Jahren (oder evtl. jünger) vor heute ein (Burga & Perret 1998).

2.3 Die Schutthalde

Der Felssturz, der letztlich zur Entstehung der Eislöcher geführt hat, löste sich am Osthang des aus Bozener Quarzporphyr bestehenden Gandberges (935 m ü.M.). Er ist dem Mendelkamm (Monte Penegal 1737 m ü. M.), getrennt durch das Matschatschtal (881 m ü. M.), vorgelagert (Abb. 3).

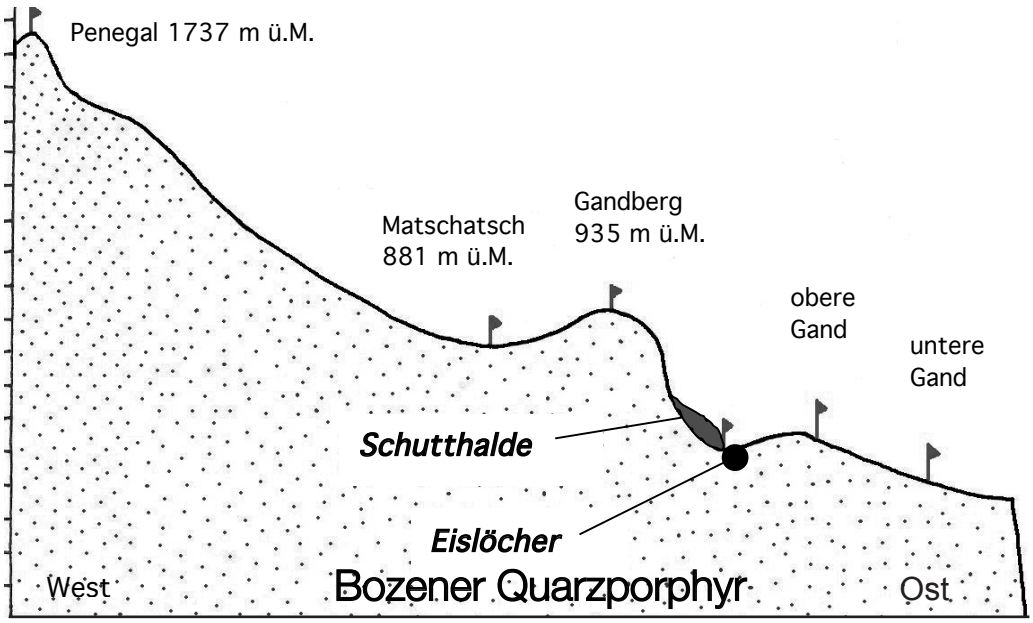


Abb. 3:
West-Ost-Profilskizze durch das Gelände vom Penegal, der höchsten Erhebung des Mendelkamms, über den Gandberg und das Untersuchungsgebiet bis etwa St. Michael/ Eppan.

Die entstandene Schutthalde erstreckt sich etwa von 600 m bis 530 m ü. M. und bedeckt rund 23 ha (0.23 km^2 nach Press & Siever 1995); das ausgewiesene Biotop umfasst 12 ha (Ruffini, Morandell & Brutti 2001). Der Böschungswinkel liegt zwischen 35° und 45°. Die Schutthalde endet im Wesentlichen in einer hangparallelen Geländerinne mit einer etwas ausgeprägteren Mulde von rund 25 m Länge und 20m Breite.

Das Schuttmaterial besteht aus meist groben, zum Teil grossen Quarzporphyr-Felsblöcken. So sind in der Halde über die gesamte Höhenausdehnung durchgehende Hohlräume vorhanden. An der Oberfläche ist die Halde nur in den Bereichen des Waldes geringfügig überdeckt; stellenweise ist die Schutthalde unbewaldet (Foto 1). Somit kann die Luft in der Halde zirkulieren sowie ein- und austreten. Das Ein- und Ausströmen der Luft am unteren Rand der Schutthalde (Kap. 2. 4) erreicht messbare Stärke (Kap. 3. 1). Als Antrieb der Strömung ist eine Kombination aus schutthaldeneigener Thermik und äusseren Wettereinflüssen anzunehmen.

Foto 2:
Muldenboden mit einem markanten Eisloch mit Moosvorhängen. Vordergrund: subalpin-alpine Grasheide; Hintergrund: Krüppel-Nadelhölzer und Zwergsträucher.
Position 2 der Messkette (vgl. Abb. 4a).
(Foto C. A. Burga 2002)

2.4 Das Phänomen der Eppaner Eislöcher

Die Eislöcher von Eppan sind Hohlraumöffnungen am Hangfuß der Blockschutthalde (Foto 2). Bei ausströmender Luft liegt deren Temperatur deutlich unter derjenigen der unbeeinflussten Umgebung. Die Kaltluft fliesst in die Mulde und schafft dort einen 4 bis 5 m mächtigen Kaltluftsee, der beim Durchwandern von der Umgebung her insbesondere in der warmen Jahreszeit abrupt und stark spürbar ist.

Die Stärke dieses thermischen Systems wandelt sich im Laufe des Jahres. In der ersten Winterhälfte nähern sich die Mulden- und Umgebungsbedingungen an (Kap. 4.1). Eine längere Dauer von in diesem südalpinen Klimabereich nur sporadisch auftretenden Schneedecken weist auf die thermische Besonderheit in der Mulde hin. Sowohl optisch wie auch fühlbar wird der singuläre Zustand gegen das Frühjahr wieder zunehmend auffälliger. Während im März die Tagesmitteltemperaturen der Umgebung systematisch schon über 5 °C liegen, sind in den Eislöchern Eiszapfenbildungen und in der Mulde Bodeneis zu beobachten. Beide Erscheinungen erhalten sich in den Eislöchern bis in den Hochsommer bei Umgebungstemperaturen, die bereits im Mai im Monatsmittel 15 °C übersteigen (Abb. 1).

Die für die Lagerung und Aufbewahrung von Nahrungsmitteln günstigen Eigenschaften der Eislöcher wurde natürlich von den Anwohnern schon früh als natürliche Kühlschränke erkannt und benutzt (Punz et al. 1983). Vorrangig von naturwissenschaftlichem Interesse ist die Einstellung der Pflanzendecke auf die ausgeprägte lokale Klimasingularität. Die charakterisierenden Klimavariablen sind die Komponenten des Wärmehaushaltes, parametrisierbar durch die Lufttemperatur. Durch den Wärmeaustausch zwischen Umgebungs- und Muldenluft ist auch die Luftfeuchtigkeit in der Mulde betroffen. Weitere Klimavariablen, wie Niederschlag und Bewölkung, sind wettergebunden und nicht lokal abhängig. Der bodennahe Wind wird zwar durch das übergeordnete Wetter angetrieben, erfährt aber durch lokale Reibung eine örtliche Prägung (Kap. 4.1).

2.5 Überblick zur Vegetation im Raum Überetsch / Bozner Unterland

Durch die Öffnung des Etschtals zum Mittelmeerraum können zahlreiche submediterrane (vereinzelt mediterrane) Florenelemente in grösserem Ausmass weit nach Norden vordringen (vgl. Kiem 1987, Peer 1995). Es sind dies im Wesentlichen folgende Gehölzarten: *Pistacia terebinthus, Sorbus torminalis, Celtis australis, Cotinus coggygria, Coronilla emerus, Colutea arborescens*, *Genista radiata*. In kleinflächigen Trockenrasen sind u.a. verbreitet: *Teucrium montanum, T. chamaedrys, Scorzonera austriaca, Linum tenuifolium, Dictamnus albus, Trinia glauca, Lilium bulbiferum*, *Stipa pennata* ssp. *eriocaulis, Helianthemum canum, H. apenninum, Fumana procumbens, Chamaecytisus purpureus, Asperula purpurea, Globularia punctata, Scabiosa graminifolia, Silene otites, Geranium sanguineum.* Das Potentillion caulescentis der Kalkfelsfluren enthält einige submediterrane Arten, wie z. B. *Hypericum coris* mit Nordgrenze am Fennberg (Kiem 1987).

Die Vegetation der kollinen Stufe im Gebiet Überetsch / Bozner Unterland wird gebildet aus thermophilem Mannaeschen-Hopfenbuchenwald (Fraxino orni-Ostryetum), dem lokal auf der linken Talflanke vertretenen fragmentarischen Flaumeichenbuschwald

(Quercetum pubescentis s.l.), dem Silikat-Kiefernwald (Vaccinio-Pinetum sylvestris), dem an der Flanke des Mendelkammes stockenden Karbonat-Buchenwald (Carici-Fagetum) und dem dort darüber folgenden Karbonat-Kiefernwald (Erico-Pinetum sylvestris). Auf der linken Talseite folgen der montane Silikat-Buchenwald (Luzulo-Fagetum) und Fichten-Tannenwald (Luzulo-Abietetum, Oxali-Abietetum, Adenostylo glabrae-Abietetum).
Der Bereich des Mendelkammes wird eingenommen von subalpinen Zwergstrauchgesellschaften (Latsche, Bewimperte Alpenrose, selten Arve) und alpinen Grasheiden auf Karbonat (Seslerion variae, Elynion, Caricion ferrugineae, Festucion alpestris). In den Gebieten Trudner Horn und Cavalese folgen in der subalpinen Stufe Fichtenwald (Homogyno alpinae-Piceetum, Adenostylo glabrae-Piceetum subalpinum) und Lärchen-Arvenwald (Larici-Pinetum cembrae). Darüber schliessen sich alpine Grasheiden und subnivale Pioniervegetation an. Der flache Talboden des Etschtales wird dominiert von Siedlungs- und Nutzflächen (Wein- und Obstgüter, Äcker- und Mähwiesen mit verschiedenen Ruderalgesellschaften).

Das Gebiet der Eppaner Eislöcher wird je nach Bereich von thermophilem Mannaeschen-Hopfenbuchenwald, Karbonat-Buchenwald oder Silikat-Kiefernwald bestockt (Foto 1). Die Edelkastanie (*Castanea sativa*) ist diesen Waldgesellschaften in unterschiedlicher Häufigkeit beigemengt. Im Siedlungs- und Kulturbereich ist die Robinie (*Robinia pseudacacia*) vertreten. An Sekundärgesellschaften sind lokal kleinflächig Trockenrasen und extensive Weiden verbreitet (cf. die Vegetationskarte von Peer, 1995).

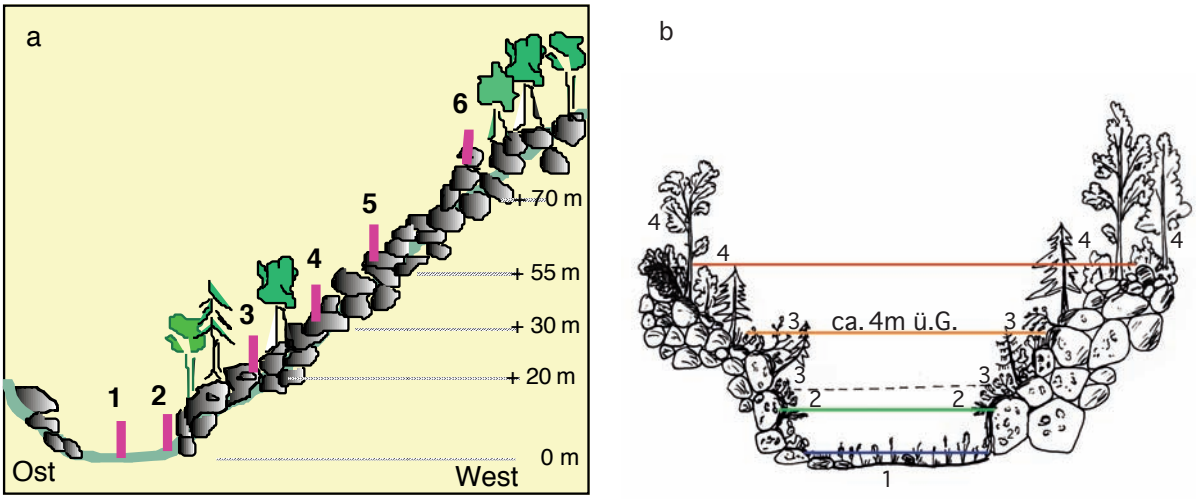


Abb. 4 a,b:
Ost-West-Profil durch die Mulde und die Schutthalde.
a) Positionen der Temperaturmesskette.
b) Vergrösserter Muldenquerschnitt mit den 4 Höhenbereichen der Vegetationsaufnahmen sowie der Obergrenze der Kaltluft (ca. 4 m über Grund) in der Mulde; Niveau 4 reicht etwa bis an den Standort 4 heran.

3. Messprogramm

3.1 Mikroklima

Die Messperiode umfasst Mai 2002 bis Juni 2003. Für diese Dauer wurde das nachfolgend beschriebene Messnetz eingerichtet und durchgehend betrieben. Das Messnetzkonzept war ausser bezüglich den üblichen Randbedingungen auch hinsichtlich sicherem Zugang zu den Messorten sowie Unauffälligkeit für Passanten zu optimieren. Zur Erfassung der mikroklimatischen Zustände wurden folgende zwei Messgruppierungen gewählt:

a) Erfassung des Temperaturprofils anhand einer Temperaturmesskette mit 6 Positionen vom Boden der unterkühlten Geländemulde (ca. 530 m ü. M.) mit den Eislöchern, über die Inversion bis an den oberen Rand der Schutthalde (ca. 600 m ü. M.), dem mutmasslichen, oberen Einzugsbereich der Haldenventilation (Abb. 4a). Die Registrierung erfolgte mit batteriebetriebenen Temperatursensoren und automatischer digitaler Datenspeicherung auf angeschlossene Mini-Datalogger (UTL-1). Die Genauigkeit der Messfühler beträgt ± 0.25 °C. Aufgrund der Batteriereichweite, vor allem in den kalten Monaten, und aufgrund der Loggerkapazität wurde der Messzeitschritt an jedem Logger auf 12 Minuten festgelegt. So betrug die Betreuungs- und Auslesefrequenz gut 2 Monate.

Entscheidend für den Aussagewert der Messreihen ist die lokale Montage der Temperatursensoren.

Position 1: im Muldenboden 10 cm unter der Grasdecke

Position 2: in einer etwa 130 cm hohen nach Osten orientierten Spalte (Eisloch) in der Schutthalde am Rand der Mulde, durch die Umgebung auch morgens im Schatten

Position 3: rund 20 m darüber zwischen den Blöcken der Schutthalde abgeschattet eingehängt, oberhalb des Kaltluftsees der Mulde, etwa in der Mitte des an die Mulde nach oben anschliessenden Wäldchens auf der Schutthalde

Positionen 4–6: rund 30 m, 55 m und 70 m über dem Muldenboden, d.h. am Anfang, etwa in der Mitte und am oberen Rand der vegetationsfreien Schutthalde, zwischen den Blöcken abgeschattet eingehängt.

b) Die zweite Messgruppe war zur **Registrierung der Strömungseigenschaften** in den Eislöchern ausgelegt (Foto 3a).An einem vertikal in einem Blockspalt aufgestellten Rohr waren zwei Anemometer (Schildknecht, Typ 555.1.12), eine Windfahne, ein Temperatursensor (PT 100) und ein (kapazitiver) Feuchtefühler montiert. Nachfolgend wird diese Einrichtung als Messturm bezeichnet. Am Standort befanden sich die Anemometer 110 cm bzw. 50 cm über Boden. Im oberen Niveau war auch die Windfahne montiert (Foto 3b). Die gesicherte Anlaufgeschwindigkeit der Anemometer aus dem Stillstand liegt zwischen 0.5 bis 0.7 m / s; im laufenden Zustand ist die Empfindlichkeit feiner. Auf mittlerer Höhe des Ständers, 80 cm über Grund, wurden die Temperatur und die Feuchte der Luft gemessen. Die Messwerte wurden im Zeitschritt von 30 Minuten auf einen zu dieser Messgruppe gehörenden Data-Logger (Cr 500) gespeichert. Damit korrespondierte die Auslesefrequenz, insbesondere auch der Batteriewechsel, mit derjenigen der Temperaturmesskette. Als Aufstellungsort war ein Eisloch zwischen den Felsblöcken im Niveau des Muldenbodens erwünscht, aber aus Gründen der Gefährdung durch Passanten nicht möglich. Stattdessen wurde eine Spalte am südlichen Hang der Mulde, ca. 6 m über dem Muldenboden, zwischen den Positionen 2 und 3 der Temperaturmesskette (Abb. 4a, Foto 3a, 3b), gewählt.

3.2 Erfassung der lokalen Vegetation

Im Laufe der Messperiode vom Mai 2002 bis Juni 2003 wurden mehrere, saisonal bezogene Kartierungen der lokalen Flora und Vegetation durchgeführt. Die Vegetations-Aufnahmen erfolgten gemäss der ökologischen Gliederung der Kaltluftmulde in vier Ebenen:

1) Boden des Kessels,
2) unbewaldeter Kesselrand mit Moosvorhängen,
3) Krüppelzone / Zwergsträucher des Kesselrandes und
4) Übergangszone Nadel- / Laubwald (cf. Abb. 4b).

Die Vegetationsaufnahmen auf Flächen von ca. 4 m² (Kesselboden), 50 m² (Kesselrand) und 200 m² (Waldbereich) erfolgten nach der modifizierten Braun-Blanquet-Skala (Braun-Blanquet 1964). Um geringere Deckungsgrade besser zu erfassen, wurde das „weite" Intervall des Deckungsgrades 2 (5 bis 25 %) in vier 5er-Intervalle feiner unterteilt (vgl. Tab. 1 - 4). Es wurde keine umfassende floristische Erhebung angestrebt, da hierzu bereits umfangreiche Untersuchungen vorliegen (cf. Pfaff 1933), die für die vorliegende Arbeit genügen. Pfaff (1933) erwähnt für das Gebiet der Eppaner Eislöcher insgesamt 619 Pflanzensippen (177 Blütenpflanzen mit rund 60 Unterarten, 11 Farnpflanzen, 82 Moosarten, 160 Flechtenarten, 188 Pilzarten und 1 Algenart). Vielmehr wurden von Juni 2002 bis Mai 2003 bei verschiedenen Begehungen in zeitlich möglichst repräsentativer Weise die dominanten Blüten- und Farnpflanzen sowie Moose (Tab. 4) notiert (Vegetationsaufnahmen nach der modifizierten Braun-Blanquet-Skala, die Nomenklatur richtet sich nach Lauber & Wagner 2001, Frahm & Frey 1983). Die Angaben in den Tab. 1 – 3 stellen eine Synthese von mehreren zeitlich gestaffelten Vegetationsaufnahmen dar. Die Verbindung der Moose mit dem Lokalklima wurde durch Zuordnung von Arealtyp und Temperaturzahl (Ellenberg et al. 1992) hergestellt.

Das Vegetationsmosaik der einzelnen vier Erfassungsebenen wurde schematisch in vier Kartenskizzen dargestellt (Abb. 6 bis 9). Die Temperaturmesskette wurde in etwa gemäss dieser Gliederung im Gelände angelegt.

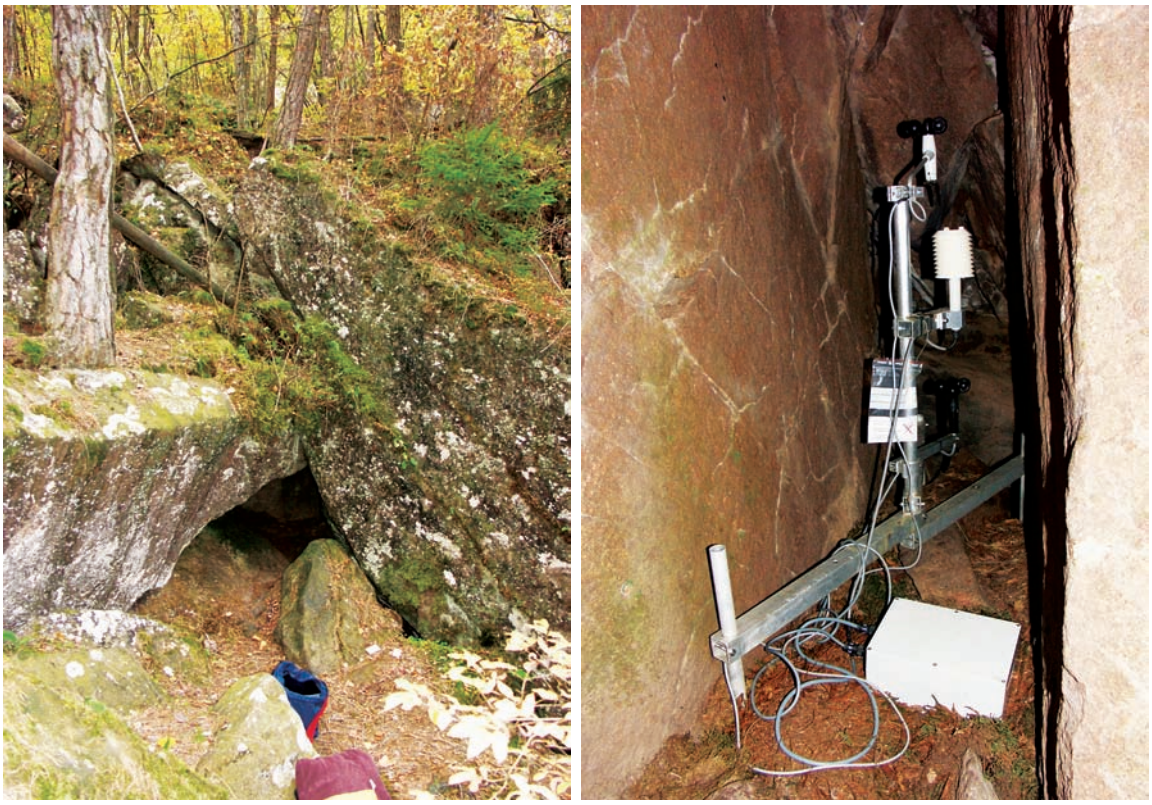


Foto 3 a: Spalt in der Schutthalde, in welchem der Messturm aufgestellt war;
Foto 3 b: Messturm und Datalogger in der Schutthalde. (Foto D.Grebner 2003)

4. Ergebnisse

4.1 Temperatur und Ventilationseigenschaften

Da die Projektmessungen auf 12 Monate Dauer begrenzt sind, wird als Bezug für die Temperaturmessreihen der mittlere Temperaturjahresgang von Bozen verwendet (Kap. 2. 1). Die fehlenden Monatsmittel am Messturm im Oktober 2002 und in der Messkette im Januar 2003 (Abb. 5) ergaben sich aus mehrtägigen Datenausfällen.

Die Abweichungen zwischen den Temperaturmessungen der einzelnen Positionen und Bozen in Abb. 5 setzen sich zusammen aus den Eigenschaften eines Einzeljahres im Vergleich zum vieljährigen Mittel, den unterschiedlichen Höhenlagen aller Messstandorte und vor allem der thermischen Singularität der Eislöcher. Die unterschiedlichen Höhenlagen von Bozen und der Messkette werden durch die meist tieferen Temperaturen an den Positionen 5 und 6 der Messkette deutlich. Die geringen Temperaturdifferenzen sowie die positive Abweichung der Temperatur an Position 6 von Bozen im Winter 2002/2003 ist in den Eigenschaften des Einzeljahres und der Messorte zu suchen (Kap. 5). Im Übrigen weisen die beiden obersten Positionen (5 und 6) jedoch zeitlich in guter Näherung den von Bozen vertretenen Temperaturjahresgang der Region auf (Kap. 2. 1).

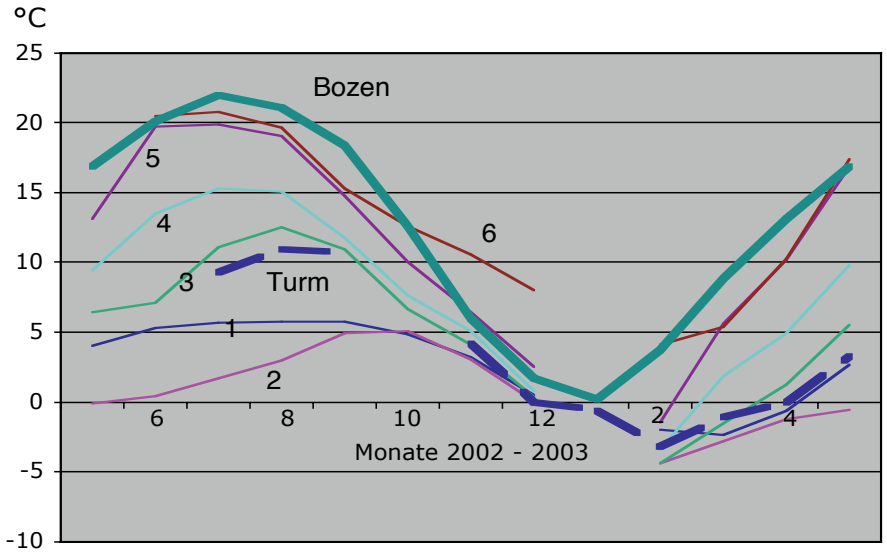


Abb. 5: Monatsmitteltemperaturen in der Messperiode Mai 2002 bis Mai 2003. Die Beschriftung der Kurven von 1 bis 6 beziehen sich auf die in Abb. 4 skizzierten Positionen . ‚Turm' (gestrichelte Kurve) bezeichnet die Messreihe vom Messturm; ‚Bozen' den als Referenz für die Region verwendeten Temperaturjahresgang.

Die thermische Singularität der Eislöcher wird in der Messkette von Position 4 an abwärts mit drei für die Vegetation prägenden Effekten zunehmend sichtbar. Sie dürfen als systematisch, d.h. als wenig abhängig von der Kürze der Projektmessreihen angesehen werden (Kap. 5).

a) Das Jahresmaximum der Temperatur verschiebt sich mit tieferen Lagen in der Messkette und je nach den Positionseigenschaften vom Juli (Bozen) deutlich gegen den Herbst. In den Eislöchern, d.h. am Messturm und an Position 2, ist diese Verschiebung am stäksten (Abb. 5).

b) Auch das Jahresminimum des Winters tritt verzögert auf. Mit Ausnahme von Position 1 beträgt die Verschiebung allerdings nur rund einen Monat, und ist im Gegensatz zum Sommer an den verschiedenen Positionen weitgehend zeitgleich. Die Ausnahme von Position 1 wird nachfolgend im Zusammenhang mit einer temporären Schneedecke weiter erwähnt.

c) Im Vergleich zu den im Sommer zunehmend starken negativen Abweichungen der Positionen 4 bis 1 und Messturm von Bozen (bis 17 °C) sind im Winter die Differenzen (mit rund 5 °C) nur mässig. Ausserdem unterscheiden sich im Winter die Temperaturen der Positionen von 5 abwärts untereinander nur wenig. Dadurch flachen sich die Jahresamplituden von den annähernd regionsklimatischen Verhältnissen der obersten Positionen bis zum Boden der Kaltluftmulde systematisch ab und verkleinern sich die zeitlichen Abstände zwischen den Jahresextremen.

An den Positionen 1, 2 und Messturm ergeben sich aufgrund der jeweils besonderen Ortseigenschaften weitere Feststellungen. Der im Muldenboden eingebaute Sensor in Position 1 erfährt durch die Dämpfung des Bodens die geringste Jahresschwankung der Temperatur mit dem Höchstwert im Messjahr von gut 6 °C in der ersten Septemberhälfte und dem monatlichen Maximum im September von 5.8 °C. Weitere Ursachen für den auffallend flachen Verlauf der Temperaturkurve, vor allem im Sommer, sind die überwiegend durch Bäume gegen direkte Strahlung abgeschattete Lage mit Ostorientierung des Muldenbodens sowie die Beständigkeit der in der Mulde angesammelten Kaltluft durch Nachfliessen und Windschutz. Entgegen bisheriger Annahmen (z.B. Wakonigg 1996) folgt zumindest im gemessenen Jahr die Zirkulation in den Eislöchern und in der Schutthalde nur sehr eingeschränkt dem thermischen Konzept von Hangauf- und Hangabwind ab. Abgesehen von kurzen Phasen bei dynamischen Wetterlagen im Mai und Juni 2003, wie z.B. Frontdurchgänge, überwog noch im Juli und August 2002 das Ausströmen aus den Eislöchern (Messturm), nur gelegentlich unterbrochen durch einige aufeinanderfolgende Tage mit messbarem Einströmen. Erst im September stellte sich dann fast durchgehend eine Strömung in die Eislöcher hinein ein. Im Oktober setzte die Hangabrichtung wieder ein.

Der Abzug der Muldenkaltluft und ein Nachfliessen von wärmerer Umgebungsluft bis zum Muldenboden ist deshalb nur in geringem Ausmass möglich. Eine turbulente Einmischung von warmer Luft durch Wind ist aufgrund der windgeschützten Lage der Mulde ebenfalls als gering einzustufen. Dafür sprechen die eher gelegentlichen und geringen Tagesgänge und wetterabhängigen Veränderungen der Temperatur im Sommer von weniger als 2 °C an den beiden Stationen 1 und 2. Tagesgänge im Winter waren noch etwas seltener als im Sommer. Im Vergleich dazu zeigen sich im oberen Bereich der Schutthalde die Tagesschwankungen sehr deutlich mit bis zu 5.5 °C (Voser 2003). Als weitere mögliche Wärmequelle, vor allem im Sommer, ist der Wärmeaustausch an der Oberfläche des Kaltluftsees ein nur langsamer, sekundärer Prozess.

Eine weitere feststellbare Ursache für die Beständigkeit der Kaltluft in der Mulde zeigt sich parametrisch während einer temporären Schneedecke von rund 50 cm Dicke ab 21. Januar 2003. Die Unterseite einer solch dicken Schneedecke wird normalerweise durch den Bodenwärmefluss temperiert. Die Temperatur an Position 1 ging jedoch bis zum Monatsmittel im März weiter zurück bis –2.4 °C, zwischen 24. Februar und 6. März 2003 sogar durchgehend unter –3 °C. Dieser Verlauf der Temperatur deutet auf Permafrost im Boden der Mulde hin (Haeberli et al. 2000). Er unterbindet den Wärmefluss aus tieferen Schichten an die Oberfläche. Der Summe aller Erwärmungsbeiträge stehen somit dominierend die Erhaltungsfaktoren für den Kaltluftsee gegenüber.

Aussagekräftig sind weiterhin auch der Temperaturunterschied zwischen dem Muldenboden (Position 1) und dem Eisloch am Muldenrand (Position 2) sowie die Temperaturverläufe in beiden Eislöchern verglichen mit den übrigen Positionen. Diese Beobachtungen korrelieren auch mit der festgestellten, überwiegenden hangabwärts gerichteten Strömung in der Schutthalde.

Anstatt des typischen Verlaufs der Lufttemperatur zwischen Mai und September (2002) in Form eines Sommermaximums, steigt sie an Position 2 nur allmählich und schwach zunehmend von 0 °C bis zur Temperatur am Muldenboden an (Abb. 5). Im April und Mai 2003 nähert sie sich entsprechend asymptotisch vom Winterminimum gegen 0 °C,

in Abweichung von den deutlich steigenden Erwärmungen an den übrigen Positionen. Das Temperturplateau bei 0 °C passt zum Vorjahr und markiert den Wärmebedarf zum Abschmelzen von Bodeneis und Eiszapfen, deren Bildung im Spätwinter 2002/2003 beobachtet wurde. Dessen Abnahme und die inzwischen hochsommerliche Temperatur im oberen Einzugsgebiet der Strömung in die Schutthalde lassen die Temperatur im Eisloch langsam steigen. Mit der am Messturm registrierten Strömungsumkehr im September hangaufwärts stellte sich im Eisloch die Temperatur auf diejenige der Mulde ein. Die Abkühlung im Oktober ist klimatisch zum Winter hin und durch wieder einsetzenden Kaltluftausfluss bedingt.

Auch am Messturm wird die Strömungsdrehung im September von hangabwärts in hangaufwärts durch die Temperatur bestätigt. Einerseits ist zwar eine deutliche Sommererwärmung festzustellen. Sie ergibt sich durch die erhöhte Lage in 6 m über dem Muldenboden. Dadurch ist der Standort knapp oberhalb der Kaltlufthöhe von etwa 4 m. Subjektiv schien ausserdem die Austrittsgeschwindigkeit geringer und die Luft weniger kalt als an Position 2. Anderseits wird aber das Maximum ebenfalls wieder im September, dem Zeitpunkt der Strömungsdrehung hangauf, erreicht, während die Positionen 3 bis 5 und Bozen bereits jahreszeittypisch deutlich abkühlen.

Die Kaltluft in der Mulde wird durch eine Bodenschwelle am Abfliessen gehindert. Dadurch erreicht der Kaltluftsee eine Höhe von 4 m. Sie überstieg die Schwelle um rund 1 Meter und wurde auch dort wahrgenommen. In der Zeitskala von Wetterlagen wurden Oberflächenschwankungen der Kaltluft von gut 1 m beobachtet (z.B. Begehung vom 24. April 2004).

4.2 Vegetation

Die Ergebnisse zur Erfassung der dominanten Pflanzenarten und eine schematische Darstellung des Vegetationsmosaiks nach den vier oben erwähnten Ebenen des Haupteislochs sind nachfolgend in Abb. 6-9 und in den Tab. 1-4 dargestellt (vgl. Kap. 3.2). Unterhalb des Gandbergs (obere Gand) stockt der oben erwähnte submediterrane Mannaeschen-Hopfenbuchenwald, der einen grossen Teil des Felssturzes von rund 23 ha bedeckt. Ausgenommen sind die offene Schutthalde sowie der Kesselboden und -rand der Eislöcher. Im Einflussbreich der Kaltluft treten in inverser Höhenstufung typische subalpine und alpine Arten auf, die in Südtirol üblicherweise in einer Höhenlage von 1500 bis 2000 m ü. M. verbreitet sind.

Im Einflussbereich des Kaltluftsees befinden sich einige charakteristische Kälte- und Kühlezeiger. Es sind dies folgende Arten (in Klammern sind die T-Werte [Temperaturzahl] nach Ellenberg et al. (1992) angegeben):

a) Muldenboden (subalpin-alpine Grasheide, Position 1 in Abb. 4b, vgl. Tab. 1 und Abb. 6): *Campanula scheuchzeri* (2), *Poa alpina* (3), *Vaccinium gaultherioides* (3), *Luzula sylvatica* (4), *Alchemilla monticola* (4), *Homogyne alpina* (4), *Gymnocarpium dryopteris* (4), *G. robertianum* (4).

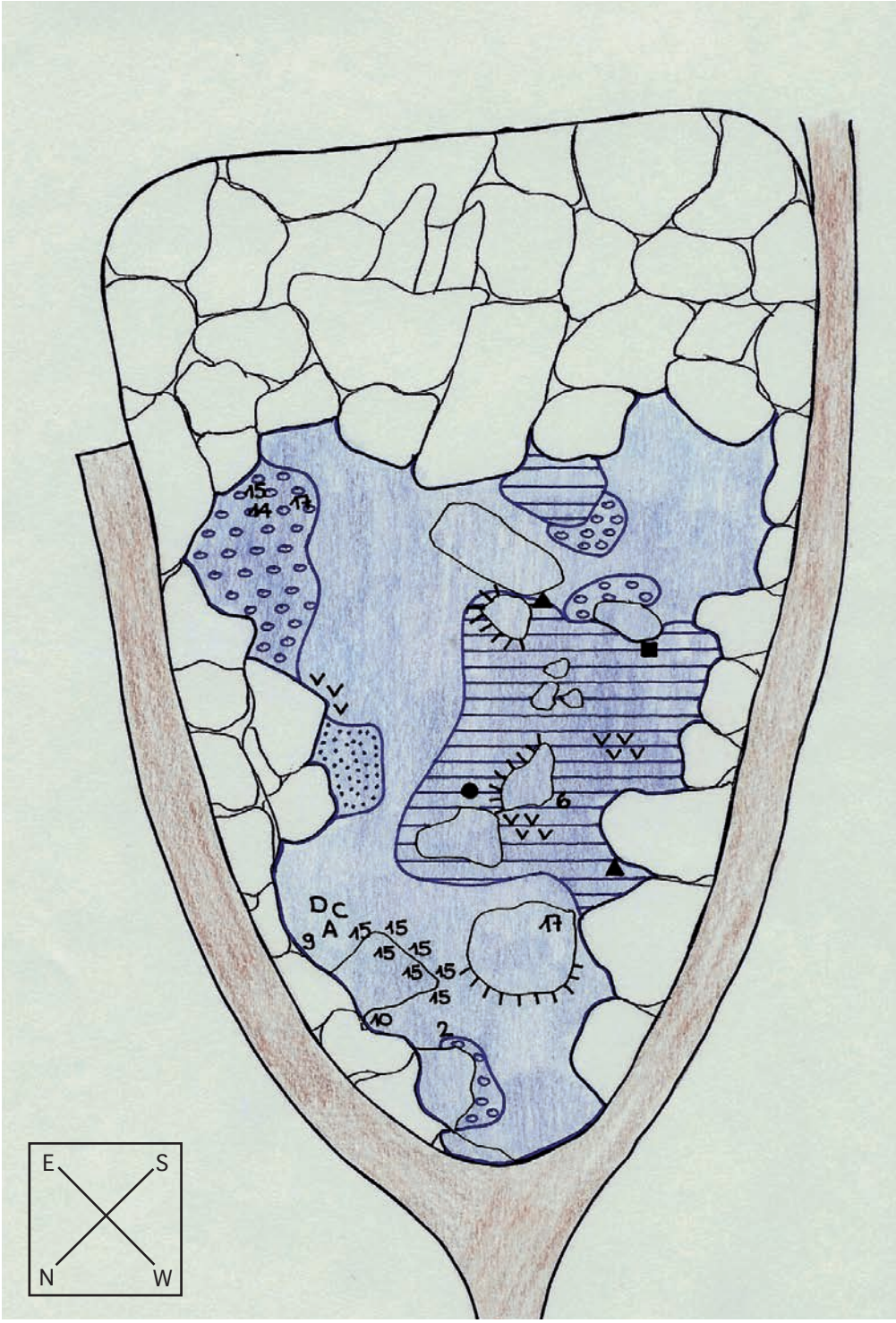


Abb. 6: Kartenskizze zur subalpin-alpinen Grasheide; braun: Weg
(vgl. Legende nach Abb. 9)

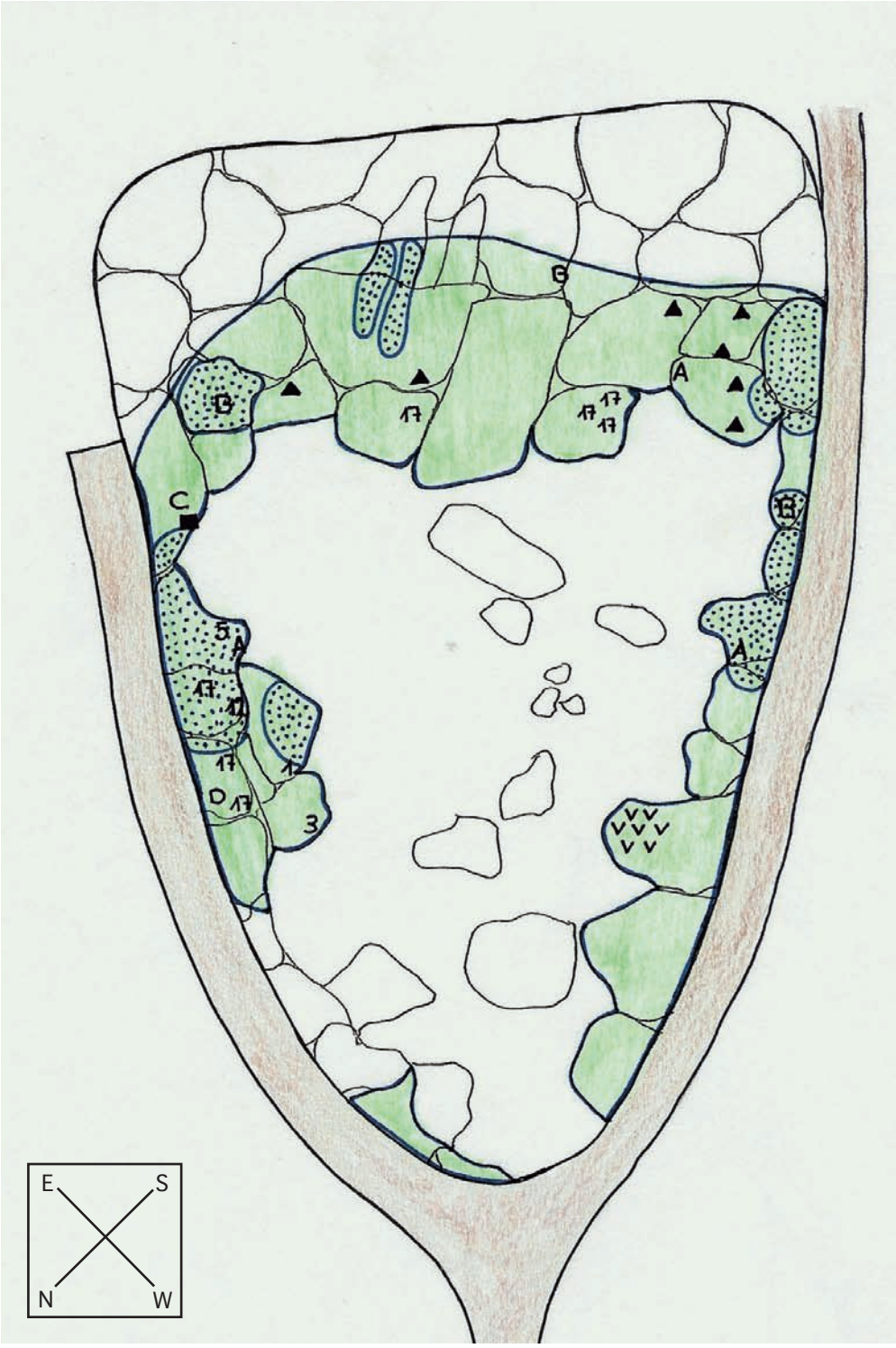


Abb. 7: Kartenskizze zum Kesselrand mit Moosvorhängen; braun: Weg
(vgl. Legende nach Abb. 9)

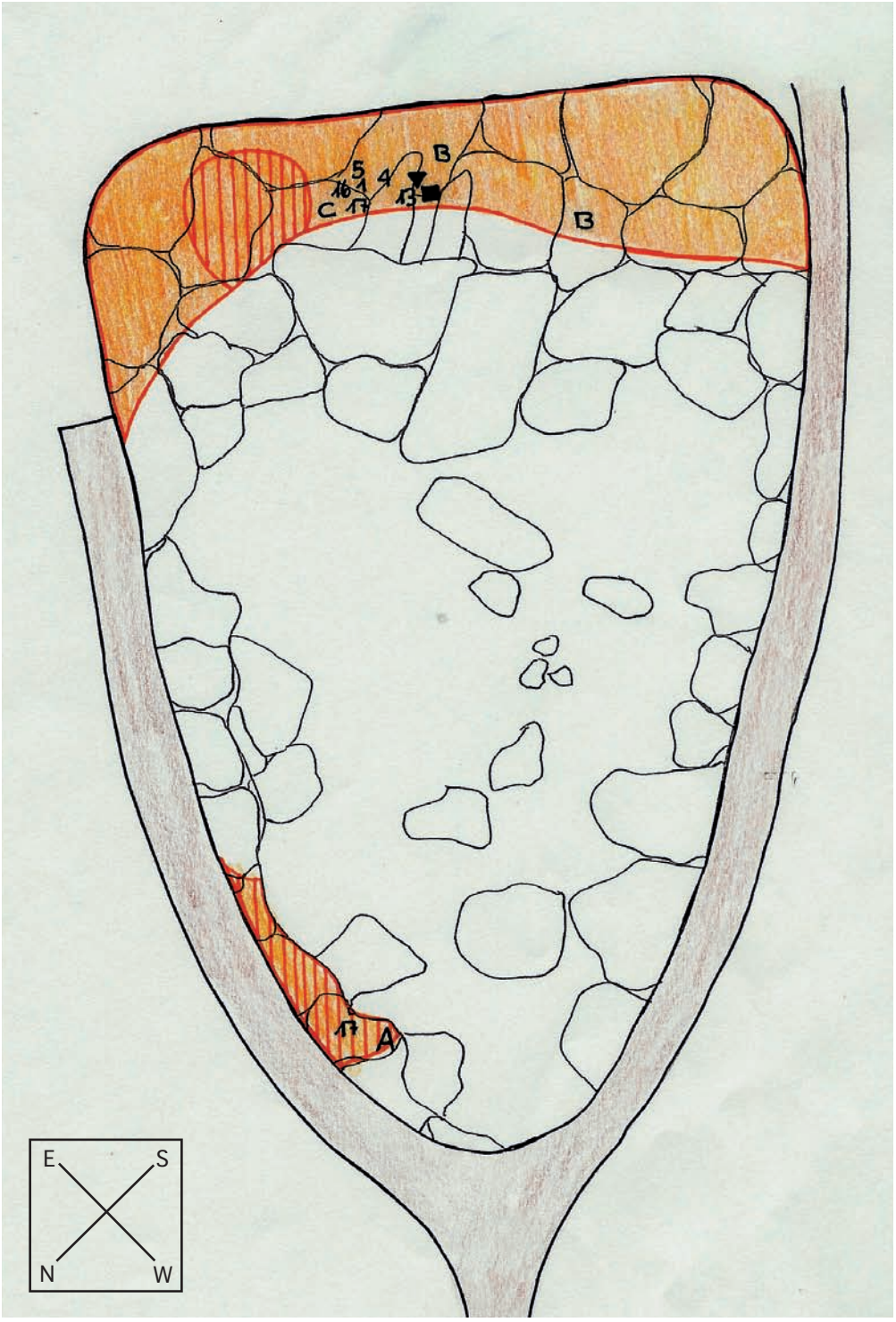


Abb. 8: Kartenskizze zur Krüppelzone mit Zwergsträuchern; braun: Weg (vgl. Legende nach Abb. 9)

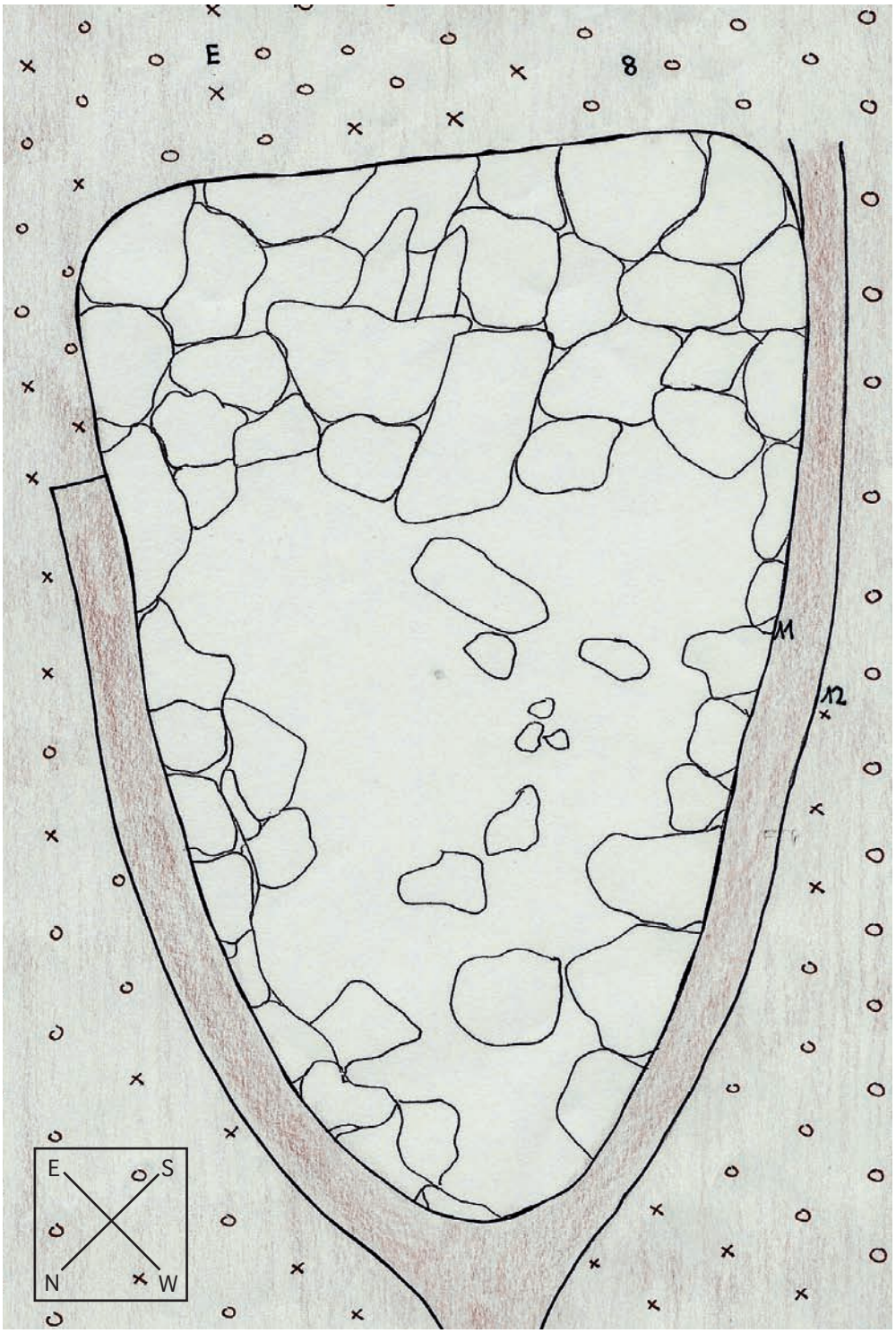


Abb. 9: Kartenskizze zum subalpinen Nadelwald und submediterranen Laubwald; braun: Weg (vgl. Legende nach Abb. 9)

Legende zu den Abbildungen 6 bis 9

subalpin- alpine Grasheide (Abb. 6)

horizontal schraffiert: Süssgräser
Kreise: *Oxalis acetosella*
schwarz punktiert: *Carex montana, Luzula campestris*
blau: *Poa alpina* und *P. annua*

Kesselrand mit Moosvorhängen (Abb. 7)

schwarz punktiert: Moosvorhänge

Krüppelzone mit Zwergsträuchern (Abb. 8)

vertikal rot schraffiert:*Rhododenron ferrugineum*
und *Vaccinium gaultherioides*

Nadel- und Laubmischwald (Abb. 9)

Kreuze: Nadelhölzer (*Picea abies*)
Kreise: Laubhölzer (*Ostrya carpinifolia, Fraxinus ornus, Tilia platyphyllos*)

Baumarten: A *Sorbus aucuparia*, B *Pinus sylvestris*, C *Larix decidua*, D *Picea abies*, E *Populus tremula*

Einzelpflanzen: 1 *Clematis alpina*, 2 *Epilobium angustifolium*, 3 *Veronica urticifolia*, 4 *Lonicera nigra*, 5 *Epipactis helleborine*, 6 *Genista tinctoria*, 7 *Moehringia muscosa*, 8 *Sambucus racemosa*, 9 *Luzula nivea*, 10 *Rhododendron ferrugineum*, 11 *Valeriana tripteris*, 12 *Rosa pendulina*, 13 *Vaccinium myrtillus*, 14 *Homogyne alpina*, 15 *Vaccinium gaultherioides*, 16 *Geranium robertianum*, 17 *Hieracium lachenalii*

Einzelsignaturen:
Ecken: *Campanula scheuchzeri*,
schwarze Dreiecke: *Athyrium filix-femina* und *Cystopteris montana*,
schwarze Quadrate: *Polypodium vulgare* und *Gymnocarpium dryopteris*.

Tab. 1
Boden der Geländemulde

Höhe über Meer: 530 m
Fläche: 4 m²

Süss- und Sauergräser

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz/ Dominanz
Weissliche Hainsimse	*Luzula luzuloides*	2.1
Schneeweisse Hainsimse	*Luzula nivea*	2.1
Wald-Hainsimse	*Luzula sylvatica*	2.3
Feld-Hainsimse	*Luzula campestris*	2.2
Berg-Segge	*Carex montana*	1.0
Einjähriges Rispengras	*Poa annua*	2.2
Alpen-Rispengras	*Poa alpina*	2.2
Hain-Rispengras	*Poa nemoralis*	2.2
Nickendes Perlgras	*Melica nutans*	2.1
Draht-Schmiele	*Deschampsia flexuosa*	2.1
Rasen-Schmiele	*Deschampsia caespitosa*	2.2
Gemeines Ruchgras	*Anthoxanthum odoratum*	2.2
Kriechender Klee	*Trifolium repens*	2.3
Roter Klee	*Trifolium pratense*	2.1
Alpenlattich	*Homogyne alpina*	+

Farnpflanzen

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz/ Dominanz
Eichenfarn	*Gymnocarpium dryopteris*	+
Ruprechtsfarn	*Gymnocarpium robertianum*	r
Breiter Wurmfarn	*Dryopteris dilatata*	r
Gemeiner Waldfarn	*Athyrium filix-femina*	+

Tab. 2
Übergangsbereich Nadel-/ Laubwald

Höhe über Meer (ca. 535 m)
Fläche: 50 m²

Baumschicht

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Fichte	*Picea abies*	1
Wald-Föhre	*Pinus sylvestris*	+
Hopfenbuche	*Ostrya carpinifolia*	+
Sommer-Linde	*Tilia platyphyllos*	+
Vogelbeerbaum	*Sorbus aucuparia*	+
Manna-Esche	*Fraxinus ornus*	+

Strauchschicht

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Alpenrebe	*Clematis alpina*	+
Rostblättrige Alpenrose	*Rhododendron ferrugin.*	2.1
Erika	*Erica carnea*	2.1
Heidelbeere	*Vaccinium myrtillus*	2.2
Preiselbeere	*Vaccinium vitis-idaea*	2.2
Rote Heckenkirsche	*Lonicera xylosteum*	2.1
Schwarze Heckenkirsche	*Lonicera nigra*	2.1
Alpen-Hagrose	*Rosa pendulina*	+

Krautschicht

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Nabel-Miere	*Moehringia muscosa*	+
Berg-Mauerpfeffer	*Sedum montanum*	+
Ruprechtskraut	*Geranium robertianum*	1.0
Gemeines Habichtskraut	*Hieracium lachenalii*	1.0
Nesselblättr. Ehrenpreis	*Veronica urticifolia*	+
Gemeiner Sauerklee	*Oxalis acetosella*	2.2
Trauben-Steinbrech	*Saxifraga paniculata*	+

Farnpflanzen

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Gemeiner Waldfarn	*Athyrium filix-femina*	r
Berg-Blasenfarn	*Cystopteris montana*	+
Gemeiner Tüpfelfarn	*Polypodium vulgare*	+

Tab. 3

Mischwald

Höhe über Meer (ca. 535-540 m)
Fläche: 200 m²

Baumschicht

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Manna-Esche	*Fraxinus ornus*	2.1
Hopfenbuche	*Ostrya carpinifolia*	2.2
Traubeneiche	*Quercus petraea*	1.0
Flaum-Eiche	*Quercus pubescens*	1.0
Sommer-Linde	*Tilia platyphyllos*	1.0
Edel-Kastanie	*Castanea sativa*	2.1
Echter Mehlbaum	*Sorbus aria*	1.0
Felsenbirne	*Amelanchier ovalis*	1.0
Rot-Buche	*Fagus sylvatica*	1.0
Hänge-Birke	*Betula pendula*	r
Wald-Föhre	*Pinus sylvestris*	+
Fichte	*Picea abies*	r

Strauchschicht

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Steinweichsel	*Prunus mahaleb*	1.0
Roter Hornstrauch	*Cornus sanguinea*	+
Hasel	*Corylus avellana*	+
Berberitze	*Berberis vulgaris*	r
Edel-Kastanie	*Castanea sativa*	+
Hopfenbuche	*Ostrya carpinifolia*	+
Sommer-Linde	*Tilia platyphyllos*	+
Vogelbeerbaum	*Sorbus aucuparia*	+
Echter Mehlbaum	*Sorbus aria*	2.1
Manna-Esche	*Fraxinus ornus*	1.0
Felsenbirne	*Amelanchier ovalis*	1.0
Rote Heckenkirsche	*Lonicera xylosteum*	+
Schwarze Heckenkirsche	*Lonicera nigra*	1.0
Liguster	*Ligustrum vulgare*	1.0
Feld-Ahorn	*Acer campestre*	1.0
Roter Holunder	*Sambucus racemosa*	+
Christophskraut	*Actaea spicata*	+

Krautschicht

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Maiglöckchen	*Convallaria majalis*	1.0
Leberblümchen	*Hepatica nobilis*	2.1
Vielblüt. Salomonssiegel	*Polygonatum multiflor.*	2.1
Zweiblättr.Schattenblume	*Maianthemum bifolium*	+
Wald-Veilchen	*Viola reichenbachiana*	1.0
Wald-Erdbeere	*Fragaria vesca*	1.0
Gemeiner Sauerklee	*Oxalis acetosella*	2.3
Efeu	*Hedera helix*	1.0
Echte Goldrute	*Solidago virgaurea*	+
Wald-Habichtskraut	*Hieracium sylvaticum*	2.1
Gemeines Habichtskraut	*Hieracium lachenalii*	1.0
Dreiblatt-Baldrian	*Valeriana tripteris*	1.0
Schmerwurz	*Tamus communis*	+
Immenblatt	*Melittis melissophyllum*	+

Farnpflanzen

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Gemeiner Waldfarn	*Athyrium filix-femina*	1.0
Gemeiner Tüpfelfarn	*Polypodium vulgare*	1.0
Braunstielig. Streifenfarn	*Asplenium trichomanes*	+

Schutthalde

deutscher Name	wissenschaftlicher Name	Abundanz / Dominanz
Rollfarn	*Cryptogramma crispa*	+
Nordischer Streifenfarn	*Asplenium septentrion.*	+
Braunstielig. Streifenfarn	*Asplenium trichomanes*	+
Eichenfarn	*Gymnocarpium dryopt.*	+
Gemeiner Blasenfarn	*Cystopteris fragilis*	+
Spinnweben-Hauswurz	*Sempervivum arachnoid.*	r
Felsen-Mauerpfeffer	*Sedum rupestre agg.*	+
Weisser Mauerpfeffer	*Sedum album*	+
Steinbeere	*Rubus saxatilis*	+

Tab. 4

Laub- und Lebermoose (Auswahl)

Nr.	Moosarten	Arealtyp // Temperaturzahl
1	*Barbilophozia hatcheri* Pterigynandrum filiforme	bor-mont / / T2 bor-mont / / T2
2	Hylocomium splendens	subbor / / T3
3	*Barbilophozia barbata*	subbor-mont / / T3
5	Rhytidiadelphus triquetrus	subbor / / T3
7	Polytrichum formosum	temp / / T2
9	Polytrichum formosum *Ptilidium ciliare*	temp / / T2 bor / / T3
10	*Lophozia excisa* Paraleucobryum longifolium Racomitrium sudeticum	bor-mont / / T3 bor-mont / / T2 subarc-subalp / / T2
11	Isothecium alopecuroides	temp / / T4
14	**Polytrichum alpinum**	**subarc-subalp // T1**
15	*Plagiochila asplenioides s.l.* **Plagiomnium medium**	temp / subbor-mont / / T3-4 **subarc-alp // T1**
16	*Bazzania tricrenata* Isothecium alopecuroides **Plagiomnium medium**	bor-mont / / T2 temp / / T4 **subarc-alp // T1**
18	*Plagiochila asplenioides s.l.* **Polytrichum alpinum**	temp / subbor-mont / / T3-4 **subarc-subalp // T1**
26	Isothecium alopecuroides *Lophozia heterocolpos* Mnium cf. spinulosum	temp / / T4 subarc-dealp / / T2 subkont-mont / / T7
28	**Plagiomnium medium**	**subarc-alp // T1**
31	*Porella arboris-vitae*	submed-mont / / T4
32	Isothecium alopecuroides	temp / / T4

Die Nummern beziehen sich auf die Fundstellen des Kesselrandes (in Abb. 6 nicht eingetragen). Gerade Schrift: Laubmoose, kursive Schrift: Lebermoose, fette Schrift: ausgeprägte Kältezeiger.
T 1-2: Kältezeiger, T 3: Kühlzeiger, T 7: Wärmezeiger (nach Ellenberg et al. 1992). Es dominieren Arten des subarktisch-alpinen und boreal-montanen Arealtyps.

b) Moosvorhänge am Kesselrand (Position 2 in Abb. 4b, vgl. Tab. 4). Unter den Laub- und Lebermoosen dominieren Arten des subarktisch-alpinen und boreal-montanen Arealtyps: *Polytrichum alpinum* (1) und *Plagiomnium medium* (1) sind besonders bemerkenswert; ferner *Pterigynandrum filiforme* (2), *Polytrichum formosum* (2), *Paraleucobryum longifolium* (2), *Racomitrium sudeticum* (2), *Barbilophozia hatcheri* (2), *Bazzania tricrenata* (2), *Lophozia heterocolpos* (2), *Barbilophozia barbata* (3), *Rhytidiadelphus triquetrus* (3), *Ptilidium ciliare* (3), *Lophozia excisa* (3), *Plagiochila asplenioides* (3). Die ersten beiden genannten Laubmoosarten können als Eiszeitrelikte betrachtet werden. Sie geben einen Hinweis darauf, dass die Temperaturverhältnisse in den Eislöchern über praktisch das ganze Holozän mehr oder weniger gleichbleibend kühl waren.

c) Übergangszone vom Nadel- zum submediterranen Laubwald (Positionen 3 bis 4 in Abb. 4b, vgl. Tab. 2 und 3 sowie Abb. 8 und 9). Einerseits treten hier im unteren Bereich (Position 3) noch typische subalpine Kühlezeiger, andererseits darüber (Position 4) ausserhalb des Kaltlufteinflusses die charakteristischen submediterranen Wärmezeiger auf: *Picea abies* (3), *Clematis alpina* (3), *Rhododendron ferrugineum* (3), *Moehringia muscosa* (3), *Valeriana tripteris* (3), *Lonicera nigra* (4), *Sambucus racemosa* (4), *Rosa pendulina* (4), *Veronica urticifolia* (4); *Tilia platyphyllos* (6), *Ostrya carpinifolia* (8), *Fraxinus ornus* (8); auf der Schutthalde: *Sempervivum arachnoideum* (3), *Cryptogramma crispa* (3).

5. Diskussion

Die vorliegende Untersuchung erfasst die Mikroklimatologie im Bereich der Eislöcher in Verbindung mit dem floristischen Bestand und dem Vegetationsmosaik. Die Mikroklimatologie, insbesondere die Temperatur, liefert trotz gewisser einschränkender Aspekte den quantitiven Rahmen für das Auftreten und die räumliche Verteilung der Pflanzenarten als Klimazeiger. Die Messreihen umfassen 12 Monate und sind hochaufgelöst in Zeitschritten von 12 bzw. 30 Minuten (vgl. Kap. 3.1). In Bezug auf die Vegetation sind jedoch aggregierte Werte davon in Zeitintervallen wie Tagesgänge, Monatsmittel und Jahresgänge von Bedeutung.

Die teilweise einschränkenden Aspekte für generalisierbare Aussagen sind: Datenseits die mit 12 Monaten relativ kurze und dadurch der Jahr zu Jahr-Variabilität unterworfenen Messungen im Vergleich zum Klimanormaljahr (CLINO) sowie entstandene Messlücken. Letztere wurden allerdings durch den Begehungsrhythmus rasch entdeckt und haben somit für pfanzenrelevante klimatische Schlussfolgerungen geringe Bedeutung. Bezüglich Messorte sind deren bedingte Wahl und begrenzte Anzahl zu nennen. So wurde der Messturm zum Schutz in einem etwas abseits gelegenen Eisloch installiert. Im Weiteren einschränkend ist auch das Fehlen von Luftfeuchtemessungen ausserhalb des Eislochs, vor allem in der Mulde. Möglichst beschädigungsgeschützte geeignete Standorte waren für dieses Projekt jedoch nicht gegeben. Von instrumenteller Seite wäre eine tiefere Anlaufschwelle der beiden Anemometer im Eisloch wertvoll gewesen. Durch räumliche und zeitliche Kombination der Messungergebnisse lassen sich dennoch die mirkoklimatischen Randbedingen für die Planzenarten und das Vegetationsmosaik des Standortes weitgehend repräsentativ darstellen.

Um die Temperaturmessreihen klimatisch einzuordnen, wurden sie mit dem mittleren Jahresgang von Bozen verglichen. So erweist sich der erfasste Temperaturverlauf vom Sommer 2002 aufgrund der Positionen 5 und 6 zeitlich im Prinzip klimakonform (Abb. 5). In Einzelmonaten während der Messperiode sind aber spontane Änderungen festzustellen, ausgeprägt an den Posititionen 6 und 5, abwärts rasch weniger. Diese Auffälligkeiten stimmen zeitlich mit Temperaturanomalien in der südalpinen Region während der Messperiode überein.

Im Einzelnen sind südalpin folgende Witterungsphasen zur Beurteilung der Messreihen zu erwähnen: Bis zum Messbeginn war das Jahr 2002 südalpin leicht, im Februar und März signifikant übernormal. Dadurch sind die gemessenen Monatstemperaturen am Messbeginn als etwas übernormal anzunehmen. In der Messperiode folgte dann im Juni regional ein, um 3 - 4 °C, stark übernormales Temperaturmittel. Dieser Zustand deckt sich mit einem spontanen Anstieg der Temperaturen an den Positionen 6 und 5. Die Positionen von 4 abwärts reagieren jedoch kaum mehr auf diese Wärmephase. Im Juli und August 2002 lagen am Alpensüdhang die Temperaturen bei Normalwerten. Erneut übernormale Werte im November und Dezember korrelieren wiederum mit dem auffallenden Verlauf an den Positionen 6 und 5 (hier abgeschwächt). Nach regionalen Monatsmitteln im Januar und Februar 2003 unter der Norm folgen, verglichen mit Bozen, weitgehend nur diese beiden Messreihen wieder einer stark positiven Temperaturanomalie im März. Sie dauerte dann letztlich den gesamten Sommer, über das Messende hinaus, an.

Aus dem geringen Einfluss der anomalen Witterungsphasen während der Messperiode auf die Messreihen der Positionen von 4 abwärts ist zu schliessen, dass diese gute Näherungen für das Klima der Singularität sind, einschliesslich den aus Abbildung 5 ablesbaren Jahresmitteltemperaturen. Dafür sprechen auch noch die sehr ähnlichen Temperaturen am Ende und am Anfang der Messperiode, besonders in Position 2, mit seinen spezifischen weiteren Randbedingungen (vgl. Kap. 4.1). Dementsprechend als repräsentativ sind auch die festgestellten Verschiebungen der jahreszeitlichen Temperaturextreme anzusehen.

Position 1 parametrisiert als weitere pflanzenrelevante Bedingung Permafrost im Boden der Mulde (Kap. 4.1). Er ist Teil der Verifikation der Beständigkeit des Kaltluftsees sowie der gemessenen Strömungsrichtungen in der Schutthalde. Die Beständigkeit erklärt sich im Weiteren noch aus dem Wärmehaushalt der Mulde, einschliesslich den Folgen aus den Geländemerkmalen, und aus der dominierend hangabwärts, aus den Eislöchern heraus gerichteten Strömungsrichtung. Deren Drehung hangaufwärts erfolgt erst, mit sporadischen Ausnahmen, konsequent nur im September. Die späten Temperaturmaxima in den Eislöchern (Positionen 2 und Messturm), besonders an der Position 2 (Kap. 4.1), stützen die Strömungsmessungen, die wegen der etwas hohen Anlaufschwellen der Sensoren mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind.

Die in der Geländemulde auftretenden Kälte-, Kühle- und bedingte Kühlezeiger, insbesondere die beiden als Glazialrelikte zu betrachtenden Laubmoosarten *Polytrichum alpinum* und *Plagiomnium medium* lassen einen während mehr oder weniger während des ganzen Holozäns andauernden Kaltlufteinfluss auf die Vegetation vermuten. Die heutige inverse Zonation der Vegetation dürfte sich im Verlauf des Boreals / Älteren Atlantikums oder evtl. noch früher im Zuge der postglazialen Einwanderung der thermophilen Gehölzarten zum heutigen Zustand konstituiert haben.

An anderen ähnlichen durch Kaltluft beeinflussten Standorten wurden reliktische Faunen nachgewiesen (Molenda 1996, 1999). Gefunden wurden u.a. Milben, Spinnen, Springschwänze und Käfer. Es wäre wohl lohnend, auch die Eppaner Eislöcher in dieser Hinsicht näher zu untersuchen.

Ferner bietet die einzigartige Situation die Möglichkeit, dendroökologische Untersuchungen an Normal- und Kümmerformen von Gehölzen vorzunehmen, wie dies z.B. von Schudel (2002) an mehreren Standorten in den Schweizer Alpen und im Jura gemacht wurde.
Ausserdem könnten noch weitere ökophysiologische und pflanzenanatomische Studien in der Art, wie dies Punz et al. (1983) und Sieghardt et al. (2000) an Pflanzen der Eppaner Eislöcher durchgeführt haben, vorgenommen werden.

Zum Schluss sei noch bemerkt, dass einige von Pfaff (1933) aufgeführte Pflanzenarten nicht mehr festgestellt werden konnten (z.B. *Botrychium lunaria*). Eine neue, aufdatierte floristische Erhebung der Eppaner Eislöcher wäre nach 70 Jahren durchaus angebracht und vom naturschützerischen Gesichtspunkt aus sehr sinnvoll.
Des weiteren wäre sehr zu wünschen, dass der Schutz der Eppaner Eislöcher vor dem Betreten durch Unbefugte wirksamer durchgesetzt werden könnte.

Zusammenfassung

In der Blockschutthalde eines ehemaligen Felssturzes bei Eppan (Südtirol, Italien) kann die Luft frei zirkulieren. Luft, die bei hangabwärts gerichteter Strömung am unteren Rand ausfliesst, ist stark abgekühlt. Sie sammelt sich in einer Geländemulde und bildet einen ganzjährigen Kaltluftsee von 4-5 m Tiefe. Von Mai 2002 bis Juni 2003 wurden das vertikale Temperaturprofil von der Mulde zum oberen Rand der Schutthalde gemessen, in einem Eisloch das Mikroklima registriert sowie zonierte Vegetationsaufnahmen durchgeführt. Im Beobachtungsjahr wurden in der Mulde, verglichen mit der Umgebung, im Sommer gegen 17 °C tiefere Monatsmitteltemperaturen festgestellt. Im Hochwinter sinkt dieser Unterschied unter 5 °C. Die Kaltluft wird nach oben durch eine Inversion abgeschlossen, besonders ausgeprägt im Sommer. Entgegen bisherigen Annahmen ist zumindest die mit den Messgeräten erfassbare Strömung in 11 von den 12 Messmonaten massgeblich hangabwärts gerichtet. Dies trägt wesentlich zur Beständigkeit des Kaltluftsees bei und bewirkt zusammen mit den tiefen Muldentemperaturen das in der Mulde extrazonale und inverse Vegetationsmosaik, welches sich in vier Höhenbereiche gliedern lässt: subalpin-alpine Grasheide, Kesselrand mit Moosvorhängen, Krüppel-Nadelhölzer mit Zwergsträuchern sowie Übergangsbereich zum zonalen submediterranen Laubwald. Im Bereich des Kaltluftsees treten unter den Blüten- und Moospflanzen Kälte-, Kühle- und bedingte Kühlezeigerarten auf, die zonal 1000 bis 1500 Höhenmeter höher verbreitet sind. Die beiden Kältezeiger *Polytrichum alpinum* und *Plagiomnium medium* (Laubmoose) werden als Glazialrelikte betrachtet.

Dank

Wir danken Herrn J. Bertram (Allschwil/ BL) für die aufwändigen Moosbestimmungen sowie Herrn Dr. N. Kuhn (WSL, Birmensdorf) für die hilfreiche Literatursammlung zu Dolinen, Block- und Schutthalden (mündliche Mitteilungen 2003 und 2004) und für sein Interesse am hier behandelten Thema. Unser Dank richtet sich ebenso an Frau Dr. Maria Luise Kiem (Amt für Landschaftsökologie Bozen) und Herrn Dr. Vito Zingerle (Naturmuseum Bozen) für die Unterstützung und das stete Interesse an der Untersuchung. Und schliesslich danken wir natürlich auch unseren Kollegen Herrn Karl Schroff (Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich) und Dr. Martin Hölzle (Geographisches Institut der Universität Zürich) herzlich für die Bereitstellung der Klimamessinstrumente und den vielfachen technischen Rat bzw. die Mitbetreuung der Diplomarbeit von Nancy Voser.

Literatur

Bauermeister R., 2002: Azonale Vegetation auf unterkühlten Schutthalden. Eine Studie zur Charakterisierung und Erklärung der Vegetationsmuster. Diplomarbeit ETH Zürich. Unveröff. Manuskript, 42 + XX pp.

Beck von Mannagetta G., 1906: Die Umkehrung der Pflanzenregionen in den Dolinen des Karstes. Sitz.ber. Akad. Wiss. Wien, 115: 3-18.

Braun-Blanquet J., 1964: Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. Wien, Springer Verlag, 865 pp.

Burga C.A. & Perret R., 1998: Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngeren Eiszeitalter. Ott, Thun, 805 pp.

Burga C.A. & Voser N., 2002: Die Eppaner Eislöcher – eine Kälteinsel im Weingebiet Südtirols, Naturmuseum Südtirol, Zoologische und botanische Forschung in Südtirol, Kleinsäugerforschung im Alpenraum. Naturmuseum Bozen: 10.

Ebers E., 1972: Das Quartär von Überetsch (Schwarzhaus, Eppan). Der Schlern, 111, 259.

Ellenberg H., Weber H.E., Düll R., Wirth V., Werner W. & Paulißen D., 1992: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, Scripta Geobotanica XVIII. Golze, Göttingen, 258 pp.

Fliri F., 1974: Eiszeitliche Geschichte des Zentralraumes von Tirol. Der Schlern, 104.

Frahm J.-P. & Frey W., 1983: Moosflora. Ulmer, Stuttgart, 522 pp.

Furrer E., 1961: Über „Windlöcher“ und Kälteflora am Lauerzersee (Schwyz). Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich, 32: 83-96.

Furrer E., 1966: Kümmerfichtenbestände und Kaltluftströme in den Alpen der Ost- und Innerschweiz. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 117(10): 720-733.

Furrer E., 1972: Kaltluftvegetation im Waagtal (Schwyz). Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich, 41: 21-24.

Habbe K.-A., 1969: Die würmeiszeitliche Vergletscherung des Gardasee-Gebietes. Freiburger Geogr. Arbeiten, 3, Schulz, Freiburg i.Br.: 1-254.

Haeberli W., Hoelzle M., Fischer U. & Vonder Mühll D., 2000: Gletscher und Permafrost. Vorlesungsunterlagen, Geographisches Institut der Universität Zürich. 150 pp.

Hantke R., 1983: Eiszeitalter 3, Ott, Thun, 730 pp.

Heissel W., 1982: Südtiroler Dolomiten. Sammlung geolog. Führer 71. Borntraeger Berlin, Stuttgart, 172 pp.

Kiem L., 1987: Die Vegetation des südlichen Mendelzuges zwischen Kurtatsch und Aichholz. Schlern-Schriften. Athesia, Bozen, 349 pp.

Kobiendza R. & Kobiendza M.J., 1928: Führer durch die "Goloborza"-Blockhalden des Lysogory-Höhenzuges. In: Rübel E. (1930): Ergebnisse der internat. pflanzengeogr. Exkursion durch die Tschechoslowakei und Polen 1928. Veröff. Geobot. Inst. Rübel, Zürich, 6.

Kuhn N. 2003/04: Div. mündliche Mitteilungen (Literatursammlungen). WSL, CH 8903 Birmensdorf.

Lauber K. & Wagner G., 2001: Flora Helvetica. Haupt, Bern, 1614 pp.

Mayer H., 1961: Märchenwald und Zauberwald im Gebirge. Zur Beurteilung des Block-Fichtenwaldes (Asplenio-Piceetum). Jb. Ver. Schutze Alpenpflanzen u. –Tiere, 26: 22-37.

Mayer H., 1962: Der Block-Fichtenwald (Asplenio-Piceetum) in den Berchtesgadener, Chiemgauer und Kitzbühler Alpen. Mitt. Ostalpin-dinar. Pfl.soz. Arb.gem., 2: 47-53.

Molenda R., 1996: Zoogeographische Bedeutung Kaltluft erzeugender Blockhalden im ausseralpinen Mitteleuropa: Untersuchungen an Arthropoda, insbesondere Coleoptera. Verh. Naturwiss. Ver. Hamburg (NF), 35: 5-93.

Molenda R., 1999: Die Rolle von Blockhalden bei der Entstehung disjunkter Areale: zoogeographische Aspekte. Decheniana-Beihefte (Bonn), 37: 163-170.

Moor M.S.U., 1957: Die kartographische Darstellung der Vegetation des Creux du Van-Gebietes (Jura des Kantons Neuenburg). Beitr. Geobot. Landesaufn. Schweiz, 37: 1-114.

Morton F., 1959: Mikroklimatische Untersuchungen an *Rhododendron ferrugineum* im Bergsturzbereiche der Eppaner Gand. Der Schlern, 33: 233-234, 339-342, 424-426.

Müller M.J., Lutz E. & Renschler C., 1996: Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde. Universität Trier, Forschungsstelle Bodenerosion Mertersdorf. 5. ergänzte und verbesserte Aufl. Trier, 400 pp.

Peer T., 1995: Die natürliche Pflanzendecke Südtirols. Karte und Begleittext zur Karte 1 : 200'000. Amt für Landschaftsplanung, Autonome Provinz Bozen/ Südtirol, Lithopress Wien, 32 pp. und Karte.

Pfaff W., 1933: Die Eislöcher in Überetsch. Schlern-Schriften, 24: 72.

Press F. & Siever R., 1995: Allgemeine Geologie. Deutscher Taschenbuch Verlag, München. 602 pp.

Prosser F., 1992: Le "Buche del Vento" di Cornacalda, (Rovereto, Trentino Meridionale), Aspetti Floristici ed Ecologici: 157-176.

Punz W., Maier R., Sieghardt M., Engenhart M., Nagl A., Domschitz E., Neumann G. & Kovacs G., 1983: Mikrometeorologische und ökophysiologische Untersuchungen in den Eppaner « Eislöchern". Der Schlern: 261-278.

Rist A., 2002: Hexenwäldli auf kalten Blockhalden. Abiotische Faktoren zur Ausbildung von Zwergbäumen. Diplomarabeit Technische Universität München-Weihenstephan Freising und WSL Davos. Unveröff. Manuskript, 63 pp.

Ruffini F., Morandell I. & Brutti E., 2001: Natura 2000 in Südtirol. Abt. Natur und Landschaft, Autonome Provinz Bozen/ Südtirol und Europäische Akademie Bozen. Bozen, 256 pp.

Schudel K., 2002: Hexenwäldli. Dendroökologie von Kümmerfichtenbeständen auf unterkühlten Schutthalden. Diplomarbeit ETH Zürich und WSL Davos. Unveröff. Manuskript, 64 und XXXII S.

Sieghardt H., Punz W. & Reimitz R. 2000: Vergleichend-anatomische Studien an Pflanzen der Eppaner "Eislöcher". Verh. Zool.-Bot. Ges. Österreich, 137: 255-264.

Staindl A., 2000: Kurze Geologie von Südtirol. Weger, Brixen, 144 pp.

Streiff-Becker R., 1945: Die Windlöcher bei Ennetbühl. Mitt. naturf. Ges. Glarus, 7: 247-255.

Tirol-Atlas, 1980: Geologische Übersichtskarte von Tirol 1 : 300'000. Institut für Geographie/ Abt. Landeskunde der Universität Innsbruck. Wagner, Innsbruck.

van Husen D., 1987: Die Ostalpen in den Eiszeiten. Populärwiss. Veröff. der Geolog. Bundesanstalt Wien. 24 pp.

Voser N., 2003: Das Phänomen der Eppaner Eislöcher in Südtirol. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich. Unveröff. Manuskript, 71 + XLV pp.

Wakonigg H., 1996: Unterkühlte Schutthalden. Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz, 33: 209-223.

Wegmann G., 1995: Permafrostvorkommen auf geringer Meereshöhe. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich und VAW der ETH Zürich. Unveröff. Manuskript, 80 pp.

Adresse der Autoren:

Univ. Prof. Dr. Conradin A. Burga
Geographisches Institut der Universität Zürich
Winterthurerstr. 190
CH-8057 Zürich, Schweiz
cburga@geo.unizh.ch .

Dipl. Geogr. Nancy Voser
Lerchenberg 2
CH-8046 Zürich, Schweiz

Dr. Dietmar Grebner
Institut für Atmosphäre und Klima ETH Zürich
ETH Zentrum CHN L 16.2
CH-8092 Zürich, Schweiz
dietmar.grebner@env.ethz.ch

eingereicht: 03. 05. 2004
angenommen: 07. 07. 2005