Untersuchungen über die Entstehung einiger Höhlen im Säntisgebirge

Autor(en): **Bächler, Heinz**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bericht über die Tätigkeit der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft**

Band (Jahr): **71 (1942-1944)**

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-832846

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Untersuchungen über die Entstehung einiger Höhlen im Säntisgebirge

Von *Heinz Bächler*

Inhalt

I. Kapitel: Beschreibung der untersuchten Höhlen 69–83
II. Kapitel: Alte und neue Ansichten über die Entstehung von Karsthöhlen 83–94
III. Kapitel: Die Entstehung der Höhlen im mittleren Säntisgebirge 94
A. Allgemeines über die Bruchdislokationen im Säntisgebirge, ihre Entstehung und ihre Beziehungen zum Faltenbau 94–105
B. Die Entstehung der primären Hohlräume. Die Beziehungen zwischen Bruchdislokation und Höhlenbildung 105–115
C. Die Erweiterung der primären Hohlräume zu Höhlen 115
1. Erosion 116–120
2. Korrosion 120–128
3. Verwitterung und Deckenbrüche 128–140
Zusammenfassung 140
Literaturverzeichnis 141–143

Vorwort

Das Thema der von der Schläflistiftung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft für das Jahr 1935 ausgeschriebenen Preisfrage lautete: «Neue Untersuchungen über die Entstehung von Höhlen und Höhlensedimenten.» Die Aufgabe war folgendermaßen umschrieben: «An einem oder mehreren Beispielen von Höhlen im Jura oder in den Kalkalpen sind an Hand genauer Plan- und Profilaufnahmen neue Untersuchungen anzustellen über die Bedingungen, unter welchen Höhlen entstehen, über die Beziehungen der Höhlen zum geologischen Bau, über die Bildung und stratigraphische Gliederung von Höhlensedimenten, über die Möglichkeit, das geologische Alter von Höhlensedimenten zu präzisieren.»

Die vorliegende Abhandlung stellt nur den ersten, die Entstehung der Höhlen*räume* betreffenden Teil der mit dem Doppelpreis ausgezeichneten Lösung dar. Der zweite, welcher die Höhlen*sedimente* behandelt, wurde von meinem Vater verfaßt. Der Inhalt jenes zweiten Teils ist in etwas umgearbeiteter Form in der Monographie über das alpine Paläolithikum bereits 1940 gedruckt worden. Diese und einige andere erst nach der Einreichung des Manuskripts erschienene Veröffentlichungen führten zu verschiedenen – inhaltlich unwesentlichen – Änderungen am ursprünglichen Text des ersten Teils. Besonders wurden alle jene Stellen gekürzt oder gestrichen, bei denen durch einen Literaturhinweis eine Wiederholung vermieden werden konnte.

Der St.Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, vorab deren Präsidenten, Herrn Realschulvorsteher F.Saxer, dankt der Verfasser herzlich für das Anerbieten, diesen Beitrag zur Kenntnis der Säntishöhlen in ihr Jahrbuch aufzunehmen.

I. Kapitel: **Beschreibung der untersuchten Höhlen**

Dem vorliegenden Beitrag zur Frage nach der Entstehung von Höhlen im Kalkgestein liegen Beobachtungen an einigen Höhlen des Säntisgebirges zugrunde. Das I. Kapitel gibt zunächst eine Beschreibung der untersuchten Höhlen. Es wurde darauf geachtet, dabei nur das tatsächlich Beobachtbare festzuhalten, nicht zugleich schon zu erklären. Begriffe, in denen gewollt oder ungewollt schon eine Erklärung liegt, sind nach Möglichkeit vermieden. Dieses Vorgehen scheint deshalb angebracht zu sein, weil man in der Höhlenliteratur nicht selten Beschreibungen findet, deren Verfasser mit vorgefaßten Lehrmeinungen zu Werke gehen und das Beobachtete von Anfang an als Auswirkung der von ihnen angenommenen höhlenbildenden Kräfte darstellen.

Die in diesem Kapitel gegebene Beschreibung der Höhlen berücksichtigt jeweils folgende Gesichtspunkte:

1. topographische Lage;
2. Lage in bezug auf die Stratigraphie und Tektonik des Gebirges;
3. Topographie und Morphologie des Höhlenraums (Raumgestaltung, Kleinformen an Wänden, Decke und Boden);

4. Hydrographisches (Höhlenbäche, Tropfstellen).

Bei den Gradangaben handelt es sich durchwegs um nicht korrigierte Kompaßablesungen. – Wo die Bezeichnungen «vorn» und «hinten», «links» und «rechts» gebraucht werden, verstehen sie sich stets vom in die Höhle Eintretenden aus. – Bei der Bezeichnung einzelner Antiklinalen des Säntisgebirges ist die von ALB. HEIM (Lit. 14) eingeführte Numerierung verwendet.

1. Wildkirchli-Rees (Tafel I)

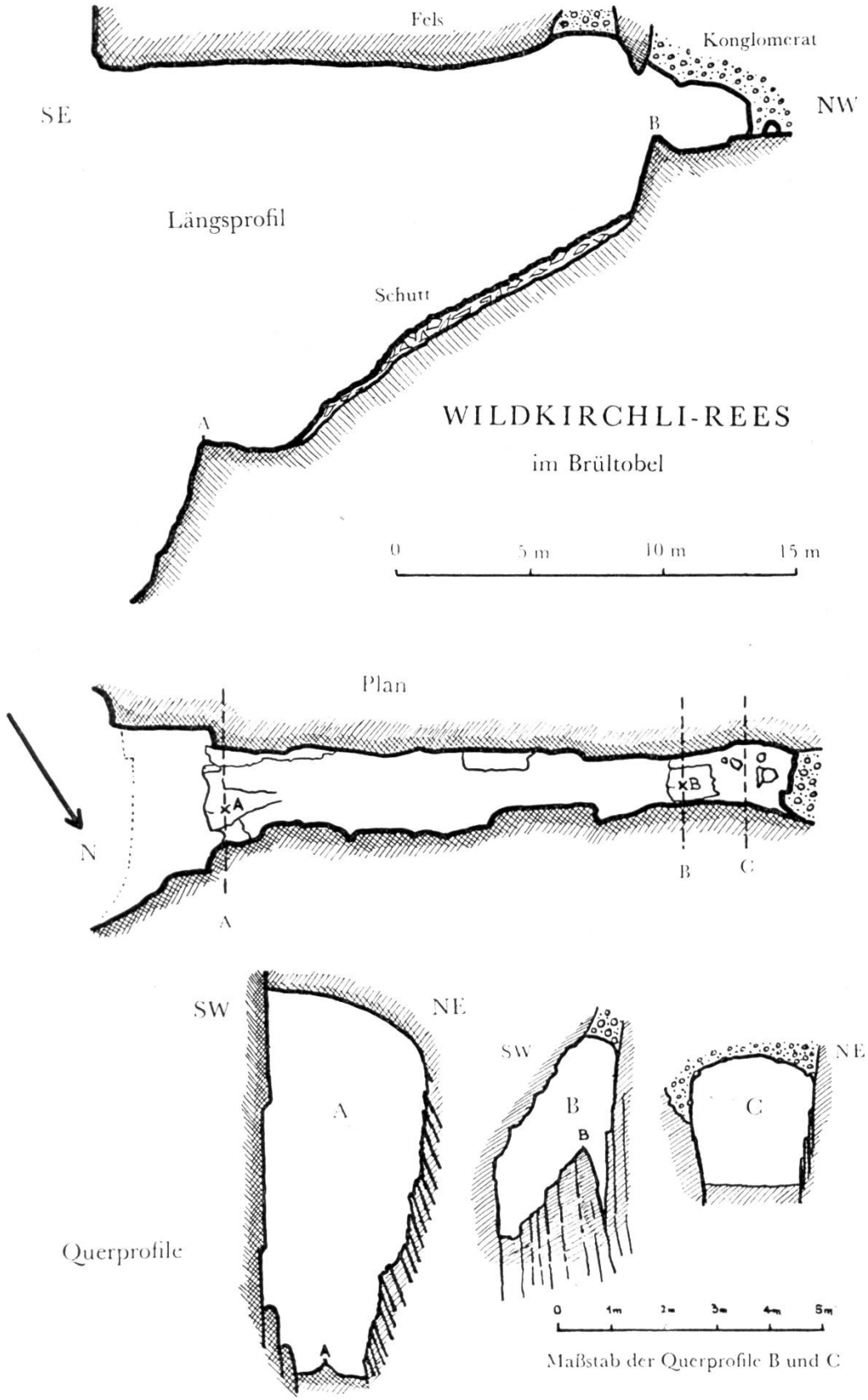
Nachdem man, von Brülisau her kommend, die drei Hütten im Brültobel erreicht hat, geht man auf dem Weg zum Plattenbödeli noch etwa 180 m weiter talaufwärts. Dann steht man bei etwa 1150 m am Fuße einer langen, ziemlich schmalen Runse, die sich, beiderseits von Wald eingesäumt, in nordwestlicher Richtung steil zu der Schrattenkalkwand hinaufzieht, in welcher der bewaldete Abhang des Alpsiegels ins Brültobel abfällt. Da, wo die Runse die Felswand erreicht, hat diese eine etwas geringere Höhe als weiter talaufwärts; auch ist ihr Verlauf nicht mehr so ungestört wie dort, sondern sie bildet gerade an jener Stelle einen einspringenden Winkel. Im Scheitel dieses Winkels, genau in der Fortsetzung der Runse, liegt das große Höhlentor. Die Höhe der Felswand mißt hier schätzungsweise 20 m, die Höhe des Höhleneinganges 15 m, die Mächtigkeit des Höhlendaches zuvorderst etwa 5 m. Das obere Ende der Schrattenkalkwand geht in den abschüssigen, bewaldeten Alpsiegel-Abhang über; einzig gerade über der Höhle befindet sich eine kleine, nach oben spitz zulaufende steile Wiese. Irgendwelche Spuren von Erosion (Eintiefung eines Bachbettes) sind dort keine zu bemerken.

Am Höhlentor fällt der glatte senkrechte Riß auf, der – sozusagen als Fortsetzung der westlichen Höhlenwand – das Felsdach durchsetzt.

Die Höhendifferenz vom Brültobelweg bis zum Höhleneingang beträgt gegen 130 m. Vom oberen Ende der erwähnten Runse, wo aus dem Riß heraus meistens Wasser herabtropft, muß man (bei Punkt A des Planes) noch eine kleine Bastion aus Sturzblöcken und anstehender Brekzie erklimmen, bis man richtig unter Dach ist.

Die Höhle ist am Eingang gegen 15 m hoch; nach hinten wird sie, weil der Boden ziemlich stark ansteigt, die Decke aber stets auf gleicher Höhe bleibt, immer niedriger. Die Breite des Hohlraums hingegen nimmt nach hinten nur wenig ab, von etwa 5 m am Eingang auf rund 2½ m am Ende. Seine Tiefe beträgt etwa 25 m. Die Längsachse verläuft in der Richtung N 60° W; die Höhle ist nach SE geöffnet. Der Boden steigt nach hinten zunächst ziemlich gleichmäßig an; er ist von eckigen Verwitterungstrümmern bedeckt. In einer Entfernung von 18½ m vom kleinen Felskopf unter dem Eingang steht man (bei Punkt B) vor einem über 2 m hohen Wändchen aus stark zerklüfteter Brekzie. Hinter diesem Hindernis ist die Höhle noch 4 m lang, dann hört sie auf, ohne in eine Spalte auszulaufen. Der Boden ist hier hinten flach und nur noch 2½ m von der Decke entfernt.

Wie man bereits am Außentor sieht, folgt die Dislokationsfläche einigermaßen der südwestlichen Seitenwand der Höhle. Man kann nicht sagen, diese Höhlenwand werde von der Kluftfläche gebildet; sie ist wohl im Vergleich zu der andern Seite verhältnis-


Fels
Konglomerat
SE
NW
B
Längsprofil
Schutt
A
WILDKIRCHLI-REES
im Brültobel
0
5 m
10 m
15 m
Plan
N
A
B
C
SW
NE
A
SW
B
B
NE
C
Querprofile
0
1m
2m
3m
4m
5m
Maßstab der Querprofile B und C

mäßig glatt und eben (Profil A), aber richtige Glättung ist nur an einer Stelle am Eingangstor zu erkennen; sonst ist die Wand abgewittert. Die Dislokationskluft ist vom Eingang höhleneinwärts noch etwa 12 m weit in der Decke zu verfolgen. Das Gestein der SW-Wand ist normaler, massiger Schrattenkalk. Ganz anders sieht die nordöstliche Seitenwand aus: Hier ist das Gestein stark tektonisch beansprucht worden. Der Kalk ist zerklüftet, kantig verwittert und überall von Kalzitadern durchzogen. Die Klüftungsflächen verlaufen besonders in der Richtung der Höhlenachse enggeschart, so daß das Gestein, in parallele Platten zerlegt, wie geschiefert erscheint. Im Wändchen 4 m vor dem Höhlenende und in der Bastion unter dem Eingang hat das Anstehende mehr den Charakter einer Kalzitbrekzie.

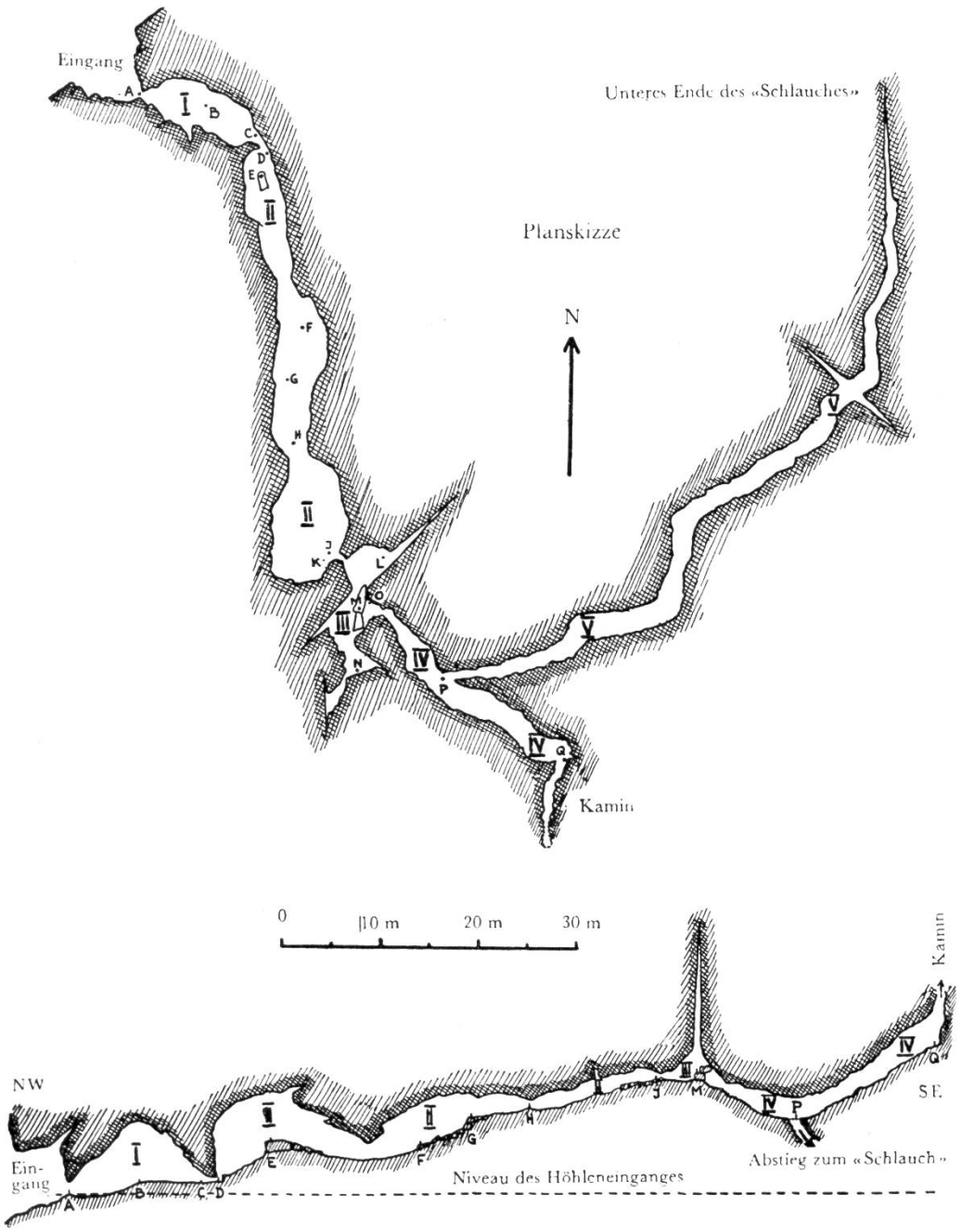
Etwas sehr Eigenartiges ist am hintern Ende der Höhle zu sehen: Die Decke (Profil C) und das hintere Abschlußwändchen bestehen nicht aus Kalk, Brekzie oder Sinter, sondern aus einem nicht sehr stark verfestigten Konglomerat. In einer feinsandigen Grundmasse liegen viele nicht sehr vollkommen gerundete Schrattenkalkgerölle verschiedener Größen (maximal 22 cm, am häufigsten 3–6 cm, selten unter 1 cm Durchmesser). Der Sand läßt sich mit dem Hammer leicht abkratzen; beim Weggeschabten haften die einzelnen, im Mikroskop ziemlich eckigen Körnchen nicht aneinander. Wenn man die Gerölle anschlägt, so fallen sie meist heraus und lassen runde Löcher zurück; manche sind durch Sinter so fest mit dem Sand verkittet, daß man sie entzweischlagen kann, ohne daß die im Sand steckende Hälfte herausfällt. Die Gerölle sind stellenweise von einer dünnen Sinterkruste umhüllt; auch an ihrer eigentlichen Oberfläche fühlen sie sich rauh an. Diese konglomeratartige Masse ist nicht auf die Decke und die Rückwand des Höhlenendes beschränkt; auch weiter vorn, etwas hinter der Mitte der Höhle, sieht man sie nochmals an einer Stelle auf etwa 3 m Länge in der Decke.

Tektonische Lage: Die Höhle liegt im Schrattenkalk des Südschenkels des Alpsiegel-Gewölbes. Die Dislokation, die durch die Höhle zieht, ist auf größere Distanz zu verfolgen. Auf der geologischen Säntiskarte ist sie eingezeichnet als die östlichste der vielen Querstörungen, die den Alpsiegelrücken zerschneiden.

2. *Furgglenhöhle* (Tafel II)

Die Furgglenhöhle befindet sich im nördlichen Abhang der Furgglenfirst–Häuser-Kette, geologisch gesprochen im N-Schenkel des VI. Säntisgewölbes. Sie liegt in ihrer ganzen Ausdehnung im Schrattenkalk. Geht man von der Bollenwies zu den Hütten der Alp Furgglen, von dort in gleicher Richtung auf der schwach ausgeprägten Geländeterrasse etwas über P.1479,4 hinaus und wendet dann den Blick dem Abhang der Häuserkette zu, so sieht man sofort das große, schief dreieckige Höhlentor. Es liegt etwa 100 m höher als der eben genannte Triangulationspunkt, dort, wo der steile Grashang in ein Schrattenkalk-Felswändchen übergeht.

Die Furgglenhöhle ist das größte und komplizierteste Höhlensystem, das bis heute aus dem Innern des Säntisgebirges bekannt wurde. Sie ist in fünf Teile gegliedert, welche E. Bächler (vgl. Lit. 3, S. 134), der im Sommer 1907 die inneren Räume entdeckte als Höhle I–V bezeichnet hat. Es handelt sich dabei nicht etwa um völlig getrennte Kammern, sondern um Teile desselben Höhlensystems, die allerdings nur durch enge Durchschlupfstellen miteinander verbunden sind. – Die beigegebene Planskizze (Tafel



Längsprofil durch die Höhlenteile I bis IV

FURGGLEN-HÖHLE

II) beruht auf einer im Oktober 1934 durch L. E. Schlatter und den Verfasser nur mit Kompaß und Meßband ausgeführten einfachen Vermessung; sie erhebt keinen Anspruch auf besondere Genauigkeit.

Das außen etwa 7 m breite und 5 m hohe Höhlentor schaut nach NW; es verengert sich rasch zum eigentlichen Eingang (Fußhöhe 1575 m), einer ziemlich schmalen Öffnung, durch die man in die geräumige kuppelförmige Höhle I gelangt. Deren Länge

beträgt 13 m, die Längsachse verläuft von WNW nach ESE; die Breite beträgt an der weitesten Stelle 5,5 m, die größte Höhe beläuft sich schätzungsweise auf 7 m. Der Boden steigt nach hinten zunächst langsam an, hinten ist er horizontal. Hinten verengert sich die Höhle zu einem schmalen, nur 60 cm hohen Durchschlupf, durch den man auf allen vieren zur Höhle II durchkriechen muß, was um so unangenehmer ist, als es gerade an dieser Stelle oft stark tropft.

Höhle II hat die Gestalt eines mehr oder weniger geraden, langgestreckten Tunnels von nach Größe und Form stark wechselndem Querschnitt; nach innen steigt sie meist stärker oder schwächer an. Ihre Gesamtlänge beträgt etwas über 45 m; die Achse verläuft im Mittel N 10° W. Wenn man das enge Loch zwischen I und II passiert hat, steht man an der tiefsten Stelle eines ziemlich hohen Raumes. Der Boden steigt zunächst um etwa 3 m steil an bis zu einem großen Sturzblock (Punkt E). Über diesem wölbt sich die Decke noch 4–5 m hoch. Bis hieher findet man im Winter und Frühling Eisbildungen, und dementsprechend sind Decke und Wände vom Eingang bis zu dieser Stelle überall kantig verwittert, währenddem weiter innen sanftgerundete Formen vorwiegen; auch die Sinterbildung an den Wänden tritt erst von hier an häufiger auf. – Vom großen Sturzblock weg verläuft der Boden eine Strecke weit horizontal, die Decke hingegen senkt sich langsam, steigt aber nachher wieder an. Vor F verläuft der Boden zunächst schwach bis G, dann steil aufwärts. Er ist hier mit vielen großen und kleinen Blöcken bedeckt, die bei G wie zu einer Bastion aufeinandergetürmt sind. Der Boden ist viel stärker angestiegen als die Decke: Von G bis H ist die Höhle nur noch etwa mannshoch. Hinter der engen Stelle bei H verliert sie ihren tunnelförmigen Charakter. Sie dehnt sich mehr in die Breite aus und wird nach hinten immer niedriger. Der Boden dieses hintersten Teiles der Höhle II ist ein großes Blocktrümmerfeld; die Decke ist hier stark zerklüftet.

Der Eingang zur Höhle III liegt etwas versteckt in der östlichen Wand des hintern Teiles von II. Er ist nur 1 m breit und 50 cm hoch. Sobald man sich dort durchgezwängt hat, steht man in einem im Verhältnis zu seiner erstaunlichen Höhe schmalen, im Grundriß unregelmäßigen Raum, der Höhle III. Wenn man sie näher betrachtet, besonders bei genauerer Beobachtung der Decke, sieht man bald, daß sich hier zwei hohe Klüfte kreuzen. Die eine, die man beim Eintritt in diesen Höhlenteil allein erkennt, steht senkrecht und streicht genau von NE nach SW. Sie ist schätzungsweise 18 m hoch und auf etwa 15 m Länge begehbar; aus der Höhe tropft beständig reichlich Wasser. Nach NE setzt sie sich in eine enge, unpassierbare Spalte fort. – Die zweite, weniger scharf ausgeprägte Kluft schneidet die erstgenannte beinahe unter einem rechten Winkel; sie bildet die südliche Hälfte des Raumes. Ihr Streichen ist N 60° W; sie fällt steil nach SE. – Vom südlichsten Punkt der Höhle III aus kann man, einen sehr engen, schwach ansteigenden Gang durchkriechend, in eine kleine Nebenhöhle gelangen.

In der Mitte der Höhle III liegen große, von dicken Kalzitadern durchzogene Blöcke; sie versperren den Eingang zu Höhle IV. Man muß entweder unter ihnen hindurchschlüpfen oder über sie hinüberklettern, um dorthin zu gelangen. Höhle IV hat wieder die Gestalt eines unregelmäßig begrenzten Tunnels, der zunächst (bis P) auf 9,2 m Länge um etwa 5 m absinkt, von P nach Q in einem 17 m langen Gang stark aufsteigt. Das südöstliche Ende der Höhle IV (bei Q) ist hoch; es setzt sich in südlicher Richtung in einen steilen Kamin fort, in den man gegen 20 m weit hinaufklettern kann; er zieht noch weiter aufwärts, ist aber durch Blöcke verrammelt.

Vom tiefsten Punkt der Höhle IV (P) zweigt die V. Abteilung der Furgglenhöhle ab, der sogenannte Schlauch. Es ist ein meist 1–2 m breiter, meistens steil abwärts führender Gang von insgesamt 95 m Länge. Zuunterst läuft er in eine schmale, schräg stehende Spalte aus, in der man sich zur Not noch 12 m weit durchzwängen kann, die dann aber blind endigt. Der Schlauch hat einen schwach winkligen Verlauf, im ganzen biegt er aus der anfänglichen W–E- allmählich in die N–S-Richtung um. Zu Beginn des untersten Drittels kreuzt er eine hohe Kluft. Der Eingang zum Schlauch liegt auf 1585 m Höhe, sein Ende auf 1545 m. Trotz dieses steilen Verlaufs ist er bei einiger Vorsicht gut zu begehen; nur an 2 Stellen muß man die Tritte und Griffe kennen, wenn man durchkommen will.

In hydrographischer Hinsicht bietet die Furgglenhöhle wenig Interessantes. Die ganze Wasserzirkulation beschränkt sich auf ein kleines Bächlein unter dem Bodenschutt der Höhle V und zahlreiche Tropfstellen.

3. Zwei kleinere Höhlen ob der Bollenwies

Wenn man von der Bollenwies zur Saxerlücke hinaufsteigt, so sieht man von der Stelle aus, wo sich der Fußweg das erste Mal in einer Kehre gegen den östlichen Abhang des Tälchens wendet, in einem orographisch nur wenig hervortretenden Einschnitt ein hohes, schmales Höhlentor. Es liegt schätzungsweise 20 m höher als die genannte Kehre des Weges, auf etwa 1605 m.

Morphologisch bietet diese Höhle nicht viel Eigenartiges. Sie besteht aus einem einzigen langgestreckten, nach NW geöffneten Raum; ihre Längsachse hat die Richtung N 40° W. Sie ist nur 17½ m lang und hat auf dieser ganzen Länge denselben, im Verhältnis zu seiner erheblichen Höhe (6–7 m) schmalen (2 m), etwas schräg stehenden Querschnitt. Der Boden steigt im Vorderteil langsam an, hinten verläuft er horizontal.

Sehr interessant hingegen sind die geologischen Verhältnisse dieser Stelle. Man steht hier im Schrattenkalk des Nordschenkels des Säntisgewölbes VI, hart vor dessen Abscherung durch den Sax–Schwendi-Bruch. In der Höhle selbst jedoch vermag man kaum ein Stück normalen Schrattenkalks zu finden: Ihre Wände bestehen fast überall aus einer gelblichen Brekzie aus groben Kalzitkristallen. An tiefer ausgewitterten Stellen geht diese Brekzie allmählich in Schrattenkalk über, der aber überall noch von einige Millimeter dicken Kalzitadern durchzogen ist. – Betrachtet man den Boden der Höhle, wo er nicht von Verwitterungsschutt gebildet ist, ihre Decke und ihr hinteres Ende, so fällt sofort auf, daß die 2–3 m mächtige Brekzie von einem scharf ausgeprägten, stellenweise etwas klaffenden Riß, einer Verwerfung, durchsetzt wird. Man staunt darüber, daß die Verwerfungsfläche so eben ist, daß der Riß einen so schnurgeraden Verlauf hat. Man hat es hier offenbar mit einer im Alpstein nicht allzu seltenen Erscheinung zu tun, deren schönstes Beispiel M. JEROSCH auf S. 241 und 171 der Säntismonographie von ALB. HEIM (Lit. 14) beschrieben hat: Die Kluftfüllungsbrekzie eines Querbruchs ist infolge eines allerletzten Nachrückens der Bruchflügel durch eine ganz ebene, nur wenige Millimeter klaffende Spalte nachträglich zerrissen worden. – Aus dem Fehlen eindeutig gerichteter Rutschstreifen auf der Scherfläche muß man bei dieser Höhle schließen, daß der Betrag der gegenseitigen Verschiebung beider Bruchflügel minim war.

Auf derselben Verwerfung liegt einige Meter weiter oben noch eine zweite Höhle, in der die Verhältnisse der soeben beschriebenen untern in etwas kleinerem Maßstab

genau wiederholt sind. Sie ist nur 8½ m lang und niedriger als die untere. In ihrer Decke kann man die die Kalzitbrekzie durchsetzende Dislokationsspalte aus der Nähe sehr schön beobachten. Ihr Streichen beträgt hier N 41° W (untere Höhle N 38° W); sie fällt etwas steiler: 83° nach SW.

4. *Alpeelhöhle* (Tafel III)

Die Alpeelhöhle liegt im obersten Teil der Alp Alpeel zwischen dem Amboß und dem Kirchli (dem westlichsten Teil der «Häuser»), auf der Rheintaler Seite der südöstlichsten Säntiskette. Vom P. 1818, der niedrigsten Stelle des Sattels zwischen Amboß und Häusern, geht man in östlicher Richtung, auf dem grasbewachsenen Abhang nur schwach absteigend, gegen 100 m weit auf den Westabsturz des Kirchli zu. Der Höhleneingang liegt auf etwa 1780 m, beim ersten t des Wortes «Sa*t*tel», ganz nahe beim obern Ende des schmalen, von der Häuser-Wand isolierten Schrattenkalkrückens, der, in der Richtung des größten Gefälles verlaufend, mit einer nur wenige Meter hohen Steilwand den obersten Teil der Alp Alpeel nach E begrenzt.

Die Gestalt der Höhle ist sehr einfach: ein unverzweigter, fast gerader und beinahe horizontaler Gang von insgesamt 51 m Länge. Ein außen weites, nach innen sich verengerndes Höhlentor, wie man es sonst bei den meisten Höhlen findet, ist hier nicht ausgebildet; wenn man von dem kleinen, wohl künstlich etwas ausgeebneten Vorplatz aus die Höhle betritt, muß man sich gleich von Anfang an etwas bücken. Form und Dimensionen des Querschnittes bleiben vom Eingang an 13 m weit ziemlich konstant: Die Höhle ist etwas weniger als mannshoch und etwa doppelt so breit; die Decke bildet ein flaches Gewölbe. Hinter Meter 13 steigt das Höhlendach rasch um etwa 1 m an; bis zu Meter 26 beträgt die Höhe des Hohlraumes im Mittel 2½ m, seine Breite 2½ bis 3 m. Zwischen Meter 16 und Meter 26 ist die westliche Höhlenwand durch dicke Sinterüberzüge verkleidet, denen stellenweise größere, schmutziggraue Stalagmiten aufgesetzt sind. Hinter Meter 26 (immer vom Eingang aus gemessen) wird die Höhle rasch niedriger und etwas schmaler. Bei Meter 35 beträgt der Abstand zwischen der Decke und dem ebenen, lehmigen Boden nur noch 35 cm, so daß man nur kriechend in den hinteren Teil gelangen kann. Zuhinterst weitet sich die Höhle in horizontaler Richtung wieder aus; die Höhe dieser hintersten Partie jedoch übersteigt nirgends 1,5 m. Dieses flache, hintere Ende liegt östlich von der allgemeinen Längsachse; einzig eine schrägstehende hohe Spalte verläuft in der gleichen Richtung wie die vordern Höhlenteile.

Die Alpeelhöhle liegt ganz in den Drusbergschichten, im obersten Teil des Südschenkels des Säntisgewölbes VI. Der Eingang liegt stratigraphisch höher als das Ende der Höhle, nur wenige Meter unter der Basis des Schrattenkalkes. Das in der Höhle anstehende Gestein ist ein bräunlich bis hellgrau anwitternder, innen schwarzgrauer, stark tonig riechender Mergelkalk. In der Umgebung des Eingangs sieht man die Schichten mit normalem Streichen steil nach SE einfallen; weiter oben am Hang gehen sie, der Gewölbeumbiegung entsprechend, allmählich in flachere Lage über. In der Höhle selbst und an deren Eingang ist von diesem normalen Streichen und Fallen der Schichten nichts zu sehen. Hier ist ihre Lage an eine sehr deutliche Scherfläche angepaßt, die den Mergel glatt durchsetzt. Ihr Streichen ist N 4° W, ihr Fallen 62° nach E.

ALPEEL-HÖHLE
Plan
N
Stalagmiten
Sinter
10 m
5 m
0
A
B
C
D
E
F
G
1
2
3
N
S
Längsprofil entlang der im Plan gestrichelten Linie
W
E
Querprofile
0 1 m 2 m 3 m 4 m 5 m
Dislokationsflächen

Das Vorhandensein einer solchen glatten Scherfläche in den gutgeschichteten und duktilen Drusbergmergeln ist erstaunlich, um so mehr, als sie nicht nur außen am Eingang sehr schön ausgebildet ist, sondern auch im Innern der Höhle an der Decke und der westlichen Seitenwand gut 15 m weit als scharfer Schnitt verfolgt werden kann. Sie hört dort schließlich auf, wird aber durch eine eng benachbarte Scherfläche abgelöst, die auf fast 25 m Länge (von Meter 12 bis Meter 37) aufgeschlossen ist; am schönsten ist sie sichtbar bei D, wo sie die Mitte der Deckenwölbung durchschneidet. Ihr Verlauf ist schnurgerade, ihr Streichen ebenfalls N 6° W, hingegen fällt sie steil gegen W. Von D an tritt westlich von dieser Verschiebungsfläche wieder eine zweite auf, die sich bis in die hintersten Partien der Höhle fortsetzt. Möglicherweise ist es die Fortsetzung derjenigen, die man vom Höhleneingang 12 m weit verfolgen kann, bis sie in die westliche Höhlenwand hineinläuft.

Leider ist es nicht gut möglich, diese Scherflächen auf dem Plan genau darzustellen: Würde man die Schnittlinie der schiefen Kluftflächen mit der auf- und absteigenden Höhlendecke auf die Ebene des Planes projizieren, so käme eine unregelmäßig geschlängelte Linie heraus, was einen ganz falschen Eindruck erwecken würde; in Wirklichkeit sind die Kluftflächen fast völlig eben; ihr Streichen und Fallen schwankt nur sehr wenig. Einige Querschnitte vermögen das Gesagte besser zu veranschaulichen.

5. *Teufelskirchli*

Die im Volksmund als «Tüfelschilchli» bekannte Höhle liegt in der ersten Felswand über dem Buchenwald südlich vom Seealpsee, in der Fortsetzung der Runse, welcher der untere Schrennenweg im Zickzack folgt. In der Schrattenkalkwand öffnet sich ein sehr großes, wohl 17 m hohes und unten 8 m breites Höhlentor, das in seiner Form an einen gotischen Bogen erinnert. Es ist auch aus größerer Entfernung gut sichtbar, z. B. vom Äscher und vom Zisler aus.

In seiner morphologischen Gestaltung und geologisch-tektonischen Lage zeigt das Teufelskirchli weitgehende Ähnlichkeit mit der Höhle Wildkirchli-Rees im Brültobel. Es ist wie jene nicht als eigentliche Höhle, sondern als Halbhöhle zu bezeichnen, weil es ebenfalls am Eingang hoch und breit ist und sich nach hinten trichterartig verengert. Auch hier steigt der Boden nach hinten gleichmäßig ziemlich stark an. Die Längsachse des Raumes verläuft von SSW nach NNE; das Höhlentor ist nach NNE geöffnet. Die Höhle ist etwa 25 m lang.

Auch diese große Halbhöhle liegt auf einer im Gebirgsbau bedeutenden Querdislokation. Schon bei einer Betrachtung des Höhlentores von außen sieht man, daß ein scharfer senkrechter Schnitt durch die Stirn des Felsdaches geht. Wenn man im Innern der Höhle steht, kann man den Verlauf der Scherfläche an der Decke über die ganze Länge der Höhle einwandfrei verfolgen. Sie durchschneidet den Fels schnurgerade. Sie streicht parallel der westlichen Seitenwand und steht ziemlich genau senkrecht. Die Dislokationsfläche (westliche Bruchkluftwand) ist nur noch in den obersten Partien der westlichen Höhlenwand erhalten; weiter unten ist die Wand zurückgewittert. Auch am Boden ist die Scherfläche an 2 Stellen, wo das Anstehende nicht von Schutt und Lehm bedeckt ist, sichtbar (Streichen N 15° E, Fallen 85° nach W). Zuhinterst läuft die Höhle auf der Dislokationsfläche in eine schmale, lehmerfüllte 2–15 cm breite Spalte aus. – Wie im Wildkirchli-Rees ist auch hier der Unterschied in der Gesteinsbeschaffenheit

zwischen Ost- und Westwand besonders im hintern Teil der Höhle sehr auffällig. Die Westwand erscheint sehr kompakt; Klüftung ist wohl an einigen Stellen zu erkennen, doch ist sie nur schwach ausgeprägt. Im Gegensatz dazu ist die Ostwand stark zerklüftet und unregelmäßig kantig und eckig verwittert; einzelne Gesteinspartien haften nur lose aneinander. Am hintersten Höhlenende kann man an Ostwand und Decke sehr schön ein regelmäßiges Umstreichen der senkrecht stehenden Klüfte in die Richtung der Hauptdislokation (parallel zur W-Wand) beobachten.

Die Höhle liegt im Schrattenkalk des etwa 30° S-fallenden S-Schenkels des Gewölbes IIb, im Nordfuß der Marwies. Obwohl die Querverschiebung am Abhang über der Höhle bei nassem Wetter einem kleinen Bächlein als Weg dient, trifft man Tropfstellen nur am Höhleneingang; der hintere Teil der Höhle ist das ganze Jahr vollständig trocken.

6. *Zigerloch* (Tafeln IV, V)

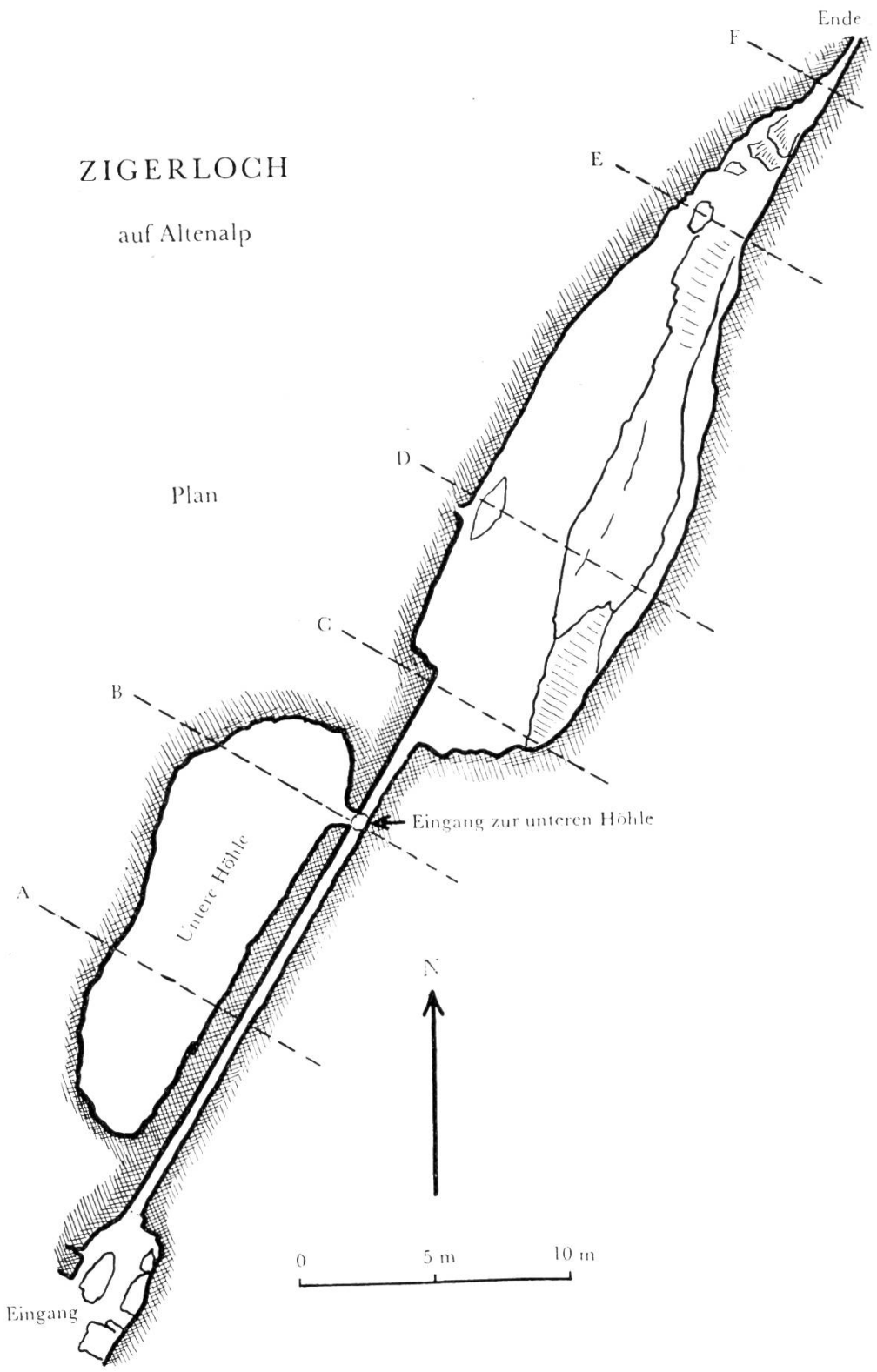
Das Zigerloch liegt in den Felsen nordöstlich der Hütten der Altenalp (Geißplatte). Von den Hütten aus geht man ein Stück weit auf dem Weg bergan, der zum Schäfler hinaufführt, bis dorthin, wo er sich den Felsen nähert, zweigt dort ab und folgt, auf der steilen Grashalde etwas aufwärtssteigend, der ostwärts verlaufenden Felswand. Im Winkel, den diese mit einer vorspringenden Felspartie bildet, klettert man einige Meter zwischen den großen, eingeklemmten Sturzblöcken hinauf und steht dann unmittelbar auf dem kleinen, felsüberdachten Vorplatz vor dem Eingang zur Höhle, einer Spalte von der Form eines schiefen, hohen und schmalen Dreiecks. Man steht hier auf etwa 1660 m.

Zu den eigentlichen Höhlenräumen gelangt man erst, wenn man ziemlich genau 20 m weit durch jene Spalte, die im Querschnitt ihre schmale Dreiecksform stets beibehält, sich durchgezwängt hat. Ihr Verlauf ist schnurgerade; sie führt mit N 30° E in den Berg hinein; das Höhlentor ist nach SSW exponiert. Die Spalte ist durchgehend 2,2–2,5 m hoch; im Querschnitt ist sie am Boden 40–60 cm breit, nach oben wird sie immer schmaler und läuft schließlich auf ihrer ganzen Länge in eine Kluftfläche aus.

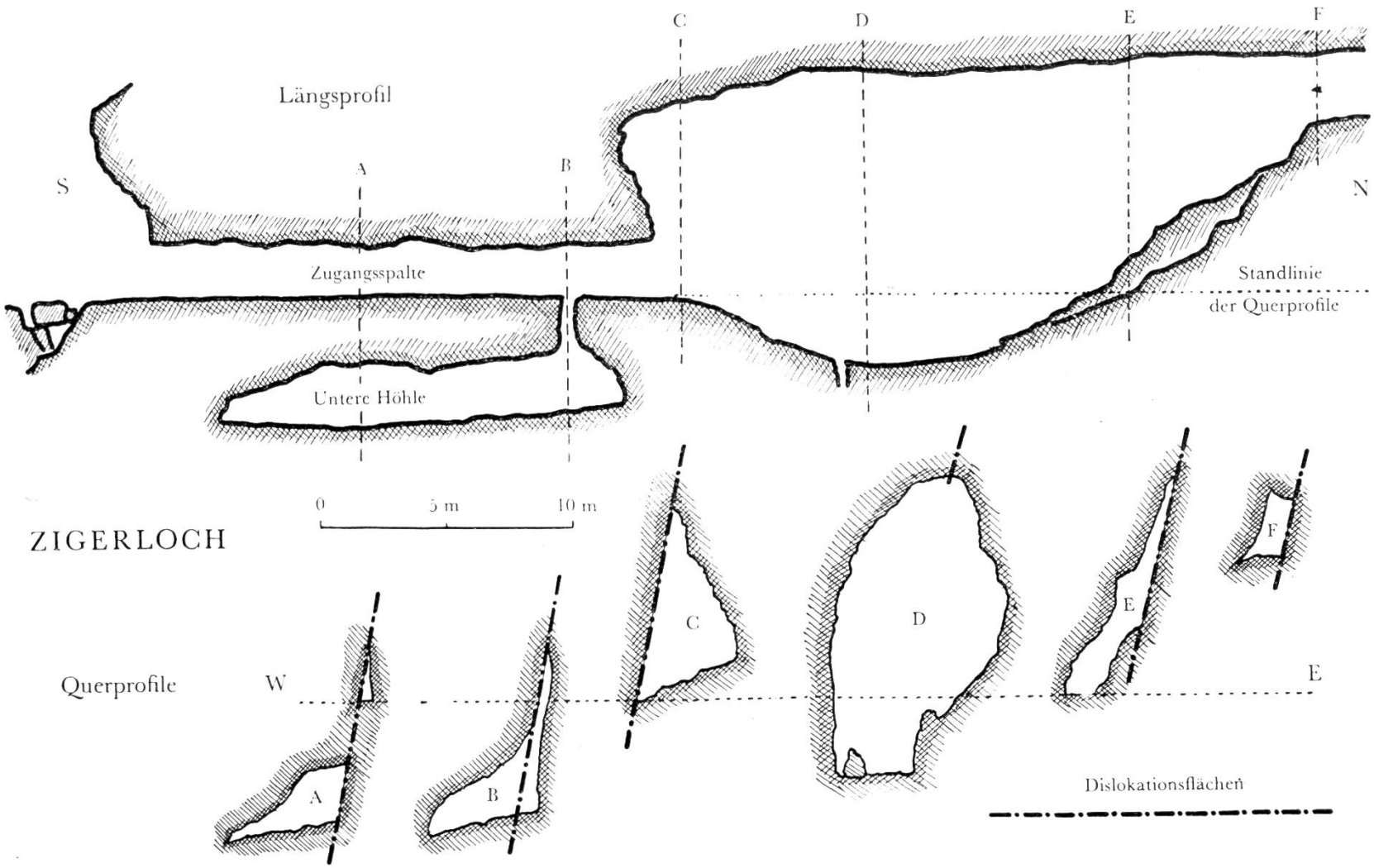
Etwas mehr als 16 m vom Eingang entfernt öffnet sich mitten im Boden dieser fast horizontalen Zugangsspalte ein steil zur Tiefe führendes Loch von etwa 40 cm Breite und 60 cm Länge. Es führt zu der untern Kammer, der die ganze Höhle den Namen «Zigerloch» verdankt: Diese *untere Höhle* ist nämlich von alters her bei den Sennen der Umgebung – in neuerer Zeit auch bei den Naturheilärzten von Appenzell A.Rh. – bekannt als Lagerstätte des als Volksheilmittel geschätzten «Bergzigers» (Montmilch, vgl. Lit. 3, S. 136). – Geht man von dem Loch aus noch etwa 3 m weiter bergeinwärts, so kommt man unvermutet in eine hohe und weite, langgestreckte Halle, die *obere Höhle*. Ihre Längsachse verläuft ebenfalls etwa N 30° E; die Länge dieses Raumes mißt etwa 28 m, seine größte Breite um 8 m, die größte Höhe schätzungsweise 12 m. Sein Boden senkt sich zunächst um etwa 3 m, verläuft an der tiefsten Stelle ein Stück weit horizontal und steigt nach hinten erst langsam, gegen das Ende der Höhle sehr steil an.

Verfolgen wir den Verlauf der *Dislokationsfläche*, auf der, wie wir bereits gesehen haben, schon die ganze 20 m lange Zugangsspalte liegt: Schon vor der Höhle draußen fällt einem sofort auf, daß der Fels, der den kleinen Vorplatz überdacht, von 2 parallelen Kluftflächen zerschnitten wird, deren westliche sich in die Höhle hinein fortsetzt.

IV



In der Zugangsspalte selbst wird häufig die westliche Wand direkt von der Scherfläche gebildet; die Westwand unterscheidet sich an jenen Stellen von der unregelmäßig buckligen und rauhen Ostwand durch ihre auffällige Glätte und Ebenheit. – An der Stelle, wo der schmale Zugang in die weite obere Höhle ausmündet, setzt sich der westliche


Längsprofil
S
N
A
B
C
D
E
F
Zugangsspalte
Untere Höhle
Standlinie
der Querprofile
0
5 m
10 m
ZIGERLOCH
Querprofile
W
E
Dislokationsflächen

Bruchflügel noch auf gut 2 m Länge fort. Er ist eben; deutlich sind horizontale Rutschstreifen sichtbar. Sein Streichen ist N 30° E; die Fläche fällt 74° nach W, bildet also eine überhängende Wand. Man kann diese sehr schön etwa 7 m hoch hinauf beobachten, bis sie in die Decke einschießt (Profil C). Dort, wo der Raum am weitesten ist, verläuft die Dislokation in der Decke weiter; erst am hintern Ende der Höhle ist sie wieder an einer Wandfläche sichtbar; hier hinten bildet sie aber nicht die westliche, sondern die östliche Seitenwand (Profile D–F). – Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß diese N 30° E streichende Dislokationsfläche mit der Raumgestaltung der Höhle in einem auffällig engen Zusammenhang steht.

Das bereits erwähnte enge Loch im Boden der Zugangsspalte führt – dem Verlauf der Dislokationskluft entsprechend – steil in die Tiefe. Nachdem man etwa 4½ m weit hinabgeklettert ist, steht man auf dem Boden einer geräumigen, langgestreckten Höhle, die ihre größte Ausdehnung (17,5 m) ebenfalls in der NNE-Richtung hat. Ihre größte Breite mißt 5,7 m, ihre mittlere Höhe 2–2½ m. Nach W sinkt der Boden etwas ab. Die Ostwand des Raumes wird stellenweise von der glatten Dislokationsfläche gebildet, auf der auch die Zugangsspalte liegt. Die Wände sind stellenweise sehr dick von schneeweißer Montmilch überzogen; auch am Boden zwischen den Sturzblöcken und selbst an der Decke findet man diesen weichen Belag.

Geologisch liegt das Zigerloch in dem vom Schäfler herabziehenden Schichtkomplex der schrattenkalkähnlichen Valanginienkalke, im Südschenkel des Säntisgewölbes I. – Die Querverschiebung, auf der die Höhle liegt, bildet sich in der äußern Oberflächenform der Umgebung nicht stark ab. Einzig die einspringende Nische, in der man zum Eingang hinaufklettert, ist ein äußeres Anzeichen für das Vorhandensein einer Dislokation. In den Wildheuplanken über der Höhle ist von einer der Verschiebung entsprechenden Eintiefung nichts zu sehen.

7. *Gartenalphöhle*

Die Gartenalphöhle liegt im Fuße der Felswand, die die Gartenalp nach Osten abschließt, etwa 50 m südlich von der Stelle, wo die Telephonleitung von der Ebenalp zum Schäfler den Westabsturz der Ebenalp quert. Vor das Höhlentor, direkt an die überhängende Felswand, ist eine kleine Sennhütte gebaut worden. Die Höhle wird während der Weidezeit im Sommer als ausgezeichneter, natürlicher Keller für Milch und Butter benutzt.

Die Höhle ist klein, im ganzen nur etwa 18 m lang, morphologisch aber ist sie ziemlich kompliziert. – Vom hintern Raum der Sennhütte aus führt zunächst ein horizontaler, 7½ m langer, 2½–3½ m breiter Gang von etwa 1 m maximaler Höhe in südöstlicher Richtung in den Berg hinein. Seine nordöstliche Seitenwand wird von einer glatten und geraden, überhängenden Schubfläche gebildet (Streichen N 50° W, Fallen 68° nach NE). Sie ist die Fortsetzung des überhängenden, etwas ausgebauchten Felswändchens, an das die Hütte angebaut ist. Nach SW senkt sich die Decke dieses Ganges schief zum Boden. In 7½ m Entfernung vom Eingang hebt sich die Decke unvermittelt zu einer engen, hohen Kuppel. Die Höhle scheint hier abgeschlossen zu sein; durch ein enges, unbequemes Loch am Fuße der hintern Höhlenwand kann man jedoch in ein hinteres Kämmerchen gelangen, welches ebenfalls etwa 9 m lang ist. Im Gegensatz zum vordern Höhlenteil, dessen von braunem, erdigem Lehm gebildeter Boden eben

ist, steigt diese hintere Partie ziemlich stark an. Links vor dem Ende des hohen, in südöstlicher Richtung aufwärts verlaufenden Ganges führt ein enger, runder Kamin senkrecht in die Decke hinauf. Durch kleine Seitenklüfte kann man da und dort noch ein wenig seitwärts oder abwärts vordringen, doch endigen sie überall in unpassierbare Spalten. Die Umrißformen dieses hintern Höhlenteiles sind ziemlich unregelmäßig; richtunggebende tektonische Klüfte sind hier keine zu beobachten. Das Gestein (Schrattenkalk) ist überall, an der Decke, den Wänden und am Boden, rauh und oft oberflächlich von kleinen flachen Näpfchen ausgehöhlt; der Kalk ist überall karrig angefressen.

Die kleine Verwerfungskluft, die die NE-Wand des untern Höhlenteiles bildet, verläuft parallel zu einer etwas größern Dislokationsfläche, die den an dieser Stelle flach nach NE einfallenden, meist ungeschichteten Schrattenkalk etwas weiter westlich durchzieht. –

Im III. Kapitel werden mehrfach auch Beobachtungen aus zwei weiteren Höhlen des mittleren Säntisgebirges angeführt, über welche bereits eingehende Veröffentlichungen vorliegen: Wildkirchli–Ebenalp-Höhle und Dürrschrennenhöhle.

Die Beschreibung des **Wildkirchli**-Höhlensystems und seiner geologisch-tektonischen Lage soll hier nicht wiederholt werden, da sie bereits in der Monographie von E. Bächler über das alpine Paläolithikum der Schweiz (Lit. 6, S. 11–16) enthalten ist. Auch die allgemeinverständliche Schrift über das Wildkirchli (Lit. 5) gibt auf S. 60f. eine Schilderung der Höhlenräume. An beiden Orten sind auch einige Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen verwertet.

Was die Flußspathöhle von **Dürrschrennen** anbetrifft, sei auf die ebenfalls von E. Bächler verfaßte Beschreibung (Lit. 2) verwiesen.

II. Kapitel: **Alte und neue Ansichten über die Entstehung von Karsthöhlen**

Einen historischen Überblick über die Höhlenbildungstheorien, die bis zum Jahre 1893 aufgestellt wurden, findet man in der «Höhlenkunde» von F. KRAUS (Lit. 19, Kap. 2).

Der Gedanke, daß die spülende und lösende Kraft des Wassers im Verein mit Rissen und Spalten der Erdrinde die Voraussetzung für die Entstehung unterirdischer Hohlräume sei, ist nach jener Darstellung – neben zwei andern Theorien (Hebung der Erdrinde durch unterirdisches Feuer mit nachfolgendem Verstürzen, Einsinken der innern Erdschichten) – zum erstenmal 1805 im Werke von ROSENMÜLLER und TILLESIUS «Beschreibung merkwürdiger Höhlen» (Lit. 26) niedergelegt. – 1836 hebt TH. VIRLET (Lit. 32) als Grundursachen der Existenz der Höhlen die Dislokationen und sukzessiven Erschütterungen der Erdkruste hervor. Diese Disloka-

tionen können schon allein Hohlräume bilden, oft aber wurden die Brüche durch Thermalwässer und Gasemanationen oder auch nur durch die Erosion des gewöhnlichen Wassers ausgeweitet. – K. C. v. LEONHARD (Lit. 23, Bd. 2, S. 303) nimmt 1838 ebenfalls an, daß «durch zahlreiche Spalten und Klüfte der erste Grund zur Grottenbildung gelegt werde». Die Ursache für das häufige Auftreten der Höhlen im Kalkgestein sieht er nicht nur ausschließlich in dessen größerer Löslichkeit, sondern vielmehr in seiner größeren Sprödigkeit, derzufolge die Kalkschichten auch durch geringe Bewegungen der Erdkruste viel stärker zerklüftet werden als andere Gesteine. Die damals oft ausgesprochene Meinung, die Höhlen seien *nur* eine Folge des langandauernden Einwirkens von kohlensäurehaltigem Wasser, erscheint v. Leonhard nicht ganz glaubwürdig; gewaltsame Umwälzungen und Erschütterungen der Erdrinde hält er für sehr wesentlich. – Auch Graf WURMBRAND (Lit. 33) vertritt 1871 die Ansicht, daß die Entstehung der Höhlen stets auf Klüfte zurückgeht, die durch tektonische Hebungen bedingt sind. Nach seiner Darstellung liegt z. B. das Luegloch im Peggauergebirge auf einer großen Verwerfung. Daneben sollen es vor allem Schichtklüfte sein, welche dem Wasser den Weg ins Bergesinnere ermöglichten.

Diese wenigen Angaben aus der ältern Höhlenliteratur mögen genügen, um zu zeigen, daß die Bedeutung der *Klüfte* von einzelnen schon sehr früh erkannt worden ist. Wenden wir uns gleich zu den zusammenfassenden Arbeiten aus den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts, auf die man noch stets zurückgreifen muß. Wir kommen damit zu Problemen und Streitfragen, die auch heute noch zur Diskussion stehen.

E. A. MARTEL, der eifrige Erforscher der französischen und anderer Höhlen, der – obwohl er von Beruf nicht Geologe war – aus eigener Anschauung in Höhlensachen wohl die größte Erfahrung besaß, hat seine Ansichten über die Entstehung der Höhlen im großen Werke «Les Abîmes» (Lit. 25, Kap. 31) niedergelegt. «Comme les abîmes, verticaux, les cavernes proprement dites, cavités étendues principalement dans le sens de la longueur, ont en général pour origine l'agrandissement des fissures préexistantes du sol, par l'action chimique et mécanique des eaux infiltrées. De nombreux géologues ont reconnu depuis longtemps cette influence des fentes, cassures et dislocations de la croûte terrestre, des litho-

clases en un mot» (S. 536). «Nous avons montré avec insistance, dans toutes nos descriptions de grottes, que les plus petites comme les plus grandes fissures ont été mises en œuvre pour l'expansion des cavernes, et que des failles mêmes ont pu jouer ce rôle . . . Quant à l'action souterraine des eaux d'infiltration, il y a eu controverse entre les partisans de la corrosion (usure chimique) et de l'érosion (usure mécanique)» (S. 536/37). Daß die Korrosion allein große Höhlen bilden kann und daß ihr zumeist die wichtigste Rolle bei der Ausweitung der Hohlräume zuzuschreiben ist, stellt MARTEL nicht in Frage. Hingegen hält er es für ganz unrichtig, die Arbeit der Erosion als nebensächlich zu betrachten: «L'érosion, c'est-à-dire l'enlèvement de matière résultant du frottement et du choc continus de l'eau en mouvement, et des corps qu'elle entraîne, est, sans doute possible, un des facteurs qui ont contribué à la formation des grottes . . . Il est irrationel de ne pas concéder aux ondes souterraines la puissance que l'on prête aux flots superficiels, alors surtout, qu'emprisonnée dans les étroitesses des cavernes, accumulée dans les hautes crevasses, et contrainte de passer par des fissures insuffisantes, l'eau doit acquérir, par sa pression hydrostatique, une force considérable qui multiplie les énergies destructives» (S. 537/38). Die Beweise für die erosive Tätigkeit des Wassers sind in großen Höhlen häufig anzutreffen (gerollte Geschiebe, geglättete Oberflächen, Riesentöpfe mit gerollten Steinen usw.). – Erosion und Korrosion sind die hauptsächlichsten Höhlenbildner im Kalkgestein. Daneben sind andere Kräfte von untergeordneter und nur lokaler Bedeutung (Ausströmen saurer Gase in der Nähe vulkanischer Herde, Bildung von Überdeckungshöhlen infolge von Verstürzen u. a. m.).

Die eingangs erwähnte «Höhlenkunde» von KRAUS (Lit. 19) teilt die Höhlen ein in: 1. ursprüngliche Höhlen; 2. später gebildete natürliche Höhlen; 3. künstliche Höhlen. Die zweite Gruppe, die uns hier allein interessiert, zerfällt wieder in Untergruppen, die nach ihrer Entstehungsart unterschieden werden:

a) Die Spaltenbildung durch Bruch

Die Spaltenbildung muß der Höhlenbildung vorangehen. Das Vorhandensein von Spalten, in die das Wasser eindringen kann, genügt nicht; das Wasser muß auch zirkulieren können, wenn es die Spalten erweitern soll. Von *Spaltenhöhlen* spricht man, wenn die Klüfte schon primär, bevor das Wasser dazu kam, sehr weit sind.

Im übrigen können auch aus den engsten Spalten mit der Zeit Höhlen entstehen, wenn nur die folgenden Bedingungen erfüllt sind: 1. die Möglichkeit der Wasserzirkulation; 2. die Lösungskraft des Infiltrationswassers; 3. die leichte Löslichkeit des Gesteins. – Die Klüfte können verschiedene Ursachen haben: Erdbebenklüfte, durch Horizontalschub entstandene Bruchspalten, Klüfte infolge Senkungen durch Unterwaschung, präexistente Absonderungsklüfte zwischen den Schichtlagen.

b) Die Erosion und die Korrosion

Sie haben den größten Anteil an der Höhlenbildung; meist wirken sie beide miteinander, selten eine allein.

c) Die Überdeckung

Überdeckung bereits vorhandener Spalten und Klammen durch Blöcke. Höhlen zwischen Bergsturztrümmern. Quelltuffhöhlen.

In seiner 1906 erschienenen «Höhlenkunde» (Lit. 18, Kap. 2) gibt W. v. KNEBEL einen kurzen Überblick über die Ursachen der Entstehung von Höhlen. Es ist besonders das Wasser, das die Höhlen bildet, durch mechanische und chemische Zerstörung des Gesteins. «Die Erosion sowohl als auch die Korrosion – beide Kräfte setzen, wie leicht einzusehen ist, stets an den Stellen im Gestein ein, welche den geringsten Widerstand bieten. Solche Stellen sind die das Gestein durchsetzenden Spalten und Klüfte. Von diesen aus wirkt das Wasser zerstörend – höhlenbildend» (S. 6). KNEBEL kommt an Hand eingehender Überlegungen zum Schluß, daß die Wirkungen der Erosion gegenüber denen der Korrosion ganz zurücktreten. «Als höhlen*bildende* Kraft kommt daher die Korrosion *allein* in Betracht. Und nur in manchen Fällen vermögen es erodierende Kräfte, sich mit der Wirkung der Korrosion zu summieren. Aber auch dies ist selten . . . Ja, Gesagtes kann unseres Erachtens noch um vieles verschärft ausgedrückt werden: Die Erosion ist nicht nur kein höhlenbildender Faktor, sondern sie ist im Gegenteil sogar ein die Höhlen ausfüllender – ein höhlenvernichtender» (S. 43). «Da wir gesehen haben, daß eine einzige Ursache es ist, welche die Höhlen bildet, nämlich die chemische Kraft des Wassers, die Korrosion, so sollte man erwarten, daß ihr Produkt, die Höhlen, stets gleichartig gestaltet seien. In gewissem Sinne trifft das auch zu. Verschiedene morphologische Eigentümlichkeiten kehren dem Grundsatze ‚Gleiche Ursachen, gleiche Wirkungen' gemäß in nahezu allen Höhlen wieder. Aber nicht alle durch das

Wasser gebildeten Höhlen besitzen darum gleichartige Formen. Denn die Form der Höhle wird durch den Weg bedingt, welchen das Wasser bei seiner unterirdischen Zirkulation benutzt . . . Die Formen der Höhlen müssen somit durch die Zerklüftungsverhältnisse bedingt sein; und nur da, wo diese sich gleichen, schafft die Korrosion gleichartige Höhlen» (S. 45/46).

KNEBEL (Lit. 18, S. 48/49) unterscheidet folgende morphologische Typen:

I. Sickerwasserhöhlen

a) Spaltenhöhlen: meist wenig breit; aus der Erweiterung großer Spalten entstanden, auf denen das Wasser rasch zur Tiefe rieselt.

b) Zerklüftungshöhlen: weite Höhlen, die aus mehreren engen Spalten durch Auflösen des dazwischenliegenden Gesteins sich gebildet haben.

c) Naturschächte: senkrechte Schächte, hervorgegangen aus Rissen, welche der unmittelbar vertikalen Versickerung des Wassers besonders günstig waren.

II. Flußwasserhöhlen

a) Höhlenflußbetten	Kanalartig gestreckte Höhlen,
b) ehemalige Höhlenflußbetten	relativ wenig hoch und breit, dafür oft sehr lang.

G. KYRLE, der führende österreichische Speläologe, verwirft es (Lit. 20, S. 32), schlechterdings von Höhlenbildung zu sprechen; er unterscheidet in bezug auf die Entwicklung der Karsthöhlenräume scharf 4 Phasen, nämlich 1. Raumentstehung, 2. Raumerweiterung, 3. Raumerfüllung, 4. Raumverfall.

Die *Raumentstehung* umfaßt «diejenigen Vorgänge, welche, abgesehen von der rein tektonischen Vorbereitung, im geschlossenen Gefüge des Karstgesteins lokal begrenzte Massendefekte durch Korrosion hervorbringen, bevor es noch in diesen Teilen zur Bildung von Höhlenflüssen gekommen ist» (Lit. 20, S. 34). Raumschaffende Kräfte sind 1. die tektonische Vorbereitung, 2. die Korrosion. – Die Zerklüftungen weisen dem Wasser die Wege, auf denen es in die Tiefe dringen und das Gestein lösen kann. Die Art der Durchklüftung des Gesteins ist sowohl im Stadium der Raumentstehung als auch in dem der Raumerweiterung von ausschlaggebendem Einfluß auf die Morphologie der werdenden Hohlräume (es entstehen entweder Bruchfugenhöhlenräume oder Zerklüftungshöhlenräume; die Defi-

nition dieser Begriffe folgt weiter unten). – Neben Zerklüftungen sind auch noch Unterschiede in der Löslichkeit der verschiedenen Gesteinsschichten von Bedeutung; auch die weniger wasserfesten Schichten weisen gewissermaßen dem Wasser den Weg (Schichtfugenhöhlenräume, Lit. 20, S. 34/35).

«Unter *Raumerweiterung* haben wir alle diejenigen Vorgänge zu verstehen, die zur Vergrößerung einer bereits bestehenden Evakuation oder Konvakuation führen» (Lit. 20, S. 46). Unter evakuationserweiternden Kräften sind besonders wichtig 1. die Erosion, 2. die Korrosion, 3. Verwitterung und Deckenbrüche.

«Solange auf ein mit Wasser gefülltes System von Bruch- und Schichtfugen von keiner Seite her ein Überdruck wirkt, stagnieren die Wässer und erweitern durch Korrosion die Hohlräume, die sie erfüllen. Durch Überdruck auf einer Seite kommt das vorher ruhende Wasser in Bewegung, es wird dadurch stets frisches, lösungsfähiges Wasser zugeführt; trotzdem die Strömung gelegentlich lockere Gesteinsstückchen und den Lösungsrückstand fortschwemmen, also erodierend wirken kann, überwiegt noch die Wirkung der Korrosion. Sobald das Höhlensystem weiter geworden ist, werden die Wässer nicht mehr langsam und unter Druck durchgepreßt, sondern sie können mit größerer Geschwindigkeit durchströmen. Von da an hat die Erosion (vorerst die Druck-, später dann die Gravitationserosion) den überwiegenden Anteil an der Raumerweiterung» (S. 46/47).

Es muß auffallen, daß bei dieser Einteilung die Grenze zwischen Raumentstehung und Raumerweiterung nicht scharf gezogen werden kann, sondern rein konventionell ist: Die erste Ausweitung der Klüfte durch die Korrosionswirkung des in ihnen angesammelten Wassers wird noch zur Raumentstehung gerechnet; wenn dann die Hohlräume einmal so weit geworden sind, daß in ihnen erst langsame und später rasche Fließbewegungen stattfinden können, so gehört dieser Prozeß zur Raumerweiterung. Wo da die Grenze zu ziehen ist, wird sowohl im einzelnen Fall wie auch in einer allgemein-schematischen Ableitung kaum zu entscheiden sein. Außerdem kommt es sicher nicht immer zur Ausbildung eines raschfließenden oder erodierenden Druckgerinnes oder Höhlenbaches, sondern es ist oft die Korrosion allein, die von Anfang bis zu Ende den Hohlraum schafft; in diesem Fall ist eine Trennung erst recht unmöglich.

Zwischen Raumentstehung und Raumerweiterung zu unterscheiden, ist entschieden notwendig. Eine naturgemäße und scharfe Abgrenzung beider Entwicklungsphasen ergibt sich aber nur zwischen

1. der *Anlage der Hohlräume* in Form von *tektonisch* bedingten offenen Dislokationsfugen, *ohne Mitbeteiligung des Wassers (Raumentstehung)* und

2. der Ausweitung dieser Urhohlräume durch die (zunächst nur korrodierende) Tätigkeit des Wassers *(Raumerweiterung)*.

Durch diese Art der Trennung wird es vermieden, den Anfang der Spaltenausweitung zur Raumentstehung und erst deren weitern Verlauf zur Raumerweiterung zu rechnen. Die Raumentstehung ist somit auf das Wirken tektonischer Kräfte zu beschränken, auf die Anlage von Klüften oder auch von größeren Hohlräumen.

Es wird hier vielleicht der Einwand gemacht werden, daß Klüfte und Dislokationsfugen durchaus nicht immer Hohlräume zu sein brauchen, sondern daß die beiden Kluftwände sehr dicht aneinanderschließen können, manchmal durch eine Brekzie miteinander verkittet sind. Man wäre somit, weil gar kein Hohlraum sich bildet, auch nicht berechtigt, von Raumentstehung zu sprechen. Dieser Einwand fällt aber dahin, seitdem O. LEHMANN (Lit. 22, § 11) nachgewiesen hat, daß Dislokationsfugen im Karstgestein von Anfang an eine gewisse Weite haben müssen, um überhaupt vom Wasser wirksam erweitert werden zu können, und daß primär enge Fugen nur in den seltensten Fällen (wenn sie nämlich «verbindend» zwischen größern Hohlräumen liegen) hydrographisch wegsam und wirksam werden können. Man kann demnach sagen: Wo kein primärer Hohlraum vorhanden ist, gibt es auch keine Korrosionshöhle.

Unsere Kritik an KYRLES Unterscheidung zwischen Raumentstehung und Raumerweiterung führt noch zu einer weitern Folgerung: Bei den «Schichtfugenhöhlenräumen» (die nur auf der wechselnden Widerstandsfähigkeit der verschiedenen Schichten beruhen und bei deren Bildung tektonisch bedingte Klüfte und Risse keine Rolle spielen) kann man von einer Raumentstehung, von einer Anlage des Hohlraumes, nicht reden. Nur wenn es vorkommen sollte, daß die Schicht«fugen» wenn auch nur stellenweise wirkliche, etwas klaffende Fugen darstellten, hätte hier der Begriff «Raumanlage» einen Sinn und eine Berechtigung. Das wird aber,

wo nicht tektonische Kräfte mitgespielt haben, kaum je der Fall sein.

KYRLE teilt die Karsthöhlenräume ein in 1. Bruchfugenhöhlenräume, 2. Zerklüftungshöhlenräume, 3. Schichtfugenhöhlenräume.

Die Gruppe der Bruchfugenhöhlenräume ist nicht ganz identisch mit der Gruppe Ia (Spaltenhöhlen) von KNEBEL: KYRLE versteht darunter nur «diejenigen Karsthöhlenräume, deren Entstehung bedingt ist durch das Vorhandensein von feinen, häufig nur kapillaren Spalten und Rissen, die das Gestein entweder einzeln oder vergesellschaftet parallel zueinander nach einer einheitlichen Richtung hin, und zwar nicht parallel zur Schichtung, durchziehen» (Lit. 20, S. 35). Die von KNEBEL auch zu den Spaltenräumen gerechneten Höhlen, die auf tektonisch geschaffene klaffende Spalten zurückgehen, zählt KYRLE nicht zu den Karsthöhlenräumen, sondern er stellt sie als Klufthöhlen in die Klasse der tektonischen Höhlen. – Die Bruchfugenhöhlenräume zeichnen sich aus durch linearen Grundriß und im ganzen Höhlenverlauf unverändert hohe und schlanke Querschnitte.

Unter Zerklüftungshöhlenräumen versteht KYRLE «diejenigen Karsthöhlenräume, deren Entstehung durch Zerklüftungszonen bedingt ist, die nicht parallel zur Schichtung des Gesteins verlaufen und bei denen die Gesteinsauflockerung durch zahlreiche Spalten und Risse, die in den verschiedensten Richtungen aufeinander und zueinander stehen, stattgefunden hat, so daß die Auflockerung nicht einen linearen, sondern einen ausgesprochen flächigen Charakter im Grundriß zeigt» (S. 40). In jugendlichen Stadien sind es meist labyrinthartig verzweigte Räume, in «ausgereiftem» Zustand größere Höhlen von flächigem Grundriß.

Schichtfugenhöhlenräume sind «diejenigen Karsthöhlenräume, bei denen die Schichtfugen der Korrosion den Weg vorgezeigt haben. Dabei ist es gleichgültig, ob es sich um eine Schichtfuge in einem und demselben Gestein oder um eine Fuge in der Kontaktzone (gemeint ist eine stratigraphische Grenze. Verf.) handelt» (S. 44).

Zu der alten Streitfrage, ob bei der Höhlenbildung die Erosion oder die Korrosion die Hauptrolle spiele, äußert sich KYRLE folgendermaßen: «Der Einfluß der Erosion ist auf die Gestaltung der Evakuationen gewöhnlich von ausschlaggebender Bedeutung. Von ihr hängt auch meist die Gestaltung der Evakuationen ab» (S. 46).

«Der Einfluß der Korrosion bei der Evakuationserweiterung ist in der Regel gering» (S. 55).

Es ist bereits oben kurz skizziert worden, wie man sich nach KYRLE den Wechsel der Fließweisen in einem wassererfüllten unterirdischen Hohlraumsystem zu denken hat, in dem allmählich die Spalten zu Höhlen erweitert werden: Sobald die Hohlräume eine gewisse Weite erreicht haben und das Wasser in stärkere Bewegung kommt, tritt die Arbeit der Korrosion hinter jener der Erosion zurück. Füllt das strömende Wasser den ganzen Querschnitt aus, so spricht man von Druckgerinnen; ihre Arbeit ist die Druckerosion oder Efforation. Nach KYRLE schleifen kontinuierliche Druckgerinne die Wandungen der durchflossenen Hohlräume allseitig glatt; es entstehen Efforationsgänge, die sich durch ein kurviges, geschlossenes Profil auszeichnen. Das schönste Beispiel dafür sind die sogenannten «Kanonenröhren». Die Wandungen periodischer Druckleitungen hingegen zeichnen sich aus durch nischen- oder schalenförmige Ausschliffe, sogenannte «Druckkolke». Verkleinert sich die Wassermenge oder vergrößert sich der durchflossene Querschnitt so, daß das Wasser den Querschnitt nicht mehr ganz auszufüllen vermag, so fließt das Wasser wie die oberirdischen Bach- und Flußläufe als Gravitationsgerinne; seine Wirkung nennt man Gravitationserosion. Sie erzeugt – wie in den Schluchten der Erdoberfläche – Gravitationskolke.

LEHMANN (Lit. 22) hat es unternommen, die Vorgänge, die bei der Wasserbewegung in Karsthöhlen eine Rolle spielen, möglichst genau nach physikalischen Gesetzen zu erfassen im Kapitel über «Das allgemeine Verhalten der Karstgewässer im Lichte der physikalisch erfaßten Bewegungsformen des Wassers» (§§ 24–45). Er kommt auf diesem Wege zu Ergebnissen, die für die Fragen der Höhlenentstehung und der Höhlenausweitung von größter Bedeutung sind. In den Kapiteln «Die Entwässerung der Karsthöhlen und der engern unterirdischen Hohlräume» (§§ 86–103) und «Die Entwässerung des Karstes zwischen der Oberfläche und den Höhlen und zwischen diesen selbst» (§§ 104–111) wird dann das theoretisch Abgeleitete mit den Beobachtungen in Höhlen in nähern Zusammenhang gebracht.

Daß die Gravitationserosion den Höhlenwänden die Spuren ihrer Tätigkeit aufprägt, wird von LEHMANN nicht in Abrede gestellt. Hingegen hält die «Druckerosion» einer genauern Prü-

fung nicht stand: Es wird klar gezeigt, daß die von BOCK (Lit. 8) aufgestellte (und von KYRLE übernommene) Efforationstheorie, die die Entstehung aller wohlgerundeten Höhlenquerschnitte der erosiven Tätigkeit des rasch fließenden Wassers zuschreibt, das einstmals die Höhle ganz ausfüllte und wirbellos durch sie hindurchschoß, nicht nur unbewiesen, sondern auch – wenn man mit physikalischen Überlegungen über Fließweisen und Fließgeschwindigkeiten an sie herantritt – unhaltbar ist. Die runden Querschnittsformen, die als «schlagende Beweise» für die Wirkung der Efforation hingestellt worden waren, sind mit viel größerer Wahrscheinlichkeit durch *Korrosion* entstanden.

Ein wichtiges Ergebnis der Untersuchungen LEHMANNS ist auch das, daß Druckleitung und (erosive) Efforationsarbeit nichts miteinander zu tun haben. Das Fehlen der Spuren von Wasserwirbeln an unversehrten Wandflächen spricht dafür, daß diese Höhlenteile einst nur ganz langsam durchflossen worden sind. Aber auch schwache und langsame Wirbel vermögen dem löslichen Gestein die Spuren ihrer Bewegungsart aufzuprägen; es können dadurch Hohlformen entstehen, die man bisher unbedenklich als reine Erosionsarbeit ansah (Kolke usw.). – Die alte Erkenntnis, daß die leichte Löslichkeit der Karstgesteine nur im Bunde mit der Durchklüftung zur Höhlenbildung führen könne, wird von LEHMANN ganz bedeutend präzisiert. Die Höhlenbildung kann nur von *den* Klüften ausgehen, die schon primär, d. h. durch die rein tektonische Vorbereitung, eine gewisse minimale Weite (etwa 2 mm) haben. Von Anfang an muß 1. ihre obere Öffnung so beschaffen sein, daß das Wasser hinein*fließt* (nicht nur kapillar angesogen wird: die Karsthydrographie braucht keine Saugwirkungen!), und 2. muß ihre Gestalt und Verbindung mit andern Klüften so sein, daß das hineingeflossene Wasser darin weder liegen bleibt noch verdunstet, sondern wieder ausfließt. – Durch Lösung erweitert werden nur Klüfte, in denen das Wasser in ungesättigter Lösung hindurchfließt; nur sie sind hydrographisch wegsam. Wegsame Klüfte können sich aus unwegsamen (mit bestimmten Ausnahmen) nicht entwickeln (im Gegensatz zu den kapillaren Gesteinsfugen an der Erdoberfläche, die durch die Wirkung von Wind, Spaltenfrost, Wurzeldruck usw. allmählich zu Kluftkarren erweitert und für das Wasser wegsam gemacht werden können). – An der Höhlenbildung können auch größere primäre Hohlräume be-

teiligt sein, deren Durchmesser nach Dezimetern zu bemessen ist; sie sind viel seltener als die engen Fugen, aber doch oft von ausschlaggebender Bedeutung.

Der mögliche «Entwicklungsgang» einer Höhle ist nach LEHMANN (Lit. 22, §§ 115–120) kurz zusammengefaßt etwa folgender: Rein tektonisch gebildete Urhohlräume werden vom Wasser erfüllt und zunächst unter Druck langsam laminar durchflossen, dabei durch Korrosion erweitert. Durch Vergrößerung des Querschnitts, besonders an den engen Stellen, erfolgt ein Wechsel in der Fließweise: Wo früher ständig Wasser war, erfolgt später zeitweilige Leerung und Wiederauffüllung; an die Stelle der einstigen Druckströmungen treten Durchflußseen mit schwankender Spiegellage, die vorerst noch durch vollerfüllte Siphons, später durch Sohlengerinne verbunden sind. Wo vorher das Wasser unter Druck laminar durchfloß, fließt es jetzt turbulent; zwischen beiden Fließweisen liegt wohl als Übergang die ruhige Drehbewegung des spiraligen Fließens. (Die verschiedenen Fließweisen prägen den Höhlenwänden die Spuren ihrer Bewegungseigenart auf.) Schließlich degeneriert die Karstentwässerung völlig: Man findet nur noch ruhige Seelein, kleine Bäche und Tropfwasser. Erst in diesen späten Stadien werden die Höhlen gangbar. Die vielen Tropfwasser- und Tropfsteinhöhlen sind alle einst anders durchflossen worden; ihre Entwässerung hat eine Störung erlitten durch die Eröffnung tieferer Kluft- und Höhlenbereiche.

Zusammenfassend können wir feststellen: Die Bedeutung der durch tektonische Kräfte gebildeten *Klüfte* für die Höhlenbildung im Innern relativ leicht löslicher Gesteine (Karstgesteine: Kalk, Dolomit, Gips) wird heute allgemein anerkannt. Erst die Zerklüftung eröffnet dem Oberflächenwasser den Weg in die Tiefe und ermöglicht eine unterirdische Wasserzirkulation. Die alte Erkenntnis, daß die Löslichkeit der Karstgesteine erst im Verein mit der Durchklüftung zur Höhlenbildung führen kann, wird von LEHMANN (Lit. 22) durch theoretische Überlegungen dahin präzisiert, daß im allgemeinen nur solche Klüfte vom Wasser als Weg benützt werden können, die von Anfang an so weit sind, daß das Wasser in ihnen fließen kann.

Man ist auch darüber einig, daß die Klüfte durch das unterirdisch zirkulierende *Wasser* zu Höhlen ausgeweitet worden sind.

Über die Frage, auf welche Weise dies geschehen ist oder noch geschieht, ob hauptsächlich durch Korrosion oder durch Erosion, ist auch heute die Diskussion noch offen. Die Ansicht, daß die Korrosion allein höhlenbildend wirken könne, ist besonders durch v. KNEBEL (1906) vertreten worden. Nach ihm (z. B. BOCK 1913, KYRLE 1923) wurde dann wieder der Korrosion nur die erste Ausweitung der Klüfte zugeschrieben; die in begehbaren Höhlen zu beobachtenden Querschnitts- und Oberflächenformen werden als Wirkungen der Erosion durch heftig strömende Wassermassen erklärt, die die unterirdischen Wege als Druck- oder Sohlengerinne durchflossen. LEHMANN (1932) hat gezeigt, daß die Lehre von der Druckerosion auf schwachen Füßen steht und aufgegeben werden muß; CRAMER (1928, Lit. 9) und LEHMANN haben ferner darauf hingewiesen, daß gewisse Oberflächenformen, die man bisher unbedenklich als Wirkungen der Erosion durch rasch und turbulent fließendes Wasser ansah, wahrscheinlich durch die korrosive Tätigkeit ganz langsamer Wirbel entstanden sind.

Wie der noch bestehende Widerstreit der Meinungen zeigt, ist das Studium der Höhlenentstehung noch ein dankbares Arbeitsfeld. *Ein* Weg zum Fortschritt der Erkenntnis ist der, in möglichst verschiedenen Gegenden neue Beobachtungen zu sammeln und an diesen die bestehenden Höhlenbildungstheorien zu prüfen. In Verbindung mit der Betrachtung der topographischen, geologischen und hydrographischen Verhältnisse des betreffenden Gebietes ergeben sich oft neue, wertvolle Folgerungen. – In diesem Sinne möchte das folgende Kapitel ein Beitrag zur Kenntnis der schweizerischen Höhlen sein.

III. Kapitel: **Die Entstehung der Höhlen im mittleren Säntisgebirge**

A. Allgemeines über die Bruchdislokationen im Säntisgebirge, ihre Entstehung und ihre Beziehungen zum Faltenbau

Die alte Erkenntnis, daß Höhlen im Kalkgestein dort entstanden, wo Klüfte dem Wasser einen Weg in die Tiefe ermöglichten, wird auch durch die Beobachtungen im Säntisgebirge vollauf bestätigt. Die Kenntnis der Bruchdislokationen, ihrer Entstehung und ihrer Beziehungen zum gesamten Bau des Gebirges

bildet daher die Grundlage jeder Untersuchung über die Entstehung der Höhlen. Aus diesem Grunde stellt der vorliegende Abschnitt die für unser Thema wesentlichen Angaben aus der geologischen Literatur zusammen. Die hier gegebene Darstellung stützt sich vor allem auf die große Monographie von ALBERT HEIM (Lit. 14), welche auch die sehr sorgfältige Spezialuntersuchung von MARIE JEROSCH über die Querbrüche enthält (S. 123–267). Daneben wurden die kurzgefaßten Übersichten von ARNOLD HEIM (Lit. 17) und die neueren Untersuchungen von L. E. SCHLATTER (Lit. 29) benützt.

Das Säntisgebirge besteht aus der zu Falten zusammengepreßten Stirn der oberen helvetischen Decke (Säntis–Churfirsten-Decke), die über Flysch bis auf das Molasse-Nagelfluh-Gebirge geschoben wurde. «Wie eine Flut der bewegten Erdrinde» stauten sich die wechsellagernden Kalk- und Mergelschichten der Kreide am Widerstand des Vorlandes zu großartigen, durchgehend ziemlich stark nach NNW überliegenden Falten. Eine ehemals 15,5 km breite Schichtplatte ist hier zu einem Faltenbüschel von 5,5 km Breite zusammengepreßt. Es wurden nur Kreideschichten auf die Flysch- und Molasseunterlage aufgeschoben, während alle älteren Sedimente weit zurückblieben; es sind besonders die Mergel der unteren Kreide, die als Gleithorizont diese Abscherung von der ehemaligen Unterlage und zu einem großen Teil auch den wundervollen Faltenbau ermöglichten. Im ganzen lassen sich zwölf größere Antiklinalen unterscheiden, die sich unter Ablösung zu sechs Gewölbezügen gruppieren. Die Faltenachsen streichen alle von WSW nach ENE.

Die Falten konnten sich jedoch nicht überall ungehindert ausbilden. Sie sind häufig mit Längsstörungen (Längsbrüchen einzelner Schenkel und Überschiebung ganzer Gewölbeköpfe) verknüpft und werden auch von zahlreichen Querbrüchen zerschnitten. Die Querbrüche treten besonders im mittleren und östlichen Säntisgebirge auf; in seinem westlichen Teil fehlen sie beinahe, am W-Ende sogar vollständig. Diese Dislokationen, die den Fels oft wie riesige Messerschnitte durchreißen, haben sehr verschiedene Ausmaße und dementsprechend auch wechselnde morphologische Bedeutung: Die größten durchsetzen ganze Ketten, die größte, der klassische *Sax–Schwendi-Bruch,* sogar das ganze Gebirge; die meisten aber verstellen nur einzelne Faltenschenkel, andere sind noch weit

geringfügiger. Die Verstellung der Bruchflügel beträgt maximal etwa 1500 m. Andrerseits gibt es aber auch Fälle, bei denen man den Betrag der Verschiebung nicht mehr messen, ja nicht einmal ihre Richtung feststellen kann. Auf der geologischen Spezialkarte 1 : 25000 wurden von M. JEROSCH nur die Brüche mit deutlich sichtbarer Verstellung der Bruchflügel eingetragen; es sind deren fast 400. Meist treten sie einzeln auf, manchmal jedoch sind einige mehr oder weniger parallele Brüche zu ganzen Büscheln geschart. Ihr Streichen ist im Mittel 0° bis N 10° E, verläuft also meistens nicht genau senkrecht zum Streichen der Faltenachsen. Sie fallen in der Regel sehr steil. Dem Sinne der Bewegung nach sind sowohl Querbrüche mit Horizontalverstellung (Verschiebungen) wie solche mit Vertikalverstellung (Verwerfungen) zu beobachten. Im allgemeinen handelt es sich um Bewegungen, bei denen die Horizontalkomponente bedeutend überwiegt: An Hunderten von Stellen kann man ein schwaches N-Fallen (im Mittel 12°) der Hohlkehlen und Rutschstreifen an den Bruchwänden beobachten. Es handelt sich also deutlich um Wirkungen des Horizontalschubs. Die Querstörungen waren wohl weitgehend bedingt durch das Relief des schon vor der Überschiebung erodierten Molasseuntergrundes, welches der Säntisdecke örtlich verschiedenen Widerstand entgegensetzte. Gegen das Ostende der Ketten stellen sich auch Brüche mit vorherrschend vertikaler Verstellung ein; entsprechend dem allgemeinen Sinken der Faltenachsen gegen die Rheintalsenke zu ist meist der Ostflügel abgesunken. E. BLUMER (Lit. 14) hat als erster die Ansicht geäußert, daß der Grund für dieses Verhalten darin zu suchen ist, daß die von S vorstoßende Säntisdecke in eine schon vor der Überschiebung vorhandene tiefere orographische Senke (vorpliozänes Rheintal) gleichsam einbrach und dadurch in ihren östlichen Teilen staffelförmig zerrissen wurde.

Die Querbruchklüfte, längs denen eine deutliche Verschiebung stattgefunden hat, klafften ursprünglich nie, wahrscheinlich nicht einmal zeitweise und vorübergehend; gleichzeitig mit der Verstellung der Bruchflügel, mit ihrem Auseinanderweichen, füllte sich die Spalte durch Abreibung der Kluftwände; es entstand eine Kluftfüllung, die die beiden anstehenden Bruchkluftwände miteinander verband. Wo wir heute eine leere Kluft zwischen den Bruchflügeln sehen, handelt es sich um rezente Auswitterung der alten Füllung. Nach M. JEROSCH (Lit. 14, S. 230) muß man sich das Entstehen

eines Bruches, seiner Kluft und dessen Ausfüllung wohl so vorstellen: «Durch die relative Bewegung der Bruchflügel im entgegengesetzten Sinne fand an irgendeiner dazu besonders disponierten Stelle ein Brechen des Gesteins statt. War nur einmal ein kleiner Riß vorhanden, so griff die weitere Verschiebung sofort hier an und es entstand so ein oft auf Kilometer hin gerade verlaufender Unterbruch in der Kontinuität der Schichten, ein Bruch. Da jedoch der Schub, so müssen wir uns vorstellen, stetig weiterging, so rieben sich die beiden Bruchwände aneinander; härtere Partien der einen gruben sich in die weichen der andern ein, wurden aber ihrerseits wieder abgehobelt, wenn sie sodann auf Widerstände der andern Wand stießen. So entfernten sich die Wände, indem sie sich gegenseitig abrieben, immer mehr voneinander; die Bruchkluft, die alte gerade Richtung beibehaltend, füllte sich mit dem von den Wänden abgerissenen und abgehobelten Gestein; die Wände bedeckten sich mit Glättung, Hohlkehlen und Rutschstreifen. Ist das Gestein der Flügel nicht spröde, sondern mehr duktil, so wird es sich weniger um ein Abhobeln und Abbrechen als um ein Abschürfen, Verkneten und Einpressen handeln.» – Die Art der Kluftfüllung schwankt je nach der petrographischen Eigenart des Gesteins: In sprödem Material, in massigen und grobbankigen Kalken hat sie mehr brekziösen, in duktilen Gesteinen jedoch mehr schiefrigen Charakter. Es hing überhaupt (mit Ausnahme der Rutschstreifen und Hohlkehlen) alles von der lokalen Beschaffenheit des Materials, besonders von der Duktilität der Gesteine ab; unter anderm auch, ob überhaupt Brüche auftraten oder ob die Verstellungen einfach durch innere Verschiebungen ohne Unterbruch der Kontinuität sich ausglichen. Oft kann man beobachten, daß Brüche einfach aufhören, wo sie in Mergelschichten auslaufen. In den spröden Kalken sind Brüche am häufigsten, insbesondere im Schrattenkalk, in dem sich schon eine kleine Störung, oft von keiner im Gebirgsbau bemerkbaren Verstellung begleitet, als echter Bruch äußert.

Die Beziehungen der Querbrüche zur Faltung

Faltung und Bruchdislokation sind gegensätzliche Äußerungen derselben Kraft, des gebirgstürmenden Horizontalschubs. In größerer Tiefe entwickelt sich Faltung; nimmt die Belastung ab, so

entsteht Bruch. Denn unter stärkerer Belastung verschieben sich auch die spröden Gesteine leicht und bruchlos, wie die duktilen bei leichter Ausweichmöglichkeit.

Bereits die Tatsache, daß die Unterschiede in der petrographischen Beschaffenheit des Materials für die Art der Ausbildung der Querdislokationen ausschlaggebend sind, läßt vermuten, daß die Belastung, bei der diese Dislokationsvorgänge sich abspielten, klein genug war, um die spezifischen Unterschiede zwischen sprödem und duktilem Material zur Auswirkung kommen zu lassen. Schon das deutet darauf hin, daß die Querbrüche erst gegen das Ende der Faltung einsetzten, zu einer Zeit, als die Abtragung durch Erosion bereits eine gewisse Entlastung geschaffen hatte.

Betrachten wir das Zusammenwirken von Faltenbildung und Querdislokation im tektonischen Gesamtbild, wie es heute vor uns steht! «Schon der erste Blick auf die geologische Säntiskarte von ALB. HEIM oder das Säntisrelief ergibt, daß die größern Querbrüche horizontal oder vertikal, meist beides zugleich, verstellen, ohne auf beiden Bruchseiten die Gestalt der Falten wesentlich zu ändern. Die Falten sind gebrochen, die Brüche aber nicht gefaltet. Die Querbrüche sind also jünger als die Anlage der Falten, auch jünger als deren Längsbrüche, die samt den Falten quer verschoben sind. Sie sind also wie im Juragebirge in der *letzten* Stauungsphase entstanden» (ARN. HEIM, Lit. 17, S. 367). – «Die Querbrüche beeinflussen die großen Züge der Faltung nicht. Nur die Hauptquerbruchregionen beeinflussen lediglich erstens die letzte, graduelle Ausbildung, die Intensität der Faltenstauung, und zweitens die letzten Komplikationen, wie Wiedereinwicklung und Bildung von kleinen Nebenfalten. Die übrigen Querbrüche zeigen keine tektonische Differenz ihrer Flügel» (Lit. 14, S. 263). Die Hauptquerbruchsregionen unterscheiden sich von den mehr vereinzelten übrigen Querbrüchen nicht nur durch die größere Häufigkeit und Länge der Brüche und größern Betrag der Verschiebung, sondern auch durch deren höheres Alter. «Die ältern Querdislokationen sind jünger als die Ausbildung aller wesentlichen Hauptzüge der Faltung; jünger bis gleich alt wie die Längsbrüche; älter als die letzte Phase der Faltung; älter als der Beginn der Bildung der heute noch zu verfolgenden Talläufe im Innern des Säntisgebietes» (Lit. 14, S. 263). In diese ältere Phase gehört z. B. die *Anlage* des Sax–Schwendi-Bruches, der damals als Vertikalsprung entwickelt war.

«Die jüngern Querdislokationen sind jünger als die letzte Phase der Faltung, als die Längsbrüche, als die Anfänge der Talbildung des Mutschen–Furgglen, des Fählen–Sämbtiser- und des Seealp–Hütten–Schwenditales, ja sogar jünger als die Kiesakkumulationen im ersten dieser Talzüge. – Untereinander sind sie gleich alt . . . Sie alle sind Horizontalverschiebungen» (Lit. 14, S. 264).

Aber auch diese jüngern Querbrüche sind noch nicht die letzten Dislokationen: «Bei einigen Brüchen mit wohlentwickelter und entblößter Brekzie läuft mitten durch diese Kluftfüllung ein *haarscharfer Schnitt,* annähernd parallel oder etwas schief geneigt zu den Bruchwänden. Man kann nicht gut sagen: Er klafft; dazu ist er zu eng. Er ist aber nirgends durch spätern Kalzitabsatz wieder ausgeheilt, ein Zeichen, daß er relativ noch jung ist. Er durchsetzt die Brekzie glatt, ganz unbekümmert um die verschiedene Festigkeit usw. ihrer Bestandteile; er ist *erst nach der Bildung der Brekzie eingerissen* . . . Wir müssen annehmen, daß nach vollendeter Ausbildung der Kluftfüllung noch ein letztes Nachrucken erfolgte, bei dem dann der scharfe Spalt eingerissen wurde» (Lit. 14, S. 240/41).

Die Geschichte der Querdislokationen, wie sie sich nach den Beobachtungen rekonstruieren läßt, spielte sich also folgendermaßen ab:

«1. Faltung etwa zu $^5/_8$ vollendet;

2. ältere Querdislokationen;

3. weitere $^2/_8$ der Faltung; Talbildung auf den ältern Tallinien;

4. jüngere Querdislokationen; gleichzeitig und anschließend;

5. letztes Achtel des faltenden Horizontalschubes, letztes Nachrucken der Bruchwände und Entstehen gewisser mechanischer Erscheinungen (gemeint ist hier u. a. das eben erwähnte nachträgliche Zerreißen der Kluftfüllungsbrekzien); und

6. Talbildung auf den heutigen Tallinien» (Lit. 14, S. 264/65).

Die Frage nach dem *Alter der Querbrüche in bezug auf die Faltung* ist damit gelöst: Eine erste Phase der Bruchdislokation fällt etwa zwischen den fünften und sechsten Achtel der Faltung, die Hauptverstellung durch Querbrüche fand jedoch zwischen deren siebtem und letztem Achtel statt. Noch jünger sind kleinere, lokale Risse (nachträgliches Zerreißen der Kluftbrekzien), bei denen die Bruchflügel nicht mehr merklich verstellt wurden.

Nun drängt sich die weitere Frage auf, *in welchem Abschnitt der geologischen Zeitrechnung* diese Bruchdislokationen erfolgten. Um sie zu beantworten, müssen wir zunächst wissen, wann die Überschiebung der helvetischen Decken stattfand. Die grundlegende Synthese von R. STAUB (Lit. 31) gibt uns darüber Auskunft:

«Die ersten Anfänge eines eigentlichen zentralalpinen Reliefs gehen zurück bis ins mittlere Stampien; dasselbe akzentuiert sich dann über das Aquitan weiter und ist zu Beginn des Miozäns in seinen Hauptzügen vollendet» (S. 43). Das definitive Aufsteigen des Helvetikums erfolgt jedoch erst später, nämlich gegen den Schluß des Miozäns. «Nach dem Sarmat werden die helvetischen Alpen (die schon lange vorher Deckenland waren) definitiv an der Molasse hochgepreßt, und diese selber, schon bei den letzten Überschiebungsphasen unter der helvetischen Basis zu Schuppen gehäuft, steigt empor über das flache mittelländische Miozän (S. 85). Das tektonische Relief der helvetischen Randzone ist somit um vieles jünger als das längst in seinen Grundzügen schon im obern Oligozän vorhandene und seither stets im Abtrag begriffene des Alpeninnern hinter den Zentralmassiven (S. 62). Die morphologische Geschichte der inneralpinen Gebiete beginnt am Schluß der tiroliden Hauptbewegungsphase mit dem Aufsteigen des ersten tektonischen Reliefs im mittlern Stampien . . . Die morphologische Gestaltung der nördlichen Randzonen im Helvetikum und in den Préalpes ist aber ganz bedeutend jünger, sie beginnt mit einiger Sicherheit erst, wie die morphologische Gestaltung der Molassezone und der äußeren Südalpen, *nach Abschluß des Sarmats, etwa in pontischer Zeit* (S. 47) . . . In jedem Falle hat . . . eine bedeutende nachsarmatische Hochbewegung des alpinen Randgebietes inklusive der Zentralmassive stattgefunden. Und diese Hochbewegung des alpinen Randes kann auch sehr wohl noch eine beträchtliche Horizontalkomponente gehabt haben. Bei diesen Bewegungen wäre auch die oligozäne Molasse der subalpinen Zone endgültig über das mittelländische Miozän geschoben worden, vom Genfersee bis an den Inn» (S. 45).

«Mehr als merkwürdig erscheint es nun unter diesen Umständen, daß diese ohne jeden Zweifel stattgehabten postsarmatischen Hochbewegungen des Alpenkörpers und seines Molasserandes kein

stratigraphisches Abbild im nunmehrigen schweizerischen Alpenvorland hinterlassen haben, etwa in Form pliozäner Schottermassen. Da drängt sich unwillkürlich die Frage auf, ob nicht vielleicht die altbekannten *Deckenschottermassen* der ersten Eiszeiten in das Pliozän zu stellen wären und ob nicht in diesen Deckenschottern die stratigraphischen Korrelate der energischen postsarmatischen Hebungen der alpinen Zonen zu erblicken sind. Daß die Deckenschotter der Schweiz möglicherweise pliozänen Alters seien, hat eben erst auch PAUL BECK auf Grund weitreichender glaziologischer und paläoklimatischer Studien ausgesprochen, und ich zögere nicht, ihm . . . zu folgen. Die mächtige alpine Erosion der Pliozänzeit fordert unbedingt ganz bedeutende stratigraphische Abbilder, und diese Abbilder liefert nur der Deckenschotter. Es sei denn, daß im ganzen nördlichen Alpenvorland das sicher einst zur Ablagerung gelangte schotterige Pliozän von den Eiszeiten völlig abgeräumt worden wäre» (Lit. 31, S. 47).

Die endgültige morphologische Gestaltung des Alpsteingebirges, als eines Teils des am weitesten nach N vorgeschobenen helvetischen Deckenlandes, das definitive Zusammenstauen der Kreidefalten vor dem bremsenden Widerlager des Molasse-Nagelfluh-Vorlandes fällt also in die jüngste alpine Bewegungsphase, die spätinsubrische, welche mit dem Beginn des Pliozäns ihren Anfang nimmt. Es bestätigt sich also, was ARN. HEIM (15) schon 1906 schrieb: «Die Brandung der alpinen Decken, ihr Überschieben über das anerodierte Molassegebirge und ihr stellenweises Zerbrechen ist eine einheitliche Erscheinung und gehört an den Schluß der alpinen Stauung überhaupt (S. 459); sie fällt zwischen das oberste Miozän und mittlere Pliozän, am ehesten ins ältere Mittelpliozän» (S. 460).

Durch lokale Untersuchungen im Gebiete selbst läßt sich die Frage, in welchem Teil des Pliozäns oder des Pleistozäns diese letzten Bewegungen stattfanden, leider nicht sehr viel genauer beantworten, weil Ablagerungen aus der Zeit der ersten Vergletscherungen im Säntisgebiet und seiner nächsten Umgebung nicht festzustellen sind. Sie zeigen lediglich, daß selbst sehr erhebliche tektonische Bewegungen – mit geologischem Zeitmaß gemessen – nicht weit zurückliegen. Der bereits erwähnte Sax–Schwendi-Bruch, der sämtliche Säntisketten durchquert, dabei Gewölbe und Mulden und damit Berg und Tal aneinander vorbeigeschoben hat,

ist erstaunlich jung; ARN. HEIM (Lit. 17, S. 369) schreibt hierüber: «Die transversalen Rutschstreifen sieht man noch an der Riegelwand. Auch die alten Kiese im Furgglentälchen, wo jetzt keine solchen mehr hingelangen können, besagen, daß die heutige tiefe Durchtalung schon vor dem Sax–Schwendi-Bruch vorhanden war und am letzteren die schon vorhandenen Berge und Täler zur Seebildung verschoben worden sind. Der Bruch war also die letzte große Veränderung im Gebirge; er gehört zur letzten tektonischen Bewegung der Alpen, die hier bis über das Mitteldiluvium gereicht haben mag.» ARN. HEIM (Lit. 15, S. 459) erwähnt übrigens schon 1906, daß ALB. HEIM den letzten Teil der Bewegung beider Flügel des Sax–Schwendi-Bruches ins Diluvium stelle. – Unter starker Betonung neuerer, von O. AMPFERER (Lit. 1) und anderen Forschern in den nördlichen Ostalpen gewonnener Ergebnisse schreibt auch H. LÜTHY in seinen «Morphologischen Untersuchungen im Säntisgebirge» (Lit. 24, S. 176): «Die letzte, in ihren Ausmaßen so beträchtliche Hebung der Alpen, welche in der zweiten Interglazialzeit zu der tiefen Einschneidung der Haupttalzüge führte . . . kann mit den jungen tektonischen Bewegungen des Säntisgebirges gleichgesetzt werden.» Zu den jungen Bewegungen rechnet H. LÜTHY vor allem die Querbrüche.

Die Beobachtungen und Folgerungen über die Bruchdislokationen des Säntisgebirges mußten hier deshalb ziemlich ausführlich dargestellt werden, weil sie für die Frage nach dem *Alter der Höhlen* wesentlich sind. Wie im Abschnitt III B eingehend dargelegt wird, liegen nämlich die eigentlichen Höhlen des Säntisgebirges (d. h. alle Höhlen mit Ausnahme der bloß durch Unterwitterung entstandenen Balmen), soweit Beobachtungen vorliegen, alle auf Dislokationsklüften, zumeist Querbrüchen, und zwar nicht auf den großen, sondern auf kleinen, im Gebirgsbau ganz unbedeutenden Fugen und Rissen. Wenn es nun möglich ist, das Alter dieser der Höhlenbildung zugrunde liegenden Bruchstörungen zu bestimmen, so ist damit der Zeitpunkt gegeben, in dem die Entstehung der Höhlen beginnen konnte.

Wie soeben gesagt wurde, liegt *keine* der auf ihre geologische Bedingtheit hin untersuchten echten Höhlen auf einer *großen* Querdislokation, d. h. auf einer solchen, längs der eine starke Verschiebung der Bruchflügel stattgefunden und in der sich demzufolge eine Kluftfüllung gebildet hat. Sie liegen alle auf *kleinen* Verstel-

lungen, bei denen die Bewegung der Bruchflügel so gering war, daß man oft nicht imstande ist, das Ausmaß oder auch nur den Richtungssinn der Dislokation festzustellen; daß bei diesen Verhältnissen Kluftfüllungen sich nicht bilden konnten, ist ohne weiteres verständlich. Die Bruchflügel bestehen aus meist intaktem, nur wenig zerklüftetem Anstehendem; meistens schließen sie dicht aneinander, oft aber lassen sie zwischen sich einen offenen Zwischenraum von wenigen Millimetern Durchmesser. In diesem Klaffen einer offenen Spalte, weiterhin im geringen Ausmaß der relativen Verstellung (Fehlen der eindeutig gerichteten Rutschstreifen, Fehlen der Brekzie) und der meist geringen Erstreckung (im Mittel etwa 20–40 m), stimmen die bei den eigentlichen Höhlen vorhandenen Dislokationen ganz überein mit den oben geschilderten allerjüngsten Rissen, welche an manchen Stellen die Kluftfüllungsbrekzien durchsetzen. Man wird wohl nicht allzusehr fehlgehen, wenn man annimmt, daß *die Klüfte, auf denen die Höhlen entstanden, mit diesen letzten Auswirkungen des Deckenschubes* («Letztes Nachrucken» nach M. JEROSCH) *gleichaltrig sind, daß sie also ebenfalls zu den allerletzten Auswirkungen des Deckenschubes, an das Ende des Faltungsprozesses gehören.*

Daß diese Ansicht richtig ist, läßt sich natürlich nur da *beweisen,* wo die kleinern Klüfte die Kluftfüllungen der ältern Querbrüche nachträglich zerrissen haben, also offensichtlich jünger sind als diese. Man hat jedoch Grund, auch da, wo die Verhältnisse nicht so klar liegen, anzunehmen, daß diese Klüfte durch die allerletzten tektonischen Bewegungen verursacht sind: Als die Überlagerung und damit der Druck auf die heute freigelegten Schichten noch groß war und ihnen dadurch eine gewisse Plastizität verlieh, haben wohl nur die *großen* Spannungsdifferenzen zu Verschiebungen (und dann gleich zu Verschiebungen größeren Ausmaßes) geführt, während geringere bruchlos ausgeglichen wurden. Erst als dann die Überlagerung geringer geworden war, kam der Charakter der spröden Gesteine voll zur Auswirkung: Sie antworteten selbst auf schwache tektonische Beanspruchung mit Bruch, sie wurden zerklüftet. Entsprechend den geringen Druckkräften und Widerstandsdifferenzen (Ausklingen des Deckenschubes, letzte schwache Phase der Stauung) sind dabei die relativen Verschiebungen der Bruchflügel klein; die Dislokationen verstellen nicht mehr ganze Faltenschenkel, sondern sind nur noch von lokaler Bedeutung und meist auf

die sprödesten Schichten beschränkt. Nach der von M. JEROSCH (Lit.14, S. 124) gegebenen Definition sind sie aber dennoch als echte Brüche zu bezeichnen, weil das entscheidende Merkmal nicht das Ausmaß der Bewegung, sondern lediglich die Störung der Kontinuität ist.

W. SCHMIDLE (Lit. 30) hat nachgewiesen, daß die von ihm als «Unterseeniederung» bezeichnete Senke zwischen Schienerberg und Bodanrücken sich zur Hauptsache während des Mindel-Riß-Interglazials gebildet hat. Es handelt sich dabei um die Entstehung einer Grabenversenkung von etwa 200 m Tiefe, also eine recht bedeutende Bewegung. Es wäre wohl nicht richtig, diese ausschließlich als direkte Folge des Deckenschubes zu betrachten. Andrerseits wird sich aber auch nicht viel dagegen einwenden lassen, wenn man die Verwerfungen, die sich beim Übergang vom Alt- zum Jungquartär im nordwestlichen Bodenseegebiet abspielten, doch mit den letzten Auswirkungen des Deckenschubes in Verbindung bringt. Gerade in jenem Sektor der helvetischen Deckenstirn, der dem Untersee am nächsten liegt, eben im Säntisgebirge, wird man gleichzeitige tektonische Bewegungen annehmen dürfen; sie schufen vielleicht gerade jene jüngsten Bruchfugen, auf denen sich die Höhlen bildeten.

Kürzlich hat F. SAXER (Lit. 27) eine interessante Beobachtung aus dem näheren Vorland des Säntisgebirges veröffentlicht: Die Höhenlage der Moränenablagerungen längs dem Laufe der Sitter macht es wahrscheinlich, daß selbst noch im Jungquartär das Gebiet des Nordschenkels der großen Molassehauptantiklinale um 50 bis 70 m gehoben worden ist. Da es sich hier um eine Zone handelt, deren Streichen mit dem Alpennordrand ziemlich genau parallel läuft, muß ein Zusammenhang mit gleichaltrigen Bewegungen des Alpenkörpers angenommen werden.

Es liegt damit durchaus im Bereich der Möglichkeit, die Entstehung der letzten, kleinen Bruchstörungen, die zur Höhlenbildung Anlaß gaben, auf die Mitte des Diluviums anzusetzen.

Trotzdem der geologische Bau nur in wenigen Gebieten so klar zutage liegt und gleichzeitig auch so gut erforscht ist wie im Säntisgebirge, muß man feststellen, daß die Frage nach dem Alter der für die Höhlenbildung maßgebenden Dislokationen nicht mit der wünschenswerten Sicherheit beantwortet werden kann. Das Alter der Höhlen auf Grund rein geologischer Schlüsse, also sozusagen

von rückwärts, von der Vergangenheit her bestimmen zu wollen, kann beim gegenwärtigen Stand der Kenntnisse noch nicht zum Ziele führen. Der Weg, der heute erheblich zuverlässigere Ergebnisse liefert, ist die Altersbestimmung der Höhlen*sedimente* und damit auch der ganzen Höhle durch die Auswertung paläontologischer und prähistorischer Daten. In Verbindung mit den Ergebnissen der Ausgrabung des Höhlenbodens allerdings vermögen die geologischen Untersuchungen über die Höhlenbildung wertvolle Hinweise und Ergänzungen zu geben und – wie ich glaube – den ganzen Vorgang der Höhlenentstehung zu einem geschlossenen Bilde abzurunden. *Es ist zum mindesten beachtenswert, daß einerseits die vorhin angestellten geologischen Überlegungen es wahrscheinlich machen, daß die zur Höhlenbildung führenden Klüfte erst im späteren Altquartär entstanden, vielleicht erst im Mindel-Riß-Interglazial, während andrerseits die älteste Schicht der lockeren Bodenauffüllung im Wildkirchli und im Wildenmannlisloch auf Grund prähistorischer und paläontologischer Daten* (vgl. Lit. 6, S. 43) *nur der Riß-Eiszeit zugewiesen werden kann.*

B. Die Entstehung der primären Hohlräume. Die Beziehungen zwischen Bruchdislokation und Höhlenbildung

Wie bereits im II. Kapitel dargelegt wurde, hat man bei der Höhlenbildung Raumentstehung und Raumerweiterung zu unterscheiden. Die Raumentstehung haben wir dort definiert als die Anlage der Hohlräume in Form von tektonischen offenen Dislokationsfugen, eventuell auch größerer Hohlräume, ohne Mitbeteiligung des Wassers. Unter Raumerweiterung verstehen wir die Vergrößerung dieser Urhohlräume durch die Tätigkeit des Wassers.

Schon im I. Kapitel wurde gezeigt, daß die untersuchten Säntishöhlen in jedem einzelnen Falle von Dislokationsflächen durchschnitten werden, mit anderen Worten, daß sie alle auf tektonisch bedingten Rissen liegen.

Um nicht einen unrichtigen Eindruck zu erwecken, muß hier gleich bemerkt werden, daß die Dislokationen nicht in jeder Höhle auf Schritt und Tritt zu beobachten sind. Sie sind ganz verschieden stark ausgeprägt: am einen Ort fallen einem die Klüfte schon auf den ersten Blick auf, am anderen findet man sie erst nach längerem

Suchen, schließlich gibt es auch – besonders in größeren Höhlensystemen – Strecken und Gänge, wo das Gestein kaum zerklüftet worden ist und vollkommen unversehrt aussieht.

Auf die ganze Länge des überdachten Raumes ist die Dislokation sehr schön sichtbar in der Dürrschrennen, im Zigerloch, im Teufelskirchli, in den zwei Höhlen oberhalb der Bollenwies und in der Alpeelhöhle. Nur in der vorderen Hälfte, aber dort sehr deutlich, ist sie zu beobachten im Wildkirchli-Rees und in der Gartenalp. Die bisher genannten Höhlen sind diejenigen, die morphologisch einfach gebaute Räume von langgestrecktem Grundriß darstellen. – Etwas schwieriger wird die sichere Feststellung der Dislokationen in den Höhlen von ungefähr isometrischem Grundriß (Wildkirchli) und in größern, komplizierten Höhlensystemen (Furgglen). Die Schwierigkeit liegt vor allem darin, daß die Dislokationen, auf denen die innern Höhlenteile liegen, hier meist nicht bis an den Tag ausstreichen und dort – wie in den vorhin genannten sieben Fällen – schon am Höhlentor und in dessen Umgebung beobachtet werden können. – Im Wildkirchli sind nur zwei bedeutende Dislokationsfugen zu finden: Die eine folgt dem hintern Abschluß der Kellerhöhle und bildet dort den großen Kamin, die andere verläuft quer über die obere Höhle. – In der Furgglen sind verschiedene größere Bruchfugen vorhanden. Eine erste sieht man schon von außen am Höhlentor; sie zieht sich in die Höhle I hinein, hört aber an deren hinterem Ende auf. In Höhle II habe ich keine einzige einigermaßen bedeutende Bruchfuge gefunden. In der dritten Kammer kreuzen sich zwei sehr deutlich ausgeprägte, steilstehende, *weite* Klüfte. Höhle IV liegt wahrscheinlich ihrer ganzen Länge nach auf einer schiefliegenden Dislokationsfläche; im Schlauch ist von größern Klüften wieder nichts zu sehen, abgesehen von der hohen Spalte, die den Gang in der untern Hälfte kreuzt.

Welcher Art sind nun diese Dislokationen? Wir fassen hier das über diesen Punkt im I. Kapitel bei Gelegenheit der Höhlenbeschreibungen bereits Gesagte zusammen und fügen noch Einzelheiten dazu.

Betrachten wir zunächst einmal die *Streich- und Fallrichtung* der in den bisher untersuchten Höhlen sicher erkannten, auf längere Erstreckung (mehr als 10 m) verfolgbaren Dislokationsflächen. Wir stellen die bereits gemachten Angaben, nach den Streichrichtungen geordnet, in tabellarischer Übersicht zusammen.

	Streichen (unkorrig. Ablesg.)	*Fallen*
Wildkirchli-Rees	300° (= N 60° W)	90°
Furgglen, Höhle I	300°	90°
Furgglen, Höhle IV	310°	63° NE
Gartenalp	310°	68° NE
Höhlen ob Bollenwies	320°	80°–83° SW
Dürrschrennen	340°	90°
Alpeel (2 parallel streichende)	354° (= N 6° W)	62° E, 85° W
Teufelskirchli	14° (= N 14° E)	85° W
Wildkirchli, Kellerhöhle	20°	75° E
Zigerloch	30°	74° W
Furgglen, Höhle III	45°	90°
Wildkirchli, obere Höhle	80° (= N 80° E)	90°

Wie man sieht, sind die Streichrichtungen nicht regellos verteilt, sondern sie halten sich – mit zwei gleich zu erörternden Ausnahmen – deutlich innerhalb bestimmter Grenzen: zwischen N 30° E über N bis N 60° W. Nach M. JEROSCH (Lit. 14, S. 247, 4. Beobachtungssatz über Querstörungen) sind Brüche, deren Streichen innerhalb der 100° von N 30° E über N bis N 70° W verläuft, als *Querbrüche* anzusprechen. *Demnach haben wir es bei den Dislokationen, auf denen die Säntishöhlen liegen, zur Hauptsache mit Querbrüchen zu tun.*

Von den beiden Dislokationen, deren Streichen außerhalb die für Querbrüche angegebenen Grenzen fällt, liegt die eine im Innern eines unübersichtlichen Höhlensystems (Furgglen, Höhle III, N 45° E), die andere in einer Höhle von ungefähr isometrischem Grundriß (obere Höhle des Wildkirchli, N 80° E). Beim zuletzt genannten handelt es sich um einen *Längsbruch* in der Antiklinale des Säntisgewölbes I, einen Gewölbescheitelbruch, wie sie in der Gegend der Ebenalp mehrfach auftreten. – Der großen offenen Kluft in der Abteilung III der Furgglenhöhle kommt insofern besondere Bedeutung zu, als sie im Streichen und Fallen mit der Schichtung des Schrattenkalkes übereinstimmt. Wir haben es hier mit einer wohl tektonisch bedingten *Schichtkluft* zu tun, die ihrer Lage nach als Längsbruch zu bezeichnen ist.

Diejenigen Dislokationen jedoch, auf denen die morphologisch einfachen Höhlen von mehr langgestrecktem Grundriß liegen,

halten sich in ihrer Streichrichtung alle innerhalb des Bereiches der für Querbrüche typischen Werte. Weil die Kluftflächen dem allgemeinen Verlauf der Höhle ganz oder nahezu parallel laufen, hat das zur Folge, daß die Höhlenlängsachsen und damit die Öffnungen der Höhlen zum Tag (Höhlentor) entweder in einer zwischen WNW und NNE oder zwischen ESE und SSW gelegenen Richtung liegen, je nachdem sich die Höhle am nördlichen oder südlichen Abhang einer Bergkette befindet. Wenn auch die Anzahl der untersuchten Höhlen zum Zweck einer statistischen Zusammenstellung etwas gering ist, so glaube ich doch, daß die oben aufgestellte Regel für das ganze Säntisgebirge gilt. In diesem Gebiete wird schwerlich eine Höhle der angegebenen Art (einfacher langgestreckter Hohlraum) zu finden sein, deren Längsachse in W–E oder SW–NE-Richtung oder zwischen diesen Werten liegt.

Was den *Fallwinkel* der Querdislokationsflächen anbelangt, halten sie sich durchaus im Rahmen des Normalen; einzig das Fallen der einen (westlichen) Verschiebung in der Alpeelhöhle (62°) und jener in der Abteilung IV der Furgglen (63°) ist ungewöhnlich flach; ein ähnlich schiefes Einfallen von Querbrüchen ist nach M. JEROSCH (Lit. 14, S. 248) zwar selten, aber doch an verschiedenen Orten zu beobachten.

Die Ausbildung der Höhlendislokationen

Eine kurze Übersicht über die Erscheinung der Querdislokationen im Säntisgebirge ist im Abschnitt III A gegeben worden. Es wurde dort erwähnt, daß die größern, in die geologische Karte eingetragenen Querbrüche stets durch das Vorhandensein einer Kluftfüllungsbrekzie sich auszeichnen, die dadurch entstanden ist, daß die beiden Bruchflügel aneinander vorbeigeschoben wurden und sich dabei gegenseitig abrieben.

Von den bisher untersuchten Säntishöhlen liegen nur zwei auf solchen größern Querbrüchen, nämlich die beiden großen Halbhöhlen Wildkirchli-Rees und Teufelskirchli, die andern alle auf kleinen, von M. JEROSCH nicht in die Karte eingetragenen Verstellungen. Auch bei den beiden erwähnten Höhlen sind die Querbrüche nicht in der typischen Weise ausgebildet, d. h. es handelt sich nicht um zwei Bruchflügel aus unverändertem Anstehendem mit dazwischenliegender Brekzie. In beiden Fällen liegen die Verhältnisse so, daß eine sehr scharf ausgeprägte, ebene Scherfläche

zwei petrographisch ganz verschiedene Bruchflügel voneinander trennt. Übereinstimmend ist der westliche wenig beansprucht worden; er besteht aus massigem, nur wenig zerklüftetem und infolgedessen von der Verwitterung nicht stark angegriffenem Gestein. Auf der östlichen Seite der Scherfläche jedoch hat eine deutliche Dynamometamorphose stattgefunden; je näher eine Gesteinspartie bei der Kluft liegt, um so stärker ist sie zur Brekzie umgewandelt. Im Wildkirchli-Rees ist das Anstehende bis zu etwa 2 m Entfernung von der Kluftfläche stark brekziös; in noch größerm Abstand geht die Brekzie allmählich in unveränderten Schrattenkalk über, der aber zunächst noch stark von Kalzitadern durchsetzt und zerklüftet ist. Die Klüfte laufen zur Hauptsache enggeschart parallel zur Höhlenlängsachse. In etwa 4 m Abstand von der Scherfläche hört die intensive Zerklüftung allmählich auf. – Im Teufelskirchli ist die Umwandlung des Kalks in Brekzie weniger weit fortgeschritten, aber auch hier ist der Ostflügel stark zerklüftet. Am hintern Ende der Höhle ist sehr schön ein eigenartiges Umstreichen dieser kleinen Klüfte in die Richtung der großen Scherfläche hinein zu beobachten: sie erscheinen wie geschleppt, wie wenn hier der zersplitterte Ostflügel vom weiter nach N vorstoßenden kompakten Westflügel mitgezogen worden wäre. – Die Dislokationen, die die zwei genannten Halbhöhlen durchziehen, sind bedeutende, im Gebirgsbau auf längere Strecken feststellbare Querbrüche, die sich auch morphologisch sehr deutlich ausprägen. Beim Wildkirchli-Rees ist es die tiefe Kerbe in der Felswand, in der der Alpsiegelabhang zum Brültobel abstürzt, beim Teufelskirchli die große Nische in der Region oberhalb der Höhle, die schon aus einer bloßen Betrachtung der Oberflächenformen einen Querbruch vermuten läßt.

Im Gegensatz dazu liegen alle andern untersuchten Höhlen auf unbedeutenden, für die heutige Oberflächenform des Gebirges völlig nebensächlichen Dislokationen, die übereinstimmend folgende Ausbildung zeigen: Eine steilstehende, erstaunlich ebene Scherfläche durchreißt den Schichtkomplex auf eine Erstreckung von im Mittel 20–40 m. Mit einem scharfen Schnitt trennt sie die beiden Bruchflügel voneinander. Diese bestehen – selbst unmittelbar in der Nähe der Bruchfläche – ganz aus meist unverändertem, manchmal aber auch von kleinen Klüften oder Kalzitadern durchsetztem Gestein. Einen Sonderfall stellen die zwei Höhlen ob der Bollenwies dar: hier setzt der Riß mitten durch die über 2 m dicke

Kluftfüllungsbrekzie eines größeren Querbruchs. Gegen die Scherfläche zu sind beide Bruchflügel von einer ebenen, auch bei näherer Betrachtung mehr oder weniger glatten Fläche begrenzt. Diese Bruchkluftwände schließen längs der Scherfläche teils dicht aneinander, teils lassen sie zwischen sich eine schmale, nur wenige Millimeter breite Fuge offen; manchmal ist der schmale Zwischenraum zwischen den beiden Kluftwänden auch von Lehm erfüllt. Von einer Kluftfüllungsbrekzie ist nirgends auch nur eine Spur zu sehen. Hohlkehlen sind ebenfalls keine vorhanden. Rutschstreifen sind an den Kluftwänden nur ziemlich selten zu beobachten (z. B. – überall schwach N-fallend – an der Decke der Dürrschrennen; im Zigerloch an der überhängenden Westwand gleich beim Eintritt in die obere große Höhle; in der Alpeelhöhle an einigen Stellen, hier aber nur schwach ausgeprägt). In andern Höhlen (Gartenalp, ob der Bollenwies), wo die eine oder andere Bruchkluftwand wenigstens stellenweise freiliegt, fehlen deutliche Anzeichen einer relativen Verschiebung der Bruchflügel, auch da, wo die Kluftwände durch die lösende Wirkung des Wassers noch nicht angegriffen und verändert werden konnten. Das zeigt, daß es sich bei diesen Höhlendislokationen um ganz geringe Bewegungen gehandelt hat. – Auch dort, wo Rutschstreifen vorhanden sind, ist man kaum imstande, das Ausmaß der Verschiebung sicher anzugeben. Das wäre nur dann gut möglich, wenn die Höhlen in der Nähe stratigraphisch gut erkennbarer Horizonte lägen, so daß man am Unterschied in der Lage derselben Schicht links und rechts vom Bruch das Ausmaß der Verstellung messen könnte. Die bisher untersuchten Höhlen liegen aber – wohl zufälligerweise – alle im Innern von nicht gut unterteilbaren Schichtkomplexen (Wildkirchli, Gartenalp und Furgglen im Schrattenkalk, Zigerloch und Dürrschrennen im Valanginienkalk, Alpeel in den oberen Drusbergschichten). Auch erstrecken sich die Dislokationen, die durch die Höhlen gehen, nicht so weit, daß sie bis an eine deutliche stratigraphische Grenze verfolgbar wären, wo die relative Verschiebung der Bruchflügel leicht festgestellt werden könnte. Einzig die beiden größeren Verwerfungen in der Wildkirchlihöhle sind wahrscheinlich nicht auf den Schrattenkalk beschränkt, sondern verstellen wohl auch den Gault und den Seewerkalk des Ebenalp-Plateaus.

Wir kommen also, was die Ausbildung der die Höhlen durchziehenden Dislokationen anbelangt, zusammenfassend zu folgen-

dem Ergebnis: *Abgesehen von den zwei Halbhöhlen Wildkirchli-Rees und Teufelskirchli liegen alle untersuchten Höhlen auf kleinen, im Gebirgsbau ganz nebensächlichen Dislokationsklüften, meist Querbrüchen.* Ihre Geringfügigkeit geht aus verschiedenen Punkten hervor:

1. Die Dislokationen haben eine relativ geringe Erstreckung, im Mittel 20–40 m.
2. Eine relative Verstellung der Bruchflügel ist oft überhaupt nicht festzustellen (teilweises Fehlen der Rutschstreifen). Wo eine solche stattgefunden hat, beläuft sie sich wahrscheinlich höchstens auf wenige Meter.
3. Kluftbrekzien sind in keinem Falle vorhanden. Daß sich solche bei der nur geringen Verschiebung der Bruchflügel nicht bilden konnten, ist verständlich. Die Bruchflügel bestehen bis an die Kluftfläche aus intaktem oder durch die tektonischen Kräfte nur sehr wenig verändertem Gestein.
4. Die Dislokationen prägen sich im Gelände kaum oder gar nicht aus.

Diese Ergebnisse sind im Abschnitt III A im Zusammenhang mit der Besprechung der Querbrüche bereits angeführt und verwertet worden. Dort interessierte uns besonders die Frage nach dem geologischen Alter der höhlenbildenden Dislokationen. Es wurde an jener Stelle gezeigt, daß es sich bei diesen Höhlendislokationen sehr wahrscheinlich um die letzten schwachen Auswirkungen des Dekkenschubs handelt, bei denen – entsprechend den nur noch schwachen Schubwirkungen und Widerstandsdifferenzen – nur *kleinere* Brüche gebildet werden konnten. Die Hauptsache war dabei das Zerreißen der betroffenen Schicht längs einer ebenen Scherfläche, der Unterbruch in der Kontinuität; die Verstellung der Bruchflügel, die bei dieser Gelegenheit stattfand, war entweder minim oder doch nicht bedeutend.

Warum liegen die Säntishöhlen gerade auf kleinern Dislokationen?

Die Beobachtung, daß die eigentlichen Höhlen im Kalkgebirge meist immer dort liegen, wo *Dislokationen* das Gestein durchsetzen, hat schon früh zu der richtigen Folgerung geführt, daß diese der erste Anlaß für die Höhlenbildung seien. Auch durch theoretische Überlegung kommt man zu dem gleichen Ergebnis: Wie könnte das Wasser, das die Höhlen ausweitet, in das Innere des Berges ge-

langen und dort Hohlräume bilden, wenn es nicht auf den durch die Klüfte vorgezeichneten Wegen dorthin gelangt wäre? Wo keine Klüfte vorhanden sind, bleiben Korrosion und Erosion auch bei relativ leicht löslichen Gesteinen auf die Oberfläche beschränkt. Um aus den vielen Beispielen zur Bestätigung der Ansicht, daß die Höhlen ihre Entstehung in erster Linie tektonischen Dislokationen verdanken, nur die Beobachtungen in schweizerischen Höhlen zu erwähnen, sei z. B. auf die Arbeiten von P. EGLI (Lit. 12, 13) verwiesen.

Wer den geologischen Bau des Säntisgebirges und im besondern die Erscheinung der Querbrüche kennt, ist geneigt, bei einer ersten Überlegung anzunehmen, daß die Höhlen wahrscheinlich auf den größten Querbrüchen am häufigsten anzutreffen sein werden, weil längs dieser großen Dislokationsflächen das Gestein am meisten tektonisch mitgenommen und gelockert ist, so daß das Oberflächenwasser dort am ehesten in die Tiefe dringen und höhlenbildend wirken könnte. Daß die Querbrüche Zonen geringerer Festigkeit und verminderter Widerstandskraft gegen äußere Einflüsse sind, geht ja schon daraus hervor, daß die Verwitterung an ihnen am erfolgreichsten gearbeitet hat, so daß sie heute in der äußern Oberflächenform des Gebirges als Einschnitte und Kerben zu erkennen sind.

Diese Erwartung wird aber in keiner Weise bestätigt; im Gegenteil ergibt die genaue Beobachtung, daß einerseits die vorhandenen Höhlen auf kleinen Störungen liegen, daß man andererseits auf den großen Querbrüchen und Querbruchzonen keine Höhlen antrifft. Ich habe z. B. den Sax–Schwendi-Bruch auf seiner ganzen Länge nach Höhlen abgesucht, habe aber keine einzige finden können. – Wie ist das zu erklären?

Wir haben bereits gehört, daß O. LEHMANN (Lit. 22) begründet hat, wieso nicht alle beliebigen tektonischen Klüfte vom Wasser zu Höhlen erweitert werden können, sondern in der Regel nur diejenigen, die von Anfang an so weit sind, daß das Wasser in ihnen fließen kann. Lehmann führt (l. c., S. 16/17) zur Bekräftigung dieses auf theoretischem Wege gefundenen Resultates u. a. folgende Feldbeobachtungen an:

> Daß Dolomit im allgemeinen weniger verkarstet ist als Kalk, wurde bisher stets mit der geringern Löslichkeit des Dolomits erklärt. Wenn wirklich die Löslichkeit das Maß der Verkarstung bestimmen würde, so müßte der etwa 5 mal löslichere Gips mehr verkarstet sein als die (wie neuere chemische Untersuchun-

gen gezeigt haben) nur wenig sich unterscheidenden Gesteine Kalk und Dolomit. Der wahre Grund für das verschiedene Verhalten liegt in der Art und Länge der Klüfte: Dolomit verhält sich tektonischer Beanspruchung gegenüber viel spröder als Kalk. Wo Dolomit stark beansprucht wurde, ist er in ein Trümmerhaufwerk verwandelt, das meist durch Kalzitnähte zu Brekziendolomit verkittet ist; davon abgesehen ist die Zerklüftung nur gering. An solchen Stellen nun ist der Dolomit nicht verkarstet, sondern es herrscht Oberflächenentwässerung. An Orten, wo der Dolomit tektonisch nur so schwach beansprucht wurde, daß er – ähnlich wie Kalk bei starkem Druck – nur einzelne Risse erhielt, zeigt er hingegen echte Karstentwässerung (Frankenjura, einzelne Partien im Toten Gebirge). In Dalmatien ist der Dolomit dort, wo die Schichten nur in flache Falten gelegt wurden, verkarstet, dort wo Deckenbau herrscht, jedoch nicht.

Die Beobachtungen über die Höhlen des Säntisgebirges sind nun eine weitere Bestätigung der genannten Ergebnisse der Arbeit O. LEHMANNS: Nur diejenigen Dislokationen wurden zu Höhlen erweitert, die von Anfang an offene Klüfte darstellten.

Bei den *großen* Querdislokationen ist diese Bedingung nicht gegeben. Was die großen Querbrüche anbelangt, ist nach M. JEROSCH (Lit. 14, S. 229) anzunehmen, daß ein Bruch ursprünglich niemals klafft, wahrscheinlich auch nicht einmal teilweise oder vorübergehend, sondern daß gleichzeitig mit der Verstellung der Bruchflügel eine Brekzie die Kluft auszufüllen beginnt. Die Kluftfüllungen mögen wohl von vielen kleinen Fugen zerrissen und durchsetzt sein, größere Klüfte von überkapillarem Durchmesser konnten sich aber nicht öffnen. Die Voraussetzung für die Höhlenbildung war also nicht erfüllt. – Klaffende Fugen, wie sie nach LEHMANN zur Höhlenbildung erforderlich sind, konnten nur bei den durch das letzte Ausklingen des Deckenschubs geschaffenen Dislokationen entstehen, wo es wohl noch zum Bruche kam, wo aber die Verschiebung der Bruchflügel nur noch sehr gering war, so daß der Zwischenraum zwischen den Bruchwänden sich nicht mit Brekzie ausfüllen konnte. Nur diese Fugen sind – günstige hydrographische Verhältnisse vorausgesetzt – vom eindringenden Wasser zu Höhlen ausgeweitet worden.

Was wir eben über die hydrographische Wegsamkeit der großen Querbrüche gesagt haben, scheint allerdings einigen Beobachtungen

zu widersprechen, die ALB. HEIM im Säntisgebirge gemacht hat. ALB. HEIM schreibt (Lit. 14, S. 284): «Der Zusammenhang der Quellen mit dem Gebirgsbau ist überall deutlich. Die Quellen erscheinen da, wo ein durchlässiger Schichtenzug in möglichst tiefem Niveau von der Oberfläche angeschnitten, d. h. entblößt ist. Seewerkalk, Schrattenkalk, Valanginienkalke bilden durchlässige Längszonen, die Querbrüche bilden manchmal durchlässige Querwege.»

Wäre es aber nicht auch möglich, daß der Zusammenhang zwischen Querbrüchen und Quellen deshalb besteht, weil die Querbrüche für das nur korrosiv wirkende Wasser *un*durchlässige Zonen darstellen? Stellen wir uns vor, das unterirdische Wasser benütze eine geneigte Schicht als «Längsweg», bis es auf einen Querbruch stößt. Solange es nur durch Korrosion arbeiten kann, vermag es die Kluftfüllung weniger anzugreifen als das manchmal von Klüften durchsetzte Gestein der Bruchkluftwand; es ist dann gezwungen, dem undurchlässigen Hindernis entlangzusickern – und dann sieht es so aus, als ob der Querbruch ein «durchlässiger Querweg» sei. Für Wasser allerdings, das mechanische Arbeit zu leisten vermag, sind die Querbrüche die durchlässigeren Zonen. Für unsere Untersuchungen ist aber – weil die ersten Stadien der Höhlenausweitung der chemischen Einwirkung des Sickerwassers zugeschrieben werden müssen – vor allem wichtig, ob die Kluftfüllungsbrekzie durch die *Korrosion* besonders angreifbar ist. – Weil die Querbrüche «einen gegebenen Zirkulationsweg für unterirdische Wasseradern bilden» sollen, findet es M. JEROSCH (Lit. 14, S. 242) um so erstaunlicher, daß die Wände der großen Querbrüche so oft ihre schöne Politur und Schrammung bis heute erhalten haben. M. JEROSCH weist darauf hin, daß wohl das undurchlässige tonige und mergelige Material die Kluftwand konserviert hat. Ist aber nicht der Hauptgrund für die gute Erhaltung der Glättung und der Rutschstreifen der, daß das Wasser nicht in genügender Menge in die Kluftfüllungsbrekzie einzudringen und dort lösend zu wirken vermochte, als die betreffende Partie noch unter der heutigen Oberfläche lag?

In der Literatur findet man oft die Ansicht, daß bei der Entstehung von Höhlen auch *größere primäre Hohlräume*, deren Durchmesser sich nach Dezimetern bemißt, eine bedeutende Rolle gespielt

haben müssen. In manchen Fällen steht das Vorhandensein primär weiter Klüfte außer Frage; das berühmteste Beispiel ist das Höhlensystem von Bramabiau in den Cevennen (vgl. MARTEL, Lit. 25, S. 187–200, KRAUS, Lit. 19, S. 47, und LEHMANN, Lit. 22, § 100/03). In den Säntishöhlen konnte ich Anzeichen solcher größerer Urhohlräume nirgends feststellen.

Das Beobachtungsmaterial, das zu den oben dargelegten Ergebnissen über die Raumanlage führte, umfaßt zwar nur einen Teil (schätzungsweise die Hälfte) der bedeutenderen Säntishöhlen. Bei diesen aber sind die geologisch-tektonischen Verhältnisse so gleichartig, daß ich nicht daran zweifle, daß die Untersuchung der übrigen Höhlen zu denselben Resultaten führen und das hier Vorgebrachte bestätigen wird.

C. Die Erweiterung der primären Hohlräume zu Höhlen

Über die Art und Weise, wie die erste Ausweitung der primären Hohlräume vor sich ging, weiß man noch sehr wenig. Übereinstimmend wird angenommen, daß die *erste* Erweiterung der Klüfte durch die *Korrosion* besorgt wurde. Wie sich das aber im einzelnen abspielte, wieso z. B. auf einer steilstehenden Kluft, die auch in vertikaler Richtung beträchtliche Ausdehnung besitzt, eine horizontal verlaufende Höhle von mehr oder weniger isometrischem Querschnitt sich entwickeln konnte, oder warum die Größe des Querschnittes in ein und derselben Höhle manchmal auf kurze Strecken so stark zu wechseln vermag, ist noch ungeklärt. Sicher war die ehemalige Form der primären Hohlräume von ausschlaggebender Bedeutung für die heutige Gestalt der Höhlen, weil es von ihr abhing, an welchen Stellen das Wasser zuerst angriff. Wie diese primären Hohlräume im einzelnen beschaffen waren, können wir aber darum nicht mehr erfahren, weil ihre ursprüngliche Form eben durch die Erweiterung zerstört worden ist.

Aus der heutigen Gestalt der Höhlen kann man lediglich mehr oder weniger hypothetische Rückschlüsse ziehen. Der direkten Beobachtung sind diese *Urhohlräume* und die ersten Stadien ihrer Ausweitung auch nicht zugänglich. So ist es nicht verwunderlich, daß an dieser Stelle der schwache Punkt in jeder Ableitung der Entwicklung der Höhlen liegt. Die verschiedenen Höhlenbildungstheorien gehen alle mit mehr oder weniger unbestimmten Worten

über die ersten Stadien der Ausweitung hinweg oder schweigen hier überhaupt. – Erst über die Frage, durch welche Kräfte und auf welche Weise die Höhlen in den spätern Phasen ihrer Entwicklung erweitert worden sind, nachdem sich das Wasser bereits einen bestimmten Weg geschaffen hatte, ist man wieder besser orientiert. Einmal kann man in aktiven Wasserhöhlen direkt beobachten, wie die Vergrößerung der Hohlräume vor sich geht; in trockengelegten Höhlen jedoch ermöglichen die Gestalt der Räume, die Modellierung der Wände und der Decke und die am Boden liegenden Ablagerungsprodukte sichere Schlüsse auf die Entstehungsart.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Höhlen des mittleren Säntisgebirges sind alle *Trockenhöhlen;* ein unterirdischer See oder Bach ist in keiner einzigen zu finden. Direkte Beobachtungen über die Art und Weise, wie das Wasser höhlenerweiternd wirkt, konnten demnach hier keine gemacht werden. Trotzdem gelingt es, anhand der vergleichenden Untersuchung der Raumgestaltung, der Modellierung der Innenflächen, der Bodenablagerungen und der Lage im Gelände ein gutes Bild von der Entstehungsweise unserer Höhlen zu bekommen.

Wir folgen KYRLES Einteilung der höhlenerweiternden Kräfte und behandeln nacheinander die Spuren 1. der Erosion, 2. der Korrosion, 3. von Verwitterung und Deckenbrüchen.

1. Erosion

Unterirdische Bachläufe sind im Säntisgebirge ziemlich häufig; man denke nur, um gerade die bekanntesten Beispiele zu erwähnen, an den Abfluß des Sämbtiser- und des Fählensees, deren Wasser unter der südöstlichsten Säntiskette hindurchfließt und im Brunnentobel oberhalb Sennwald wieder zum Vorschein kommt, an die große «Tschuder»-Quelle westlich vom Escherstein in der Wasserau, oder an den Bach, der bei der Bollenwies aus einem Querbruch im Fuß der Häuserkette zum Vorschein kommt, in kurzem oberflächlichem Verlauf den Talboden überquert und alsbald unter der Stiefelegg wieder verschwindet. – Von allen diesen unterirdischen Bachläufen ist aber keiner begehbar; nirgends ist die Kraft des bewegten Wassers so groß gewesen, daß es sein Bett zu einer zugänglichen Höhle erweitert hätte. Schon diese Erscheinung deutet darauf hin, daß in unserm Gebiet die Erosion als höhlenbildende Kraft keine große Rolle spielt.

Andererseits sind in den zugänglichen Höhlen unseres Gebietes keine Bäche von nennenswerter Größe anzutreffen. Die einzige aktive Wasserhöhle der Kantone St.Gallen und Appenzell ist die *Kristallhöhle von Kobelwies* bei Oberriet im St.Galler Rheintal.

Schon in ihrem von jeher zugänglichen, etwa 80 m langen vorderen Teil wird sie ein Stück weit von einem ansehnlichen Bach durchflossen. Vom Eingang aus muß man zunächst einen ziemlich steilen Gang hinabsteigen, bis man an der tiefsten Stelle der ganzen Höhle zum Bach gelangt, der dort einen kleinen See bildet, dessen Abfluß zur äußeren Felswand durch eine unbegehbare Spalte erfolgte. Früher wurde jene Partie bei starkem Zufluß stets überschwemmt, so daß man dann nur mühsam oder überhaupt nicht weiter vordringen konnte. Im Zusammenhang mit verschiedenen Veränderungen, welche 1934 mit dem Zwecke vorgenommen wurden, die Höhle zu einem Anziehungspunkt für den Fremdenverkehr zu machen, wurde die Abflußspalte durch einen Stollen ersetzt, der auch eine maximale Wassermenge nach außen abzuleiten vermag. Von jenem Durchflußsee an bergeinwärts bildet die tiefste Sohle des Felsbodens das Bachbett, bis etwa 10 m vor dem höher gelegenen hintersten Teil der Höhle, wo das Wasser aus dem Fuß einer kleinen Felswand hervorfließt. Auf Veranlassung von J. GYR † in Gais wurde im Jahre 1934 mit Erfolg versucht, den Höhlenbach weiter zu verfolgen: Vom hintersten Teil des bis damals einzig begehbaren Höhlenraumes aus sprengte man einen 3 m langen Stollen durch die westliche Seitenwand und stieß dabei auf einen etwa 1 m breiten und 2 m hohen Gang, dessen Boden fast überall vom Bach überschwemmt wurde. Am untersten Ende dieses neu entdeckten Raumes versickert das Wasser in engen Spalten; jene Stelle liegt 15–20 m von der vorhin erwähnten Quelle im alten Höhlenteil entfernt. Die ersten 80 m hinter der Sprengstelle konnten ohne große Schwierigkeit begangen werden; dann aber senkte sich das Felsdach allmählich bis unter die Oberfläche eines langgestreckten Stausees. Bis in die Nähe dieser Stelle ist die Höhle vor zehn Jahren mit elektrischer Beleuchtung versehen und für jedermann zugänglich gemacht worden, indem man enge Partien erweiterte, den Bach teilweise in einen ausgesprengten Graben leitete, teilweise mit eisernen Stegen überbrückte. Im neu erschlossenen Teil sind mehrere freistehende Drusen von Kalzitkristallen, darunter Skalenoeder von 30 cm Länge, im ursprünglichen Zustande belassen worden. Bemerkenswert ist, daß ihre Oberflächen durchwegs durch kleine Unebenheiten angeätzt sind, so daß sie jeden Glanz verloren haben. Diese Gruppen pflegen daher auf den Laien einen geringeren Eindruck zu machen als das große Kalkspatlager in der Westwand des schon immer offenen vorderen Höhlenteils, welches durch Hunderte von Besuchern ausgeplündert worden war und daher überall die glänzenden Spaltflächen zeigt. – Jenseits des Eisengitters, das in etwa 150 m Entfernung vom Eingang den allgemein zugänglichen Höhlenteil abschließt, kann man seit der Sprengung zweier Siphons, wo das Felsdach unter das Wasser reichte, noch schätzungsweise 250 m weiter in den Berg vordringen. Abgesehen von der hintersten Partie, wo der Hohlraum breiter, aber sehr niedrig wird, bildet stets der Bach ein Sohlengerinne. An einigen Stellen fließt er am Grunde eines tiefen Einschnittes, so daß man sich oben zwischen den Wänden durchstemmen muß. Einige weitere Einzelheiten über die Gestaltung dieser hinteren Räume sind in der kurzen allgemeinverständlichen Beschreibung durch den Verfasser (Lit. 7) geschildert.

Die an vielen Stellen im Bachbett liegenden Gerölle beweisen eindeutig, daß der Höhlenbach eine erodierende Tätigkeit zu entwickeln vermag. Trotzdem ist nicht anzunehmen, daß die Kobelwieser Höhle ganz oder auch nur zum überwiegenden Teil durch die Erosion geschaffen wurde. Gewiß sind auch hier die verschiedenen Räume zuerst durch die Korrosion gebildet und erst nachträglich vom Bach als Weg gewählt worden, wobei sie dann durch die mechanische Wirkung des rasch fließenden Wassers noch erweitert wurden. Groß kann aber der Anteil der Erosion nicht gewesen sein. Wie ließe sich sonst erklären, daß der Bach zwischen dem alten und dem neuentdeckten Höhlenteil auf über 15 m Länge in schmalen Spalten versickert, trotzdem gerade dort das Gefälle erheblich größer ist als oberhalb und unterhalb jener Partie? Dieselbe Frage stellt sich auch für den Abfluß des kleinen Sees in der Nähe des Eingangs. Auch die Entstehung der Kristalle, auf die der nächste Abschnitt (III C 2) noch zurückkommen wird, und die Beschaffenheit ihrer Oberfläche läßt sich kaum mit der Annahme in Einklang bringen, daß die Höhle durch Erosion gebildet worden sei.

Auch bei der Entstehung der in dieser Arbeit ausführlich beschriebenen Höhlen des Säntisgebietes, die heute alle trocken liegen, hat die Erosion eine ganz untergeordnete oder überhaupt keine Rolle gespielt. Die Ansicht einiger Höhlenbildungstheoretiker, daß der Hauptanteil an der Raumerweiterung und der Raumgestaltung der Erosion zufalle, trifft für die Säntishöhlen sicher nicht das Richtige.

Gerollte Geschiebe, die eindeutigsten Spuren der Erosion, sind unter allen beschriebenen Höhlen nur in einer einzigen zu finden, und auch hier nur an einer Stelle: am untersten Ende des «Schlauches» in der Furgglenhöhle. Währenddem der Boden dieses langen, steil abwärts führenden Ganges sonst überall entweder vom festen Fels gebildet wird oder dann von kantigen Sturzblöcken und Schutt bedeckt ist, findet man zuunterst, vor dem Übergang in die horizontal verlaufende schmale Endspalte, eine Anschwemmung von fluviatil gerolltem Material, auffälligerweise nicht nur Gerölle aus Schrattenkalk, sondern auch solche aus braunem Hornstein. Diese Hornsteine sind höchstwahrscheinlich ortsfremd; quarzitische Einschlüsse im Schrattenkalk des Säntisgebirges kommen m. W. keine vor. Sie gleichen genau dem Gesteinsmaterial, aus dem der Wildkirchlimensch einen Teil seiner Steinartefakte hergestellt hat. Einige Stücke haben überdies die schmale Dreiecksform, die für manche jener Werkzeuge typisch ist; allerdings sind die Kanten stark abgerundet. Vermutlich handelt es sich bei diesen gerollten Hornsteinen um Werkzeugmaterial, das vom Paläolithiker in die Höhle gebracht und dann von seiner früheren Lagerstätte verschwemmt wurde. – Der «Schlauch» der Furgglen ist in unserem

Untersuchungsgebiet das einzige bekannte Beispiel für einen Höhlengang, dessen Ausweitung wahrscheinlich zu einem wesentlichen Teil der Erosion durch rasch fließendes Wasser zuzuschreiben ist. Hiefür sprechen folgende Gründe: 1. Eine richtungbestimmende große Kluft, auf der die Korrosion hätte angreifen können, ist nicht vorhanden. 2. Am untern Ende des «Schlauches» ist Geröll abgelagert. 3. Nach der Form der Höhle und ihrer Lage im Gelände (relativ großes Einzugsgebiet) ist es sehr gut möglich, daß er einmal einer größeren Wassermenge als Abzug gedient hat; alles Wasser, das in die Höhlenräume III und IV eindringt, fließt nämlich zum Eingang des «Schlauches» hin. 4. Dieses unterste Teilstück der Furgglen verläuft durchgehend sehr steil, so daß selbst ein kleinerer Bach kräftig erodieren konnte. – Es scheinen hier ähnliche Verhältnisse vorzuliegen wie in den von ARN. HEIM (Lit. 16) beschriebenen Beatushöhlen am Thunersee.

Außer an der genannten Stelle der Furgglen sind gerollte Geschiebe in keiner Höhle des mittleren Säntisgebirges gefunden worden. Auch die systematische Durchgrabung der Bodenauffüllung im Wildkirchli, die an manchen Stellen bis zum Felsboden hinabreichte, hat keinen einzigen im Wasser gerollten Stein zutage gefördert. Dasselbe wurde auch im Drachenloch und im Wildenmannlisloch festgestellt.

Von den Autoren, die der Erosion als höhlenbildender Kraft eine wichtige Rolle zuschreiben, werden auch manche Auswaschungsformen an den Innenflächen der Höhlen als Beweise für die Richtigkeit ihrer Ansicht angeführt. Wie im II. Kapitel erwähnt wurde, sind jedoch diese Wandmodellierungen mit großer Vorsicht zu deuten. Kolke und «Strudelnischen» sind in den größeren Höhlen unseres Gebietes, wo Verwitterung und Deckenbrüche die alten Formen nicht zerstört haben, oft anzutreffen. Sie werden im nächsten Abschnitt (III C, 2) behandelt. Was ihre Entstehung anbelangt, ist anzunehmen, daß sie nicht durch die Erosion gebildet wurden.

Ein Hauptgrund dafür ist der, daß die für die erosive Ausweitung der größern Hohlräume erforderlichen Wassermengen wenigstens bei einigen Höhlen nie vorhanden gewesen sein können. Man vergegenwärtige sich z. B. die topographische Lage des Wildkirchli, der Alpeelhöhle, des Wildenmannlislochs (vgl. Lit. 6, Abb. 25, 27) und des Drachenlochs (Lit. 6, Abb. 17, 19). Sie liegen alle orographisch sehr hoch, entweder an der Flanke von Bergrücken, nur

wenig unter der Wasserscheide (Alpeel, Wildenmannlisloch) oder nur wenig unter der Oberfläche eines kleinern isolierten Bergkopfes (Drachenloch) oder Plateaus (Wildkirchli). Das Einzugsgebiet, dessen Wasser der Höhle zufließt oder ihr zufließen könnte, ist in jedem Falle viel zu klein, als daß es einen einigermaßen ansehnlichen kontinuierlichen oder auch nur periodischen Höhlenbach versorgen könnte, der imstande gewesen wäre, unterirdische Hohlräume durch Erosion auszuweiten. Aus einer Menge von Beispielen, die zeigen, daß die erforderlichen Wassermengen das Maß des Möglichen weit übersteigen, greifen wir hier nur ein einziges heraus. Der mittlere Teil der horizontal verlaufenden Wildenmannlislochhöhle (der sogenannte «Schlauch») hat auf seine ganze Länge von über 30 m stets ungefähr den gleichen Querschnitt: Die Decke bildet einen sehr schön geglätteten und ebenmäßig gewölbten flachen Bogen (vgl. Lit. 4, Abb. 20); die Seitenwände hingegen zeigen unregelmäßige Kolke, welche an die Auswaschungsformen erinnern, die man an Schluchtwänden findet. Der Gang ist hinten 1,6 m, vorn 3,5 m breit. Eine Wassermenge nun, die ein Bett von dieser Breite auszufüllen und zu erodieren vermöchte, ist aber nach der ganzen topographischen Lage der Höhle – sie durchquert den schmalen, an dieser Stelle beinahe horizontalen Selunerruck, maximal 50 m unter dessen Oberfläche – unmöglich; auch zu Zeiten, als vielleicht größere Niederschlagsmengen fielen als heute, konnte ein größerer Höhlenbach nicht existieren.

Wir haben hier nur einige der wichtigsten Beobachtungen hervorgehoben, die zum Schlusse zwingen, daß die Erosion keinen oder höchstens einen sehr bescheidenen Anteil an der Erweiterung der Höhlenräume hatte. Weiteres Beweismaterial für diese Ansicht (karrige Auslaugung des felsigen Höhlenbodens, Ansteigen des Felsbodens vom Innern nach dem Höhleneingang, Lagerung und Beschaffenheit der Höhlensedimente u. a. m.) wurde hier, um Wiederholungen zu vermeiden, nicht erwähnt, weil sich der folgende Abschnitt eingehend mit diesen Punkten beschäftigt.

2. Korrosion

Wie wir soeben gesehen haben, sprechen alle Gründe dagegen, daß bei der Entstehung der in dieser Arbeit näher besprochenen Höhlen die Erosion als raumerweiternde Kraft wesentlich mitgewirkt habe. Wenn man eine größere Höhle unseres Gebietes be-

sucht, so ist es zwar nicht immer leicht, sich von der Vorstellung freizumachen, daß hier vor Zeiten mächtig strömende Wassermassen sich einen Weg durch den Fels geschaffen haben, besonders dort, wo man an den Wänden noch Auswaschungsformen findet, wie man sie in ähnlicher Art von felsigen Flußufern her kennt. Eine genauere Prüfung der Situation der Höhlen im Gelände, ihrer Formen und des Materials der Bodenauffüllung zeigt aber, daß die Bildung der Höhlen des Säntisgebirges nicht der mechanischen Arbeit raschfließender Gewässer zu verdanken ist, sondern der langsamen chemischen Auflösung des Kalksteins durch kohlensäurehaltiges Wasser, der Korrosion.

Es wurde schon sehr früh erkannt, daß das Wasser nur dort weit ins Innere des Gebirges eindringen kann, wo das Gestein durch tektonische Kräfte zerbrochen worden ist. Welcher Art in unserm Gebiete die tektonischen Störungen sind, von denen aus die Höhlen sich entwickelt haben, ist im Abschnitt über die Raumanlage (III B) eingehend dargestellt worden. Es sind, wenn wir von den durch Unterwitterung gebildeten Halbhöhlen absehen, ohne Ausnahme *kleine* Brüche mit nur geringer relativer Verschiebung der Bruchflügel. Es ist bei ihnen nur zu einem Unterbruch in der Kontinuität, zu einem Riß gekommen, nicht aber zu einer gleichzeitigen Ausfüllung des Risses durch eine Brekzie. Einzig diese offenen Dislokationsfugen konnten – das Vorhandensein des nötigen Wassers vorausgesetzt – zu Höhlen erweitert werden. Nach den vorliegenden Beobachtungen hat man sich, was die Säntishöhlen anbelangt, über die Raumausweitung folgendes allgemeine Bild zu machen:

Die offenen Klüfte wurden zunächst vom Sickerwasser vollständig erfüllt und in langsamer Bewegung durchflossen. Das Wasser löste dabei im Innern des Berges durch seinen Gehalt an freiem CO_2 den Kalkstein auf. Es wird an den Stellen, wo die Bruchflügel weiter voneinander entfernt waren, langsamer geflossen sein und dadurch Gelegenheit gehabt haben, länger auf das Gestein einzuwirken und sich vielleicht bis zur Sättigung mit Kalziumbikarbonat zu beladen. Dadurch wurden die von Anfang an etwas weiteren Stellen stärker ausgeweitet. Je größer sie wurden, um so eher wurden sie vom Wasser als Weg benützt, und um so weniger liefen sie Gefahr, nachträglich durch Sinter wieder verschlossen zu werden. Die Hohlräume im Berginnern konnten natürlich nur dann

erweitert werden, wenn das Wasser in ihnen nicht völlig stagnierte, sondern wenn eine auch nur langsame Bewegung dafür sorgte, daß immer lösungsfähiges Wasser das Spalten- und Höhlensystem durchfloß und daß der gelöste Kalk fortgeführt wurde. Diese Bedingung wird wohl vor allem dort erfüllt gewesen sein, wo eine hydrographisch wegsame Kluft an die Oberfläche eines Abhangs ausstrich; das Wasser konnte hier eher einen Ausweg finden als tief im Innern des Bergkörpers.

Am Anfang ist das Höhlensystem ganz mit Wasser gefüllt gewesen. Nachdem durch die fortschreitende Auflösung sein Querschnitt größer und durch die Erweiterung der engen Stellen gleichmäßiger geworden war, mögen wohl die zufließenden Wassermengen nicht mehr ausgereicht haben, um das ganze Raumsystem ständig zu füllen. Während trockenen Perioden lief es teilweise oder ganz leer. Schließlich wurde der Hohlraum überhaupt nie mehr ganz vom Wasser eingenommen, entweder weil es sich tieferliegende Klüfte erschlossen hatte, oder weil die Abflußwege so weit geworden waren, daß sie eine stauende Wirkung nicht mehr ausüben konnten.

Die Erweiterung tektonischer Klüfte durch die Korrosion bildete zunächst Hohlräume, die abgeschlossen im Innern des Berges lagen. Die Schaffung einer Verbindung mit der Außenwelt ist wohl durch die Korrosion höchstens angebahnt worden, zur Hauptsache ist es die gewöhnliche Verwitterung, die *von außen her* die bereits bestehenden Höhlungen im Berginnern freigelegt und die Höhleneingänge so modelliert hat, wie wir sie heute vor uns sehen.

Wie die Ausweitung der Klüfte zu Höhlen im einzelnen vor sich gegangen ist, läßt sich heute, wo die Höhlen schon längst trocken liegen, nicht mehr erkennen. Währenddem man einerseits weiß, warum die Höhlen unseres Gebietes gerade dort anzutreffen sind, wo man sie heute findet (nämlich dort, wo offene Klüfte sich bilden konnten), ist man anderseits in den wenigsten Fällen imstande, anzugeben, wieso sie auf Grund der bestehenden Klüftungsverhältnisse gerade ihre heutige Form erlangten. Wie bereits erwähnt, liegt der eine Grund für diese Unsicherheit darin, daß man die ursprüngliche Gestaltung der tektonisch geschaffenen Urhohlräume, von der offenbar viel abhängt, nicht mehr ergründen kann. Die andere Schwierigkeit ist die, daß man über die Art und Weise, wie die Korrosion die Klüfte angreift und ausweitet, an Ort und

Stelle keine direkten Beobachtungen machen kann, weil eben die Höhlen in jenen Stadien ihrer Entwicklung noch nicht zugänglich sind.

Doch läßt sich aus der genauen Beobachtung z. B. der Wand- und Querschnittsformen manches über die Vorgänge bei der Höhlenerweiterung rekonstruieren, und durch die Zusammenstellung solcher Einzelheiten wird man dazu kommen, sich einmal ein lückenloses und genaues Bild vom Werdegang mancher Höhle machen zu können, ohne, wie es heute noch der Fall ist, über einige Stadien der Entwicklung mit mehr oder weniger unklaren Worten hinweggehen zu müssen.

Leider sind die Säntishöhlen in dieser Hinsicht keine sehr dankbaren Untersuchungsobjekte, vor allem aus dem einen Grunde, weil die Formen, die die Korrosion hinterlassen hat, an den meisten Orten durch Verwitterung und Deckenbrüche bereits unkenntlich gemacht sind. Einige Höhlen sind sogar so klein, daß die Verwitterung bis an ihr hinterstes Ende ihren zerstörenden Einfluß geltend macht. – Immerhin läßt sich noch mancherlei feststellen. Wir lassen hier kurz einige Beobachtungen über Raumanlage und Einzelformen folgen, die uns der Festlegung würdig erscheinen.

Die beiden als *Fundstellen von Mineralien* schon lange bekannten Höhlen des Säntisgebirges im weiteren Sinne, Dürrschrennen und Kobelwies, zeigen, daß die Korrosion ursprünglich abgeschlossene Hohlräume schuf. In der Kobelwies ist es die große Menge von Kalkspat, in der Dürrschrennen das umfangreiche Lager von grünem Fluorit, die sich niemals hätten bilden können, wenn die Höhlen durch die erodierende Tätigkeit eines Höhlenbaches gebildet worden wären. In beiden Fällen hat die Korrosion zuerst eine Dislokationskluft zu einem größeren Hohlraum ausgeweitet, der mit der Außenwelt nur durch enge Zu- und Abflußspalten verbunden war. Dieser muß von *ruhendem* Wasser erfüllt gewesen sein, aus dem sich die Kristalle abscheiden konnten. Die bemerkenswerte Größe der Kristalle (in der Dürrschrennen sind Fluorithexaeder von über 7 cm, in der Kobelwies Kalzitskalenoeder von über 10 cm Kantenlänge keine Seltenheit) erlaubt den Schluß, daß die Ausfüllung der Höhle durch stagnierendes Wasser sehr lange Zeit dauerte. Erst später hat sich die Höhle dann durch Erweiterung der Abflußwege entleert und durch die Verwitterung eine weite Verbindung mit der Außenwelt bekommen; daß dieser

Zugang nicht immer den Abflußwegen zu folgen braucht, zeigt das Beispiel der Kobelwies. Während die Dürrschrennen – von einigen unbedeutenden Tropfstellen abgesehen – ganz trocken wurde, hat sich in der Kobelwieser Höhle ein Sohlengerinne erhalten. Wahrscheinlich vollzog sich hier die Erweiterung der Abflußwege nur langsam, so daß sich die Höhlenräume zunächst nur noch zeitweise und dann überhaupt nicht mehr mit Wasser füllen konnten. In die Übergangsphase mit gelegentlicher vollständiger Füllung bei rascherem Durchfluß ist die nachträgliche Anätzung der Kristalle anzusetzen, deren Wachstumsflächen heute durchwegs gleichmäßig korrodiert sind.

Eine sehr auffällige Eigenart der Raumanlage zeigen die Furgglenhöhle und außerhalb des Säntisgebiets das Drachenloch ob Vättis (vgl. Plan in Lit. 6, Abb. 22). Sie sind *in einzelne Kammern gegliedert*, die miteinander nur durch enge Durchschlupfstellen verbunden sind. Im Drachenloch schließen sich an den geräumigen vordersten Teil in ziemlich geradliniger Anordnung fünf kleinere Hohlräume an. In der Furgglen ist der oft unvermittelte Wechsel der Querschnittsgröße noch ausgeprägter; die engen Durchgänge zwischen den verschiedenen geräumigen Kammern sind im I. Kapitel beschrieben worden. In der Höhlenliteratur (z. B. Lit. 22) findet man die Ansicht vertreten, ein solcher Wechsel sei dadurch zu erklären, daß die Raumerweiterung von einzelnen erheblich größeren Urhohlräumen (von einigen Dezimetern Durchmesser) ausgegangen sei, diese stark und die dazwischenliegenden Partien nur wenig angegriffen habe. In der Furgglen und im Drachenloch ist das Vorhandensein von so großen Urhohlräumen sehr unwahrscheinlich. Eine tektonisch bedingte Zersplitterung des Gesteins hat zwar stattgefunden, größere Hohlräume konnten sich aber wegen der fehlenden Ausweichmöglichkeiten wohl kaum bilden. Gewiß ist auch hier die Gliederung der Höhle in einzelne Kammern durch die stärkere Ausweitung schon primär größerer Hohlräume bedingt. Um schon von Anfang an sehr weite Klüfte kann es sich aber nicht handeln; wahrscheinlich hat hier die Korrosion einfach zuerst dort stärker angegriffen, wo die Bruchkluftwände etwas weiter voneinander entfernt waren oder überhaupt einen überkapillaren Abstand hatten. Von diesen Stellen aus bildeten sich zunächst einzelne wassererfüllte Kammern, die erst infolge der immer fortschreitenden Vergrößerung durch Korrosion miteinander in Verbindung kamen.

Für das Studium von chemischen *Auskolkungsformen* an Höhlenwänden ist das Wildenmannlisloch (Churfirsten) unter allen bekannten Höhlen der Nordostschweiz der günstigste Ort. In den hintern Teilen dieses etwa 150 m langen horizontalen unterirdischen Ganges sind die durch Korrosion geschaffenen Formen auf die ganze Länge der Höhle prachtvoll erhalten. In der Monographie über das Wildenmannlisloch (Lit. 5, S. 96–98 und S. 103/4) gibt E. BÄCHLER eine erklärende Beschreibung dieser Wandmodellierungen; Abb. 17–21 zeigen einige der eindrucksvollsten Stellen. Unregelmäßige, scharfkantige Korrosionsformen, von den österreichischen Höhlenforschern «Hacheln» genannt (vgl. W. CZOERNIG, Lit. 10, S. 122 und Taf. XX), sind an einigen Stellen der Wände und der Decke des vorderen Höhlenteiles auf großen Flächen sehr schön ausgebildet (Lit. 5, Abb. 15). Flachmuschelige Auswaschungen und Kolke findet man besonders an der schräg-liegenden südöstlichen Seitenwand der «Kammer» (l. c., Abb. 17 und 18), dann weiter bergwärts überall an den Seitenwänden des «Schlauches» und der «Klamm» (Abb. 19–21). – Die «Muscheln» grenzen durchgehend mit senkrechten oder ungefähr in der Richtung des größten Gefälles verlaufenden, oft sehr scharf vorspringenden Kanten aneinander. Diese Kanten sind nicht etwa deshalb stehen geblieben, weil sie härter oder sonstwie vom Wasser weniger angreifbar wären: Man sieht sehr oft, wie die horizontalen dünnen Seewerkalkschichten die Kolke und Kanten überqueren und auf deren ebenmäßige Ausgestaltung gar keinen Einfluß haben; weichere und dünnere Schichten sind dabei nicht stärker abgetragen als mächtigere und härtere; auch kleinere Schichtfugen sind nicht besonders angegriffen worden. Diese flachen Auskolkungen können nicht das Werk eines raschfließenden Höhlenflusses sein, obwohl sie teilweise stark den Modellierungen gleichen, die man an den Wänden von Schluchten findet. – Es wurde bereits gezeigt, daß durch das kleine Einzugsgebiet der Höhle ein der Querschnittsgröße der Höhle angemessener Höhlenbach unmöglich hätte gespiesen werden können. Die Kolke sind wahrscheinlich folgendermaßen entstanden: Sie stammen aus einer Zeit, wo die Höhle noch einen abgeschlossenen Höhlenraum darstellte. Das sie erfüllende Wasser befand sich nicht in Ruhe, sondern infolge des ständigen Ab- und gelegentlichen Zuflusses in einer langsamen Fließbewegung. In Hohlräumen, die Durchmesser von einigen Metern haben, treten

nun schon bei äußerst langsamem Fließen Wirbel auf, besonders wenn die Wände des «Gefäßes» nicht glatt, sondern rauh und winklig sind (LEHMANN, Lit. 22, § 25). Diese Wirbel zeigen die Neigung, stabil zu werden (l. c., § 27), d. h. wenigstens für einige Zeit immer am gleichen Orte aufzutreten. Die ständige, sanft drehende Bewegung des Wassers hat sich dabei im Fels abgebildet. Es hat – zur Hauptsache durch seine chemische Wirkung – die schalenförmigen Vertiefungen ausgewaschen.

Wo anläßlich prähistorischer Ausgrabungen in nordostschweizerischen Höhlen, z. B. im Wildkirchli, der vorher von Lockermaterial bedeckte *Felsboden* freigelegt wurde, zeigte sich stets, daß dieser *karrig ausgelaugt* ist. Es handelt sich dabei meistens nicht um die typischen Karrenformen, wie man sie an der Erdoberfläche findet, also Rillen und Grätchen, die alle in der Richtung des größten Gefälles verlaufen. Der Felsboden der genannten Höhlen wies stets grubenförmige Vertiefungen von wechselnder Größe und unregelmäßiger Anordnung auf, die durch stumpfwinklige Kanten gegeneinander abgegrenzt sind. Nirgends zeigten sich ausgedehnte glattgeschliffene Partien, wie sie raschfließendes Wasser geschaffen hätte. Auch die Modellierung des Felsbodens der Höhlen zeigt also eindeutig, daß nicht die Erosion, sondern die Korrosion am Werke war.

Karrenbildungen im engeren Sinne sind im Innern der Höhlen häufig anzutreffen. Am besten sind sie auf schiefen Wandflächen ausgebildet, beispielsweise an der westlichen Seitenwand der zweiten Abteilung der Furgglen. Verglichen mit den vorhin erwähnten Auskolkungsformen sehen diese stets in der Richtung des größten Gefälles verlaufenden Karren frisch aus, da sie im Gegensatz zu den Kolken erst *nach* der Entleerung der Höhlen entstanden sein können, zu einer Zeit, da nur noch kleine Rinnsale von Sickerwasser an die Höhlenwände gelangten.

Zeugen der korrosiven Tätigkeit des Wassers sind mindestens teilweise auch die mächtigen *Lehmablagerungen* in den inneren, dem Spaltenfrost unzugänglichen Teilen der meisten größeren Karsthöhlen. Es ist nicht die Aufgabe der vorliegenden Untersuchung, sich mit der Entstehung der Höhlensedimente näher zu befassen; es werden hier nur einige Beobachtungen herausgegriffen, die geeignet sind, zur Lösung der Fragen nach der Entstehung der Höhlen*räume* beizutragen. Es sind dabei vor allem Ergebnisse der syste-

matischen Ausgrabungen im Wildkirchli, Wildenmannlisloch und Drachenloch verwertet, welche E. BÄCHLER in seiner abschließenden Monographie über diese drei altsteinzeitlichen Fundplätze veröffentlicht hat (Lit. 6, Kap. IV und V).

Während die lehmig-erdige Bodenauffüllung in den dem Spaltenfrost ausgesetzten äußeren Höhlenteilen hauptsächlich durch das Absprengen von Gesteinstrümmern von Decke und Wänden sich bildet, die mit der Zeit am und im Boden weiter zerkleinert und teilweise kreidig zersetzt werden, gehen die Ablagerungen von äußerst feinkörnigem Lehm in den hinteren, der exochthonen Verwitterung nicht mehr zugänglichen Höhlenteilen auf andere Ursachen zurück. Eine sowohl in vertikaler wie in horizontaler Richtung große Ausdehnung haben diese gleichmäßig feinen, keinen Gesteinsschutt enthaltenden Lehmschichten z. B. im Wildenmannlisloch (Churfirsten); vom vorderen Teil des Eingangstunnels abgesehen bilden sie dort praktisch die gesamte Bodenauffüllung. Wie auch in anderen Höhlen festgestellt wurde, bilden diese Lehme nicht eine völlig homogene Masse, sondern sie sind in horizontale Schichten gegliedert. Zusammen mit dem Fehlen größerer Gemengteile ist dies ein Anhaltspunkt dafür, daß diese Schichten in ruhendem Wasser oder doch in nur sehr langsam durchflossenen Staukammern oder Staubecken abgelagert wurden. Zweifellos handelt es sich bei diesen Lehmschichten um einen Teil des Materials, welches vom Sickerwasser beim Durchfließen des Felsdaches über der Höhle und auch der Höhle selbst mitgeführt und dann abgelagert wurde. Für die untersten Schichten, die sich bildeten, als die Höhle noch ein ständig oder zeitweise wassererfüllter Hohlraum ohne weite Verbindung mit der Außenwelt war, ist anzunehmen, daß die Bodenablagerung die unlöslichen Rückstände des Kalksteins enthält, der einst den Platz des Hohlraumes einnahm. Wie die von R. LAIS (Lit. 21, S. 100) vorgenommene Analyse der hellen Lehmschichten des Wildenmannlisloch zeigt, enthalten diese auch große Mengen von $CaCO_3$ (Gesamtgehalt an Karbonaten 39,5% bis 77%), was wohl kaum anders erklärt werden kann, als daß hier ein Teil des vom Sickerwasser auf seinem Weg bis zur betreffenden Stelle der Höhle aufgenommenen Kalkes wieder ausgeschieden wurde. Gleichzeitig mit diesem chemisch ausgefällten Material kann allerdings auch ganz feines mechanisches Sediment (Pelit) abgelagert worden sein, indem das Wasser auf seinem Weg von

der Oberfläche bis zur Höhle auch bei geringer Fließgeschwindigkeit feinste Boden- und Gesteinsteilchen mitzuführen vermochte, die dann in den Staubecken zu Boden sanken. Solche Staubecken müssen in allen drei unter der Leitung von E. BÄCHLER ausgegrabenen Höhlen vorhanden gewesen sein, denn in jeder von ihnen gibt es Stellen, wo der Felsboden im Längsprofil gegen den Ausgang hin ansteigt, so daß das ins Innere der Höhle eingedrungene Wasser sich hinter diesen Felsbarrieren ansammeln mußte. In diesen Becken zeigt die unterste Lehmschicht ihre größte Mächtigkeit und eine sehr reine, fast weiße Ausbildung. Mit der Zeit werden die ursprünglichen Vertiefungen durch die stärkere Ablagerung ausgefüllt worden sein.

In den heute zugänglichen Höhlen sind höchstens noch die letzten Phasen dieser Sedimentation zu sehen. Um so wertvoller sind einige von H. SCHARDT (Lit. 28) mitgeteilte Beobachtungen, die beim Bau des Mont d'Or-Tunnels gemacht werden konnten. Sie geben Einblick in ein frühes Stadium der Höhlenbildung, das sonst naturgemäß der Untersuchung verschlossen bleibt. Beim Vortrieb des Stollens stieß man im Malmkalk auf lehmerfüllte Spalten. Beim Anstechen des Lehms erfolgten verheerende Wassereinbrüche. Es zeigte sich, daß dieses Wasser Hohlräume erfüllt hatte, deren unterste Teile von den angebohrten Lehmmassen eingenommen wurden. Wo dieser Lehm beim Ausbruch nicht fortgespült und umgelagert worden war, zeigte er horizontale Schichtung, teilweise sogar blätterige Struktur. An den Wänden der leergelaufenen Hohlräume war der Fels feinzellig angeätzt, seine Oberfläche zeigte überall Näpfchen und Rippen, Fossilien aus schwerer löslichem Material waren reliefartig aus dem umgebenden Kalkstein herausgelöst. Die Erweiterung der Spalten war also eindeutig durch die *chemische* Einwirkung des sie erfüllenden Wassers erfolgt; dieser verdanken zweifellos auch die Lehmablagerungen am Boden der Hohlräume ihre Entstehung.

3. Verwitterung und Deckenbrüche

KYRLE (Lit. 20, S. 56f.) unterscheidet: 1. *exochthone Höhlenverwitterung* («diejenige Verwitterung in Höhlen, bei der im allgemeinen die Gesamtheit der Tagverwitterungskräfte tätig ist») und 2. *endochthone Höhlenverwitterung* («diejenige Verwitterung in Höhlen, bei der stets nur ein Teil der Tagverwitterungskräfte tätig ist»).

Exochthone Verwitterung

«Wenn man horizontale Trockenhöhlen betritt, so wird man in einiger Entfernung hinter dem Höhleneingang in verschiedenen Höhlen sehr oft gemeinsame Erscheinungen antreffen. Das Gemeinsame besteht im wesentlichen aus folgendem:

1. Fast immer nimmt die Weite des Höhlentors und des Vorhofes gegen das Höhleninnere zu ab.
2. Die Decke und die Wände der vordersten Teile der Höhlen zeigen keine altzeitliche Modellierung mehr, sondern ganz ähnliche Verwitterungsflächen wie die Gesteinsabbruchwände am Tag.
3. Am Boden findet sich ein erdiger Belag, durchschossen mit kleinen kantigen, häufig plattenförmigen Steinen; nur in sehr seltenen Fällen ist der Boden auch mit großen Gesteinstrümmern bedeckt.

Diese sich immer wiederholenden Erscheinungen in den vordersten Teilen horizontaler Trockenhöhlen reichen im allgemeinen nur so weit, als die Gesamteinwirkung der Atmosphärilien und der Temperaturschwankungen nicht gestört ist, oft auch nur so weit, als das Tageslicht eindringen kann. Die Beschaffenheit der vordersten Höhlenteile ist in ihrer heutigen Gestalt fast immer das Produkt der exochthonen Höhlenverwitterung» (KYRLE, l. c., S. 57).

Von den drei soeben zitierten Beobachtungssätzen fassen die beiden ersten bereits zusammen, was sich über die Gestaltung der äußeren Partien der Säntishöhlen sagen läßt; Satz 3 hingegen deckt sich nur teilweise mit den hier gemachten Beobachtungen.

Die Form des Höhlentores

Bei den mir bekannten Höhlen im Kalkgebirge der Kantone St.Gallen und Appenzell ist ein bergeinwärts trichterartig sich verengerndes Höhlentor gut ausgebildet: Bei allen drei Eingängen der Wildkirchli–Ebenalp-, bei der Furgglen- und bei der Kobelwieshöhle. – Eine allmähliche Verengerung vom Eingang nach hinten ist ebenfalls festzustellen beim Wildkirchli-Rees, beim Teufelskirchli und bei der Dürrschrennen. Im Gegensatz zu den vorher genannten bestehen diese Höhlen aber *nur* aus einem nach hinten trichterartig sich verengernden Raum; es fehlt eine weitere Fortsetzung ins Innere des Berges. Was bei den erstgenannten Höhlen nur Vorhalle ist, hinter deren engster Stelle die eigentliche Höhle erst beginnt, ist bei diesen Halbhöhlen (Balmen) der einzige Raum.

– Ein überdachter Vorplatz vor dem Eingang ist auch beim Zigerloch vorhanden; hier ist aber die Verengerung zur Zugangsspalte ganz unvermittelt und unregelmäßig. – Bei der Alpeelhöhle und beim Wildenmannlisloch sowie bei der Gartenalphöhle ist von einer Verkleinerung des Querschnitts gegen das Höhleninnere zu nichts zu bemerken; die Höhlen sind im Gegenteil am Eingang enger als weiter innen.

Worin sind nun diese Verschiedenheiten begründet? Ohne Zweifel ist es überall die *Verwitterung,* die den Höhlentoren die heutige Gestalt gegeben hat, und nicht das fließende Wasser. Daß die vordersten Höhlenteile trichterförmig erweitert werden, ist ja ohne weiteres verständlich: Die Verwitterung arbeitet am intensivsten in den vordersten Partien, weil hier die Temperaturdifferenzen zwischen Tag und Nacht zu jeder Jahreszeit am größten sind und weil sich hier die sprengende Wirkung von Spaltenfrost und Pflanzenwurzeln am meisten bemerkbar macht. – Man könnte nun denken, die großen Unterschiede in der Form der Höhlentore seien durch verschiedene Intensität der Verwitterung an den betreffenden Orten bedingt (etwa infolge verschiedener Exposition, Verschiedenheit der Vegetationsbedeckung usw.). Es zeigt sich aber, daß diese Faktoren eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Unterschiede in der Ausbildung der Höhleneingänge sind hauptsächlich durch die *lokalen geologischen Verhältnisse* bedingt: Der petrographische Charakter des Gesteins, in dem die Höhle liegt, die Lage ihres Eingangs im Gelände (steile Felswand oder geneigter Abhang), die Schichtstellung, die Lage der Höhle zu Dislokationsflächen sind die wichtigsten Faktoren, die die Verwitterung in bestimmte Bahnen lenken und so bestimmte Formen bewirken. Bei ähnlichen geologischen Bedingungen entstehen ähnliche Formen.

Die größte Rolle spielt offensichtlich der *petrographische Charakter des Gesteins,* in dem die Höhle liegt. Die Höhlen im Schrattenkalk und in dem ihm petrographisch zum Verwechseln ähnlichen Valanginienkalk zeigen in der Regel ein weites, großes Höhlentor, das sich nach innen zu verengert (einzige Ausnahme: Gartenalp. Am Abweichen von der Regel sind wohl die Enge des vordersten Ganges und die besondere Lage der Dislokationsfläche schuld). In diesen massigen, manchmal kaum geschichteten Kalken sind der innere Zusammenhang und die Standfestigkeit des Gesteins so groß, daß hohe

und breite Außentore sich bilden und halten konnten. In den dünnbankigen, mit Mergelschichten wechsellagernden Kalken der Drusbergschichten (Alpeel) jedoch sind diese Voraussetzungen nicht gegeben; das relativ weiche und teilweise «faule» Baumaterial setzt der Größe des Gewölbequerschnittes eine obere Grenze, die nicht überschritten werden kann, ohne daß mindestens die mittleren Partien einstürzen. – Im dünnschichtigen Seewerkalk liegen die Verhältnisse ähnlich; die Standfestigkeit dieses Gesteins ist zwar bedeutend besser als die der Drusbergschichten, reicht aber doch bei weitem nicht an die des Schrattenkalkes heran. Der petrographische Charakter des Gesteins ist nicht nur in dieser einen Hinsicht wichtig, sondern auch noch in einer andern: er bedingt auch den Böschungswinkel des Geländes, in dem das Höhlentor liegt. Dieser ist natürlich auch von Bedeutung für die Form des Einganges; an einer Steilwand kann die Verwitterung verständlicherweise leichter eine große Abbruchnische schaffen als an einem geneigten Abhang, der außerdem meist noch durch eine Vegetationsdecke vor rascher Abtragung geschützt ist. Der Einfluß dieses Faktors tritt besonders deutlich hervor, wenn man Höhlen vergleicht, die in demselben Gestein, aber in verschiedener *Lage im Gelände* sich befinden: Das Drachenloch ob Vättis, das Wildenmannlisloch und eine dem letztern benachbarte, noch nicht näher erforschte große Höhle, liegen alle in Seewerkalk; ihre Eingänge sind aber sehr verschieden geformt; die Unterschiede sind nicht durch die Exposition bedingt (alle drei öffnen sich gegen Osten), sondern in erster Linie durch die Verschiedenheit der topographisch-morphologischen Lage des Einganges: Das Drachenloch liegt in einer senkrechten Felswand; hier hat das Höhlentor die Form eines großen, hohen gotischen Bogens, der nach innen kleiner wird (Lit. 6, Abb. 21). Der Eingang zum Wildenmannlisloch liegt am etwa 40° geneigten Ostabhang des Selunerruck; er ist viel kleiner und im Querschnitt breiter als hoch; von einer trichterförmigen Erweiterung ist nichts zu bemerken (Lit. 4, Abb. 12). Die große Höhle neben dem Wildenmannlisloch schließlich, die an einem noch flachern Hang ausmündet, hat nur ein ganz unscheinbares, kaum 50 cm hohes Loch als Zugang.

Die *Lage der Schichten* scheint ebenfalls einen Einfluß auf die Gestalt des Höhlentores zu haben. Wo die Schichten flach liegen, wird das Höhlentor größer als da, wo sie – ceteris paribus – senkrecht

einfallen. Man vergleiche das relativ kleine Höhlentor der Furgglen (senkrecht einfallender Schrattenkalk) mit den weiten Ausgängen der Wildkirchlihöhle (flache Lagerung).

Auch *Dislokationsflächen,* die durch das Höhlentor gehen, werden meist die Querschnittsform beeinflussen. Weil die Verwitterung längs der Bruchfugen besonders gut ansetzen kann, ist der Querschnitt meist in deren Richtung langgestreckt; weil die Dislokationsflächen alle mehr oder weniger steil einfallen, ergibt sich dann stets ein *hohes* Höhlentor (Dürrschrennen, Wildkirchli-Rees, Höhlen ob der Bollenwies). Nicht selten bildet sich dabei die Form eines hohen gotischen Bogens heraus, dessen spitzer Winkel auf der Scherfläche liegt (Drachenloch, Teufelskirchli). – Wie regelmäßig ein Höhlentor ausgeweitet werden kann, wenn keine Dislokationsfläche seine Form «stört», zeigt der große halbkreisförmige Bogen des Eingangstors zur Wildkirchli-Altarhöhle.

Wie weit reicht die (exochthone) Verwitterung in die Höhlen hinein?

Aus der feinern Modellierung der Decke und der Wände ist deutlich zu sehen, wie weit der Einfluß der Verwitterung in die Höhlen hineinreicht. Auch in dieser Beziehung bestehen sehr große Unterschiede; wir führen hier nur zwei extreme Beispiele an: In der Wildkirchli–Ebenalp-Höhle sind Decke und Wände überall (auf etwa 70 m Länge) kantig und eckig, also von der Verwitterung angegriffen. In der kleinen Gartenalphöhle hingegen sind vom Durchschlupf zum zweiten Raum an (nur 9 m vom äußern Eingang entfernt) alle alten Korrosionsformen vollständig erhalten; der Schrattenkalk ist oberflächlich überall hell ockergelb; nirgends ist auch nur ein Stücklein abgewittert.

Diese Unterschiede sind leicht zu erklären. Wie KYRLE (Lit. 20, S. 57) angibt, sind es die *Temperaturverhältnisse,* die den Bereich der exochthonen Verwitterung bestimmen. KYRLE begnügt sich mit dieser Feststellung; sie läßt sich aber noch bedeutend präzisieren. Die Verwitterung wird um so intensiver wirken, je größer die Temperaturdifferenzen sind und je häufiger die Temperaturen wechseln. Vor allem ist wesentlich, bis in welche Entfernung vom Höhleneingang die Luft noch unter den Gefrierpunkt abgekühlt werden kann (Spaltenfrost). Je nachdem man es mit einer Sackhöhle (statische Wetterhöhle, nur ein Ausgang) oder mit einer Durchgangshöhle (dynamische Wetterhöhle, zwei oder mehrere Ausgänge in

verschiedenen Richtungen) zu tun hat, ist der Temperaturgang im Höhleninnern ganz verschieden. In einer Durchgangshöhle sorgt der meist vorhandene Luftzug dafür, daß die Temperatur des Innern ständig jener der Außenwelt angeglichen wird. In solchen dynamischen Wetterhöhlen (Durchzugshöhlen) folgen deshalb Temperaturschwankungen viel rascher aufeinander als in nur einseitig offenen Räumen. Die Verwitterung hat überall Zutritt und zerstört die «altzeitlichen Modellierungen».

Ein schönes Beispiel hiefür ist die *Wildkirchli–Ebenalp-Höhle*. Durch die künstlich errichteten Mauern ist zwar heute der gesamte Höhlenkomplex in vier voneinander getrennte Räume zerlegt, wovon zwei ganz abgeschlossen sind, so daß eine Luftzirkulation verunmöglicht ist. Öffnet man die beiden Türen, die die obere Höhle abschließen, so macht sich meist sofort ein deutlicher Zugwind bemerkbar. Bevor die Vermauerungen bestanden, konnte die Luft ganz ungehindert durchziehen und so die im Freien herrschende Temperatur in die Höhle hineintragen; im Winter sank dadurch die Temperatur in der ganzen Höhle unter den Gefrierpunkt. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß die Verwitterung den Fels überall angegriffen hat. Die einzige Ausnahme bildet der hohe Kamin der Kellerhöhle; dieser zeigt nur in den untern Teilen (bis in etwa 6 m Höhe) die gewöhnlichen groben und kantigen Verwitterungsformen, in den obern zwei Dritteln jedoch ist die durch die Korrosion geschaffene Rundung des Querschnittes und die Glättung der Wände unverändert erhalten. Die Erklärung für diese Erscheinung ist einfach: In der großen Aufwölbung der Decke, die oben blind endigt, blieb in der kälteren Jahreszeit die relativ warme Luft gefangen. Nur im alleruntersten Teil des Kamins konnte die Temperatur unter den Gefrierpunkt sinken und das entstehende Eis den Fels sprengen. Bis in eine gewisse Höhe (5–6 m) konnten Temperaturschwankungen oberhalb 0° ebenfalls noch verwitternd wirken. In den höhern Partien hingegen schwankt die Temperatur nur um wenige Grade: hier sind die alten Formen erhalten.

Der gleiche allmähliche Übergang von Stellen mit stark und rasch wechselnder Temperatur (kräftige Verwitterung) zu stets ungefähr gleich temperierten Höhlenteilen (keine Verwitterung), den man im großen Kamin der Wildkirchli-Kellerhöhle in vertikaler Richtung verfolgen kann, ist auch in den mehr oder weniger

eben verlaufenden Sackhöhlen (mit nur einem Ausgang) festzustellen, hier aber in *horizontaler* Richtung. Wie zahlreiche von E. BÄCHLER im Wildenmannlisloch, in der Furgglen-, in der Alpeel- und Kobelwieshöhle und im Drachenloch ausgeführte Messungen ergaben, herrscht in den innersten Teilen dieser blind endigenden Räume beständig eine nahezu konstante Temperatur von 3,2° bis 5,2°. Die Differenz zwischen Sommer und Winter beträgt nur etwa 2°.

Je mehr man sich dem Höhlentor nähert, um so größer wird langsam die Temperaturschwankung. Zuhinterst ist nur der Unterschied zwischen Sommer und Winter bemerkbar, weiter vorn auch der von kürzern warmen und kalten Perioden, schließlich auch der zwischen Tag und Nacht. Es läßt sich natürlich nicht *allgemein* angeben, in welcher Entfernung vom Höhleneingang zum Beispiel die tägliche Schwankung noch feststellbar ist oder wie weit in die Höhle hinein das Wasser gefrieren kann. Das hängt selbstverständlich stark von der Raumgestaltung und dem Verlauf der Höhle ab. Besonders die starken Verengerungen des Querschnitts wirken auf die bergwärtigen Höhlenteile isolierend. – Je mehr sich der Temperaturgang in der Höhle dem der Außenwelt angleicht, um so stärker ist natürlich auch die Wirkung der Verwitterung. Der Eingang zur Höhle wird, weil dort die Temperaturdifferenzen am größten sind und der Wechsel am raschesten vor sich geht, meistens zu einem eigentlichen Portal ausgeweitet. Nur bei wenig tiefen und relativ weiten Höhlen und Halbhöhlen wirkt die Verwitterung bis an das hinterste Ende (Teufelskirchli, Wildkirchli-Rees, Dürrschrennen, Höhlen ob Bollenwies); bei längeren Höhlen nimmt der Einfluß der Verwitterung vom Eingang nach innen allmählich ab und hört schließlich ganz auf.

Bemerkenswert sind die Verhältnisse in der Furgglenhöhle. Man könnte erwarten, daß dort der enge Durchschlupf von Höhle I zu Höhle II der Verwitterung eine Grenze setze. Das ist aber nicht der Fall. Auch die vordern Teile der Höhle II sind im Winter und Frühling stark vereist, und dementsprechend findet man dort an Decke und Wänden kantige Verwitterungsformen. Erst gegen die Mitte der Höhle II zu überwiegt allmählich die durch Korrosion geschaffene Modellierung.

Eine ganz scharfe Grenze der exochthonen Höhlenverwitterung, die nach KYRLE (Lit. 20, S. 57) den Normalfall darstellt, ist nur

in der Gartenalphöhle festzustellen. Sie fällt hier zusammen mit einem engen Durchschlupf.

Das Äquivalent der Verwitterung in der Bodenauffüllung

Über die Art und Weise, wie und wo die Verwitterung arbeitet und gearbeitet hat, bekommt man die beste Auskunft aus der Untersuchung der losgelösten Gesteinstrümmer, die auf dem Boden und im Boden liegen. – Wir skizzieren hier nur kurz die diesbezüglichen Beobachtungen, die bei der Ausgrabung der drei alpinen paläolithischen Stationen Wildkirchli, Drachenloch und Wildenmannlisloch gemacht wurden.

Im *Wildkirchli* ist in der ganzen Höhle der Verwitterungsschutt in der Form von großen und kleinen kantigen Bruchstücken des Schrattenkalks sehr reichlich vertreten; er macht im Mittel etwa die Hälfte, stellenweise bis 70% der gesamten Bodenauffüllung aus. Die Steine sind überall in erdigen Lehm eingebettet. – Was die vertikale Verteilung des Verwitterungsmaterials anbelangt, gilt im allgemeinen folgende Regel: Die interglazialen und die postglazialen Schichten enthalten mehr, die glazialen weniger Steine (größere Temperaturdifferenzen während der Zwischeneiszeiten).

Die Größe der Verwitterungstrümmer wechselt verständlicherweise stark; eine Sortierung nach der Größe ist nirgends festzustellen. Die einzige Regelmäßigkeit in der horizontalen Verteilung ist die, daß das gröbste Material unter den Höhleneingängen liegt. Nach dem Höhleninnern nimmt die mittlere Größe des Verwitterungsschuttes im allgemeinen ab; das feinste Material wurde im Durchgang zwischen Gasthaus- und oberer Höhle gefunden.

Im *Drachenloch* machten Verwitterungstrümmer einen großen Prozentsatz der Bodenauffüllung der gesamten Höhle I aus. Auch hier lag das gröbste Material unter dem Eingang, das feinere hinten. Sobald man in Höhle II kam, nahm der Anteil der Steine an der Bodenauffüllung sehr rasch auf ein Minimum ab. Ganz ähnlich wie im Drachenloch war es im *Wildenmannlisloch*. Auch hier liegt Verwitterungsmaterial nur im vordern Teil der Höhle (Tunnel); die größten Blöcke lagen ebenfalls vorn.

Die Erfahrungen bei den Ausgrabungen (wie auch die Beobachtung des an der Oberfläche liegenden Sturzmaterials, z. B. in der Furgglen) widersprechen also dem eingangs zitierten dritten Beobachtungssatz von KYRLE.

Welchen Anteil hat die Verwitterung an der Höhlenausweitung?

In den *echten Höhlen* kann die Verwitterung nur dort an der Raumerweiterung mitwirken, wo ihre Produkte durch andere Kräfte fortgeschafft werden. Dieser Fall kann vor allem am Höhleneingang eintreten, besonders dann, wenn dessen Boden nach außen geneigt ist, so daß die von der Decke losgelösten Gesteinsstücke durch ihre eigene Schwere aus der Höhle hinausfallen oder allmählich hinausrutschen. Wo aber die abfallenden Gesteinstrümmer liegen bleiben, wirkt die Verwitterung eher raumverengernd.

Halbhöhlen (Balmen) können sehr wohl durch die Verwitterung allein gebildet werden; man bezeichnet sie ja auch als *Unterwitterungshöhlen*. Im Säntisgebiet hat die Verwitterung nicht nur zahlreiche wenig tiefe Abris hervorgebracht, sondern auch zwei über 20 m tiefe Balmen: Teufelskirchli und Wildkirchli-Rees. Beide liegen – im Gegensatz zu allen andern Säntishöhlen – auf größern Querdislokationen, die eine mehrere Meter breite, von vielen kleinen Klüften durchsetzte Zone darstellen. Wo nun eine derartige Dislokation eine Steilwand quert, kann die Verwitterung viel erfolgreicher arbeiten, weil ihr das stark zerklüftete Gestein viel mehr Angriffspunkte bietet als der kompakte Kalk. Der Grad der Zerklüftung wird nicht überall gleich stark sein; wo weniger zerklüftete Partien stark zersplitterte überlagern, wird eine zunächst wenig tiefe Unterwitterungshöhle gebildet werden. Liegt sie am obern Ende eines steilen Abhanges, so bleiben von weiter abstürzendem Gestein wenigstens die größern Stücke nicht liegen; der Raum kann sich beständig vergrößern und tiefer in den Berg hineingreifen. Währenddem die Verwitterung die Decke ungehindert angreifen kann, wird der Boden durch den feinen Grus vor weiterer Abbröckelung geschützt; so wird verständlich, warum der Boden der Halbhöhlen nach hinten ansteigt.

Einen Beweis dafür, daß die *Verwitterung* von *außen her* in den Berg vorgedrungen ist, liefert das Wildkirchli-Rees. Das wenig verfestigte Konglomerat, das am Höhlenende die Decke und die hintere Abschlußwand bildet, muß dort einst von fließendem Wasser in eine damals nach unten blind endigende Tasche oder Spalte abgelagert worden sein. Erst nachträglich ist diese mit Schotter und Sand gefüllte Tasche durch die Verwitterung freigelegt worden, die von außen her die Höhle immer weiter in den Berg vortrieb. Auf andere Weise läßt sich kaum erklären, wieso die relativ

lockeren Massen heute an der Decke oben hängen. Hätte die Höhle zur Zeit ihrer Bildung schon bestanden, so wären sie doch sicher nicht abgelagert, sondern weiter verschwemmt worden. Beim Teufelskirchli stehen der Annahme, daß die Höhle ganz durch die Verwitterung gebildet worden ist, ebenfalls keine Hindernisse im Wege.

Nach hinten sich verengernde Halbhöhlen können aber auch auf andere Weise entstehen. Ein sehr wertvolles Beispiel bietet hier die Flußspathöhle Dürrschrennen. Der Boden dieser Halbhöhle steigt ebenfalls nach hinten ziemlich stark und gleichmäßig an. Das Flußspatlager befindet sich ungefähr in der Mitte der Höhle im Boden und in den untern Wandpartien, also an einer Stelle, wo der Flußspat niemals gewachsen sein könnte, wenn die Höhle damals ihre heutige Gestalt gehabt hätte. Das Mineral hat hier eine zunächst gegen außen völlig abgeschlossene Kluft ausgefüllt. Es ist anzunehmen, «daß die heute nach der Südseite offene Höhle einst geschlossen sein mußte, da sich bei der jetzigen Situation z. B. der Flußspat nicht hätte ablagern können, weder aus Solution noch aus Sublimation. Nachdem aber die Höhle einmal offen war, kam die Verwitterung als ausschlaggebender Faktor zu Hilfe bei der Erweiterung der Höhle» (E. BÄCHLER, Lit. 2, S. 49). Auch hier ist es sicher nicht ein Höhlenfluß, der sich einen Ausweg zur Oberfläche geschaffen hat, sondern die Verwitterung ist von außen her vorgedrungen und dabei auf den vorher abgeschlossenen Hohlraum gestoßen. Daß sie die äußere Felswand gerade an der Stelle besonders angegriffen hat, wo im Berginnern ein Hohlraum lag, ist weiter nicht verwunderlich, weil der Dislokationsriß, auf dem die Höhle liegt, nach außen weiterstreicht und dort der Verwitterung den kürzesten Weg zur abgeschlossenen Höhle wies. Dasselbe gilt wohl für die Eingänge aller Höhlen des Säntisgebirges. Bei seiner «schematischen Darstellung der Entstehung trichterähnlicher Evakuationsformen durch exochthone Höhlenverwitterung» (Lit. 20, Fig. 31–34, S. 59) geht KYRLE von einem Höhlenfluß aus, dessen später trockengelegtes Bett durch die Verwitterung ausgeweitet wird. Diese Ableitung wird zweifellos für Flußwasserhöhlen zutreffen, für die Säntishöhlen aber gilt sie nicht. Das die einst abgeschlossenen Höhlenteile erfüllende Wasser mag wohl auch nach außen gedrückt und damit der Verwitterung den Weg vorbereitet haben; erosiv hat es aber sicher nie gewirkt; dafür waren die Wassermengen zu klein.

Endochthone Verwitterung

Die von KYRLE (Lit. 20, S. 61) als endochthone Höhlenverwitterung bezeichnete langsame Zersetzung der Felsoberfläche zu einer *pulverigen Masse* ist auch in unsern Höhlen stellenweise sehr schön zu beobachten, besonders in deren hinteren Teilen, also dort, wo die Temperaturdifferenzen geringer werden. Die Grenze gegen den Bereich der gewöhnlichen Verwitterung ist meist unscharf. Im Schrattenkalk und im Seewerkalk (Wildenmannlisloch, Drachenloch, stellenweise auch Furgglen und Wildkirchli) erhält der Kalkstein durch die endochthone Höhlenverwitterung eine *kreidige,* meist nur wenige Millimeter dicke *Kruste,* die beim Trocknen zu hellem Pulver zerfällt. In den Drusbergmergeln (Alpeel) hat der Überzug mehr lehmigen Charakter.

Bemerkenswert ist, daß die endochthone Verwitterung durchaus nicht überall dort auftritt, wo man sie nach den Temperaturverhältnissen erwarten dürfte. An manchen Stellen der Furgglen (z. B. im «Schlauch») oder im hintern Teil der Gartenalphöhle ist der Schrattenkalk nur ganz oberflächlich etwas verfärbt, sonst aber vollständig unverändert. Wie diese Unterschiede zu erklären sind, ist noch ungewiß. Überhaupt ist noch nicht abgeklärt, welches die genauen chemischen und physikalischen Vorgänge bei der endochthonen Höhlenverwitterung sind.

Die Arbeit der endochthonen Verwitterung ist aber nicht nur an dem Gestein festzustellen, das heute noch ständig mit der Luft in Berührung steht (Wände und Decke des Höhlenraumes), sondern oft auch an den Kalkbrocken in der Bodenauffüllung. In den drei nordostschweizerischen paläolithischen Hochstationen zeigten die in den untern Bodenschichten (interglaziale Fundschicht und deren Liegendes) eingeschlossenen Steine *alle* übereinstimmend dieselbe kreidige Verwitterungskruste, wie man sie von Decke und Wänden her kennt (vgl. E. BÄCHLER, Lit. 6, S. 30/31).

Deckenbrüche

Das hintere Ende der zweiten Abteilung der Furgglenhöhle ist eine Stelle, wo das Wesen der Deckenbrüche sehr gut studiert werden kann. Auf den ersten Blick sieht jener Teil der Höhle aus, als ob dort die gewöhnliche Verwitterung am Werke gewesen wäre: Der Boden ist mit großen, eckigen Blöcken bedeckt, und die Decke zeigt kantige Abbruchsformen. Doch kann es nicht die Verwitte-

rung gewesen sein, die hier gearbeitet hat. Einmal reicht der Einfluß der gewöhnlichen exochthonen Verwitterung nicht bis hieher, er hört schon etwa 40 m weiter vorn auf. Dann zeigt auch eine genauere Beobachtung, daß das Blocktrümmerfeld und die Höhlendecke anders aussehen als an den Orten, wo die Verwitterung gewirkt hat: am Boden sieht man fast nur große Blöcke (Durchmesser im Mittel etwa 50 cm), nur sehr wenig kleines Material; sie liegen lose aufeinander, d. h. ohne die erdig-lehmige Zwischenfüllung. Das Dach der Höhle ist kreuz und quer von vielen klaffenden Rissen zerklüftet; einzelne Partien hängen nur ganz locker, sozusagen im labilen Gleichgewicht, so daß stellenweise ein einziger Hammerschlag größere Blöcke zum Absturz bringen kann. Unmittelbar neben den Abbruchstellen sind die alten Korrosionsformen vollständig erhalten; die Oberfläche zeigt die typischen flachen Aushöhlungen; an einer Stelle zieht sich ein etwa 3 m hoher, runder Kamin in die Decke hinauf, dessen Wände spiralige Rillen aufweisen. All das zeigt deutlich, daß hier nicht die Verwitterung, sondern tektonische Erschütterungen den Gesteinszusammenhang gelockert und einen Teil der Decke zum Absturz gebracht haben. Mindestens das Abbrechen hat erst stattgefunden, nachdem der Hohlraum durch die Korrosion bereits geschaffen war. Von einer Raumerweiterung kann dabei eigentlich nicht gesprochen werden: Wo das abgestürzte Material nicht irgendwie fortgeschafft wird, verkleinern diese Deckenbrüche sogar den offenen Querschnitt der Höhle, da die locker aufeinanderliegenden Trümmer am Boden mehr Raum einnehmen als in ihrer ursprünglichen Lage am Höhlendach.

Solche Deckenbrüche konnten auch in der Nähe des Einganges auftreten, wo der Spaltenfrost arbeitet. Dort ist es dann allerdings schwierig, die Auswirkungen der Verwitterung und jene der tektonisch bedingten Erschütterungen auseinanderzuhalten. Immerhin wird die Beschaffenheit und Lagerung der Bodenauffüllung auch in diesem Falle über die Entstehungsgeschichte des Höhlenraums weitgehend Aufschluß geben. Ein gut untersuchtes Beispiel dieser Art ist das von E. BÄCHLER beschriebene Profil aus der oberen Wildkirchlihöhle (vgl. Lit. 6, Tf. XXI und S. 34). Hier besteht die oberste Bodenschicht an manchen Stellen zum weit überwiegenden Teil aus großen, eckigen Blöcken. Ihre Anwesenheit allein der Verwitterung zuzuschreiben, ginge nicht an, da die

oberste Schicht an anderen Stellen der Höhle, wo die Decke ebenfalls dem Spaltenfrost ausgesetzt ist, durchwegs von feinerem Schutt gebildet wird. Die auffälligen Anhäufungen großer Trümmer sind wohl am ehesten durch starke Erdbeben zustande gekommen, die die schwächsten Stellen des ausgedehnten Deckengewölbes zum Einsturz brachten. Von besonderem Wert sind die Beobachtungen in der oberen Wildkirchlihöhle noch deshalb, weil hier das Alter der die Sturzblöcke enthaltenden obersten Schicht nach den Untersuchungen von E. BÄCHLER eindeutig als postglazial bestimmt werden kann. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß diese postglazialen Erschütterungen mit den tektonischen Bewegungen zusammenhingen, welche W. SCHMIDLE (Lit. 30) im Bodenseegebiet nachgewiesen hat, wo z. B. im Gnaden- und Zellersee die Moränen der letzten Vereisung um einen ansehnlichen Betrag abgesenkt wurden.

Wie R. STAUB, der Meister der tektonischen Alpenforschung, am Schlusse seiner morphologischen Synthese (Lit. 31, S. 177) schreibt, dauern die jungen Bewegungen im Alpenkörper bis heute noch fort: «Die Beispiele für solche jungen Krustenbewegungen ließen sich beliebig vermehren, doch scheint es kaum nötig, denn einmal kann man sie ja messen (Feinnivellements am bayrischen Alpenrand ergaben zweifelsfrei bedeutende horizontale und vertikale Verschiebungsbeträge), und andrerseits verraten schließlich auch die vielen großen und kleinen alpinen Erdbeben die immer noch wache Beweglichkeit der alpinen Krustenfragmente.»

Zusammenfassung

Die in dieser Untersuchung beschriebenen Höhlen des mittleren Säntisgebirges liegen alle auf Querbrüchen. Nur aus jenen Teilen des Alpsteins, in denen Bruchdislokationen auftreten, sind zahlreiche Höhlen bekannt. Die echten Höhlen (d. h. solche, deren Querschnitt sich von einem engeren Eingang aus bergeinwärts vergrößert) liegen ohne Ausnahme auf *kleinen*, im Gebirgsbau unbedeutenden Brüchen, welche keine Kluftfüllungsbrekzie aufweisen, sondern etwas klaffende Risse im Gestein schufen, die dem Wasser den Weg in die Tiefe erschlossen. Diese kleinen Querbrüche sind als die allerletzten Auswirkungen des Deckenschubes zu betrachten. Sie entstanden frühestens im mittleren Pliozän, wahrschein-

licher im älteren Quartär, möglicherweise erst in der Mitte des Eiszeitalters. Sie treten besonders in jenen Schichten auf, die bei der letzten tektonischen Beanspruchung infolge ihrer Sprödigkeit stark zerklüftet wurden, also im Schrattenkalk und im Valanginienkalk; dementsprechend sind hier auch die Höhlen am häufigsten. – Auf den *großen* Querbrüchen, zwischen deren Flügeln eine Kluftfüllungsbrekzie entstand, haben sich höchstens Halbhöhlen (Balmen) gebildet, welche am Eingang am weitesten sind und sich bis zum hinteren Ende verengern.

Die schon lange allgemein anerkannte Ansicht, daß die erste Erweiterung der tektonisch geschaffenen Urhohlräume durch die chemische Lösungsarbeit des Sickerwassers erfolgte, trifft zweifellos auch für unser Gebiet das Richtige. Auf die noch umstrittene Frage, ob die unterirdischen Hohlräume in den späteren Entwicklungsphasen hauptsächlich durch die Korrosion oder durch die Erosion vergrößert wurden, ergibt sich für die Säntishöhlen eine ganz eindeutige Antwort: Zahlreiche Gründe führen dazu, die Entstehung der eigentlichen Höhlen ganz oder doch zum weit überwiegenden Teil der Korrosion zuzuschreiben. Einzig für den steilen, untersten Gang der Furgglen ist eine nennenswerte Mitwirkung der Erosion anzunehmen. An der Entstehung der kleineren Höhlen war diese überhaupt nicht beteiligt. Sogar bei der Höhle von Kobelwies, die heute noch von einem ansehnlichen Bach durchflossen wird, sprechen verschiedene Beobachtungen gegen die Auffassung, daß die mechanische Wirkung des rasch bewegten Wassers sehr bedeutend war.

Die Gestaltung der äußeren Höhlenteile ist vor allem durch die exochthone Verwitterung bedingt. Diese hat die ursprünglich dauernd, dann nur noch teilweise und vorübergehend von Wasser erfüllten Hohlräume im Innern des Berges von außen her zugänglich gemacht. Die beiden hier beschriebenen Halbhöhlen, welche auf größeren Querbrüchen liegen, sind in ihrem ganzen Umfang als Werk der Verwitterung anzusehen.

Literaturverzeichnis

1 *Ampferer O.* Über größere, jüngere Formänderungen in den nördlichen Kalkalpen. Ztschr. f. Geomorphologie, 1, 1925/26.

2 *Bächler Emil* Beiträge zur Kenntnis der Höhlen des Säntisgebirges. Jahrbuch d. St.Gall. Naturw. Ges. für 1904.

3 — Naturgeschichtliches aus dem Säntisgebirge. Anhang zum Illustrierten Führer durch das Säntisgebiet von G. Lüthi und C. Egloff. 5. Aufl. St.Gallen 1925.

4 — Das Wildenmannlisloch. Wattwil 1933.

5 — Das Wildkirchli. Eine Monographie. St.Gallen 1936.

6 — Das alpine Paläolithikum der Schweiz im Wildkirchli, Drachenloch und Wildenmannlisloch. Bd. II d. Monographien zur Ur- und Frühgeschichte der Schweiz. Basel 1940.

7 *Bächler Heinz* In der Kristallhöhle von Kobelwald. St.Galler Jahresmappe 1937, S. 81–83.

8 *Bock Hermann, G. Lahner* und *G. Gaunersdorfer* Höhlen im Dachstein und ihre Bedeutung für die Geologie, Karsthydrographie und die Theorien über die Entstehung des Höhleneises. Graz 1913.

9 *Cramer H.* Untersuchungen über die morphologische Entwicklung des fränkischen Karstgebirges. Abh. Naturhist. Ges. Nürnberg, Bd. 22, 1928.

10 *Czoernig-Czernhausen Walter* Die Höhlen des Landes Salzburg und seiner Grenzgebirge. Speläolog. Monographien, Bd. X. Salzburg 1926.

11 *Desor E.* Essai d'une classification des cavernes du Jura. Bull. soc. sc. nat. Neuchâtel 1871.

12 *Egli Paul* Beitrag zur Kenntnis der Höhlen der Schweiz. Zürich 1904.

13 — Kurze Orientierung über die Höhlen der Schweiz. Mittlg. d. Ostschw. Geograph.-Kommerz. Ges. 1904.

14 *Heim Albert,* mit Beiträgen von *Marie Jerosch, Arnold Heim* und *Ernst Blumer* Das Säntisgebirge. Beitr. z. Geol. Karte d. Schweiz, N.F., 16. Lfg. Bern 1905.

15 *Heim Arnold* Die Brandung der Alpen am Nagelfluhgebirge. Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. Zürich 1906.

16 — Über die Beatushöhlen am Thunersee. Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. Zürich 1909.

17 — Das helvetische Deckengebirge. Abschnitt D in *Albert Heim,* Geologie der Schweiz, Bd. II, 1. Hälfte. Leipzig 1921.

18 *Knebel Walther von* Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene. Die Wissenschaft, 15. Heft. Braunschweig 1906.

19 *Kraus Franz* Höhlenkunde. Wege und Zweck der Erforschung unterirdischer Räume. Wien 1894.

20 *Kyrle Georg* Grundriß der theoretischen Speläologie. Speläolog. Monographien. Bd. I. Wien 1923.

21 *Lais R.* Über Höhlensedimente. Quartär, Bd. III. Berlin 1941.

22 *Lehmann Otto* Die Hydrographie des Karstes. In: Enzyklopädie der Erdkunde Leipzig und Wien 1932.

23 *Leonhard K. E. von* Geologie oder Naturgeschichte der Erde, 2. Bd. Stuttgart 1838.

24 *Lüthy Hans* Geomorphologische Untersuchungen im Säntisgebirge. Jahrbuch d. St.Gall. Naturw. Ges., 69. Bd. St.Gallen 1939.

25 *Martel E. A.* Les abîmes. Paris 1894.

26 *Rosenmüller* und *Tillesius* Beschreibung merkwürdiger Höhlen usw. Leipzig 1805.

27 *Saxer Friedrich* Quartäre Krustenbewegungen in der Gegend von St.Gallen. Eologae geol. Helv., Vol. 35, Nr. 2, 1942.

28 *Schardt H.* Geologische und hydrographische Beobachtungen über den Mont d'Or-Tunnel. Schweiz. Bauzeitung, Bd. 70, II. 1917.

29 *Schlatter L. E.* Neue geologische Untersuchungen im mittleren Säntisgebirge. Jahrbuch d. St.Gall. Naturw. Ges., 70. Bd. St.Gallen 1941.

30 *Schmidle Wilhelm* Die Geologie des Untersees. Sonderdruck aus «Badische Heimat», 1926, S. 12–22.

31 *Staub Rudolf* Grundzüge und Probleme alpiner Morphologie. Denkschr. Schweiz. Naturf. Ges., Bd. 69, Abh. 1. Zürich 1934.

32 *Virlet Theod.* Des cavernes, de leur origine et de leur mode de formation. 1836.

33 *Wurmband Graf G.* Über die Grotten und Höhlen in dem Kalkgebirge von Peggau. Graz 1871.