

Der Karstformenschatz des Tennengebirges

Schützenswerte Wunder der Natur

Von *B. Toussaint**

Die Abholzungen riesiger Wälder im Mittelalter in den südeuropäischen Ländern bedeuteten einen massiven Eingriff in die Ökologie. Weite Gebiete sind dort aus wasserlöslichen Karbonatgesteinen aufgebaut. Durch die Abholzungen wurde der Prozeß der chemischen Kalklösung beschleunigt. Dieser Prozeß wird nach einem heute wasserarmen und unfruchtbaren Landstrich an der jugoslawischen Adriaküste allgemein als *Verkarstung* bezeichnet. Trotz dieses drastischen Beispiels ist sich der heutige Mensch nicht der Gefahren bewußt, die seine — vom technischen Fortschritt diktierten — Maßnahmen im Naturhaushalt der Karstlandschaften heraufbeschwören.

Am Beispiel des Tennengebirges werden die Gesetzmäßigkeiten eines teilweise seit Jahrmillionen ablaufenden Verkarstungsprozesses aufgezeigt. Das Tennengebirge gehört zu den Salzburger Kalkalpen. Es ist — ebenso wie die benachbarten Massive des Dachstein oder des Hochkönig — ein alpiner Hochkarststock.

Trotz ihrer Wildheit fasziniert die Landschaft den Wanderer, da der ober- und unterirdische Karstformenschatz sehr vielgestaltig ist. Im Gegensatz zu Gebieten, in denen die Tiefen- und Seitenerosion durch oberirdische Gewässer das Gelände formt (Abb. 1), weist das Tennengebirge ein völlig anderes Gepräge auf (Abb. 2):

- nackte, stark zerklüftete Verebnungsflächen;
- Dolinen-, Schacht- und Karrenfelder;
- ursprünglich von Flüssen geschaffene Trockentäler;
- unterirdische Entwässerung, zahlreiche Höhlen und riesige Quellen am Gebirgsfuß.

Das Tennengebirge birgt zahlreiche Naturschätze. In ihm sind auch große Wasservorräte gespeichert. Wollte man sie nutzen, dürfen die als Naturdenkmale ausgewiesenen Quellen nicht gefährdet werden. Auch andere Gefahren für die Natur werden aufgezeigt.

* Anschrift des Verfassers: Dr. Benedikt Toussaint, Hessische Landesanstalt für Umwelt, Aarstr. 1, 6200 Wiesbaden

1. Einleitung

Kommen Salz-, Gips- und Karbonatgesteine mit Wasser in Kontakt, so spielen sich an ihrer Oberfläche charakteristische Lösungsprozesse ab. Man spricht nach einem vom jugoslawischen Slowenien überkommenen Begriff von Verkarstung, deren Varianten insbesondere durch klimatische, gesteinspezifische, tektonische und morphologische Faktoren bestimmt werden. Wegen der weltweiten Verbreitung geologisch verschieden alter Kalkgesteine weist die Erde nach einer Abschätzung auf einer Gesamtfläche von über 3 Millionen Quadratkilometern — mehr als 2 % des Festlandes — Karstphänomene auf. Im Gegensatz zu den Evaporiten ist die Verkarstung der Karbonatgesteine ein rein chemischer Vorgang. Gemäß der vereinfachten Sammelgleichung $H_2O + CO_2 + CaCO_3 = Ca(HCO_3)_2$ entsteht aus Ca-Karbonat das wasserlösliche Ca-Bikarbonat. Dieser auch als Korrosion bezeichnete Prozeß verläuft in Dolomitgesteinen, bei denen es sich in den meisten Fällen um dolomitische Kalksteine handelt, im Prinzip ähnlich. Die Konzentration der gasförmig gelösten, freien Kohlensäure ist der bedeutendste Parameter für die Kalklösung. In der atmosphärischen Luft sind normal 0,03 % CO_2 enthalten. Bei Erhöhung des CO_2 -Partialdruckes infolge pflanzlicher Atmung spielt sich die Kalklösung wesentlich intensiver ab.

Der Lösungsvorgang bleibt auf die Landoberfläche beschränkt, wenn die aggressiven Wässer nicht in die Tiefe abfließen können. Während die Gesteinsdurchlässigkeit für die Entwicklung der unterirdischen Verkarstung vernachlässigbar ist, kommt der Gebirgsdurchlässigkeit entscheidende Bedeutung zu. Wichtiger noch als Schichtfugen sind für die Wasserzirkulation tektonische Kluft-, Störungs- und Verwerfungssysteme. Auch unterhalb der Karstwasseroberfläche ist Kalklösung möglich, wenn durch die Mischung verschieden konzentrierter Wässer CO_2 freigesetzt wird („Mischungskorrosion“). An dieser Stelle kann jedoch nicht ausführlich auf die physikalischen und chemischen Bedingungen des Verkarstungsvorganges eingegangen werden, es muß auf die Fachliteratur verwiesen werden (u. a. Z ö t l 1974).

Im Hinblick auf Karsterscheinungen spielt Österreich im Alpenraum die größte Rolle. Hier wiederum verdient das den Salzburger Kalkhochalpen angehörende Tennengebirge besondere Aufmerksamkeit, da es beispielhaft den Typ des nordalpinen Hochkarstes repräsentiert.

Das eine Fläche von etwa 215 km² einnehmende Gebirge riegelt das nördlich anschließende Salzburger Becken im Südosten ab. Es wird seinerseits im Westen zwischen Golling und Werfen von der tief eingeschnittenen Salzach begrenzt, im Südwesten vom Wengerbach und auf den übrigen Seiten von der Lammer, einem rechten Nebenfluß der Salzach. Aus diesen Tallandschaften steigt das Gebirgsmassiv fast überall steil bis auf 2431 m (Rauchek) empor (s. Abb. 3). Seine nur schwach reliefierte Hochfläche, die wegen der relativ geringen Höhe frei von Gletschern ist, gehört ganz im Gegensatz zum östlich benachbarten Dachsteingebirge, das touristisch besser erschlossen ist, zu den unbekanntesten Karstplateaus Europas. Der Grund ist die manchmal beklemmende Ein-

samkeit der weitgehend vegetationsfreien Felsflächen, die wegen unzähliger karstkorrosiv erweiterter Spalten und kleiner und großer Karsthohlformen nur mühsam zu begehen sind und sowohl von Bergsteigern als auch von Skifahrern gemieden werden.

Um so aktiver sind die Mitglieder des Landesvereins für Höhlenkunde in Salzburg, die im Tennengebirge bis heute nicht weniger als 270 Karsthöhlen entdeckt und zum größten Teil auch vermessen haben. Allein seit 1970 sind 50 neue Höhlen befahren worden, die vornehmlich in den nordwestlichen Abhängen des Gebirges zu finden sind (Frank 1978). Dieser einmalige Höhlenreichtum war letzten Endes der Anlaß, in der Zusammenschau Bestand und Genese aller Karstphänomene dieses Gebirgsstockes zu untersuchen (Toussaint 1971, 1976). Da die Ergebnisse der karsthydrogeologischen und wasserchemischen Untersuchungen das Interesse der staatlichen Wasserwirtschaftsverwaltung fanden, nahm der Verfasser auch Stellung zum Wasserhaushalt des Lammergebietes, dessen wichtigstes Teileinzugsgebiet das Tennengebirge darstellt (Toussaint 1977, 1978).

2. Problemstellung

Aufgrund seiner dienstlichen Tätigkeit fühlt sich der Autor dem Umweltschutz verpflichtet. Abgesehen von den von Touristen frequentierten Fremdenverkehrszentren in Tallagen ist das eigentliche Tennengebirge gegenwärtig noch eine weitgehend unberührte Naturlandschaft (Stüber 1967) mit stabilem ökologischen Gleichgewicht. Es ist auch wegen der geographischen Gegebenheiten nicht zu erwarten, daß — wie andernorts häufig geschehen — Mülldeponien in Karsthohlformen eingerichtet oder Abwässer in Karstspalten eingeleitet werden, die in hydraulischer Verbindung mit Wassergewinnungsanlagen stehen. Damit der naturnahe Zustand auch weiterhin gewährleistet bleibt, möchte der Autor in diesem Aufsatz einerseits eine exakte, auch durch einige Abbildungen¹⁾ dokumentierte Beschreibung der ober- und unterirdischen Karstphänomene sowie ihrer Genese und Altersdatierung geben. Es wird erhofft, daß die Bergfreunde wegen ihrer dadurch gewonnenen Kenntnis der Zusammenhänge einen bewußteren Naturschutz praktizieren. Andererseits muß aber auch auf mögliche Gefahren für die karstrelevanten Naturschönheiten aufmerksam gemacht werden, die durch menschliche Aktivitäten allgemein und bei unbedachtem Einsatz der Technik im besonderen drohen können. Alle Ausführungen müssen in Verbindung mit den gebietspezifischen geologischen und morphologischen Verhältnissen gesehen werden, die den Prozeß der Verkarstung des Tennengebirges maßgeblich beeinflussen.

3. Geologischer und morphologischer Überblick

Im Tennengebirge sind die verschiedensten Gesteinsserien der Trias und des Jura in Teildecken, die alle der tektonischen Großeinheit des Oberostalpin angehören, übereinandergestapelt. Die weiteste Verbreitung hat die tirolische Deckeneinheit, die durch

¹⁾ Die Photos der Abb. 1 und 3—10 sowie 12 stammen vom Verfasser, die Aufnahme der Abb. 11 wurde dankenswerterweise von W. Klappacher vom Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg zur Verfügung gestellt. Die Abb. 2 ist die Reproduktion des im Auftrag des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen in Wien hergestellten Luftbildes 4058.

das eigentliche Tennengebirge und seine südlichen Vorberge, die sogenannte Werfener Schuppenzone, vertreten wird. Die Berge an der mittleren und unteren Lammer gehören der nächst höheren Decke, dem Juvavikum, an. Das Tirolikum, das im Rahmen der Themenstellung allein interessiert, ist petrographisch vor allem durch den Dachsteinkalk charakterisiert. Dieser in Riff- und gebankter Fazies vorliegende, bis 1200 m mächtige und kaum erosionsanfällige obertriadische Kalkstein verleiht dem Tennengebirge sein morphologisch so eindrucksvolles Gepräge. Auf einer Fläche von gut 100 km² streicht der Dachsteinkalk in den Hochregionen und den Nordabhängen bis in die Täler hinunter frei aus. Seine chemische Reinheit (ca. 98 % CaCO₃) und seine gut ausgeprägte Klüftung sind die Hauptgründe für seine besondere Verkarstungsanfälligkeit. Stratigraphisch ältere und jüngere, ohnehin nur geringmächtige Kalksteine sowie alle liegenden Dolomite spielen diesbezüglich keine vergleichbare Rolle. Für die Hydrogeologie sind die jurassischen Strubbergeschichten, die das Schichtprofil des Tennengebirges nach oben abschließen, und die Werfener Schichten als Liegendes der Karbonatgesteinsserie von besonderer Wichtigkeit, da sie eine wasserstauende Funktion haben.

Die Hangendgrenze der untertriadischen, mit ihren untersten Partien möglicherweise noch in das Oberperm hineinreichenden Werfener Schichten, die im wesentlichen aus wechsellagernden Ton- und Sandsteinen bestehen, stellt die absolute Verkarstungsbasis dar.

Die starre Dachsteinkalkplatte wurde vor allem im älteren Jungtertiär durch starke Bruchtektonik in ein Schollenmosaik zerschert. Insgesamt herrscht ein Nordost-Nordwest-Diagonalkluftpaar vor. Die Zerrüttungszonen treten in vielen Fällen wegen einer intensiven Oberflächenverkarstung (s. Kap. 4) vor allem oberhalb der Baumgrenze augenfällig hervor (s. Abb. 2).

Durch die vertikale Heraushebung des Gebirgskörpers (Epirogenese) im Jungtertiär und Altquartär, die auch heute noch nicht völlig abgeschlossen ist, wurden die tektonischen Trennflächen im Gestein hydraulisch wirksam. Dadurch konnte der Verkarstungsprozeß auch in die Tiefe des Gebirgsstockes übergreifen.

Dieser Alpenaufstieg verlief in Zyklen, jeder länger andauernde Hebungstillstand hatte die Herausbildung überwiegend durch Flußarbeit entstandener Rumpfflächen zur Folge. Sie wurden später durch die Verkarstung einerseits im großen konserviert, da die linienhafte Erosion der Obertagegewässer entfiel, andererseits in zahllose isolierte Kuppen aufgelöst. Die ältesten real erhaltenen und höchstgelegenen Relikte einer früheren Landoberfläche, die ursprünglich ein Flachlandrelief aufwies, werden dem in das Obermiozän gestellten Hochkönig-Niveau zugeordnet (s. Abb. 3). Da kein verschütteter und später wieder freigelegter Paläokarst bekannt ist, wird damit das potentielle Höchstalter der Oberflächenkarstformen vorgegeben. Das Tennenniveau, das im Tennengebirge weite Verbreitung in Höhen zwischen 2000 m im Norden und 2200 m im Süden findet, und das etwas jüngere, durch zwei auffällige Trockentalungen (s. Abb. 2, 4) repräsentierte Gotzen-Niveau werden in das untere Altpliozän eingestuft. Diese miteinander verzahnten übereinanderliegenden Verebnungssysteme, die von Seefeldner (1961) ausführlich untersucht wurden, sind zusammen mit der in der Regel ruhigen Lagerung des Dachstein-

kalkes verantwortlich für den Plateaucharakter des Gebirgsmassives. Danach beschleunigte sich die Herauswölbung des Gebirges und die Hebungspausen wurden kürzer, so daß es ab dem mittleren Altplozän nur noch zur Ausbildung randlich gelegener Hochtalböden kommen konnte (s. Abb. 12). Bei der Ausbildung der Verebnungen dürfte zusätzlich die Lage des Gebirges zum Molassemeer als Erosionsbasis und das Klima eine Rolle gespielt haben, das sich im Jungtertiär von warm und feucht über kälter und trockener werdend hin zum gemäßigten Klima der Zwischeneiszeiten bzw. zu kalt und relativ trocken während der Höhepunkte der Eiszeiten des Quartärs entwickelte.

4. Der Karstformenschatz der Oberfläche

Im Rahmen dieser Arbeit wird darauf verzichtet, eine detaillierte regionale Beschreibung der oberirdischen Karstformen zu geben, da die wichtigsten Typvertreter in der näheren Umgebung der Laufener Hütte (DAV, Sektion Laufen a. d. Salzach) und des Leopold-Happisch-Hauses (Naturfreunde Golling) in großer Zahl anzutreffen sind. Außerdem muß in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, daß die Hochfläche des Tennengebirges mancherorts eine ausgesprochene Karstwildnis ist, in der der Bergwanderer physisch stark gefordert wird und auch leicht die Orientierung verlieren kann.

4.1 Geschlossene Hohlformen

Dolinen kommen bevorzugt auf Geländeverflachungen vor und können im festen Fels oder in kalkigem Lockermaterial ausgebildet sein. Ihre typischen Trichter sind fast ausschließlich durch Lösung entstanden, nur selten durch Deckeneinsturz flachliegender unterirdischer Hohlräume.

Die meisten Dolinen haben Durchmesser unter 10 m und sind bevorzugt in engscharig geklüftetem Dachsteinkalk eingesenkt (s. Abb. 4). Nur wenn durch Frosteinwirkung Schutt bereitgestellt und unter einer sehr lange liegenden Schneedecke gelöst wird, weisen die Dolinen rundliche Grundrisse mit glatten Wandungen auf. Aufgrund ihres Bezuges zu glazial bearbeiteten Flächen und ihrer geringen Größe ergibt sich eine Entstehung im Spät- bis Postglazial, sie sind also nur einige 1000 Jahre alt.

Die Zahl der Dolinen speziell dieser Größenordnung nimmt unterhalb der Waldgrenze trotz des reichlich zur Verfügung stehenden, die Verkarstung begünstigenden CO₂ rasch ab. Einerseits zerstörte der Salzachgletscher, dessen Oberfläche während der letzten Eiszeit (Würmglazial) im Bereich des Paß Lueg mindestens bei 1250 m Höhe lag, die meisten der eventuell vorhandenen Karsthohlformen. Andererseits fließen wegen der eiserosiv übersteilten Hänge und teilweiser Plombierung der wasserabziehenden Klüfte durch bindigen Moränenschutt die Niederschlagswässer zu rasch und bevorzugt an der Oberfläche des lösungsfähigen Gesteins ab. Somit sind die Bedingungen für eine nacheiszeitliche Neubildung der Dolinen immer sehr ungünstig gewesen.

Im Tennengebirge sind in allen Höhenregionen Kleindolinen mit Durchmessern meist unter 5 m auf kalkigem Moränen- und Bergsturzmaterial sowohl als Trichterdolinen als auch als sogenannte Buckelwiesendolinen anzutreffen. Vor allem letztere dürften nicht nur auf Korrosion zurückgehen. Das Höchstalter dieser Lockergesteinsdolinen ist durch die Beziehung zur spätpleistozänen Plateauvergletscherung festgelegt. Die jüngsten unter ihnen sind auf Schneeschuttwällen aus der Zeit des lokalen Gletschervorstoßes um 1850 bereits gut entwickelt.

In nicht unerheblichem Ausmaße finden sich auch mittelgroße und sehr große Felsdolinen, die Abgrenzung zwischen beiden Gruppen liegt bei etwa 50 m Durchmesser. Vor allem an letzteren kann gut demonstriert werden, daß es sich um Relikte einer früheren Zeit handelt. Ihre nur noch geringfügige Umformung ist in einem großen Ausmaß von der Lage zur Frostgrenze abhängig. Unterhalb des Bereiches der bevorzugten physikalischen Verwitterung treten oft Steilwanddolinen auf, deren jetzige Konfiguration stabil erscheint (s. Abb. 2). Ihre Genese ist noch weitgehend ungeklärt. In der Frostschuttzone liegende Großdolinen, z. B. die Gipfeldolinen der Wieselsteine in der Nähe des Leopold-Happisch-Hauses, zeigen eine Zurückverlegung der Wände durch Frostverwitterung und Solifluktion. Aufgrund der Dimensionen der größeren Dolinen und des daraus überschlägig ableitbaren Kalklösungsbetrages sowie der Gletscherschliffe an ihren Wänden läßt sich eine Entstehung zumindest im Pleistozän ableiten. Das würde ein Alter von unter Umständen mehreren 100 000 Jahren bedeuten. Ein Entwicklungsbeginn bereits im jüngeren Tertiär kann nicht ausgeschlossen werden, jedoch finden sich im Tennengebirge dafür keine zwingenden Beweise.

Als **Karstwannen** oder **Uvalas** sollen die größten in sich geschlossenen Hohlformen des Tennengebirges auch dann bezeichnet werden, wenn neben der Verkarstung noch andere Faktoren Anteil an der Umgestaltung der Landoberfläche hatten. Im Sinne dieser Definition gelten als Uvalas auch jene Teilbereiche von im Jungtertiär durch oberirdische Gewässer ausgeformte Talböden, die später trockengefallen und meist zusätzlich in den verschiedenen quartären Kaltzeiten durch Gletschererosion übertieft wurden. Das früher einheitliche, mit wenigen Ausnahmen generell nach Norden gerichtete Gefälle der Talböden ging durch alte und junge Verkarstung verloren. Als Beispiele seien angeführt das Tennalmgebiet im östlichen (s. Abb. 2) und das Pitschenbergtal im westlichen Plateaubereich (s. Abb. 4).

Trotz der in sie eingetieften Dolinen dürfen einige Hohlformen in den südlichen und nördlichen Abhängen des Gebirges nicht mit Karstwannen verwechselt werden, da es sich bei ihnen um Kare handelt.

Alle Karstwannen tragen Spuren glazialer Überformung, so daß ihnen zumindest pleistozänes Alter zukommt. Die Bindung gerade der größten Wannen an den Verlauf ehemaliger Täler ist wegen der Überlagerung mehrerer, ihre Formgebung bestimmenden Faktoren jedoch kein exakter Beweis für eine Entstehung bereits im Tertiär, also für ein u. U. mehrere Millionen Jahre zählendes Alter.

Das Tennengebirge ist reich an **Schächten**, die im Gegensatz zu Dolinen meist dort angetroffen werden, wo sich die unterirdische Entwässerung auf die Kreuzungsstellen weitständiger, ausgeprägter, bis in größere Tiefen durchhaltender Klüfte oder Verwerfungen konzentriert. Steilstehende offene Bankungsfugen können gleichfalls Anlaß für die Entstehung von Karstschächten sein (s. Abb. 5).

Die in allen Gebirgsregionen vorkommenden Schächte sind in Lagen über 1800 m besonders häufig. Als Erklärung für dieses Phänomen bietet sich an, daß in diesen Höhen und hier ganz besonders in den weitgespannten Geländedepressionen der Schmelzwasseranfall intensiver ist als in den tiefer gelegenen Bereichen mit steileren Hängen.

Ein Teil der Schächte hat eine zumindest in das Pleistozän zurückreichende Entstehungsgeschichte, da die eiszeitlichen Schmelzwässer an ihrer Ausweitung und Umgestaltung mitwirkten. Subglazial ausgekolkte, spiralig gedrehte Schachtöffnungen werden in der Rundhöckerlandschaft des Vord. Pitschenbergtales häufiger gefunden. Der gute Erhaltungszustand dieser Gletschermühlen deutet darauf hin, daß sie zumindest im Spätpleistozän in Tätigkeit waren und eine Entwässerung des Gebirgsmassives über sie auch unter dem Eiskuchen des Plateaugletschers stattfand.

4.2 Karstgassen und -spalten

Wenn Störungszonen oder Kluftbündel stärker karstkorrosiv erweitert sind, kommt es zum Erscheinungsbild der sich nur in den Dimensionen unterscheidenden **Karstspalten** und **Karstgassen**. Ihr Verlauf ist jeweils durch die dominierenden Klufrichtungen festgelegt (s. Abb. 2). Die z. T. mehrere Dekameter breiten und sich bis einige Kilometer hinziehenden Karstgassen können den Bergwanderer zu zeitraubenden Umwegen zwingen.

Karstgassen und -spalten kommen in allen Höhenzonen vor, jedoch sind ihre Querprofile ober- und unterhalb der Waldgrenze meist unterschiedlich. Häufig sind Karstgassen durch das Zusammenwachsen von Dolinenreihen entstanden. Kommt zu der häufigen Gletscherschuttfüllung in Karstgassen die glaziale Bearbeitung dieser Karstformen hinzu, läßt sich zumindest ein spätpleistozänes Alter folgern. Bei oft beträchtlicher Breite und Tiefe ist auch ein noch höheres Alter denkbar.

4.3 Karren

Die das Interesse des Naturfreundes am meisten beanspruchenden oberirdischen Karstphänomene sind zweifellos die **Karren**. Sie können sich sowohl freiliegend als auch unter Bedeckung entwickeln. Die allgemeinen Formen der Freilandkarren sind die zu den schmalen Karstspalten überleitenden Kluftkarren. Häufig verbreitet sind die Rinnekarren, d. h. Rinnen oder Rillen mit scharfkantigen Stegen dazwischen. Diese Kleinformen der oberirdischen Verkarstung gehen auf die lösende Wirkung des linienhaft auf der glatten Gesteinsoberfläche abfließenden Wassers zurück (s. Abb. 6). Mit ihnen vergesellschaftet sind oft die kleinen Firstkarren. Mit abnehmendem Gefälle der Unterlage stellen sich auch napfartige Eintiefungen an der Oberfläche der Kalksteine ein

(s. Abb. 7). Letztlich ist auch die bekannte Rauheit der Kalksteinoberfläche nichts anderes als ein Ergebnis der Korrosion.

Die unter Bedeckung angelegten oder umgebildeten Rundkarren verdanken ihre abgerundete Form der Speicherwirkung des Bodens, der das anfallende Niederschlagswasser schwammartig aufnimmt, mit biogenem CO₂ anreichert und flächenhaft verteilt.

Die obere Verbreitungsgrenze der Karren ist abhängig von der Intensität der Frostsprengung, die Untergrenze fällt mit dem Niveau der Täler zusammen. Sehr steile Felswände sind meist frei von Karren, da Felsbruchstätigkeit oder sich bei zu rasch abfließendem Niederschlagswasser nicht einstellendes Lösungsgleichgewicht keine Karrenbildung zulassen. Die stärkste Häufung von Karren zeigen die Nordhänge, da entsprechend der Abdachung ihrer Unterlage die Eiszungen des Plateaugletschers überwiegend nach Norden abfließen und durch Abräumen des Gesteinsschutts für die Karrenentstehung gute Bildungsvoraussetzungen schufen.

Da Karren durch Gletscherschurf zerstört werden, weisen die im Tennengebirge existierenden Formen pauschal ein nachwürmzeitliches Alter auf. Ein Teil der Karren in den Tälern kann durchaus präschlernzeitlich gebildet worden sein. Die Karren der mittleren Gebirgslagen dürften in ihrer Mehrzahl sicherlich erst nach Abschmelzen des gschnitzzeitlichen Plateaugletschers entstanden sein, die der Gipfelregionen wohl erst nach dem Daunstadial. Das potentielle Maximalalter schwankt also zwischen 10 000 und 15 000 Jahren. Vermutlich war während des postglazialen Klimaoptimums (Atlantikum), das etwa 6000—8000 Jahre vor heute anzusetzen ist, wegen der hochliegenden Waldgrenze der gesamte Karststock weitgehend von Rundkarren überzogen. Durch einen danach aus klimatischen Ursachen einsetzenden Boden- und Vegetationsrückgang wurden die Rundkarren freigelegt und zugeschräfft.

Die horizontale und vertikale Verbreitung aller Karstformen der Oberfläche sowie ihre Alterseinstufung sprechen eindeutig gegen die von manchen Forschern immer wieder vorgebrachte Theorie der klimatisch gesteuerten Gliederung eines nordalpinen Karstgebirges in übereinanderliegende Karstformengürtel. Nur in der Festlegung der Obergrenze der Karrenverbreitung wirkt sich das Klima aus. Lokales Dominieren oder Zurücktreten bestimmter Karstformen hat seine Ursachen in speziellen tektonischen, petrographischen und glazialgeologisch-morphologischen Besonderheiten.

5. Karsthydrologie

Bezogen auf eine mittlere Gebietshöhe des Tennengebirges von knapp 1900 m fielen im Durchschnittsjahr der Periode 1951/75 ca. 2300 mm Niederschlag. Wegen der weitgehenden Vegetationslosigkeit der Hochregionen und damit zusammenhängender nur geringer Pflanzenverdunstung sowie des Zurücktretens stärker geneigter Flächen versickert das Niederschlagswasser zu etwa 85 % in den unzähligen Schlucklöchern (T o u s s a i n t 1977). Diese führen das Sickerwasser dem im zentralen Tennengebirge mehrere 100 m tief liegenden Karstwasserkörper zu, der ganz typisch durch nur relativ wenige, dafür aber schüttungsstarke Quellen entwässert wird.

5.1 Charakteristik der Karstquellen

Während die ein Dolomitzkarstgebiet drainierenden Quellen meist in unterschiedlichen Höhenlagen austreten, ist für die tiefgreifenden Spaltensystemen aufsitzenden Quellen eines Kalkkarststockes Niveaugebundenheit die Regel. Auf Einzelheiten kann hier allerdings nicht eingegangen werden, es muß auf die Fachliteratur verwiesen werden (T o u s s a i n t 1971, Z ö t l 1974). Statt dessen wird beispielhaft auf einige große Quellenbezirke hingewiesen, die besuchenswerte Naturdenkmäler sind und modellhaft die wesentlichsten Phänomene der Karstquellen aufzeigen.

In Höhe der Salzach gelegene Karstwasseraustritte unterhalb des Gasthauses Zimmer am Paß Lueg haben hydraulische Verbindung mit der als Hochwasserspeier fungierenden Petrefaktenhöhle 34 m bzw. mit der Brunnecker Höhle 42 m über ihnen. Die Anhebung dieser zu periodischen Wasserhöhlen erweiterten Karströhren um diese Beträge geht auf eine in das spätpleistozäne Schlernstadial datierbare Aufwölbung zurück. Diese relativ jungen tektonischen Vorgänge sind auch die Ursache für die messerscharfe Eintiefung der Salzach in der sehenswerten Klamm der Salzachöfen.

Die größten Quellen des Tennengebirges finden sich an dessen Nordrand. Als sogenannte Überlaufquellen sind sie auf den vom Ausmaß der Obertageerosion höhenabhängigen Liegendaustich der dem Dachsteinkalk in normaler stratigraphischer Abfolge aufgelagerten Strubbergsschichten bzw. tektonisch aufgeschobenen Werfener Schichten der nächsthöheren Deckeneinheit fixiert. Außerdem können ehemalige Vorflutbeziehungen eine Rolle spielen. Von den an die Deckengrenze gebundenen Quellen sind besonders erwähnenswert die Wasseraustritte im Auwinkel südlich Abtenau, der ein von Gletscherzungen ausgekolktes blind endendes Karsttal und wahrscheinlich im Ältestquartär entstanden ist. An seinem südlichen Ende entspringen die Dachserfall-Quellen, die sich in hydrologischer und physikalisch-chemischer Hinsicht von den benachbarten Tricklfall-Quellen unterscheiden. Nur wenn die im Bachniveau liegenden gering dimensionierten Karstwasserröhren bei starkem Wasserandrang einen rückstaufreien Abfluß nicht mehr zulassen, springen einige Meter über dem Talboden Hochwasserspeier an (s. Abb. 8). Erwähnenswert ist das in 712 m Höhe angeschnittene Röhrensystem der Dachserfallhöhle. Das Wasser kann manchmal 1—2 m waagrecht aus der Wand des Kl. Breitsteins herausschießen. Bei extremen Überdrücken wird sogar ein Übersprung etwa 20 m über den perennierenden Quellen aktiv.

Als weiteres Beispiel sind zu erwähnen die Schwarzenbach-Winnerfall-Quellen, die hinsichtlich ihrer Wassermengen weit und breit konkurrenzlos sind. Die Abflüsse dieses Quellenbezirkes im Südosten von Oberscheffau ergeben den Scheffauer Schwarzenbach. Die in ca. 635 m Höhe der Schwarzenbach-Quellhöhle entspringende Dauerquelle kann bis zu 1,5 m³/s schütten. Bei Überdrücken springen Hochwasserspeier u. a. in 655 m Höhe (Spalthöhle) und vor allem in 702 m Höhe (Winnerfallhöhle) an. Letztere ist die eindrucksvollste Quelle nicht nur des Tennengebirges, die auf das gleiche ältestquartäre Lammerniveau eingestellt ist wie die Dachserfall-Quellen. Das Wasser tritt hauptsächlich aus dem westlichen Höhleneingang zutage (Frauenhöhle), bei extremen Druckverhält-

nissen auch aus der östlich gelegenen Mörkhöhle. Der Wasserfall macht seinem Namen „Winnerfall“ (nicht Wiener Fall, wie oft geschrieben) alle Ehre, wenn sich bis zu $15 \text{ m}^3/\text{s}$ Wasser brüllend und gischtend in einem steilen Wildbachbett in die Tiefe wälzen (s. Abb. 9).

Die Quellen des Gebirgsmassives, die alle ohne Ausnahme Karstquellen sind und nach Ausweis der physikalischen und chemischen Parameter vorrangig aus dem Wasservorrat im Dachsteinkalk gespeist werden, weisen einige bemerkenswerte Eigenschaften auf. Durch systematische Untersuchungen auch in anderen nordalpinen Hochkarststöcken (Zötl 1974) wurde bestätigt, daß trotz der charakteristischen starken Schüttungsschwankungen die Temperaturen und Inhaltsstoffe der Quellwässer eines in sich hydrologisch abgeschlossenen Karstareals vergleichbar und nur geringen jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sind. In Abhängigkeit vom Füllungsgrad des Speicherraumes, der nach dem Heberprinzip entleert werden kann, äußern sich Niederschlagsspitzen u. U. schon nach wenigen Stunden in einem merklichen Schüttungsanstieg. Das vom Plateau einsickernde Wasser fließt offensichtlich auf den offenen Klüften so rasch ab, daß das Kalklösungsgleichgewicht sich nicht einstellen kann und die Quellwässer infolgedessen äußerst schwach mineralisiert sind. Gesamt- und Karbonathärten unter 4° dH und Temperaturen zwischen 3 und 4° C , die den Einfluß von Schmelzwasser verraten, sind keine Seltenheit. Während der Niedrigwasserperioden von meist September bis März/April ist die Mineralisation zwar etwas höher, die Quellwässer sind aber immer noch weich („Kalkgehalts-Paradoxon“). Dieses Phänomen läßt sich zwanglos mit einem mehr oder weniger zusammenhängenden, wenn auch weit verzweigten Karstwasserspeicher erklären (Toussaint 1971, Zötl 1974). Weitere Erklärungen werden in Kap. 5.3 gegeben.

5.2 Markierungsversuche in Karstgebieten

In vielen Fällen, z. B. zur Aufstellung hydrologischer Bilanzen oder zur Abklärung hygienischer Fragen, müssen die Grenzen der unterirdischen Einzugsgebiete von Quellen bekannt sein. Diese weichen in Karstgebieten in der Regel teilweise erheblich von den oberirdischen Wasserscheiden ab. Von vielen möglichen Methoden hat sich der Einsatz von Markierungsmitteln bewährt, mit deren Hilfe konkrete Aussagen zur Herkunft des Wassers der Karstquellen gemacht werden können. Im Hochgebirge kommt es sehr auf Gewichtsersparnis an, so daß die bekannten Salzungsversuche nicht infrage kommen. In den letzten Jahren wurde die Verwendung von Bärlappsporen und Farbstoffen immer stärker bevorzugt.

Der Verfasser führte in eigener Regie im Sommer 1969 bei Karstwasserhochständen einen Markierungsversuch durch, bei dem außer Uranin an der Schäferhütte im Streitmandltal auch künstlich blau und rot gefärbte Bärlappsporen in Schwinden des Vord. Pitschenbergtales und an der Wasserstelle unterhalb der Laufener Hütte im Tennalmgebiet eingebracht wurden. Im Herbst 1977 erfolgte bei niedrigen Karstwasserständen ein zweiter Versuch im Auftrag der Salzburger Landesregierung, der von mehreren Institutionen getragen wurde. Als Farbtracer wurden Rhodamin B, Tinopal und erneut

Uranin verwendet und in wasserabziehende Spalten in der Nähe der Lacke im Vord. Pitschenbergtal, zwischen Hochfeiler und Hühnerkrallkogel und in der Eiskogelhöhle eingespeist. Mittels eines Parallelversuches im Bereich der südwestlichen Abhänge des Tennengebirges sollten hydraulische Zusammenhänge zwischen möglichen Verschmutzungsquellen und Wasserversorgungsanlagen festgestellt werden. Die Markierungsmittel müssen in großen Mengen von Wasser gelöst, die beschickten Schächte, Dolinen und Spalten müssen ausreichend vor, während und nach Eingabe der Tracer gespült werden (s. Abb. 10).

Um die Farbstoffe nach dem eventuellen Durchgang durch das Karströhrensystem nachweisen zu können, werden in ausgewählten Quellen oder Bächen mit Aktivkohle gefüllte kleine Säckchen eingehängt und in einem bestimmten Turnus gewechselt. Die Farbstoffe werden später in einem Labor eluiert und photometrisch qualitativ und quantitativ bestimmt. Die gedrifteten Sporen werden durch Planktonnetze abgefiltert und nach spezieller Aufbereitung der Sedimentproben unter dem Mikroskop ausgezählt. Zur Überwachung des Versuchs sind an Ort und Stelle ergänzende Direkttests erforderlich.

5.3 Mechanismus der Karstentwässerung

Aus der hydrogeologischen Kartierung der Quellen, der Beschaffenheit der Quellwässer, der Luftbildauswertung der größeren Störungen und Zerrüttungszonen im Plateaubereich und schließlich den Erkenntnissen aus Markierungsversuchen läßt sich eine fundierte, widerspruchsfreie Vorstellung der Gesetzmäßigkeiten der Entwässerung eines nordalpinen Hochkarststockes ableiten. Zunächst gilt, daß für das Tennengebirge der „**Seichte Karst**“ vorherrscht, d. h. die Verkarstungsbasis liegt oberhalb der Talniveaus, wie das in den südlichen Abhängen des Massivs besonders deutlich zu sehen ist. Für den Seichten Karst ist ein in jahreszeitlichen Schüben wasserführendes Karströhrennetz ohne nennenswerte Speicherung typisch. In der Regel fließen die versickerten Niederschläge innerhalb eines Jahres wieder in den Quellen ab. Nur im nördlichen Tennengebirge dominiert das Abflußregime des „**Tiefen Karstes**“, da hier die verkarstungsfähigen Gesteine unter die Geländeoberfläche abtauchen. Wo der Dachsteinkalk von wasserstauenden Deckschichten überlagert wird, geht das freie Karstwasser in gespanntes über, d. h. Karstwasseroberfläche und Druckfläche stimmen nicht mehr überein.

Der Karstwasserspeicher kann in einem vertikalen hydrologischen Profil in den Bereich des permanenten Karstwassers (phreatische Zone) unterhalb und in den ungesättigten Bereich (vadose Zone) über der Oberfläche des freien Karstwassers unterteilt werden. In der phreatischen Zone, die wegen des Fehlens von biogenem CO₂ nur schwach verkarstet ist, fließt das Wasser unter Druck im allgemeinen nur langsam entlang wenig korrodierter Klüfte und Schichtfugen. Nur durch Mischungskorrosion kann es zur Ausbildung von einzelnen besser wegsamen Kanälen, sog. Karstgerinnen, kommen. Ihre Häufigkeit nimmt nach unten hin rasch ab. Diese Vorstellung findet ihre Bestätigung durch die Erfahrungen, die beim Bau der neuen Tauern-Autobahn Anfang der 70er Jahre gemacht wurden. Obwohl der Trassenabschnitt zwischen Paß Lueg und Stegen-

wald in einem Tunnel im Berginnern verläuft, wurde kein nennenswerter Wasserandrang festgestellt. In der hochphreatischen Zone und noch mehr im Bereich der Karstwasserspiegelschwankungen, der unteren vadosen Zone, findet das Maximum des Karstwasserumsatzes statt, da hier die Verkarstung am weitesten fortgeschritten ist. Das Karstwasser fließt im wesentlichen in Gravitationsgerinnen ab, Druckgerinne sind relativ selten. Wegen der seit dem Tertiär andauernden Heraushebung des Gebirgsblocks und damit zusammenhängender relativer Tieferlegung des Karstwasserspiegels vergrößert sich die vadose Zone immer mehr auf Kosten der phreatischen.

Für den Bereich der Spiegelschwankungen, der mehrere 10 m umfassen kann, ergibt sich vereinfacht das Bild eines in das Gebirgsinnere verlagerten Gewässernetzes, das im Gegensatz zu dem an der Erdoberfläche dreidimensional ist. Die teilweise beträchtliche Querschnitte aufweisenden Hauptabflußbahnen fungieren als Vorfluter für die weniger wasserwegsame Umgebung. Die Anlage dieser großdimensionierten Karstgerinne ist an Störungszonen gebunden, in deren Nähe die Klüfte besonders zahlreich sind. Zwischen diesen Leitlinien der unterirdischen Entwässerung, die auch an der Erdoberfläche durch besonders intensive Verkarstung auffallen (s. Abb. 2 u. 4; T o u s s a i n t 1971), befinden sich äußerst schwach verkarstete Bereiche.

Sie sind die Ursache dafür, daß Quellenbezirke trotz kürzester Entfernung voneinander einen eigenständigen Entwässerungsmechanismus aufweisen, der aber der Hydraulik eines einheitlichen, aus verschiedenen alten Teilen im Laufe einer mehrere Jahrtausende dauernden Genese zusammengewachsenen Karstwasserspeichers untergeordnet ist (Beispiel Dachserfallquellen/Tricklfallquellen). Die Tatsache, daß die Markierungsversuche sogar sich überkreuzende Karstgerinnen aufgezeigt haben, zeigt, daß in einem Karststock auch vertikal der Verkarstungsgrad sehr unterschiedlich sein kann. Die Kalklösung scheint demnach in stärkerem Ausmaß vorhandene unterirdische Hohlräume zu vergrößern als neue zu schaffen.

Der hydrologische Gegensatz von unterschiedlich dimensionierten Fließwegen macht das Wesen der Karstentwässerung aus. Die signifikanten Niederschlagsereignissen in der Regel gut zuzuordnenden Abflußspitzen sind in Verbindung zu bringen mit der rasch ablaufenden Entleerung der Karstwasserschläuche und klaffender Klüfte. Die Niedrigwasserabflüsse gehen statt dessen auf das langsame Aussickern aus engen Klüften und Spalten zurück. Diese sind somit in erster Linie für die Speicherung des Karstwassers verantwortlich und dominieren im phreatischen Bereich.

Wenn auch die unterirdischen Hauptdrainsysteme, deren gezielte Impfung durch Tracer im übrigen eine der wesentlichsten Voraussetzungen für einen erfolgreichen Markierungsversuch ist, an tektonische Schwächelinien gebunden sind, so bestimmt die Schichtlagerung jedoch letzten Endes die generelle Richtung der Karstentwässerung. Das Einfallen der Sohlschicht des triadischen Gesteinspaketes bedingt, daß im Tennengebirge das Karstwasser hauptsächlich nach Norden abstömt und die Existenz der großen Quellen erklärt. Die beiden Markierungsversuche haben gezeigt, daß die unterirdische Hauptwasserscheide am südlichen Plateaurand liegt. Eine sekundäre Karstwasserscheide

ließ sich im Bereich des Vord. Pitschenbergtales nachweisen, die an die hier zu Tage tretenden, relativ schwach verkarsteten und damit als relative Wasserstauer fungierenden Dolomite gebunden ist. Die südlich oder südöstlich dieses Dolomitvorkommens beschickten Karstschächte haben keine hydraulische Verbindung mit den sehr starken Quellen im Paß Lueg, obwohl hier die topographisch tiefstgelegene Austrittsstelle des gesamten Karstwasserkörpers des Tennengebirges vorliegt. Im übrigen entwässern große Flächenanteile des zentralen und östlichen Massivs gleichzeitig zu mehreren Quellen.

6. Karsthöhlen

Auf die rezente unterirdische Karstentwässerung des Tennengebirges wurde relativ ausführlich eingegangen, um das Verständnis für die Entstehung der Karsthöhlen, die nichts anderes sind als mehr oder weniger großdimensionierte Teilstücke ehemaliger oder heutiger Karstwasserkanäle, zu erleichtern. Die Höhlen, die entweder eine überwiegende Horizontalausdehnung haben oder als Schächte vertikal gestreckt sind, werden in Abhängigkeit von ihrer Lage zum Karstwasserspiegel entweder permanent bzw. zeitweilig durchflutet oder sind trocken. Die Trockenhöhlen, die zahlenmäßig bei weitem überwiegen, dienen wegen ihrer Lage in der vadosen Zone jedoch der Entwässerung des Plateaus, die anfallenden Sickerwässer können in Abhängigkeit von der Temperatur und anderen Bedingungen (F r a n k e 1978) im unteren Höhlenteil vorübergehend oder auf Dauer als Eis gespeichert werden (s. Abb. 11), das ein geschätztes Alter von 500—600 Jahren aufweisen kann. Gerade die Trockenhöhlen verdanken ihr heutiges Aussehen aber nicht nur karstrelevanten Prozessen, vielmehr spielt die Raumformung durch Verstürze, Frostsprengung oder Verwitterung eine herausragende Rolle. Die sog. Ausbruchshöhlen haben daher auch keine Beziehung zur Verkarstung.

Die Höhlen werden von den Höhlenkundlern, den Speläologen, vermessen, untersucht und in Plänen dargestellt. Es existiert ein umfangreicher Höhlenkataster über die Karsthöhlen des Tennengebirges, der vom Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg demnächst in Form eines Buches veröffentlicht wird. Da hier auch sehr viele Details beschrieben werden, beschränkt sich der Verfasser auf die Darstellung einiger interessanter Gesetzmäßigkeiten der Anfänge der Höhlenentstehung, der sog. Primärgenese, und auf die Erläuterung des Höhleninhaltes, und zwar vornehmlich des biologischen.

6.1 Primärgenese der Karsthöhlen und Altersstellung

Im wesentlichen aus den Querprofilen der Höhlen ist abzuleiten, daß im Hinblick auf die hohlraumbildende Wirksamkeit des Karstwassers ein zweiphasiges Geschehen vorliegt. Nach einer Modellvorstellung, die sich gut bewährt hat, beginnt die Raumbildung mit der Erweiterung wassererfüllter Spaltensysteme der phreatischen Zone durch Mischungskorrosion. Da diese chemisch nach allen Seiten wirkt, sind rundliche bis ellipsenförmige Gangquerschnitte charakteristisch. Durch die Karströhren wird das Wasser unter Druck gepreßt, es kann also auch bergan fließen. Weiterhin sind typisch wechselnde Raumin-

halte der unterirdischen Strecken. Der Formenschatz des zweiten Stadiums ist dadurch gekennzeichnet, daß die Raumerweiterung in mehr oder weniger mit Luft erfüllten Spaltensystemen durch nur der Schwerkraft unterworfenen Sohlengerinne vor allem senkrecht nach unten erfolgt. Das Gerinne schneidet sich ein und bildet einen Cañon. Neben der Korrosion spielt hier auch die fluviale Erosion eine Rolle. Diese beiden genannten Phasen der Höhlenentstehung können sich überschneiden. Die Phasenfolge kann in verschiedenen Höhlenteilen unabhängig voneinander und zu verschiedenen Zeiten einsetzen und ablaufen. Wichtig für den Speläologen ist, daß die Großraumbildung nach ihrem Abschluß auch durch Kleinformen geprägt wird, die es beispielsweise erlauben, die Strömungsrichtung der Karstwässer zu rekonstruieren.

Im Gegensatz zu früheren und teilweise auch heute noch vereinzelt vertretenen Meinungen hat sich die Vorstellung von der Vorfluterbezogenheit der Karstgerinne weitgehend durchgesetzt. Danach sind die Höhlenniveaus Gänge eines unterirdischen Raumsystems, die unter dem Einfluß eines bestimmten als Vorfluter fungierenden Obertagegewässers angelegt worden sind. Die Gesamtheit der Gangniveaus ergibt das Höhlenstockwerk, das also eine genetische und chronologische Einheit darstellt und dessen Umfang von der Dauer des relativen Stillstandes der Heraushebung der Alpen abhängt. Ist die Talgeschichte eines Flußgebietes im zeitlichen Ablauf bekannt, kann auf das Alter der Karsthöhlen, und zwar insbesondere der Horizontalstrecken, geschlossen werden. Dabei bedient man sich der räumlichen und höhenzonaren Zuordnung der Karsthöhlen zu den Verebnungsflächen, deren Herausbildung ebenfalls vom Gewässernetz gesteuert worden ist. Aus der Korrelierbarkeit der auf die gleichen Wirkungsgrößen zurückgehenden Höhlen- und Talentwicklung ist eine speläochronologische Gliederung des Tennengebirges abzuleiten.

Die höchstgelegenen, z. T. durch die Erosion aufgedeckten Höhlen gehen mit ihren Anfängen bis in das Obermiozän zurück, die jüngsten, im Niveau des jetzigen Salzachspiegels austretenden Wasserhöhlen haben holozänes Alter. Die Masse der Höhlen entstand mit räumlich wechselndem Schwerpunkt im Salzachtal und in den nördlichen Abhängen des Gebirges. Die im ausgehenden Altplozän endgültig erfolgte Herausbildung des in West-Ost-Richtung verlaufenden Salzachlängstales im Süden der Kalkhochalpen bedeutet für die Höhlengenese eine entscheidende Zäsur. Die vorher gebildeten Höhlen wurden teilweise auch von Flüssen mit Einzugsgebieten in den Tauern geschaffen. Diese Gewässer querten auf ihrem Weg nach Norden die heutige Hochfläche des Tennengebirges bis ins unterste Altplozän überwiegend oberirdisch, danach bis zum mittleren Altplozän sehr wahrscheinlich teilweise unterirdisch. Nach vollzogener Längstalbildung verloren die Karstgerinne ihre früheren Einzugsgebiete, die Entstehung großer, z. T. riesiger Höhlen war zu Ende. Jüngere Höhlen gehen nur noch auf die vom Plateau kommenden Sickerwässer zurück und weisen dementsprechend vergleichsweise bescheidene Dimensionen auf.

Am Beispiel der bekannten Eisriesenwelt bei Werfen ist dem Naturfreund im Rahmen mehrstündiger Spezialführungen in größerer Entfernung vom mit staunenden Touristen überfüllten Eingangsteil (Eisteil) die Möglichkeit gegeben, die Entstehung dieses

ausgedehnten unterirdischen Karstlabyrinthes nachzuvollziehen. Bei einer Gesamterstreckung von 42 km auf mehreren Niveaus ist sie die Höhle mit dem größten bekannten Eisteil der Erde (s. Abb. 11). Die obersten, bis in über 1950 m Höhe zu befahrenden Strecken können in Beziehung gebracht werden mit dem im unteren Altpliozän bestehenden Obertagegewässer des Pitschenbergtales. Mit der weiteren Heraushebung des Gebirges verlor die in den Dachsteinkalk eingeschnittene Flußstrecke bis zum endgültigen Trockenfallen mehr und mehr Wasser an den Untergrund, das auf kürzestem Wege nach Westen zur damaligen Salzach hin abfloß. Das in ca. 1590 m Höhe angeschnittene Hauptniveau der Eisriesenwelt entspricht in der Höhenlage morphologisch auffällig den im Salztachtal weit verbreiteten Talbodenresten des mittleren Altpliozäns (s. Abb. 12).

Die Gänge der Riesenhöhle folgen entsprechend dem Kluftsystem und dem Schicht-einfallen verschiedenen Richtungen, die nördlichen Richtungen sind bevorzugt. Die Nordwest streichenden Höhlenteile sind im ganzen gesehen relativ jünger als die primäre Hauptanlage des Höhlensystems. Das gilt insbesondere für die „Gerade Kluft“, die erst aufriß, als die Höhlengerinne schon nicht mehr existiert haben dürften. Deswegen konnte sie ihren Charakter als senkrecht stehende tektonische Spalte bewahren. Die „Gerade Kluft“ steht vermutlich ebenso wie der parallel verlaufende Verwurf, auf den zahlreiche, die Erforschung der Höhle nach Nordosten unmöglich machende Verstürze zurückgehen, im Zusammenhang mit der Wiederbelebung im Miozän angelegter Störungszonen.

6.2 Die Höhlen als Schutzräume

Auf den Kenner von in südlichen Ländern gelegenen Karsthöhlen müssen die unterirdischen Hohlräume in den Nordalpen den Eindruck einer eintönigen Wildnis unter der Erde machen. Auch die Höhlen des Tennengebirges zeichnen sich nur durch riesige Hallen und endlose, sich im Unbekannten verlierende Gänge aus. Die sich aus übersättigten Kalklösungen ausscheidenden Tropfsteine, die einen phantastischen Formenreichtum aufweisen können, sind in den Höhlen des Tennengebirges nur in relativ wenigen Exemplaren vertreten. Möglicherweise haben die eiszeitlichen Schmelzwässer, die die unterirdischen Hohlraumssysteme durchströmten, in hohem Maße die Tropfsteine vernichtet. Die verbliebenen sind in Zerstörung begriffen, da sie im Gegensatz zu den nacheiszeitlichen Höhlensintern der Mittelgebirgsareale im wesentlichen in wärmzeitlichen Interstadialen mit wärmerem Klima als heute entstanden sind (Frank 1978). Während sich die Tropfsteine, deren Deckenzapfen (Stalaktiten) im Gegensatz zu den Bodenzapfen (Stalagmiten) ein Tropfröhrchen aufweisen, nur in luftefüllten Höhlenteilen bilden können, entstehen Kalkspatkristalle oder Aragonitausblühungen unter Wasserbedeckung (z. B. Diamantreiche I und II in der Eisriesenwelt).

Den Reiz der nordalpinen Karsthöhlen machen die prächtigen Eisfiguren aus, die in zahlreichen Höhlen anzutreffen sind. In Abb. 11 ist beispielhaft die „Wimur-Halle“ der Eisriesenwelt, in der die sich ständig verändernde Gesamteisfläche im Mittel ca. 20.000 m² beträgt (Stüber 1967), dargestellt.

Typisch für die Höhlen des Tennengebirges und der anderen Stöcke der Kalkalpen ist der Höhlenlehm. Er ist meist geschichtet, so daß zu vermuten ist, daß er nur zum geringen Teil Lösungsrückstand chemisch nicht ganz reiner Kalksteine ist, im wesentlichen aber auf den Gletscherabrieb zurückgeht und von den Schmelzwässern in nahezu stehende Höhlengewässer abgesetzt wurde.

Bei der beschwerlichen Kletterei im Dunkeln auf nassen, oft genug mit schmierigem Lehm bedeckten Felspartien oder über versturzunggefährdeten Massen wirkt die Finsternis regelrecht beklemmend. Man kann sich daher kaum vorstellen, daß die Höhlen auch die Funktion naturgegebener Schutzräume haben können. Da die beständigen mikroklimatischen Bedingungen eher konservierend als zersetzend wirken, finden sich in den Höhlen begehrte vorgeschichtliche Relikte. Die Höhlen des Tennengebirges spielten zwar keine Rolle im Leben des prähistorischen Menschen und infolgedessen wurden mit Ausnahme eines Felsüberhangs im Bereich der Salzachöfen, unter dem Kulturschichten der Bronzezeit und des Neolithikums entdeckt wurden, auch keine Gerätschaften oder gar Kunstwerke der Vorzeit wie z. B. Höhlengemälde gefunden. Sie waren aber Refugien für eiszeitliche Tiere. In der Nähe des in 1650 m Höhe gelegenen Hauptportals des Frauenofens, das vom Salzachtal aus gut zu sehen ist, wurden Skelettreste zahlreicher Höhlenbären, die größer waren als die heutigen Braunbären, und eines Wolfes gefunden. Im Hint. Pitschenbergtal gaben viele Knochen des Höhlenbären der Windischkogelbärenhöhle ihren Namen. Die tierischen Fossilien sind wichtig, da sie die Möglichkeit einer Klimarekonstruktion bieten.

In den Karsthöhlen kann aber auch rezentes Leben studiert werden. Da sie lebensfeindlich sind, kommen mit zunehmender Entfernung vom Höhleneingang immer weniger Pflanzen vor. Kein Licht benötigen Bakterien, die mit mineralischen Substanzen Energie produzieren. Bakterien scheinen verantwortlich zu sein für die Entstehung der hier und da in Höhlen anzutreffenden Bohnnerze. Es handelt sich um schwarzbraune traubige Knollen, deren Inneres aus Pyrit FeS_2 besteht, der an seiner Oberfläche in Goethit FeO(OH) umgewandelt ist.

Der Mangel an Pflanzennahrung nimmt den Tieren die Höhle als Lebensraum, tierisches Leben fehlt aber nicht völlig. Die Eingangsregion wirkt wegen ihres Schutzcharakters ohnehin auf einige Tiere anziehend. Das sind die Trogloxene, die lediglich schutzsuchenden oder überwinternden Höhlengäste. Als Beispiel sei wiederum der Frauenofen genannt, dessen Höhlensee unweit des Eingangs gerne von Gamsen aufgesucht wird. Im Winter sind auch anzutreffen die Schmetterlingsarten Kellerspanner und Zackeneule sowie Spinnen, Käfer, Tausendfüßler u. a. Insekten. Die auffälligsten Trogloxene sind zweifellos die Fledermäuse. Vor allem während des Winterschlafes hängen sie an Höhlendecken oder -wänden, ihre Lebensfunktionen sind so stark herabgesetzt, daß man sie herunternehmen und in Ruhe betrachten kann. Die am weitesten verbreiteten Höhlenfledermäuse sind Mopsfledermaus und Hufeisennase, Erwähnung verdienen auch Großes Mausohr, Langohr und Bartfledermaus. Mit der Möglichkeit, Ultraschall zu erzeugen und als Echolot zu benutzen, sind die Fledermäuse ungewöhnlich effektiv an das Leben in den Höhlen angepaßt.

Was echte Höhlentiere betrifft — Troglophile als höhlenliebende Tiere (mit gleitendem Übergang zu den Troglaxenen) und Troglobien, die niemals an die Außenwelt kommen —, so sind die alpinen Höhlen wegen des eiszeitlichen Nahrungsmangels und der zerstörenden Durchspülung durch Schmelzwässer sehr artenarm. Die wenigen Arten weisen jedoch darauf hin, daß in den Höhlen gewissermaßen Naturlaboratorien vorliegen, in denen Langzeitexperimente zum Thema Ausleseprozesse vor sich gehen. Gemeint ist vor allem der Verlust von Sehorganen und Pigmentierung, alles Eigenschaften, die an der Erdoberfläche, von der die Tiere einst einwanderten, sinnvoll waren. Dafür erleichtern neu erworbene Fähigkeiten, wie z. B. verfeinerter Tastsinn, die Orientierung in der Dunkelheit. Als Beispiele werden hier nur der Flohkrebs und der Springschwanz genannt. Der bekannte Grottenolm kommt dagegen nur in Südeuropa vor. F r a n k e (1978) und S t ü b e r (1967) gehen auf weitere Details ein.

Abschließend wird noch auf den Aspekt hingewiesen, daß „lebende Fossilien“, also Reste einer Tierwelt, die es heute in der ursprünglichen Form nicht mehr gibt, in den Karsthöhlen einschneidende Klimaänderungen überstanden haben. Ein lebendes tertiäres Relikt ist zweifelsohne ein ca. 2 mm großes spinnenartiges Insekt *Koenenia austriaca* mit großen Palpen, das an einigen Stellen der Eisriesenwelt existiert. Bezüglich weiterer Angaben wird wieder auf F r a n k e (1978) verwiesen.

7. Schutz der Natur

Es wurde aufgezeigt, daß das Tennengebirge ein besonders schönes Beispiel eines nordalpinen Hochkarststockes darstellt. Daher hat der Gesetzgeber dieses Gebirgsmassiv schon vor vielen Jahren zum **Landschaftsschutzgebiet** erklärt. Da die teilweise sehr unwirtliche Karstwildnis der Hochfläche außerhalb der Reichweite der negativen Begleiterscheinungen des Fremdenverkehrs liegt, ist nicht zu befürchten, daß ausgerechnet den vergleichsweise wenigen Naturfreunden, die sich eine Begehung des Tennengebirges zum Ziel gesetzt haben, der Schutz der Natur kein Anliegen ist.

Die Karstformen der Oberfläche, gewissermaßen zu Stein gewordene karstkorrosive Vorgänge, sowie Flora und Fauna sind auf absehbare Zeit nicht gefährdet, auch wenn in der näheren Umgebung der Hütten Latschenbestände als Heizmaterial verwertet werden. Die Hüttenabfälle jeder Art werden zwar in Karsthohlformen deponiert, diese liegen jedoch sehr versteckt. Die häuslichen Abfälle und menschlichen Fäkalien stellen nur geringdimensionierte, punktförmige Kontaminationsquellen dar, die wegen des enormen Verdünnungseffektes die Qualität des Karstwassers nicht beeinträchtigen. Da jedoch die Filterwirkung der korrosiv erweiterten Klüfte nur minimal ist, was durch den Durchgang der als Tracer verwendeten Sporen bewiesen wird, darf die Belastung nicht wesentlich über den heutigen Umfang hinausgehen. Werden diese Warnungen mißachtet, dann können die Folgen für eine eventuelle Trinkwassergewinnung genau so gravierend negativ sein wie im Falle des Untersberges, des mittels Seilbahnen erschlossenen Hausberges der Salzburger.

Für den Bestand der Karsthöhlen des Tennengebirges wird zur Zeit auch keine Gefahr gesehen. Von den zahlreichen unterirdischen Hohlräumen ist nur der mit Eis erfüllte Eingangsteil der Eisriesenwelt im Rahmen mehrmaliger Führungen am Tag dem allgemeinen Besucherverkehr geöffnet. Da nach Meinung des Verfassers diese und für wenige besonders Interessierte durchgeführte Spezialführungen beispielhaft sind, stehen sie nicht im Gegensatz zum Charakter der Eisriesenwelt als **Naturdenkmal**. Unter Schutz gestellt sind weiterhin u. a. Eiskogelhöhle, Frauenofen, Grieskesselhöhle und Winnerfallhöhle. Diese und die meisten anderen Höhlen liegen meist in unzugänglichem Gelände oder können als Wasserhöhlen nur von Speläologen mit Spezialausrüstung betreten werden. Sie erfüllen somit voll ihre Funktion als Schutzräume oder ökologische Nischen. Wissenschaftlern wird darüber hinaus die Möglichkeit geboten, insbesondere geologische, klimatologische oder biologische Studien ungestört durchzuführen, deren Ergebnisse im weiteren Sinne auch für die Allgemeinheit von Nutzen sind.

Von allen Karstphänomenen kann eigentlich nur den großen Quellen am Nordfuß des Tennengebirges ernsthaftere Gefahr drohen, wenn die Karstwasservorräte dieses Massivs in großem Stil genutzt werden. Man muß sich immerhin vor Augen halten, daß im Lammergebiet Jahr für Jahr etwa 280—300 Millionen m³ Grundwasser bester Qualität ungenutzt in den Vorflutern abfließen, während demgegenüber in den Ballungsräumen des Salzburger Beckens dieser lebenswichtige Rohstoff immer knapper wird. Der Anteil des Grundwasserdargebotes aus dem Tennengebirge macht dabei mehr als die Hälfte aus, obwohl es nur zu einem Fünftel an der Gesamtfläche beteiligt ist (Toussaint 1977). Der Verfasser schlug früher vor (Toussaint 1971), die Quellen des Abtenauer und Scheffauer Schwarzenbaches zu fassen. Die kilometerlangen Stollenfassungen hätten aber mit Sicherheit die Zerstörung des Naturdenkmals Winnerfall zur Folge gehabt, da die Hochwasserspitzen, die Ursache des Wasserfalls sind, gekappt werden würden. Nicht zuletzt aus diesem Grunde plädierte der Verfasser für eine andere Lösung (Toussaint 1978). Kurz vor ihrer Mündung in die Salzach verliert die Lammer einen Teil ihres Wassers an den Untergrund und reichert somit das Porengrundwasser des Salzburger Beckens an. Dieser Effekt kann durch technische Maßnahmen noch gesteigert werden, so daß auf diese Weise das Karstwasser des Tennengebirges indirekt ebenfalls erschlossen werden kann, und zwar effektiver und wesentlich wirtschaftlicher als beim erstgenannten Verfahren. Somit liegt eine vernünftige Basis vor, sowohl dem Naturschutz als auch den Belangen der Wasserwirtschaft gerecht zu werden.

8. Literatur

- Frank e, H. W.: In den Höhlen dieser Erde. Vorstöße in unbekannte Tiefen. — 336 S., 15 Abb., 22 Farbphotos, Hamburg 1978 (Hoffmann und Campe).
- Seefeldner, E.: Salzburg und seine Landschaften. Eine geographische Landeskunde. — 573 S., 93 Abb., 10 Tab., Salzburg/Stuttgart 1961 (Das Bergland-Buch).
- Stü ber, E.: Salzburger Naturführer. — 325 S., 81 Abb., 1 Taf., 1 Kte., Salzburg 1967 (Mayr Melnhof).
- Toussaint, B.: Hydrogeologie und Karstgenese des Tennengebirges (Salzburger Kalkalpen). — Steir. Beitr. z. Hydrogeol., 23, S. 5—115, 16 Abb., 6 Tab., 14 Taf., Graz 1971.
- Toussaint, B.: Der oberirdische Karstformenschatz des Tennengebirges (Salzburger Kalkalpen, Österreich). — Die Höhle. 27, S. 49—65, 6 Abb., 1 Taf., Wien 1976.
- Toussaint, B.: Beitrag zum Wasserhaushalt des Lammergebietes (Salzburg) unter besonderer Berücksichtigung der Karsthydrogeologie. — Dt. gewässerkdl. Mitt., 21, S. 101—112, 6 Abb., 8 Tab., Koblenz 1977.
- Toussaint, B.: Hydrographie, Hydrogeologie und Abflußverhalten des Lammergebietes im Hinblick auf natürliche und künstliche Grundwasseranreicherung im südlichen Salzburger Becken (Österreich). — Steir. Beitr. z. Hydrogeol., 30, S. 83—122, 11 Abb., 7 Tab., 2 Taf., Graz 1978.
- Zö t l, J. G.: Karsthydrogeologie. — 291 S., 114 Abb., 2 Taf., Wien 1974.



Abb. 1 Das Salzachtal südlich des Tennengebirges. — Blick vom Dr. Friedrich Oedl-Haus (Achselkopf) nach Süden über die aus Werfener Schiefen und paläozoischen Grauwacken aufgebauten Schieferalpen. Im Bildmittelgrund liegt der bekannte Ort Bischofshofen.

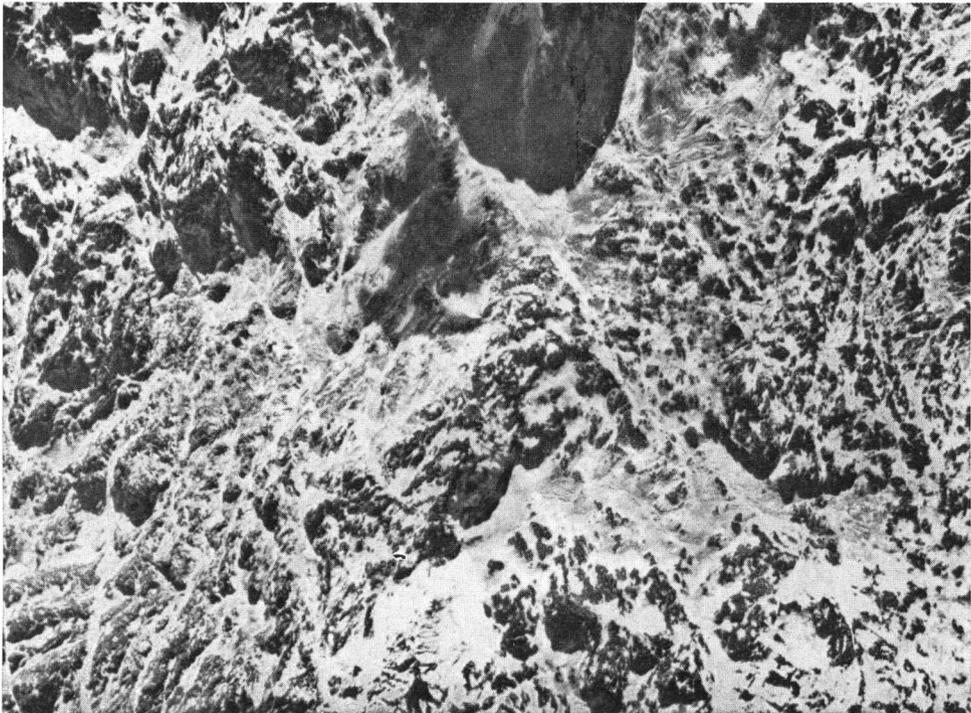


Abb. 2 Karstlandschaft des östlichen Tennengebirges im Norden des Fritzerkogels. — An hauptsächlich Nord-Süd streichenden Störungs- und Kluftsystemen sind Karstgassen sowie Schacht- und Dolinenreihen gebunden. In der Mitte des unteren (nördlichen) Bildrandes fallen im Bereich der Grieskögel einzelne Großdolinen ins Auge, nach Süden schließen sich Grieskessel und Tennenalpkessel an, welche in sich wieder vielfach gegliederte und mit Moränenschutt ausgekleidete wannenartige Oberflächenkarstformen darstellen. Die linke (östliche) Bildhälfte wird vom morphologisch abwechslungsreichen Tennalmgebiet eingenommen. Hierbei handelt es sich um einen durch Verkarstung und eiszeitlichen Gletscherschurf umgestalteten altpliozänen Talbodenrest eines früheren Nebenflusses einer „Ur-Lammer“.



Abb. 3 Südwestecke des Tennengebirges, im Vordergrund die Pongauer Talweitung mit Bischofs-
hofen. — Über der Werfener Schuppenzone des Bildmittelgrundes das eindrucksvolle Gebirgs-
panorama: von links nach rechts Raucheck als höchste Erhebung (2431 m), Fieberhörner, Hoch-
thron, Wermutschneid, Kemetsteine, Bleikogelgruppe, Tauernkogel. Die Verebnungen der genann-
ten Gipfelpyramiden gehören den Resten des ältesten erhaltenen und aus dem Obermiozän über-
lieferten „Hochkönig“-Altflächensystems an.



Abb. 4 Blick von der Umgebung der Schäferhütte im Streitmandltal nach Nordwesten über das
Pitschenbergtal. — Dieses im Altplozän oberirdisch zu einem Vorläufer der Salzach hin entwäs-
sernde Tal fiel später infolge Verkarstung trocken und wurde durch Gletschererosion morpho-
logisch umgeformt. Am oberen Bildrand links der Windischkogel, in der Mitte Tirolerkogel und
Bäreck, rechts der Sandkarriedel.



Abb. 5 Karstschacht im Vord. Pitschenbergtal, gebunden an steilstehende Schichtfugen des Dachsteinkalkes.

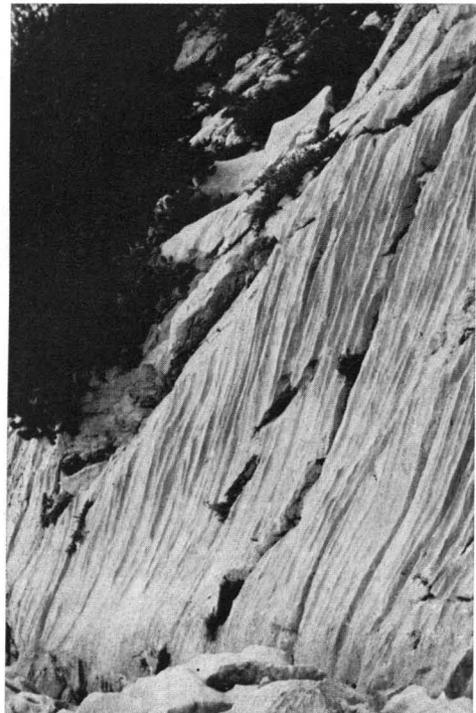


Abb. 6 Rinnenkarren im Vord. Pitschenbergtal. — Wo das Lösungsvermögen der aggressiven Wässer erschöpft ist, beginnt die sog. Ausgleichsfläche.

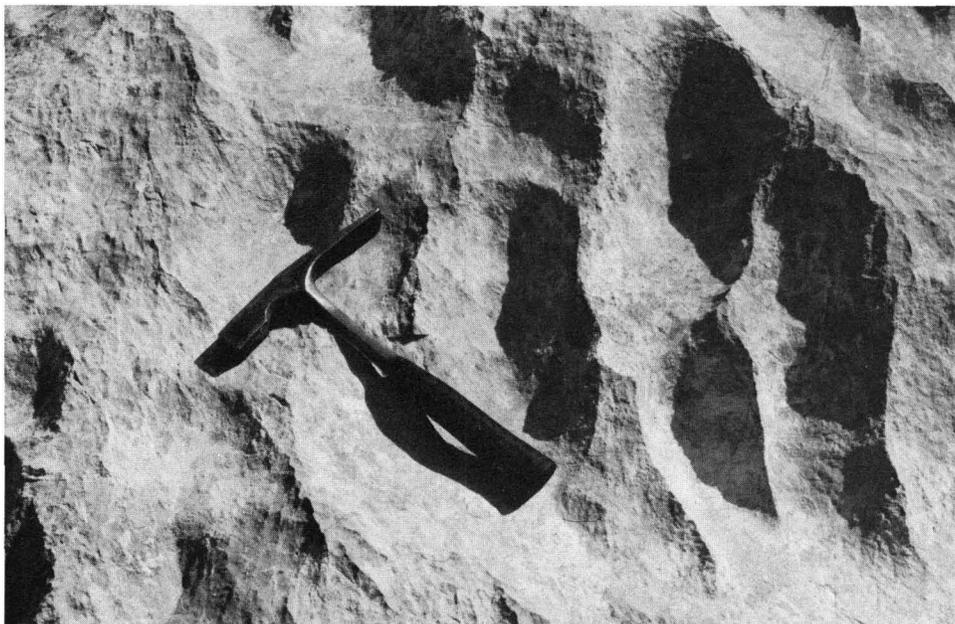


Abb. 7 Lösungsnischen oder Trittkarren am Westhang der Wieselsteingruppe.



Abb. 8 Dachserfall (auch Taxachfall genannt) bei Abtenau-Au. — Die am Nordost-Fuß des Kl. Breitsteins entspringenden Quellen ergeben mit den benachbarten Tricklfall-Quellen den Abtenauer Schwarzenbach. In Zeiten geringer Schüttung ist nur eine im Talbodenniveau liegende Quellengruppe aktiv, bei steigenden Überdrücken im kommunizierenden Karströhrensystem springen die im Bild gezeigten Hochwasserspeicher von rechts nach links nacheinander an. Die periodische Wasserhöhle links ist die Dachserfallhöhle.

Abb. 9 Der Winnerfall bei Oberscheffau. — Während der Schneeschmelze auf der Hochfläche im Frühsommer und gleichzeitigen starken Regenfällen können beiden Öffnungen des Winnerfall-Höhlensystems bis zu $15 \text{ m}^3/\text{s}$ Karstwasser entströmen. Zur Zeit der Aufnahme schüttete der Hochwasserspeicher nur etwa 100 l/s . Im Winterhalbjahr ist wegen der Speicherung der Niederschläge in Form von Schnee und Bodeneis der Übersprung in der Regel inaktiv.



Abb. 10 Karstwassermarkierungsversuch im Tennengebirge im Herbst 1977. — Einspreisung von in Wasser gelöstem Farbstoff Rhodamin B in einen kleinen Karstschant nördlich der Pitschenberg-Lacke.



Abb. 11 Eisriesenwelt — Eisteil „Wimur“. — In dieser dynamischen Einshöhle erinnern die Eiszapfen im Vordergrund an Tropfstein-Stalaktiten.



Abb. 12 Eisriesenwelt. — Blick aus dem Höhleneingang nach Süden über den Achselkopf (mit Felscharte „Beißzange“), der als Verebnungsrest eines in das mittlere Altpliozän zu stellenden Hochtalbodens der Salzach anzusehen ist, in das heutige Salzachtal im Bereich der Pongauer Schieferalpen zu den Hohen Tauern im Bildhintergrund.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt](#)

Jahr/Year: 1980

Band/Volume: [45_1980](#)

Autor(en)/Author(s): Toussaint Benedikt

Artikel/Article: [Der Karstformenschatz des Tennengebirges Schützenswerte Wunder der Natur 155-179](#)