ARBEITEN AUS DEM INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE DER KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ
Band 33 S. 209-223
Beiträge zur Permafrostforschung in Österreich Graz 1996

Unterkühlte Schutthalden

von **Herwig WAKONIGG**, Graz
mit 1 Abbildung und 4 Tabellen im Text

Zusammenfassung

Als „unterkühlte Schutthalden" werden hier jene Erscheinungen verstanden, bei denen die unteren Bereiche von Schutthalden infolge eines mit jenem der dynamischen Eishöhlen vergleichbaren Windröhrensystems wesentlich unter das Jahresmittel der Lufttemperatur der Umgebung abgekühlt werden und teilweise sogar ganzjährig Eis beinhalten. Nach einer Kurzbeschreibung der wichtigsten Vorkommen in den Ostalpen folgt ein Überblick über die bisherigen Deutungsversuche, welche fast durchwegs die sommerliche „Verdunstungskälte" im Inneren der Blockhalde für die Abkühlung verantwortlich machen. Bei der Beschreibung der wahrscheinlichen Abläufe, welche durch zahlreiche Temperatur- und Feuchtemessungen vor Ort verifiziert wurden, wird dann diese Theorie widerlegt: Demnach wird die Abkühlung der tieferen Zonen durch die im Winter einströmende Kaltluft (bei gleichzeitiger Verdunstung von Sickerwasser im Inneren) bewirkt, während es im Sommer beim Einströmen von Warmluft in die notwendigerweise existierenden oberen Öffnungen im Inneren überwiegend zur Kondensation der Feuchtigkeit der einströmenden Außenluft kommt. Demnach liegt auch die Temperatur an den oberen Öffnungen über dem Jahresmittel der Umgebung. Die auffallende Kälte der unten ausströmenden Luft ist dann eine Folge ihrer Abkühlung am im Winter ausgekühlten Blockwerk bzw. des Verbrauchs von latenter Wärme bei der Schmelzung des im Inneren befindlichen Eises, dessen Aufbau hauptsächlich zur Zeit der oberflächlichen Schneeschmelze geschieht. Hinweise auf mögliche Beziehungen zur Moorbildung bzw. zum fleckenhaften Permafrost stehen am Schluß der Arbeit.

Summary: Undercooled Talus

There are numerous places in the Alps where talus can be found with temperatures in its lower parts remarkably below those of the annual mean of the surrounding air. In many cases ice can even be found between or under the boulders and debris, sometimes existing over the whole summer. This phenomenon depends on a thermally-induced chimney effect, which in winter causes the relatively warm air of the interior to rise and be exuded from holes and crevices in the higher part of the talus, while at the same time fresh cold air necessarily enters at the corresponding holes in the lower part of the talus, thus cooling down a good deal of the rocky interior, commonly to some degrees below freezing-point. During the period of snow melting on the surface, ice is formed in the interior as long as the temperature remains below the freezing-point, but at the same time warming up the interior at least to freezing-point, due to the release of latent heat. During the summer the chimney works in the opposite way. The now relatively cold air of the interior drains from the lower openings and causes fresh warm air to enter the openings at the top of the talus. This air is then cooled on its way down to the lower exits, especially as a result of the loss of energy caused while melting the ice in the lower parts of the talus. Therefore in the summer the outstreaming air is apparently cold, usually producing a type of vegetation normally associated with a colder (sub-alpine) environment.
This study presents some examples in the Eastern Alps, and then the mechanism of the above-mentioned system is discussed and proved by numerous measurements of temperature and humidity, thus refuting the persistently repeated theory of summertime evaporation in the interior causing the low temperatures. Finally the results of the measurements are presented, followed by a short reflection on possible connexions with bog development and island permafrost.

Inhalt

1. Einleitung 210
2. Allgemeine Beschreibung des Phänomens 210
3. Beispiele aus den Ostalpen 211
4. Zur physikalischen Deutung des Phänomens der unterkühlten Schutthalden 213
4.1. Die Frage der Luftzirkulation 213
4.2. Bisherige Anschauungen über die Ursache der Unterkühlung 214
4.3. Analogie zu „dynamischen" Höhlen 215
5. Die Wirkungsweise im Jahresablauf 217
6. Meß- und Beobachtungsergebnisse 218
7. Die Frage der oberen Öffnungen 220
8. „Kondenswassermoor" und Permafrost 220
Literatur 223

1. Einleitung

Im Zuge der Beschäftigung mit dem alpinen Permafrost und seinen Erscheinungsformen im Gelände (LIEB 1996, in diesem Band) geraten auch Phänomene ins Blickfeld, die nicht unmittelbar der genannten Erscheinung zuzuordnen sind, sondern nur randliche, ähnliche oder verwandte Ausprägungen darstellen. Ein solches Phänomen sind auch unterkühlte Schutthalden, welche schon seit über 200 Jahren beschrieben werden, aber wegen der meist zu kurzen oder versteckten Veröffentlichungen nur ausnahmsweise im breiten Bewußtsein der damit befaßten Geowissenschafter präsent sind. Am geläufigsten sind davon im Bereich der Ostalpen wohl die „Eislöcher" von Eppan (Südtirol), das Eisvorkommen am Fuß der Matzen in den Karawanken südlich von Klagenfurt und - zumindest den Botanikern - das „Kondenswasser-Hochmoor" im Untertal bei Schladming.

Bei diesen und allen sonstigen hier angeführten Vorkommen handelt es sich im wesentlichen um dieselbe Erscheinung, obwohl dafür unterschiedliche Bezeichnungen wie „Eisloch" („Eislöcher"), „Eiskeller", „Eisstandorte", „Eis führende Schutthalde", „Eisvorkommen", „perennierendes Eisvorkommen", „Permafrostboden", „Frostboden", „Windlöcher", „Wetterlöcher", „unterirdischer Kaltluftstau" oder - bei zusätzlicher Vermoorung - „Kondenswassermoor" in Gebrauch waren und sind. In allen Fällen ist dabei gleichermaßen nur der untere Teil einer Schutthalde am Fuße eines Steilhanges oder einer Felswand gemeint, welcher durch ein Windröhrensystem im Sinne einer bewetterten Höhle mit wenigstens zwei Ausgängen in unterschiedlicher Höhenlage wesentlich unter die Durchschnittstemperatur der Umgebung abgekühlt wird. Diese Abkühlung äußert sich zum einen im z.T. sogar ganzjährigen Vorkommen von Bodeneis, zum anderen in der Ausbildung eines auffallend azonalen, meist subalpinen Vegetationskomplexes mit Neigung zur Hochmoorbildung und ist solcherart bevorzugtes Studienobjekt der Botaniker bzw. war Anlaß zur Klassifizierung eines eigenen genetischen Moortyps, nämlich des „Kondenswassermoores" (STEINER 1992, 49f.).

2. Allgemeine Beschreibung des Phänomens

Wie schon einleitend erwähnt, ist das Vorkommen von unterkühlten Schutthalden an eine funktionierende Luftzirkulation gebunden, wobei folgende Voraussetzungen wesentlich erscheinen:

- ☐ Die Schutthalde soll aus relativ grobem Blockwerk aufgebaut sein, dessen Zwischenräume nicht durch feinerkörniges Substrat ausgefüllt bzw. abgedichtet sein dürfen, um eine Wegsamkeit für die zirkuliernde Luft zu gewährleisten (SCHAEFTLEIN 1962, 114).
- ☐ Das beteiligte Gestein ist dabei nur insofern von Bedeutung, als es zur Bildung der genannten Schuttstruktur geeignet sein muß, was insbesondere beim Bozener Quarzporphyr (Eppan) der Fall ist, aber auch etwa bei Gneisen (Untertal) und Prasinit (Kitzbrunn), doch funktioniert das Prinzip sichtlich auch bei feinerkörnigem Schutt (Matzen).

- Wichtig erscheint auch eine oberflächliche Abdichtung durch Feinmaterial oder Moorbildung bzw. entsprechenden Bewuchs zumindest in den mittleren Teilen der Blockhalde bei gleichzeitiger Existenz oberer und unterer Öffnungen, um ein tatsächliches Windröhrensystem in Gang zu setzen (SCHAEFTLEIN 1962, 114).
- Schließlich erweist sich die Orientierung im Sinne einer der Strahlungsbilanz möglichst abträglichen Exposition als förderlich. So befindet sich keines der bekannten Vorkommen in Südexposition.
- Ob die Schutthalde durch ein mehr oder weniger einmaliges Felssturzereignis oder durch permanenten Schuttanfall entstanden ist, kann in seiner Bedeutung nur schwer eingeschätzt werden. Jedenfalls ist bei einem Felssturz nicht nur gröberes Blockwerk, sondern auch eine geringere Verkittung der Zwischenräume gegenüber laufender Schuttzufuhr zu erwarten.

3. Beispiele aus den Ostalpen (Abb. 1)

Die folgende Aufzählung soll nur eine Kurzcharakteristik der bekannten Vorkommen anbieten, wobei jeweils auf die wichtigste Literatur verwiesen wird. Die Reihung erfolgt im Sinne abnehmender Ausprägung bzw. Bedeutung und Kenntnisstand des jeweiligen Vorkommens.

1. Die „Eislöcher von Eppan" (Nr. 1 in Tab. 4)

Die „Eislöcher von Eppan" sind offenbar das bekannteste Vorkommen, wurden mehrmals erwähnt und beschrieben (MORTON 1959, 1962, FRENZEL 1962), dazu kommt eine ausführliche botanische Monographie von PFAFF (1933) mit weiteren Literaturangaben. Sie befinden sich innerhalb einer Mulde des postglazialen, etwa 0,5 km² großen, aus Bozener Quarzporphyr bestehenden Bergsturzgebietes der „Eppaner Gand" am Ostfuß des 985 m hohen Gandberges in rund 570 m Höhe (Überetsch, Nonsberger Alpen, Südtirol).

Zu den Wesenszügen dieses Vorkommens gehört die extreme Grobblockigkeit (mehrere Meter Maximaldurchmesser), die geringe bis fehlende (!) oberflächliche Abdichtung der bergseitigen Schutthalde, die Anlage in einem bis über 20 m eingesenkten „Kessel", in dem sich aufgrund der Stagnation der Kaltluft ein ausgesprochener Kaltluftsee und damit eine Vegetationsumkehr einstellen kann, sowie die Existenz mehrerer eindeutig feststellbarer Blas- oder Eislöcher. Wegen des Vorkommens innerhalb eines an sich submediterranen Vegetationskomplexes (Quercetum pubescentis bzw. Orno-Ostryetum), in welchem heute Weinbau und Edelkastanie, ja sogar Buschwerk von verwilderter Budleja sp. das Erscheinungsbild prägen, haben die Eislöcher mit ihren subalpinen Einschlägen (u.a. Rhododendron ferrugineum) früh die Aufmerksamkeit der Bevölkerung bzw. Fachwissenschafter erregt. So gibt es nicht nur eine relativ gute Literaturlage, sondern die Eislöcher wurden auch 1956 unter Naturschutz gestellt und sind heute durch einen Lehrpfad für Besucher zugänglich gemacht. Am Nordrand des Bergsturzgebietes befinden sich immer noch wenigstens zwei in die Schuttmasse hineingebaute Kühlkeller. Was das effektive Vorkommen von Eis anlangt, so erscheinen die diesbezüglichen Angaben offenbar stark übertrieben: Eis „im größten Hochsommer", wie es PLATTER 1896 schildert (nach PFAFF 1933, 16) oder auch „Vereisungen selbst im Sommer" (FRENZEL 1962) gibt es sicher nicht mehr und hat es in dieser Form wahrscheinlich auch früher nicht gegeben. Unter rezenten Klimabedingungen muß wohl mit dem vollkommenen Abtauen des oberflächlich sichtbaren Eises spätestens Ende Juni gerechnet werden.

2. Der „Eiskeller in der Matzen" (Nr. 2 in Tab. 4)

Der „Eiskeller in der Matzen" am Gotschuchenboden südlich von Klagenfurt (Karawanken, Kärnten) wurde erstmals 1893 von CANAVAL beschrieben, es folgten weitere Beschreibungen durch GRESSEL 1962 und 1965, dazu kommen noch zwei umfangreichere Monographien über das Tierleben durch HÖLZEL 1963 bzw. über ökophysiologische Untersuchungen durch SCHINDLER et al. 1976. Das Vorkommen liegt in ENE-Exposition in rund 1100 m Höhe in bewaldetem Gebiet am Fuß eines rund 500 m hohen Steilhanges unterhalb der 1627 m hohen Matzen im relativ feinkörnigen und dichten Schutt aus Wettersteinkalk, wodurch keine mit jenen in Eppan vergleichbaren Blaslöcher entwickelt sind. Solche wurden u.a. durch Aufgrabungen im

Zuge der Untersuchungen der Siebzigerjahre (SCHINDLER et al. 1976) geschaffen und belegen eine deutliche, wenn auch schwache und offenbar nur lokale Luftbewegung mit unterkühltem Ausströmen im Sommer. Die auffallendste Erscheinung in der Matzen ist aber ein um das Jahr 1960 in den vereisten Schutt gegrabener Schacht von 7 m Tiefe, der sich in Jahresfrist wieder fast vollkommen mit Eis gefüllt hatte (GRESSEL 1962, 90, 1965, 281). Er wurde auch noch im Sommer 1994 fast unversehrt angetroffen, wobei die Oberfläche des Bodeneises am 8.9.1994 in 1,2 m Tiefe festgestellt wurde.

3. Der „Toteisboden" im Untertal bei Schladming (Nr. 3 in Tab. 4)

Dieser ist wohl eines der interessantesten Vorkommen, welches erst durch die bisher einzige Beschreibung von SCHAEFTLEIN (1962) in das Licht der Fachwelt gelangte. Es handelt sich dabei um eine Grobblockhalde aus Gneis unterhalb der bis über 1000 m hohen schrofigen und von kleinen Wandstücken durchsetzten Hänge zwischen Roßkopf und Krügerzinken (2204 m) in rund 1000 m Höhe mit Exposition nach N bis NNE (Schladminger Tauern, Steiermark). Im unteren, unterkühlten Teil der Blockhalde konnte zwar kein den Sommer überdauerndes Bodeneis nachgewiesen werden, umso eindrucksvoller sind aber einerseits etwa ein halbes Dutzend Blaslöcher, bei welchen auch das winterliche Einströmen, ja sogar tagesperiodischer Richtungswechsel nachgewiesen werden konnte, andererseits die weit fortgeschrittene Vermoorung mit ihrer typischen Begleitflora (Sphagnum sp., Pinus mugo etc.), zu der auch Betula nana zählt, was als deren nordöstlichstes Vorkommen im Alpenraum gilt (SCHAEFTLEIN 1962, 116). Die Örtlichkeit wurde 1968 zum geschützten Landschaftsteil erklärt, eine Erschließung durch einen etwa 115 m langen Lehrpfad ist in Planung (weitere Einzelheiten im Kap. 4).

4. Das „Kondenswassermoor" bei der Klammhöhe (Nr. 4 in Tab. 4)

Dieses liegt nördlich von Tragöß-Oberort (Hochschwabgruppe, Steiermark) in rund 950 m Höhe am Fuß eines teilweise wanddurchsetzten, bis 400 m hohen Steilhanges des Reiterberges in einer Exposition gegen WNW, wobei die untersten Teile ähnlich wie in Eppan in eine wenige Meter tiefe Mulde hinabreichen. Am Fuß der relativ grobblockigen, aus Wettersteinkalk bestehenden, stark vermoorten Schutthalde konnten etwa fünf Blaslöcher mit auffallender sommerlicher Unterkühlung festgestellt werden, nicht aber perennierendes Bodeneis. Die Stelle wird nur bei STEINER (1992) erwähnt, wo aber zwei Farbfotos beigegeben sind (S. 63, 64).

5. Der „Permafrost" am Turmkogel (Nr. 5 in Tab. 4)

Diese Stelle bei Puchenstuben (Nördl. Kalkvoralpen, Niederösterreich) wurde erst in Herbst 1987 entdeckt und von FINK (1989) beschrieben. Es handelt sich um eine ziemlich grobblockige Schutthalde am Nordhang des im wesentlichen aus Wettersteinkalk bestehenden, 1246 m hohen Turmkogels in ca. 1060 m Höhe in NNE-Exposition, wobei insbesondere das ganzjährige Vorkommen von Bodeneis Aufmerksamkeit verdient. Leider wurde dieses Vorkommen, das auch teilweise vermoort ist, durch ausgedehnte Wegbauten (Forststraße mit platzartiger Erweiterung) nachhaltig gestört, sodaß bei einer Nachschau im August 1994 keinerlei Eis bzw. Windröhrenzirkulation nur andeutungsweise festgestellt werden konnte. Es scheint, daß die 1987 erfolgte Erklärung zum Naturdenkmal in diesem Fall zu spät gekommen ist.

6. Das „Kondenswassermoor" am Fuß des Ameiskogels (Nr. 6 in Tab. 4)

Diese von ULLMANN (1970) beschriebene und von ZIMMERMANN (1976) und STEINER (1992) erwähnte Stelle am Fuß des Ameiskogels (1471 m) bei Rotmoos NW Weichselboden liegt am Fuß von rund 700 m hohen wandartigen Steilflanken in reiner Nordexposition (Salzatal, Steiermark). Die an sich eindrucksvolle Vermoorung der aus Wettersteinkalk bestehenden grobblockigen Schutthalde ist flächenmäßig so bescheiden, daß eine Auflichtung des Hochwaldes

(wie auch am Turmkogel) nicht erfolgt. Bodeneis konnte nicht festgestellt werden, wohl aber eine schwache Windröhrenwirkung bei allerdings nur geringen Abkühlungsraten.

7. Die Windröhren beim Kitzbrunn (Nr. 7 in Tab. 4)

Diese Windröhren am Fuß eines Schuttkegels beim Kitzbrunn (auch: „Kritzbrunn") im Dösener Tal (Ankogelgruppe, Kärnten) wurden eher zufällig durch LIEB im Zuge seiner Arbeiten am alpinen Permafrost entdeckt. Die Stelle liegt in 1500 m Höhe nördlich der Sickerköpfe (2360 bzw. 2566 m) in NNW-Exposition. Es handelt sich um einen aus grobblockigem Prasinit bestehenden, nur schütter von Bäumen bestandenen, teilweise moosbewachsenen Schuttkegel, an dessen Fuß sich einige Windröhrenaustritte befinden. Es konnte allerdings weder Bodeneis noch eine effektive Vermoorung festgestellt werden, auch ist der Unterkühlungseffekt bescheiden, nur die Luftbewegung kann als deutlich und auffällig eingestuft werden.

8. Sonstige Vorkommen (Nr. 8-16 in Tab. 4)

Bei den im Moorschutzkatalog (STEINER 1992) weiters angeführten „Kondenswassermooren" bei der Moosbodenhütte im Kaponigtal bei Obervellach (1950 m; Ankogelgruppe, Kärnten), im Leitner Tal nahe dem Kartitscher Sattel in 1520 m (Karnische Alpen, Osttirol) und am Zerbenkogelmoos bei Arzbach bzw. Neuberg an der Mürz (Mürztaler Alpen, Steiermark) konnte keinerlei Windröhreneffekt oder Unterkühlung nachgewiesen werden. Dasselbe gilt auch für das „Eisloch" im Seebachtal (JUNGMEIER 1990) in 1300 m (Ankogelgruppe, Kärnten). Von den genannten Örtlichkeiten verdient insbesondere das Zerbenkogelmoos Beachtung, weil es von den im Moorschutzkatalog genannten „Kondenswassermooren" wohl das beeindruckendste ist, sowohl was die Fläche (ca. 2 ha), den Höhenunterschied (850-980 m), die Hangneigung (um 35°), die Baumarmut und die mächtige Entwicklung der Sphagnum-Bülten (bis 2 m) anlangt. Umso erstaunlicher ist, daß bei dem auf Semmeringquarzit-Schutt in NNW-Exposition entwickelten Hangmoor weder Unterkühlung noch die geringste Windröhrenwirkung feststellbar ist.

Die weiteren in der Tab.4 angeführten Örtlichkeiten Moor bei der Ingridhütte, Moor am Schellenbergkogel (STEINER 1992), die Moore in den Sölktälern (FRANEK 1995), die Windlöcher bei der Heidnischen Kirche (STÜBER und WINDING 1993) sowie die Eis führende Schutthalde auf der Steiner Alm (WEISS 1958) wurden nicht aufgesucht, weshalb ihre Wirkung im Sinne einer durch Windröhren unterkühlten Schutthalde nicht eingeschätzt werden kann. Nach der Beschreibung von WEISS darf angenommen werden, daß das Vorkommen auf der Steiner Alm von seiner Charakteristik bereits eine Übergangsform zu den alpinen Formen der gefrorenen Schutthalden (LIEB 1996, Kap.5.3.1) darstellt.

4. Zur physikalischen Deutung des Phänomens der unterkühlten Schutthalden

Eine physikalische Deutung hat zum einen die Frage der Luftströmungen innerhalb der Blockhalde, zum anderen die der Unterkühlung, d.h. Temperaturabsenkung wesentlich unter das Jahresmittel der Umgebung, und schließlich die der Eisbildung und -erhaltung zu klären, wobei letztere ja unmittelbar mit der Unterkühlung in Zusammenhang bzw. Wechselwirkung steht und beide letztlich durch die Luftströmungen bedingt werden.

4.1. Die Frage der Luftzirkulation

Was die Frage der Luftzirkulation betrifft, so wurde diese offenbar schon 1839 von F. KELLER (zitiert bei FURRER 1966, 721) im Sinne der katabatischen Luftströmungen innerhalb eines Bergwerks (wohl auch innerhalb eines bewetterten Höhlensystems) erklärt, wobei - unter der Voraussetzung einer relativ konstanten Temperatur im Berginneren bzw. einer raschen Anglei-

chung der Temperatur der zirkulierenden Luft an die Gesteinstemperatur - im Sommer die relativ kalte Luft aus den unteren Öffnungen ausströmen muß. Daß solcherart sinngemäß auch eine winterliche Umkehrung des Luftstromes mit oberem Ausströmen und unterem Einströmen verwirklicht sein muß, wurde spätestens 1846 von O. HEER (FURRER 1966, 722) ausgesprochen, wobei gleichzeitig auch Stillstand während des Frühjahrs und Herbstes postuliert wurde, was eine im Prinzip richtige, wenn auch aufgrund des beobachtbaren tagesperiodischen Richtungswechsels zu stark vereinfachende Annahme ist.

Die KELLER'sche Deutung wurde u.a. von CANAVAL (1893), später von SCHAEFTLEIN (1962, 1963) und schließlich von FURRER (1966), dort zusammen mit der erläuternden Skizze KELLERS übernommen, während die Skizzen bei SCHAEFTLEIN (1962, 113, 1963, 115) von MORLOT (1847, zitiert bei SCHAEFTLEIN) übernommen wurden, aber offenbar auch auf KELLER zurückgehen. SCHAEFTLEIN hat auch eine entsprechende, für Schutthalden anwendbare Skizze beigefügt (1962, 114, 1963, 116), wie auch später FURRER (1966, 721), wobei dieser aber die wichtige Voraussetzung der oberflächlichen Abdichtung der Blockhalde außer Acht gelassen hat. Die Darstellung SCHAEFTLEINS hat - in modifizierter Form - insbesondere von botanischer Seite viel Beachtung und Verbreitung gefunden (u.a. STEINER 1992).

Diese bis heute unwidersprochene Deutung ist in ihrer logischen Trivialität nicht nur zweifelsfrei zutreffend, sondern auch leicht nachvollziehbar, beobachtbar und einsichtig und braucht nicht weiter diskutiert zu werden. Sie ist auch keineswegs auf die außerhalb der Blockhalde aufsteigende Warmluft angewiesen, wie das bei FURRER 1966, 721, JUNGMEIER 1990, 22 und STEINER 1992, 49 f. zu lesen ist. Dort wird in der außen aufsteigenden Warmluft sogar die Ursache für das interne Absinken der Kaltluft gesehen. Sie erklärt aber ohne weitere Prämissen nicht die effektive Unterkühlung unter das Jahresmittel der Luft- bzw. Gesteinstemperatur, da die austretende Luft „höchstens bis zu der konstanten Temperatur des tieferen Untergrundes abgekühlt werden" könnte (SCHAEFTLEIN 1962, 115), was sich letzlich aber doch als Fehlschuß erweist, wie später noch zu zeigen sein wird.

4.2. Bisherige Anschauungen über die Ursache der Unterkühlung

Nach FURRER (1966, 721) war es H. B. de SAUSSURE, der 1796 als erster auf die „Verdunstungskälte" als Ursache der auffallenden Abkühlung hingewiesen hat. Dabei wird angenommen, daß die das meist feuchte Gestein abwärts durchziehende Luft die Feuchtigkeit innerhalb der Blockhalde zum Verdunsten bringe, wobei die dabei verbrauchte latente Wärme die entsprechende Abkühlung bewirke. Dieser Vorgang ist zwar prinzipiell möglich, de facto aber weitgehend auszuschließen, da bei dieser für den Sommer gültigen Situation so gut wie immer ein von der Außenluft zu den kühlen Gesteinsoberflächen im Inneren der Blockhalde gerichtetes Dampfdruckgefälle besteht, welches keine Verdunstung, sondern Kondensation der Luftfeuchtigkeit und damit Freisetzung latenter Wärme im Inneren der Blockhalde bewirkt. Für das Maß der Verdunstung bzw. Kondensation ist nun aber einzig dieses Dampfdruckgefälle entscheidend, unabhängig von den Einzelkomponenten wie Temperatur, Dampfdruck, relative Feuchte oder Sättigungsdefizit der Luft. In den späteren Arbeiten fehlen aber nicht nur diese Überlegungen und der Hinweis auf die sommerliche Kondensation, sondern die Vorstellung der Verdunstungskälte wurde sogar zunehmend unkritischer übernommen und häufig sogar unverstanden wiedergegeben.

So findet sich der Hinweis auf die Verdunstung wieder 1882 bei HÖLZL (PFAFF 1933, 23), später bei CANAVAL (1893, 199), welcher sogar die Eisbildung in der warmen Jahreszeit (!) auf die „rasche Verdunstung" zurückführt, auch nach PLATTER 1896 (PFAFF 1933, 16) „werden der Eiszapfen durch Verdunstung im Luftstrom all'der Spalten und Höhlen immer mehr ..." und GSELLFELS (PFAFF 1933, 26) macht 1898 sogar „die äußere Hitze" für die rasche Verdunstung und Abkühlung bis unter den Gefrierpunkt verantwortlich. PFAFF selbst diskutiert dieses Problem in höchst umständlicher Weise (1933, 26 ff.), macht für die Verdunstung alle möglichen Parameter wie Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur und letzlich das Sättigungsdefizit der Luft, d.h. ihre

„Aufnahmsfähigkeit für Wasserdampf" verantwortlich, lehnt die Verdunstung als entscheidendes Agens für die Abkühlung schließlich ab, billigt ihr diese Rolle später aber doch wieder zu (S. 29).

Die sommerliche Verdunstung als Ursache der Abkühlung und auch Vereisung findet sich dann wieder bei WEISS (1958, 62), wird bei GRESSEL (1962, 88 f.) abgelehnt, aber nicht aus physikalischen Gründen, sondern wegen der zu geringen zur Verfügung stehenden Wassermengen, wobei GRESSEL das Phänomen der unterkühlten Schutthalde der Matzen nur im Zusammenhang mit der Klüftigkeit und Verkarstung des Anstehenden selbst verstanden wissen will, ohne aber dafür nachvollziehbare und plausible Erklärungen anzubieten. Auch seine Arbeit aus 1965 bringt dazu nichts neues, wie auch jene von HÖLZEL 1963, welche nur die Ansichten CANAVALS mehr oder weniger wörtlich wiedergibt.

Aus dieser Zeit verdienen besonders die beiden Arbeiten von SCHAEFTLEIN (1962, 1963) besondere Beachtung, nicht nur weil sie einen guten Überblick über die Vorkommen von unterkühlten Schutthalden und deren Beschreibungen bieten, sondern auch die Frage der Unterkühlung erstmals nach PFAFF wieder ausführlich diskutieren. So wird z.B. (1962, 113) die starke sommerliche Verdunstungskälte sinngemäß als Spuk bezeichnet, aber keineswegs bezüglich ihrer allgemein abkühlenden, sondern nur bezüglich ihrer Sommereis bildenden Wirkung. Ihre Rolle als Ursache der Abkühlung wird vielmehr entschieden bejaht und dafür auch KYRLE (1923, 119, 213) zitiert, welcher an den betreffenden Stellen aber nur ausführt, daß die Verdunstung bei starkem Höhlenwind auch relativ stark sein könne, aber nur wenn die „eintretende Tagluft relativ trocken" sei. Ohne das Dampfdruckgefälle selbst anzusprechen, weist KYRLE aber doch auf den „verschiedenen Dampfdruck bei verschiedenen Temperaturen" hin und kann daher - trotz des Hinweises auf den „bedeutenden Umfang" der Verdunstung unter „günstigen Verhältnissen" und ihre u.U. recht bedeutende Wirksamkeit auf die Abkühlung - nicht als Gewährsmann für die Annahme der sommerlichen Verdunstungskälte gelten. Auch SCHAEFTLEIN (1962, 115) hält die Sättigung der Luft noch für eine die Verdunstung steuernde bzw. limitierende Größe.

Verdunstungskälte bei sommerlichem Abströmen als Ursache der Abkühlung findet sich noch bei SCHAEFTLEIN (1963, 115), FURRER (1966, 721), SCHINDLER et al. (1976, 272) und ZIMMERMANN (1976, 5). FINK (1989, 97) macht Gesteinsfeuchte, Rieselwässer und Kontakt mit dem Eis für die hohe Luftfeuchte der im Sommer innen abströmenden Luft verantwortlich (wofür aber die bloße Abkühlung allein mehr als ausreichend ist!), wobei diese Feuchte zur Folge habe, daß es im Mischungsbereich mit trockener Außenluft zu Verdunstungskälte komme (!), was zur ganzjährigen Erhaltung des Bodeneises beitragen könne. Die Annahme von Verdunstung bei der Mischung von Luft mit verschieden hoher relativer Feuchtigkeit ist natürlich unzutreffend und trägt nichts zur Erklärung der Unterkühlung bei.

STEINER (1992, 50) ist der erste, der die notwendige Kondensation der Feuchtigkeit der eingesaugten Warmluft im Inneren der Blockhalde anspricht, meint aber im selben Atemzug, daß „der zunehmend stärker werdende Luftstrom aber letztendlich zu einer Verdunstung des Innenwassers" führe. Geradezu symptomatisch für das im Laufe der Zeit eher zunehmende Unverständnis für die beteiligten Vorgänge sind die Bemerkungen bei FRANEK (1995, 15), wo neben der schon geläufigen Verdunstung des Innenwassers durch die warme, trockene Außenluft auch vom Anstieg der Windlochtemperaturen in der kalten Jahreszeit berichtet wird bzw. von der Eis konservierenden Wirkung des Windröhreneffektes bis in den Sommer hinein. Auch der Satz: „An den Austrittsöffnungen der Blockhalde kommt es zu Kondensierungen von Wasser, wodurch Verdunstungskälte entsteht" bedarf wohl keines weiteren Kommentars.

4.3. Analogie zu „dynamischen" Höhlen

Man ist geneigt, wegen der Ähnlichkeit des Phänomens mit bewetterten Höhlen bzw. Eishöhlen bei der Speläologie um Rat zu fragen und wird auch im besten Sinne des Wortes fündig: Schon

CRAMMER (1899, 50 f.) spricht von der Verdunstung „während der Kälteperioden" und bringt sie mit der in die Höhle fallenden kalten (!) Luft in Verbindung, wobei er das Ausmaß an „Verdunstungskälte" in den „Wärmeperioden" für nicht einschätzbar hält. BOCK (1913, 139) formuliert bereits recht eindeutig, daß „im Sommer Wärme durch Kondensierung von Wasserdampf zugeführt und nicht durch Verdunstung entzogen wird", und weiter: „Es wird im Winter durch die Verdunstung der in der Höhle befindlichen Feuchtigkeit Wärme gebunden und somit die abkühlende Wirkung des winterlichen Luftzuges wesentlich vermehrt" (S. 140). Beide Vorgänge müßten sich aber nicht die Waage halten. Diesen zutreffenden Aussagen ist eigentlich nichts mehr hinzuzufügen, außer vielleicht die randliche Bemerkung, daß auch bei den Höhlenforschern die Vorstellung der sommerlichen Verdunstung vertreten war (z.B. LOHMANN 1895, zitiert bei BOCK 1913, 138).

ROSCHKOTT (1921, 37) wiederholt im wesentlichen die Aussage von BOCK; die diesbezüglich wenig ergiebigen Angaben KYRLES (1923, 213) wurden bereits erwähnt. Schließlich findet sich erst bei WIGLEY & BROWN (1976, 337) der eindeutige Hinweis, daß Verdunstungs- bzw. Kondensationsvorgänge an den Höhlenwänden davon abhingen, ob die Höhlenwände wärmer oder kälter seien als der Taupunkt der Luft, also letzlich wieder als Abhängigkeit von der Richtung des Dampfdruckgefälles. Als Bestätigung dieser Überlegungen beschreibt BÖGLI (1978, 233) das in das Innere der Höhlen fortschreitende Abtrocknen der Höhlenwände im Winter unter dem Einfluß der in den unteren Eingang einströmenden Kaltluft. Die sommerliche Verdunstung als Ursache der Unterkühlung scheidet damit wohl eindeutig aus.

Letztendlich ist die Lösung viel einfacher und beruht im wesentlichen auf dem Prinzip, daß die unteren Öffnungen eines Windröhrensystems die eindringende winterliche Kaltluft immer „aus erster Hand" erhalten, während sie den oberen Öffnungen erst nach Erwärmung im Inneren, d.h. „gealtert" entströmen kann. Umgekehrt hat die (sommerlich) einströmende Warmluft an den oberen Eingängen noch ihre maximale Wärme, während sie die unteren Ausgänge erst nach entsprechender Abkühlung im Berginneren erreicht. Dadurch werden die oberen Öffnungen in doppeltem Sinne „bevorzugt", die unteren in doppeltem Sinn „benachteiligt". Die Bildung eines negativen Energiespeichers („Kältereservoir") und damit die Voraussetzung für die besonders im Sommer auffallende Unterkühlung geschieht demnach hauptsächlich im Winter.

In folgerichtiger Konsequenz meint CRAMMER (1899, 67) daß daher jederzeit (d.h. in beiden Perioden) die Temperatur von oben nach unten abnehmen müsse, und BOCK (1913, 129) überlegte sogar, daß bei entsprechend langem Weg des Luftstroms im Inneren der Höhle die oberen Öffnungen das Temperaturmittel aller warmen Tage (d.h. solcher mit Einströmen oben), die unteren Öffnungen dagegen jenes der kalten Tage (d.h. solcher mit Einströmen unten) aufweisen müßten. Auch OEDL (1923, 36) sowie KYRLE (1923, 121) weisen darauf hin, daß die Eisbildungen bei Windröhren (Eishöhlen) immer in der Nähe des unteren Einganges stattfänden, wobei KYRLE (1923, 122) das Prinzip der „Benachteiligung" der unteren Zonen im oben angeführten Sinne ausdrücklich betont, was letzlich auch von BÖGLI (1978, 236) mit dem Hinweis auf einen höheren eisfreien und einen tieferen „Eisteil" der Höhlen bestätigt wird.
Diese Überlegungen sind natürlich sinngemäß auch auf die Windröhren in Schutthalden anzuwenden und werden auch von PFAFF (1933, 29) bzw. SCHAEFTLEIN (1962, 115) in zutreffender Weise angestellt, bei PFAFF (S. 32) wird ihnen sogar der entscheidende Anteil am Abkühlungseffekt zugesprochen, bei SCHAEFTLEIN (S. 115) wird dieser aber überwiegend der (sommerlichen!) Verdunstung zugewiesen. Die Verdunstung ist durchaus an der Abkühlung der unteren Zonen im Winter beteiligt, wobei sie die „normale", durch die fühlbare Temperaturdifferenz hervorgerufene Abkühlung verstärkt (BOCK 1913, 140). Umgekehrt verstärkt die sommerliche Kondensation die Erwärmung der oberen Zonen.

Hier sei noch kurz angefügt, daß für die Unterkühlung neben diesem „dynamischen" Prinzip auch ein „statisches" Prinzip in Anlehnung an die „Sackhöhlen", d.h. die nach unten gerichteten Höhlen mit nur einer (oberen) Öffnung in Erwägung gezogen wurde, und zwar wohl schon 1786 von SAUSSURE (SCHAEFTLEIN 1962, 110), 1929 von GUGENBERGER (PFAFF, 1933, 21) und 1939

von LAUTENSACH (S. 354). Für die hier beschriebenen Vorkommen trifft es sicher nicht zu, könnte aber durchaus eine örtliche Verstärkung bewirken.

5. Die Wirkungsweise im Jahresablauf

Nach all dem Gesagten hat man sich die Vorgänge in einer unterkühlten Schutthalde mit Windröhrensystem im Jahresablauf wie folgt vorzustellen: Im Winter strömt die Kaltluft in die unteren Öffnungen ein und entzieht der Blockhalde durch Erwärmung (Differenz der fühlbaren Wärme) und Verdunstung (latente Wärme) auf ihrem Weg nach oben ständig und in allen Teilen Energie, wobei die erreichten Temperaturen an den unteren Eingängen am tiefsten liegen. Im Normalfall führt das zur Abkühlung wenigstens der unteren Teile der Blockhalde bis unter den Gefrierpunkt.

Im Frühjahr folgt eine Phase des tagesperiodischen Richtungswechsels, bei dem sich die Zeiten des (nächtlich-morgendlichen) unteren Einströmens mit fortschreitender Jahreszeit zu Gunsten jener mit unterem Ausströmen während der warmen Tagesstunden mehr und mehr verkürzen, bis schließlich gegen den Sommer das untere Ausströmen allein wirksam wird. Spätestens bei Einsetzen der Schneeschmelze kommt es durch die Sickerwässer im Inneren und an den unteren Öffnungen zu Eisbildungen in Form von glasurartigen Überzügen, stalagmitenähnlichen Bildungen am Boden und teilweise auffallenden Eiszapfenvorhängen an den unteren Öffnungen. Die Menge der Eisbildung hängt von der negativen Energiespeicherung („Kältereservoir"), d.h. der Masse des abgekühlten Blockwerkes und dem Ausmaß seiner Abkühlung unter den Gefrierpunkt ab. Mit dem Eisbildungsprozeß wird aber auch ein hohes Maß an Energie durch Freisetzung der latenten Wärme beim Gefrieren zugeführt, wodurch der Beginn der Eisbildung normalerweise auch den Zeitpunkt des Temperaturminimums und den Beginn der Erwärmung anzeigt.

Mit dem Erreichen des Nullpunktes endet auch der Eiszuwachs, aber nicht überall gleichzeitig, sondern mit Verzögerung von oben nach unten. Wenn dann der Nullpunkt auch an den unteren Öffnungen erreicht ist, herrscht im gesamten System Eisabschmelzung durch latente (Kondensation) und fühlbare Wärme. Dabei ist anzunehmen, daß Kondensation im gesamten Bereich stattfindet, aber aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit des Sättigungsdruckes von der Temperatur mit nach unten stark abnehmenden Beträgen wenigstens im eisführenden Bereich. Diese Zeit des Phasenüberganges dauert je nach Örtlichkeit Wochen bis Monate, wobei in besonders günstigen Fällen das Eis ganzjährig erhalten bleibt. Sinngemäß zeigt demnach eine Temperatur von Null Grad an den unteren Öffnungen der Blockhalde die Existenz von Bodeneis, ihr Anstieg auf positive Werte aber dessen erfolgtes Abschmelzen an. Allerdings kann infolge von „Mischluftbildungen" mit Außenluft bzw. mit solcher aus bereits eisfreien Abschnitten die Existenz von Eis in tieferen, schlecht ventilierten Zonen auch bei schwach positiven Temperaturen durchaus noch gegeben sein (vgl. Matzen!).

Das untere Ausströmen von Kaltluft mit Temperaturen nahe Null Grad zeigt daher den Eisabbau im Inneren der Blockhalde an, welcher umso rascher vor sich geht, je stärker die Luftbewegung ist, das heißt auch, je wärmer und feuchter die Außenluft ist. Der starke Luftzug wirkt daher keineswegs eiserhaltend oder gar eisbildend, wie das immer wieder behauptet wurde (z.B. PLATTER 1896, zitiert bei PFAFF 1933, 16 und 19, CANAVAL 1893, 119, PFAFF 1933, 29), und schon gar nicht als Folge der Verdunstung (!), sondern ist geradezu das Indiz für die Eisabschmelzung, deren Energieverbrauch ja die Ursache der auffallenden Kälte darstellt. Natürlich genießen die untersten Eisvorkommen, d.h. die Eisbildungen an den Austrittsöffnungen, durch die schon weiter innen gegen den Nullpunkt abgekühlte Luft einen besonders langdauernden Schutz, was man durchaus als Form der Eiserhaltung bezeichnen könnte. Das sind dann die auffallendsten Erscheinungen, etwa auch am „Toteisboden" im Untertal im späten Frühjahr.

Der Übergang zu winterlichen Bedingungen vollzieht sich natürlich wieder über eine herbstliche Phase mit tagesperiodischem Richtungswechsel, wobei das Einströmen der Kaltluft ein Abtrocknen der Gesteinsoberflächen durch Verdunstung von Wasser und Eis zur Folge hat. Eine restlose Verdunstung des Eises wird meist aber nicht erreicht werden, es ist im Gegenteil sogar anzunehmen, daß es dabei wie in den Eishöhlen (BÖGLI 1978, 236) zu einem Eiszuwachs aus restlichem Sickerwasser kommt, wobei diese sekundäre Eisbildungsphase quantitativ aber wenig ins Gewicht fallen dürfte.

Es darf angenommen werden, daß auch eine schlechte Wegsamkeit für die zirkulierende Luft in Form zahlreicher, die Reibung verstärkender Verzweigungen und Verengungen, sowie ein beträchtlicher Volumsüberschuß des Blockwerkes gegenüber den Klüften im Sinne der Vergrößerung des negativen Energiespeichers der Entwicklung des gesamten Systems förderlich ist. Das bedeutet dann eine beträchtliche (zeitliche) Vergrößerung der Weglängen der zirkulierenden Luft und eine entsprechende Verzögerung des Geschehens (auf die das Phänomen ja letzlich hinausläuft). Bei den relativ kleinräumigen Blockhalden übernehmen somit die großen zeitlichen Weglängen die Rolle der großen räumlichen Weglängen in ihren attraktiven Gegenstücken, den Eishöhlen.

6. Meß- und Beobachtungsergebnisse

In den meisten Arbeiten, die über das Ausmaß bloßer Kurzbeschreibungen hinausgehen, werden auch Meßergebnisse mitgeteilt, die sich fast ausschließlich auf Temperaturmessungen an den unteren Austrittsöffnungen während der warmen Jahreszeit beziehen. PFAFF (1933, 18) etwa berichtet, daß die Temperatur in den Eppaner Eislöchern von O° im Winter (bis März) über 1° im April und Mai, 2,5° im Juni und 4° im Juli auf 5° im September und Oktober gestiegen und dann auf 3° im November gefallen sei. MORTON (1959), der auch Licht- und Evaporationsmessungen durchführte, maß am 3.8.1958 als tiefste Temperatur 1,8°. Die eigenen Messungen, welche an vier bis neun Punkten durchgeführt wurden, brachten die in Tab.1 zusammengestellten Ergebnisse. Demnach beträgt bei einer geschätzten Jahresdurchschnittstemperatur von 11° die spätsommerliche Unterkühlung 8 bis 9 K. Die ausströmende Luft war auch durchwegs fast gesättigt, nennenswert von der Sättigung abweichende Werte wurden meist bei etwas wärmerer Luft festgestellt, z.B. 5,3° und 96% am 26.8.1994 an einer höheren Austrittsstelle.

Tab.1: Übersicht über die Stichprobenmessungen an den Eppaner Eislöchern

Datum	Uhrzeit (MEZ)	tiefste Ausström-temperatur	RF	Außenluft Taupunkt	Außenluft Temperatur
25.8.1994	18.40	2,6°	99%	10,5°	16,0°
26.8.1994	9.10/10.15	2,5°	97%	6,5°/3,5°	18,0°/19,4°
22.4.1995	17.15	-0,1°	98%	8,8°	9,0°
1.9.1995	8.45	3,0°	98%	3,3°	10,8°

Anmerkung: RF = Relative Feuchtigkeit

Wichtiger erscheint aber der Vergleich mit dem Taupunkt der Umgebungsluft, wobei in allen Fällen der Taupunkt der Außenluft über jenem der Austrittsluft liegt, was auch in allen Fällen Kondensation im Inneren der Blockhalde bedeutet, obwohl es sich bei den Werten vom 26.8.1994 und 1.9.1995 um nordföhnbedingte, außerordentlich tiefe „Ausreißer" handelt. Am 22.4.1995 wurde noch Eis, wenn auch nur in bescheidenen Resten, beobachtet, während in allen anderen Fällen, wie auch am 4.6.1992, keine Eisreste mehr beobachtet werden konnten.

Von der Matzen wurden Meßergebnisse bisher nur von SCHINDLER et al. (1976) mitgeteilt, wobei aber ein umfangreiches Meßprogramm mit Temperatur-Dauerregistrierungen, Evaporati-

ons-, Licht- und Windgeschwindigkeitsmessungen an den Austrittsöffnungen durchgeführt wurde. Dabei wurden als höchste Austrittsgeschwindigkeit 1,37 m sec^{-1} und als tiefste Erdbodentemperatur in 50 cm Tiefe 0,0° gemessen (28.6.1975 bzw. 27.-30.7.1975).

Die Ergebnisse der eigenen Messungen sind in Tab.2 enthalten. Mit Ausnahme der Matzen konnte in keinem Fall die Existenz von Bodeneis nachgewiesen werden; in allen Fällen lag der Taupunkt der Außenluft weit über jenem der Ausströmluft, was entsprechende Kondensation im Innenbereich bedeutet.

Der „Toteisboden" im Untertal verdient wegen der auffallend guten Ausbildung der Windlöcher, der starken Vermoorung und der Dichte der eigenen (auch winterlichen) Kontrollmessungen (Tab.3) besondere Beachtung . SCHAEFTLEIN (1962, 106 f.) maß am 13.6.1962 2°

Tab.2: Übersicht über Stichprobenmessungen an ausgewählten unterkühlten Schutthalden

Nr in Tab.4	Standort	Datum	Uhrzeit (MEZ)	tiefste Ausströmtemperatur	RF	Außenluft Taupunkt	Außenluft Temperatur
2	Matzen	8.9.1994	11-12	0,9°	100%	11,8°	18,5°
4	Klammhöhe	12.8.1994	10-11	1,4°	100%	7,1°-9,8°	15,1°-16,1°
„	„	28.10.1995	9-10	0,1°	100%	5,6°	7,0°
6	Ameiskogel	20.8.1994	10	3,5°	95%	13,3°	14,1°
5	Turmkogel	20.8.1994	12	2,1°[1)]	100%	10,4°	11,3°
7	Kitzbrunn	23.9.1994	11-12	2,3°	100%	8,7°	10,0°-12,0°
„	„	26.7.1995	14-15	1,0°	100%	14,3°	22,2°

1) nach FINK (1989, 96) 0,9° am 18.9.1987.

und am 10.8.1961 4° bei Außentemperaturen von 20 bzw. 25°. Die eigenen Messungen ergaben am 10.8.1994 bei 22-28° Außentemperatur (16,0-8,9° Taupunkt) an insgesamt acht Blaslöchern Temperaturen zwischen 0,3 und 2,4°, was sichere Kondensation bzw. mögliche Eisreste im Inneren bedeutet.

Die nächste Messung am 13.3.1995 bei kaltem Hochdruckwetter ergab gegen 6 Uhr Außentemperaturen zwischen -8,6 und -11,3° bei heftigem, eine Kerze verlöschendem Einströmen, wobei trotz der Schneelage von 0,5-1 m die unteren Öffnungen wegen des dachartig darüberliegenden Blockwerkes davor bewahrt worden waren, zugeschneit zu werden. Damit war die Existenz des wechselweise funktionierenden Windröhrensystems mit schneefreien oberen Austrittsöffnungen bewiesen.

Schließlich wurde am 25.3.1995 gegen 5.30 Uhr das erwartete untere Einströmen beobachtet, während gegen 8 Uhr bei Außentemperaturen zwischen -0,5 und 1,0° Stauung, d.h. völlige Luftruhe und schließlich ab 8.30 Uhr bei einer Außentemperatur bis 4,3° kräftiges Ausblasenmit Temperaturen von -3,1 bis -3,4° herrschte. Damit war auch der tagesperiodische Richtungswechsel belegt.

Tab.3: Übersicht über die Meßergebnisse am „Toteisboden" im Schladminger Untertal

Datum	Uhrzeit (MEZ)	Temperaturen (trocken/feucht) Loch 1	Loch 2	Loch 3	Loch 4	Außenluft Taupunkt/Temperatur
10.8.1994	11.40-13.00	0,3/0,3	1,1/1,1	2,4/2,3	1,1/1,0	16,0/22,0 bis 8,9/27,9
13.3.1995	5.50-6.10	Einströmen				./-8,6 bis ./-11,3
25.3.1995	8.40-9.25	-3,1/-3,4	-3,1/-3,2	-3,4/-3,5	-3,1/-3,4	0,0/4,3
23.4.1995	18.00-19.00	0,1/0,1	0,1/0,1	0,1/0,0	0,1/0,1	0,6/4,8 bis -0,2/11,0
21.9.1995	16.00-16.30	2,0/2,0	2,5/2,0	3,3/3,2	1,1/0,7	6,9/9,8

Die auffallendste Situation ergab sich schließlich am 23.4.1995. Am Abend dieses bis dahin wärmsten Tages wurde an allen Blaslöchern Ausströmen mit Temperaturen um den Nullpunkt beobachtet, womit der Zustand des Phasenüberganges im Inneren der Blockhalde angezeigt wurde. Bei Außentemperaturen von 11° in 2 m um 18.45 Uhr bzw. 4,8° in Bodennähe in der kalten Hangluft gab es im Moor nur mehr restliche Schneeflecken, aber noch eindrucksvolle Eiszapfenvorhänge an allen Blaslöchern, die auch im März vorhanden waren.

Schließlich ergab eine spätere Kontrollmessung am 21.9.1995 allgemeines Ausströmen mit 1,1-3,3°, sowie an einer Öffnung bei einem kleineren etwas taleinwärts gelegenen Moor 1,2°. Bei den angegebenen Taupunkten der Außenluft war nur am 23.4.1995 Kondensation im Inneren nicht notwendigerweise gegeben. Die Situation am 13.3. bedeutet dagegen auf jeden Fall Verdunstung im Inneren.

7. Die Frage der oberen Öffnungen

Wie erwähnt, erfordert die geschilderte Luftzirkulation auf jeden Fall auch die Existenz von oberen Öffnungen, welche ebenso wie die unteren im Winter überwiegend schneefrei bleiben müssen, was aber aufgrund der oben ausströmenden warmen Innenluft ohnehin zu erwarten ist. Für die Eppaner Eislöcher wurden solche oberen Öffnungen von PFAFF (1933, 30) angenommen, aber nicht aufgesucht, für den „Toteisboden" im Untertal wurden sie erstmals von SCHAEFTLEIN (1962, 106) mit sommerlichem Einströmen erwähnt. Eine weitere diesbezügliche Information existiert bislang leider nicht.

Die aufgrund der winterlichen Schneefreiheit den Ortskundigen durchaus geläufigen Stellen im Bereich des „Toteisbodens" wurden durch A. STREICHER in Erfahrung gebracht und dem Verfasser dankenswerterweise am 21.9.1995 gezeigt. Eine erste flüchtige Nachschau am Vormittag des 10.11.1995 konnte aber bereits ihre volle Funktion bestätigen. Bei sehr günstigen äußeren Bedingungen, d.h. bei einer frühwinterlichen ersten Schneedecke von nur 10-15 cm und Temperaturen zwischen -1,5 und -2° wurden wenigstens fünf Stellen entdeckt, an welchen das Gelände weithin schneefrei war und gesättigte Luft mit Temperaturen zwischen 9,0 und 10,7° dem Blockwerk entströmte, wobei es bei der Mischung mit der Außenluft auch zu Kondensationserscheinungen, sichtbar in Form von leichten Dampfschwaden, kam. Die wenigstens 100 m über den unteren Öffnungen gelegenen Stellen, die sich auffallenderweise auch durch das Fehlen höherer Vegetation auszeichnen, sind aber fast durchwegs durch eine Forststraße angeschnitten und stark verändert worden, erfreulicherweise aber im wesentlichen noch intakt. Zum Teil war sogar die Forststraße selbst schneefrei bzw. die Luft strömte auch aus Öffnungen im künstlich angeschnittenen Hang.

Bei den nur mäßig kalten Außentemperaturen war aber das untere Einströmen so schwach, daß es bei zwei kontrollierten Löchern mit einfachen Mitteln (Hauch der Atemluft bzw. Feuerzeugflamme) nicht einmal eindeutig feststellbar war. Das läßt den Schluß zu, daß bei wirklich kalten Außentemperaturen (unter -10°) auch das obere Ausströmen noch wesentlich kräftiger verwirklicht sein muß. Jedenfalls bestätigen diese jüngsten Beobachtungen die für das gesamte Phänomen angestellten Überlegungen in bester Weise.

8. „Kondenswassermoor" und Permafrost

Nach STEINER (1992, 49 f.) führe der Kaltluftaustritt an der Oberfläche der Halde zur Kondensation der Luftfeuchtigkeit aus der warmen Außenluft und bedinge solcherart die Existenz eines eigenen Moortyps, eben des „Kondenswassermoores". Dazu ist zu sagen, daß Kondensation bei Mischung oder Kontakt von Luft mit unterschiedlicher Feuchtigkeit und Temperatur nur dann möglich ist, wenn in beiden Fällen die Feuchtigkeit nahe oder unmittelbar an der Sättigung liegt, was an sich nur bei extrem feuchten Außenbedingungen der Fall ist, wie z.B. im oben geschilderten Fall des oberen Ausströmens. Die Kondensation der Feuchtigkeit der Außenluft an Oberflächen (z.B. Felsblöcken) kann nur dort erfolgen, wo diese durch die ausströmende Luft abgekühlt, selbst aber nur von der warm-feuchten Außenluft überstrichen

werden, was nur in äußerst begrenzten Zonen (maximal dm-Bereich) erfolgt, wie am Kitzbrunn und am Waltrafelsen (Oststeiermark, nahe Bad Gleichenberg) beobachtet werden konnte. Es darf vielmehr angenommen werden, daß das normale Regenwasser in den unterkühlten Bereichen viel langsamer bis überhaupt nicht verdunstet, wodurch ein permanent feuchtes Milieu gewährleistet wird, doch bedarf diese Überlegung noch der Bestätigung durch Geländebefunde. Schließlich sei darauf hingewiesen, daß Hangschutt-Moore offenbar auch aus anderen Ursachen im Zusammenhang mit einem Selbstverstärkungseffekt entstehen können (ZIMMERMANN 1976), was auch für das Zerbenkogelmoos anzunehmen ist.

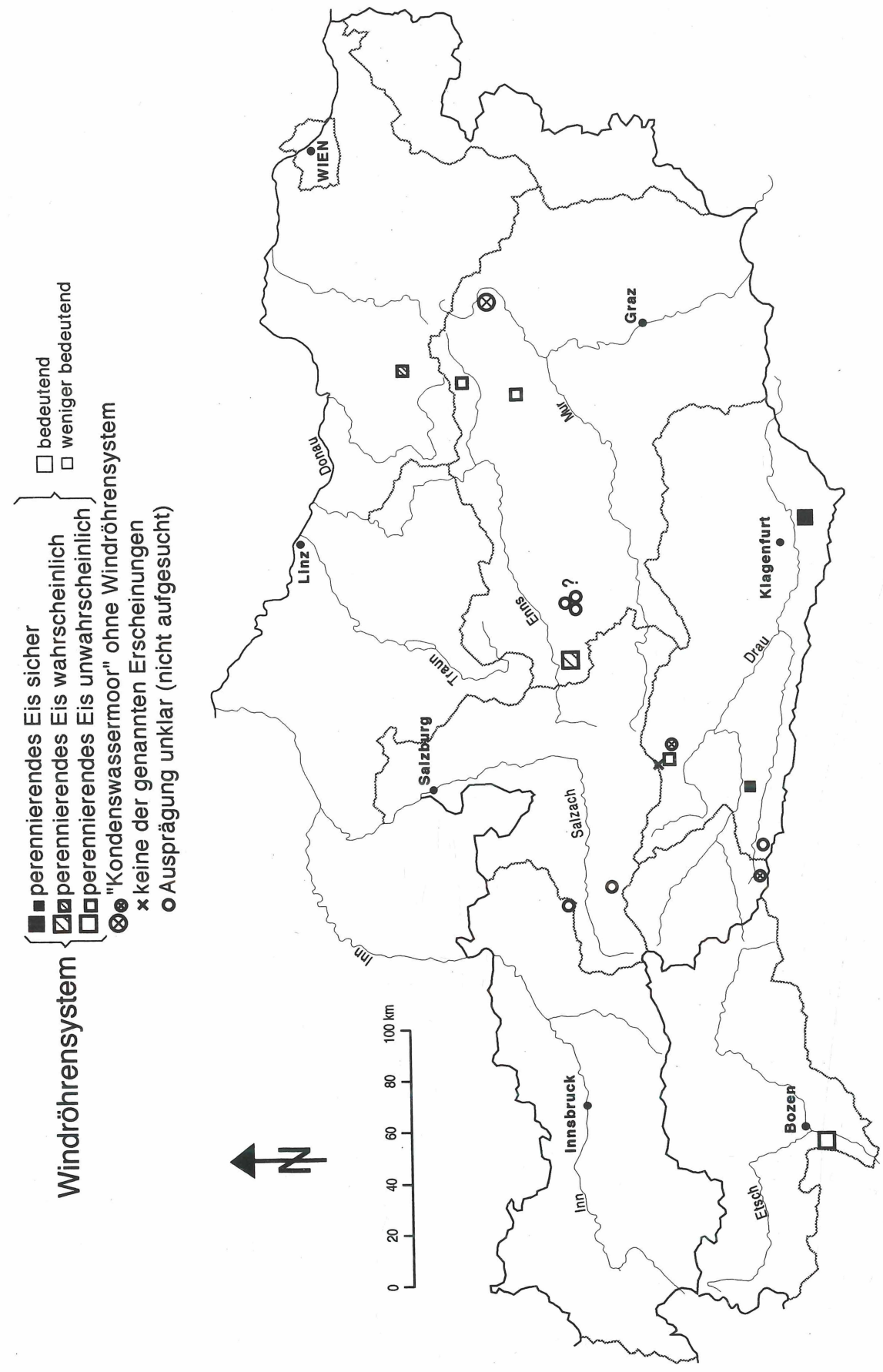
Tab.4: Übersicht über die erwähnten Vorkommen im Ostalpenbereich

Nr.	Bezeichnung	geogr. Kordinaten	Nr. der Ö.K. 1:50 000	Seehöhe unten	Exposition	Ausprägung [1] (0-3)	tiefste beobachtete Temp. im Sommer	Zahl der eigenen Besuche bzw. Messungen	Literatur
1	Eislöcher bei Eppan	46°26'42" 11°14'51"	26[2]	570 m	ENE	2	2,5° (1,8°)	4	8, 19, 20, 22
2	Gotschuchenboden, Matzen	46°30'41" 14°22'25"	203	1100 m	ENE	1	0,9°	2	4, 10, 11, 14, 29
3	„Toteisboden" Untertal	47°21'19" 13°42'14"	124	1000 m	N-NNE	3	0,3°	7	27, 28, 29
4	Klammhöhe bei Tragöß	47°33'10" 15°04'23"	101	950 m	WNW	2	1,4°	4	30
5	Turmkogel bei Puchenstuben	47°54'49" 15°16'48"	72	1060 m	NNE	1	2,1°	1	6, 30
6	Ameiskogel bei Rotmoos	47°40'53" 15°09'24"	102	700 m	N	1	3,5°	1	30, 33, 36
7	Kitzbrunn im Dösener Tal	46°58'57" 13°13'21"	181	1500 m	NNW	2	1,0°	3	-
8	Moosbodenhütte im Kaponigtal	46°58'02" 13°17'02"	181	1950 m	N	0	(3,7°)	1	30
9	Moor im Leitner Tal	46°41'52" 12°33'53"	195	1520 m	WNW	0	(3,8°)	1	30
10	Zerbenkogelmoos b. Neuberg/Mürz	47°38'49" 15°35'00"	103, 104	840 m	NNW	0	.	1	30, 33, 36
11	„Eisloch" im Seebachtal	47°01'21" 13°13'06"	155	1300 m	NNW	0	(5,0°)	1	15
12	Moor bei der Ingridhütte	46°39'03" 12°44'34"	196	1640 m?	?	?	.	-	30
13	Moor am Schellenbergkogel	47°19'30" 12°25'45"	122	1800 m?	?	?	.	-	30
14	Moore in den Sölktälern	?	128, 129(?)	1260 m, 1550 m, 1700 m	?	?	.	-	7
15	Heidnische Kirche im Amertal	47°10'38" 12°31'59"	152	1450 m	W	?	.	-	31
16	Steiner Alm/ Jauken	46°42'20" 13°03'00"	197	1810 m	NNW?	?	.	-	30, 34

1) die Luftzirkulation betreffend
2) Carta d'Italia 1:50 000

Schließlich bleibt zu entscheiden, ob unterkühlte Schutthalden dem azonalen bzw. fleckenhaften Permafrost zuzurechnen sind oder nicht. Wenn man unter Permafrost „Lithosphärenmaterial, das während der Dauer von mindestens einem Jahr Temperaturen unter Null Grad aufweist", versteht (LIEB 1996), dann sind die beschriebenen Vorkommen sicher kein Permafrost, weil sie in Gebieten mit positiven Jahresmitteltemperaturen liegen und durch das Windröhrensystem in jedem Fall bis auf Null Grad, d.h. genau an den Punkt des Phasenüberganges erwärmt werden. Zählt man aber die bloße Existenz von ganzjährig vorhandenem Bodeneis noch zum Permafrost, dann ist das Vorkommen in der Matzen und auf der Steiner Alm diesem sicher, jenes am „Toteisboden" und Turmkogel wahrscheinlich und die übrigen, insbesondere jenes in Eppan, wohl nicht mehr dem Permafrost zuzurechnen.

Abb. 1: Die Lage der im Text erwähnten unterkühlten Schutthalden



Literatur (umfaßt auch einige nicht im Text zitierte weiterführende Schriften)

1 BARSCH, D., 1977: Alpiner Permafrost - ein Beitrag zur Verbreitung, zum Charakter und zur Ökologie am Beispiel der Schweizer Alpen. - Abh. d. Akad. d. Wiss. in Göttingen, Math.-Physikal. Kl. 3. F. Nr. 31, 118-141.
2 BOCK, H., 1913: Mathematisch-physikalische Untersuchung der Eishöhlen und Windröhren. - In: „Höhlen im Dachstein" von H. BOCK et. al., Graz, 102-147.
3 BÖGLI, A., 1978: Karsthydrographie und physische Speläologie. - Berlin, Heidelberg, New York, 292 S.
4 CANAVAL, R., 1893: Ein Eiskeller in den Karawanken. - Carinthia II 83, 178-180.
5 CRAMMER, H., 1899: Eishöhlen- und Windröhren-Studien. - Abhandl. d. K. K. Geogr. Ges. in Wien, H. 1, 15-76
6 FINK, M. H., 1989: Ein Permafrostboden in der Kalkvoralpen bei Puchenstuben (Niederösterreich). - Die Höhle 40/4, 95-98.
7 FRANEK, W., 1995: Kondenswassermoore im Naturpark Sölktäler - eine ökologische Rarität. - 166. Naturschutzbrief 2/95 (Graz), 15-16.
8 FRENZEL, W., 1962: Die Eislöcher bei Eppan - ein wenig bekanntes Naturschutzgebiet in Südtirol. - Natur und Land 48/1, 21.
9 FURRER, E., 1966: Kümmerfichtenbestände und Kaltluftströme in den Alpen der Ost- und Innerschweiz. - Schweiz. Z. Forstwesen 117, 720-733.
10 GRESSEL, W., 1962: Eisvorkommen in der Matzen in Kärnten. - Die Höhle 13, 88-90.
11 GRESSEL, W., 1965: Perennierendes Eisvorkommen in der Matzen in Südkärnten. - Carinthia II, 24. SH, 280-282.
12 HAUSER, E., & OEDL, R., 1922: Eishöhlen. - Kosmos 1922, 146 ff.
13 HEIM, A., 1923: Gebläse im Gebirge. - Kosmos 1923, 68 ff.
14 HÖLZEL, E., 1963: Tierleben im Eiskeller der Matzen in der Karawankennordkette. - Carinthia II 153/73, 161-187.
15 JUNGMEIER, M., 1990: Naturführer Seebachtal. - Naturkundlicher Führer zum Nationalpark Hohe Tauern Bd. 7, Innsbruck, 60 S.
16 KYRLE, G., 1923: Grundriß der theoretischen Speläologie. - Speläologische Monographien Bd. I, Wien, 353 S.
17 LAUTENSACH, H., 1939: Unterirdischer Kaltluftstau in Korea. - Peterm. Geogr. Mitt. 85, 353-355.
18 LIEB, G.K., 1996: Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. - In diesem Band.
19 MORTON, F., 1959: Mikroklimatische Untersuchungen am Rhododendron ferrugineum L. im Bergsturzbereiche der Eppaner Gand. - (Arb. aus d. Botan. Station in Hallstatt, Nr. 198) Der Schlern 33, 5/6, 233 f. u. 7/8, 339-342.
20 MORTON, F., 1962: Die Eislöcher bei Eppan. - Natur und Land 48/2, 46.
21 OEDL, R., 1923: Über Höhlenmeteorologie mit besonderer Rücksicht auf die große Eishöhle im Tennengebirge (Eisriesenwelt). - Meteorolog. Zeitschr. 40, 33-37.
22 PFAFF, W., 1933: Die Eislöcher in Überetsch. Ihre Vegetationsverhältnisse und ihre Flora. - Schlern-Schriften 24, 72 S.
23 RICHARD, J. L., 1961: Les Forêts acidophiles du Jura. - Extrait des matériaux pour le levé géobotanique de la Suisse, Fascicule 38, 94-111.
24 ROSCHKOTT, A., 1921: Über Temperaturverhältnisse in Höhlen. - Meteorolog. Zeitschr. 38, 33-38.
25 SAAR, R., 1954: Beiträge zur Meteorologie der dynamischen Wetterhöhlen. - Mitt. Höhlenkomm. Wien, Jg. 1953, 5-25.
26 SAAR, R., 1956: Eishöhlen, ein meteorologisch-geophysikalisches Phänomen. - Geografiska Annaler 38.
27 SCHAEFTLEIN, H., 1962: Ein eigenartiges Hochmoor in den Schladminger Tauern. - Mitt. naturwiss. Ver. Steiermark 92, 104-119.
28 SCHAEFTLEIN, H., 1963: Windlöcher, Eislöcher und Frostböden in den Alpen. - Natur und Land 49, 114-118.
29 SCHINDLER, H., KINZEL, H., BURIAN, K., 1976: Ökophysiologische Untersuchungen an Pflanzen der Matzen-Eisstandorte. - Carinthia II 166/86, 269-307.
30 STEINER, G.M., et. al., 1992: Österreichischer Moorschutzkatalog[4]. - Wien, 509 S.
31 STÜBER, E., WINDING, N., 1993: Naturführer Felber - und Amertal, Hintersee. - Salzburg, 72 S.
32 TRIMMEL, H., 1968: Höhlenkunde. - (Die Wissenschaft Bd. 126), Braunschweig, 300 S.
33 ULLMANN, H., 1970: Vegetation und Klima des Hochmoores Rotmoos bei Weichselboden in der Obersteiermark. - Phil. Diss. Univ. Wien, 167 S.
34 WEISS, E. H., 1958: Eine Eis führende Schutthalde in den Gailtaler Alpen. - Carinthia II 148/68, 62-63.
35 WIGLEY, T. M. L., & BROWN, M. C., 1976: The Physics of Caves. - In: The Science of Speleology, hrsg. T. D. FORD & C. H. D. CULLINGFORD. London, New York, San Francisco, 329-357.
36 ZIMMERMANN, A., 1976: Über Wesen und Entstehung von Waldmooren in Hanglage. - TV „Die Naturfreunde" Steiermark, natur + landschaft + mensch 1976/2, 1-14.

Anschrift des Verfassers:

Univ.Prof. Dr. Herwig WAKONIGG
Universität Graz, Institut für Geographie
Heinrichstraße 36
A-8010 Graz

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz

Jahr/Year: 1996

Band/Volume: 33_1996

Autor(en)/Author(s): Wakonigg Herwig

Artikel/Article: Unterkühlte Schutthalden 209-223