

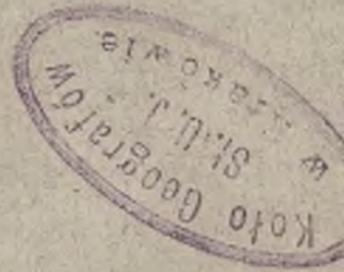
**EITRÄGE ZUM
GEOGRAPHISCHEN ZYKLUS IM KARSTE**

VON

DR. LUDOMIR RITTER VON SAWICKI
IN WIEN

MIT 15 FIGUREN IM TEXT

SONDERABDRUCK AUS DEM XV. JAHRGANG DER GEOGRAPHISCHEN ZEITSCHRIFT



1. 5. 1.

Geographische Zeitschrift
U. J.
N. J. 210.

Ein Beitrag zum geographischen Zyklus im Karst.

Von Ludomir Ritter von Sawicki.

(Mit 16 Figuren im Text.)

Die genetischen Forschungsprinzipien, welche jedes gegebene Objekt als Produkt einer mehr oder minder komplizierten Entwicklung betrachten, haben, wie in den anderen Wissenschaften, so auch in der Morphologie der Erdoberfläche reichliche Früchte zeitigt. Sie führten hier zum Verständnis sehr vieler Einzelheiten, die in einem gewissen Gegensatz zu der heute herrschenden Entwicklungstendenz stehen, indem sie dieselben als Rudimente und Zeugen früherer Entwicklungen auffaßten; sie lehrten uns auch manche morphologische Verhältnisse als momentanes Spiegelbild eines oft mit großer Hartnäckigkeit geführten Kampfes ums Dasein der sogenannten leblosen Natur betrachten und brachten sie dadurch unserem Verständnis näher. Nach und nach kommt man den großen, allgemeinen, diese Verhältnisse beherrschenden Gesetzen immer näher und erschließt damit immer neue, bisher von der Forschung wenig berührte Gebiete und Formenkomplexe dem geographischen Verständnis; denn selbst eine heute noch so einförmige Landschaft erscheint uns eben als Ruine einer ursprünglichen Form, die während einer mehr oder minder langen Zeit den an der Erdoberfläche modellierenden Agentien ausgesetzt war, dabei verschieden weitgehenden Veränderungen unterlegen ist und dementsprechend eine ganz bestimmte horizontale und vertikale Gliederung seines Formenschatzes erfahren hat.

Die Grundlinien dieses geographischen Zyklus hat vor allem der Altmeister der Physiographie, W. M. Davis, festgelegt, und zwar sowohl für das undurchlässige Gebiet mit seinem „normalen“ Zyklus¹⁾ wie für den glazialen²⁾ und den Wüstenzyklus³⁾. Ebenso haben wir schon allgemeinere Vorstellungen über das morphologische Werden und Vergehen von Einzelformen und Formenkomplexen gewonnen, wie von Küsten, Seen, Beckenlandschaften usw. Hingegen sind wir über die die Entwicklung einer Karstlandschaft beherrschenden Gesetze noch recht wenig unterrichtet. Wertvolle und brauchbare Beiträge zum Karstzyklus finden wir wohl an zahlreichen Stellen der jüngsten Karstliteratur — allerdings nur Rohmaterial in einer mehr oder minder zufälligen, aber nicht systematischen Anordnung. Nur Penck⁴⁾ hat im Jahre 1904 den ersten und

1) W. M. Davis, The geographical Cycle, Geograph. Journal, 1899, XIV.

2) W. M. Davis, Glacial Erosion in France, Switzerland and Norway, Proc. Boston Soc. Nat. Hist. XXIX, 1900, 273/322.

3) W. M. Davis, The geographical Cycle in Arid Climate. Journ. of Geology, 1905, 381—407.

4) A. Penck, Das Karstphänomen, Schrift. d. Ver. zur Verbreitung naturwiss. Kenntnisse in Wien, 1904.

bisher einzigen Versuch gemacht, die den Karstzyklus beherrschenden Gesetze aufzudecken. Wir werden diese auffallende Lücke verstehen, wenn wir bedenken, daß vor allem nicht nur einzelne, sonst unbedeutende Agentien im Karste vorherrschen, sondern auch daß geänderte Intensitätsverhältnisse der modellierenden Vorgänge nicht bloß die Schnelligkeit, sondern auch die Tendenz der Entwicklung zu beeinflussen im Stande sind. Auch geht im Karst die Entwicklung der Detailformen nicht so Hand in Hand mit der Entwicklung der Landschaft wie im undurchlässigen und unlöslichen Gebiete; hier entsprechen einer greisenhaften Landschaft auch senile Detailformen, dort aber finden wir oft in einer senilen Landschaft gewisse jugendliche Formen.

Die im folgenden entwickelten Anschauungen gründen sich auf meine in „nicht typischen“ Karsten gemachten Beobachtungen; die Ergebnisse des im Jahre 1907 durchgeführten Studiums des slowakischen Karstes¹⁾ konnte ich im Jahre 1908 durch Beobachtungen in den südfranzösischen Causses²⁾, im schweizerisch-französischen Jura, in manchen Karstgebieten der Alpen und im istrischen Karstgebiet prüfen und vertiefen. Ich will mich im folgenden darauf beschränken, diese meine persönlichen Anschauungen zuerst in allgemeinen Ergebnissen zu entwickeln, sie dann mit dem wichtigsten Beweismaterial aus den mir bekannten Karstgebieten zu belegen — dabei glaube ich auch einiges zur landeskundlichen Literatur beitragen zu können —, wobei ich, um die Studie nicht zu verlängern, auf die Heranziehung der einer genaueren Ausbeute sehr günstigen und würdigen neueren Karstliteratur vorläufig gänzlich verzichte. Erst wenn wir diese Anschauungen an zahlreichen anderen Objekten unter den verschiedensten klimatischen und petrographischen Verhältnissen und in den verschiedensten Entwicklungsphasen geprüft haben, hoffen wir zu einer abschließenden Erkenntnis über den Karstzyklus zu gelangen; dazu einen Beitrag zu liefern, sei hier meine Aufgabe.

I. Entwicklung einer Karstlandschaft.

Wenn wir im folgenden versuchen wollen, die einzelnen Entwicklungsphasen eines Karstes näher zu beleuchten, so müssen wir uns vor allem darüber klar werden, welche Kräfte und in welchem Grade diese Kräfte im Karste die Oberfläche verändern, dann aber, wie unter ihrem Einfluß einzelne Formen und Formengruppen sich gesetzmäßig umformen, dabei einem gemeinsamen Endziel zustreben, nämlich dem Gleichgewichtszustand zwischen Form und Kraft; schließlich, wie Hand in Hand mit dieser Detailumformung das Aussehen der Landschaft überhaupt sich ändert, wie weit dies gehen kann und welche Folgen dies nach sich zieht. Die im folgenden dargelegten allgemeinen Sätze gründen sich vollständig auf die in den nächsten Kapiteln beigebrachten Beobachtungen und sind nur eine systematische Zusammenstellung und vorläufige Verallgemeinerung derselben.

1) L. Sawicki, Skizze des slowakischen Karstes und der geographische Zyklus im Karst überhaupt (polnisch mit deutschem Resumé), Kosmos, Lwów, 1908, XXXIII, 395—445.

2) L. Sawicki, Die Causses. — Skizze eines greisenhaften Karstes. Rozprawy Akad. Umiej., Kraków, Wyd. mat. przyr. 1909, (im Druck) deutsches Resumé: Bulletin int. de l'Ac. des Sc. Cracovie, 1909 (Märzheft).

A. Die modellierenden Kräfte im Karst.

Betrachten wir vor allem die Kräfte und Vorgänge, die in einem Karste modellierend wirken, und zwar nicht nur, wie in anderen Landschaften, auf der Oberfläche, sondern auch im Innern des Gebirges, wobei ich das Gewicht auf die Unterschiede in der Qualität und Intensität dieser Kräfte im Karst und in der nicht verkarstungsfähigen undurchlässigen Landschaft lege. Die Massenbewegungen (Bodenbewegungen), wie wir nach dem Vorgange der amerikanischen Morphologen und Pencks das Wandern des Verwitterungsschuttes, die Ortsveränderung des zerborstenen Felsmaterials einzig unter dem Einfluß der Schwere, ohne bedeutsame Mitwirkung eines anderen morphologischen Agens (Wasser, Eis, Luft) nennen, müssen sich im Karst und in anderen Landschaften ähneln, da die Gravitation hier wie dort dieselbe ist. Überall müssen übersteile Hänge nachbrechen, sich abböschern, sanfter werden; Steinregen und Schutthalden sind hier wie dort Zeugen dieses Prozesses. Hier wie dort bewegt sich der lockere Schuttmantel auf den weniger steilen Böschungen langsam, oft ruckweise abwärts, dabei Narben bildend. Die Bildung einer Verwitterungskruste unterliegt bei gleichen klimatischen Verhältnissen denselben Gesetzen und denselben Einflüssen; ganz ähnlich äußert sich im Karst wie in der normalen Landschaft die Wirkung der Insolation, des Frostes usw. Nur die chemische Verwitterung spielt hier eine ganz andere Rolle als im unlöslichen Terrain, und daher ist der Effekt der Verwitterungsprozesse überhaupt ein gänzlich anderer. Vor allem erfolgt die Bildung des Verwitterungsschuttmantels hier viel langsamer als im undurchlässigen und unlöslichen Terrain, weil der größte Teil des mechanisch zerkleinerten Materials noch chemisch gelöst und weggetragen wird; die Rückstände sind meist relativ gering, manchmal minimal. Und so ist der Mantel von Verwitterungsschutt in der nichtverkarstungsfähigen Landschaft meist dick und nicht durchlöchert, im Karst sehr dünn und zerrissen, durchlocht. Es spielt auch das Klima beim Karstzyklus eine hervorragende, ja entscheidende Rolle, weil die chemische Verwitterung im hohen Maße von der Luftfeuchtigkeit und der Wärme des Wassers abhängt. Das erste versteht sich von selbst, hinsichtlich des zweiten sei auf die Beobachtung Rothes¹⁾ hingewiesen, daß mit Kohlensäure gesättigtes Wasser bei 0° C nur 0,07% Kalk löst, bei 15° C aber 0,10%.

Die Rutschungs- und Kriechprozesse des losen Schuttmantels (creeping der Amerikaner) sind im Karst nur von untergeordneter Bedeutung; fehlen doch die beiden Hauptfaktoren dieser Prozesse, das heißt: größere Schuttwassermengen an der Oberfläche — das Oberflächenwasser versinkt im Karste — und größere Mengen von Ton oder Lehm, in die eingebackenen der Schutt leichter die Gehänge herabrutschen würde. Deshalb böschern sich übersteile Kalkwände zwar leicht bis zu 30—35° ab, weil bei dieser Gehängeneigung meist die Reibung der herabgleitenden Schuttmassen die Intensität der Schwere eben aufwiegt. Zu einer weiteren Abböschung, zu einer weiteren Ausreifung des Gehänges durch Kriechprozesse wäre Feuchtigkeit und Lehm nötig, welche die innere Reibung vermindern; deshalb findet dieselbe in einem typischen Karste selten und nur in

1) Rothe, Allgemeine Geologie.

schwachem Grade, in langsamem Tempo statt. Daher das häufige morphologische Paradoxon im Karst, daß man bezeichnenderweise manchmal große, mächtige Täler mit eingeebneten, breiten, also sehr reifen Talböden findet, deren

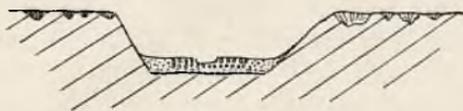


Fig. 1. Steilwandige breitbödige Karsttäler.

Gehänge so jugendlich steil und felsig sind (Fig. 1), daß man sie als Elemente zweier verschiedener Zyklen auffassen möchte; denn im selben Entwicklungszyklus gehören zu breiten Talböden auch sanfte Gehänge. Schon bei dieser Gruppe morphologischer modellierender

Agentien sehen wir, daß ihre Tätigkeit und die in ihrem Gefolge entstehenden Formen sich vom nichtverkarstungsfähigen Lande stark unterscheiden.

Viel größer sind aber die Unterschiede, wenn wir die Wirkungen des fließenden Wassers betrachten. In der unlöslichen Landschaft nimmt die mechanische Erosion die erste Stelle ein unter allen modellierenden Kräften, im Karste hingegen eine ganz untergeordnete. Natürlich transportieren die Flüsse auch im Karst Material, wirken durch die eigene kinetische Energie und eben dieses Material umgestaltend auf ihr Bett, vertiefen es und unterspülen die Gehänge.

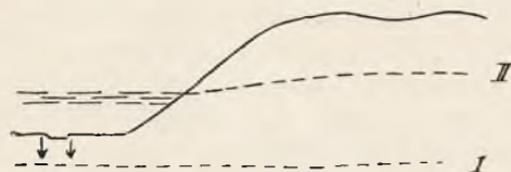


Fig. 2. Kampf zwischen Grundwasser und Fluß.

Aber jeder Fluß, sei es ein oberirdischer oder ein unterirdischer, ist im Karst überhaupt in seiner Existenz bedroht. Er muß einen doppelten Existenzkampf führen: wenn er hoch gelegen ist im Vergleiche zum Niveau des Karstgrundwassers (Fig. 2, I)¹⁾, droht

ihm die Gefahr, daß sein Wasser sich durch Klüfte diesem zu bewegt und aus dem Bette verschwindet; zahllose Ponore und Klüfte verschlucken das Wasser und führen es der senkrechten, unterirdischen Entwässerung zu; Trockentäler, das Endergebnis dieses Prozesses, sind eine charakteristische Erscheinung aller Karste.

1) Die Frage nach der Bedeutung des Grundwassers im Karste ist heute strittig; es werden in dieser Hinsicht die widersprechendsten Meinungen geäußert, die entgegengesetztesten Anschauungen verteidigt. Die Anschauungen von Penck, Grund und anderen Anhängern der „Karstwassertheorie“ werden vielfach scharf bekämpft von den Anhängern der „Theorie der Karstgerinne“ (v. Knebel, Katzer u. a. m.). Ich glaube, es gehen hier beide Seiten etwas zu weit: ein Grundwasser muß im Karste ebenso vorhanden sein wie in jedem unverkarsteten, aber durchlässigen Gebiet, und muß also auch gewisse Folgeerscheinungen hervorrufen. Andererseits mögen zahlreiche „Karstgerinne“, an deren Existenz nicht gezweifelt werden kann angesichts unserer Kenntnisse über Höhlenflüsse, sich auch noch über dem Karstgrundwasserniveau erhalten und in Bewegung bleiben, allerdings immer mit der Tendenz, dem Grundwasser zuzustreben; sie mögen viele Erscheinungen der Karsthydrographie, welche die Karstwassertheorie nur schwer oder gar nicht deuten kann, erklären. Aber die Existenz des Grundwassers im Karste überhaupt zugegeben, — bleiben unsere weiteren Ausführungen aufrecht, unter welchem Gesichtspunkte immer man die Karsthydrographie betrachtet. (Es verschiebt sich eben nur je nachdem die „Evolutionbasis“, s. S. 197).

Da gibt es nur zwei Möglichkeiten für die Erhaltung eines Flusses im Karste: 1) wenn der Fluß ein sehr kräftiges Gefälle besitzt, mag das mit großer Geschwindigkeit abfließende Wasser gleichsam keine Zeit haben, um in den Klüften des Bettes zu verschwinden, und der Fluß wird sich so erhalten und erodieren; 2) wenn das Einzugsgebiet des Flußes so weit, und zwar besonders im undurchlässigen, nicht verkarsteten Nachbargebiete, aus dem der Fluß kommt, vergrößert wird, daß nicht die ganze Masse des Wassers während des Laufes im Karste versinkt und wenigstens ein Teil noch erosionsfähig bleibt. Liegt hingegen der Karstwasserspiegel im Verhältnis zum Flusse hoch (Fig. 2, II), so wird dessen Bett vom horizontalen, fast nivellierten Karstwasser inundierte; jegliche schnellere und lokalisierte Bewegung des Wassers wird damit unterbunden und eine fluviatile Erosion ausgeschlossen. Während also die Entwicklung einer unverkarsteten Landschaft einzig von der Erosionsbasis abhängt, steht die fluviatile Erosion im Karste nicht nur im Zusammenhang mit diesem Niveau, sondern auch mit dem Niveau des Karstgrundwassers und der Lage und Ausdehnung des Einzugsgebietes der Flüsse im undurchlässigen Terrain. Während dort bei geringer Menge des Flußwassers, bei geringem Gefälle des Flußbettes die Wirkungen der fluviatilen Erosion nur geschwächt und verlangsamt werden, werden diese hier nicht nur aufgehoben, sondern von anderen Vorgängen — nämlich dem Prozesse der unterirdischen Entwässerung — ersetzt; nicht nur die Intensität, sondern die Tendenz der Entwicklung ändert sich.

Der wichtigste formenbildende Prozeß im Karste ist, wie bekannt, die chemische Erosion des Wassers und die durch sie und die Klüftigkeit des Gesteins ermöglichte unterirdische, senkrechte Entwässerung. Jeder Kalkstein, auch der Dolomit¹⁾, löst sich in geringerem oder stärkerem Grade im Wasser, wodurch entlang von Klüften Hohlräume und Gänge im Gestein entstehen, durch die das Oberflächenwasser versinkt, indem es die chemisch und mechanisch transportierten Materialien, statt aus dem Karst hinaus, in dessen Inneres entführt. Die Kraft und Geschwindigkeit der chemischen Erosion im Karste hängt vor allem ab 1) von der Reinheit des Kalkes und 2) von der Klüftigkeit desselben, also indirekt von der Intensität und Qualität der tektonischen Vorgänge, welche ihn zerbrochen haben.²⁾ Es hängt vom Grade der Reinheit und Klüftigkeit des Kalkes das Aussehen und die Schnelligkeit der landschaftlichen Entwicklung eines Karstes so sehr ab, daß oft neben einander sich Gebiete finden, die gleich lange unter dem Einfluß der modellierenden Kräfte standen und doch morphologisch ganz verschieden aussehen, einzig wegen der in beiden Gebieten verschiedenen Auflösungsfähigkeit des Kalkes und wegen der ungleichmäßigen Verteilung der Angriffspunkte (Klüfte) für die Aktion der modellierenden Kräfte.

Gerade die Tatsache, daß im Karste die chemische Erosion eine so vorherrschende Stellung einnimmt, verursacht einige wichtige Unterschiede in der Modellierung der verkarstungsfähigen und der undurchlässigen und unlöslichen Landschaft. Die wichtigsten sind: das mechanisch nicht mehr wirkende Wasser wirkt dort noch chemisch weiter; das Wasser kann im Karste Formen schaffen

1) v. Knebel, Höhlenkunde 1906. Dolomit als Karstgestein.

2) A. Grund, Karsthydrographie, S. 172.

und vernichten, selbst wenn es kein oberflächliches Gefälle, selbst wenn es gar kein Gefälle hat. So gibt es übersteile Formen, die die chemische Erosion des stehenden Wassers unterschritten hat. Auch das Grundwasser und das Sickerwasser haben im Karste noch eine nicht zu unterschätzende Bedeutung in formengestaltender Hinsicht, während sie für die Modellierung der undurchlässigen Landschaften so ziemlich belanglos sind. Die formenvernichtende und aufbauende Wirkung des Wassers ist in der undurchlässigen Landschaft auf die Oberfläche beschränkt, im Karste hingegen auch in die Tiefe, in das Innere des Gebirges übertragbar. Diese Eigentümlichkeit verursacht alle Erscheinungen des Karstphänomens, sie verursacht die Verkarstung der Oberfläche (Dolinen, Trockentäler usw.) und der Tiefe (Höhlenbildung, Tropfsteinbildung usw.), und verursacht endlich auch alle hydrographischen Erscheinungen des Karstes (Karstquellen, unter- und oberirdische Karstflüsse, Karstwasser und seine Schwankungen usw.).

Eine Form der Talbildung, die sich auf die chemische Erosion des Wassers gründet, ist streng auf den Karst beschränkt. Im undurchlässigen Terrain ist die Talbildung an die Erosionsbasis gebunden und geht konstant und gleichmäßig vor sich. Im Karste kann durch Versinken des Wassers die oberflächliche Talbildung gänzlich unterbunden werden; aber das in die Tiefe versinkende Wasser vermag sich unter gegebenen Umständen Flußhöhlen, an deren Existenz wohl nicht gezweifelt werden kann¹⁾, zu schaffen, deren Einbruch an der Oberfläche eine neue und zwar ruckweise vertiefte Talform erzeugt: diese „unterminierende“ Talbildung, die an die chemische Erosion im Karste gebunden ist, kommt in der Natur nicht gar zu selten vor, so in den Grotten von St. Canzian im Küstenland, ähnlich in den Causses Süd-Frankreichs.²⁾

Gerade die Kombination der chemischen und mechanischen Wirkungen des Wassers, die sich in mannigfaltiger Weise unter einander und mit den übrigen modellierenden Agentien verbinden, ist für den Karst charakteristisch: immer wirkt auch das vorwiegend mechanisch arbeitende Wasser chemisch, immer transportiert und erodiert mechanisch auch das versinkende Wasser. Doch eine Grenze ist der mechanischen Arbeit selbst des versinkenden Wassers auch im Karste gesteckt. Die mechanische Arbeit ist an die kinetische Energie und daher an lebhaftere Bewegung des Wassers gebunden; diese und damit die mecha-

1) In dieser Hinsicht möchte ich nur auf Folgendes aufmerksam machen. In Istrien ist es uns möglich, das maximale Gefälle des Karstwasserspiegels in der Nähe des Meeres zu bestimmen. Das Trockental der Draga-Leme ist trotz eines Gefälles von höchstens 1—2 ‰ vom Karstwasser nicht inundiert; dieses muß also ein kleineres Gefälle haben. Ebenso wurde von Krebs (Morphogenetische Skizzen aus Istrien, 1904, VI) in Istrien das Gefälle des Karstwasserspiegels an der Hand des Avens von Dignano mit 1,6 ‰ bestimmt. Sollte das Flußwasser der St. Canzianer Höhlen schon dem Karstwasserspiegel angehören, müßten wir hier ein Gefälle seines Spiegels von 60 ‰ annehmen, was offenkundig mit dem obigen unvereinbar ist. Ebenso liegt das Bett des periodischen Höhlenflusses der Baradla (v. Sawicki, Skizze des slowakischen Karstes, S. 425) in Ober-Ungarn hoch über dem Karstwasserspiegel. Der mit einem Wasserfall aus einer Flußhöhle tretende Bramabiau gehört natürlich auch nicht dem Grundwasser an. Daß auch das Höhlenflußwasser ebenso wie das oberirdische die Tendenz hat, im Karste dem Grundwasserspiegel zuzustreben, ist klar.

2) Penck, Das Karstphänomen a. a. O.

nische Leistungsfähigkeit hört dort auf, wo das versinkende Wasser das Grundwasser erreicht. Dann beginnt die chemische Erosion allein wirksam zu sein, bis eine Sättigung mit gelöstem Material beim mangelnden Luftzutritt und der damit zusammenhängenden Zufuhr an Kohlensäure auch die chemischen Wirkungen des Wassers ausschaltet.

So wechselt das gegenseitige Intensitätsverhältnis der beiden Kräfte. Beide aber schaffen im Gegensatz zu den Massenbewegungen den Schatz der Detailformen. Mit ihnen hält Schritt der Reichtum und die Mannigfaltigkeit der Karstformen einer bestimmten Landschaft; die Formenmannigfaltigkeit oder vielmehr die Zunahme derselben können wir als Charakteristikum eines jugendlichen¹⁾ Karstes betrachten. Die Massenbewegungen hingegen vernichten überwiegend die vom Wasser geschaffenen Detailformen und erzeugen große, im Gleichgewicht befindliche Flächen. Eine Karstlandschaft, in der die Massenbewegungen über die Wasserwirkungen vorherrschen, können wir als alternd betrachten.

Allerdings gelten diese Sätze nicht ganz ohne Ausnahmen. Wir wissen, daß die mechanische Arbeit im Karste überhaupt gering ist, weil das Wasser im Karste sich nicht konzentriert, in Rinnen sammelt, sondern zerteilt und isoliert; sie führt auch oft zur Akkumulation, die von um so größerer Bedeutung ist, als das zerkleinerte, poröse Material, das abgelagert wird, mehr Raum einnimmt als das feste Gestein. Daher können selbst bei einem Massendefekte Hohlräume relativ leicht ausgefüllt, also vernichtet werden.

Auch die chemische Wirksamkeit der Wasser schafft nicht nur Karstformen, sondern verursacht auch deren Vernichtung, und zwar auf zweierlei Weise: 1. durch die Tropfsteinbildung und 2. durch die Bildung der rückständigen Verwitterungskrume. Vor allem kann das Wasser sehr oft nicht die ganze gelöste Kalkmasse in sich erhalten, sei es, daß die Temperatur des Wassers und damit seine Lösungskraft sinkt, sei es, daß eine starke Verdunstung die Wassermasse selbst verringert und so den Rest übersättigt erscheinen läßt. In beiden Fällen scheiden sich aus ihnen Sinterbildungen und Tropfsteine der mannigfaltigsten Art ab und erfüllen ganz dicht hier Klüfte, dort Höhlen. Die Hohlräume des Gebirges verringern sich immer mehr und werden von der Tropfsteinbildung erstickt. Die Sinterbildung bekämpft also die Laugungsprozesse. Noch viel wichtiger ist die Bildung der Verwitterungskrume; es gibt keinen so reinen Kalk in der Natur, daß nicht, wenn auch noch so spärlich, unlösliche Rückstände nach dessen chemischer Auflösung zurückblieben. Diese Rückstände sind meist Tone und Lehme, die durch Eisenverbindungen gerötet sind und deshalb Roterde (Terra rossa) genannt werden. Die Menge der sich bildenden Roterde hängt vor allem von der Reinheit des Kalkes ab, die Geschwindigkeit der Bildung einer Roterdedecke von der Intensität der Laugungsprozesse überhaupt, und endlich ihre Erhaltungsfähigkeit von dem Grade der Transportkraft des fließenden Wassers; denn diese Roterde kann einzig und allein mechanisch und suspendiert weggetragen werden von in Bewegung befindlichem Wasser. Für die Intensität der Zersetzungsprozesse und der mechanischen Transportkraft des fließenden

1) Jung nennt man nach Davis eine Landschaft, die noch nicht lange den jetzigen Modellierungsverhältnissen ausgesetzt ist und daher noch weit vom Endzustand der Entwicklung entfernt ist.

Wassers sind klimatische Faktoren von ausschlaggebender Bedeutung, für die ersteren besonders die Insulationsverhältnisse, die Frostverwitterung der felsigen Oberfläche usw., für die letzteren die Niederschlagsmenge überhaupt, die Verteilung derselben im Jahre, und die größten täglichen Niederschlagsmengen, die zum Abfluß gelangen. Diese Verhältnisse sind dafür maßgebend, ob der Roterdemantel sich an der Oberfläche erhält und anwächst, sich verbreitet, bis er die ganze Karstlandschaft bedeckt, oder ob er vielleicht abgespült wird in die Tiefen des Gebirges, wenn etwa weniger Terra rossa gebildet wird, als das Wasser davonträgt, so daß die Decke von Roterde immer mehr durchlöchert und vernichtet wird.

Die Bildung eines Roterdemantels ist der springende Punkt für die morphologische Geschichte einer Karstlandschaft, sie ist von hervorragender Bedeutung für die Entwicklung des Karstphänomens, denn die Terra rossa bildet vermöge ihrer Undurchlässigkeit gleichsam die Brücke zwischen der Entwicklung einer Karstlandschaft und einer undurchlässigen Landschaft. Der Entwicklung des Karstphänomens wird durch die Bildung einer zusammenhängenden allgemeinen Roterdedecke ein Halt geboten; denn hier herrschen dann in der Entwicklung des Formenschatzes ganz andere Gesetze als im durchlässigen, unbedeckten Karste.

B. Entwicklung der Karstformen.

Unter dem Einflusse der besprochenen Kräfte erfahren alle einzelnen Karstformen, z. B. die Dolinen, die Karren, die Höhlen usw., eine bestimmte Entwicklung, sie durchleben ein bestimmtes Leben. Diese Entwicklung ist unter gegebenen Umständen (Reinheit und Klüftigkeit des Kalkes, Höhenlage der Oberfläche und des Grundwasserspiegels, Klima usw.) gesetzmäßig, wiederholt sich regelmäßig und strebt regelmäßig denselben Endzielen zu. Die einzelnen Phasen dieser Entwicklung können wir deren morphologisches Alter nennen (Jugend, Reife, Senilität), da ihre Unterschiede unter einander sich vor allem auf die verschieden lange Dauer der modellierenden Prozesse zurückführen. Betrachten wir kurz das Leben oder den Zyklus einiger Karsterscheinungen!¹⁾

Das Niederschlagswasser, das auf die Oberfläche des nackten Felsens fällt, fließt, jeder Tropfen einzeln, auf der gegebenen Abdachung herab, löst dabei vermöge der der Luft beim Fallen entnommenen Kohlensäure etwas Kalk und entführt die Lösung in die Tiefe. Die sich auf diese Weise bildenden kleinen Karrenfurchen mit Rinnen und sie trennenden Rücken ziehen wie Kanellüren parallel zu einander die Kalkplatten hinab. So sehen die jugendlichen Karren, die „Rillen“, aus. Sie sind abhängig von der Abdachung, unabhängig von der Struktur. Mit der Zeit findet das Wasser Punkte und Linien geringsten Widerstandes, wo es in relativ kurzer Zeit relativ viel erodieren kann; solche Angriffslinien geringsten Widerstandes sind vor allem die Klüfte, die jeden Kalk durchziehen, der einst vom Gebirgsdruck gepreßt worden ist; meist durchsetzen ganze Kluffbündel, oft in gewissen vorherrschenden Richtungen oder strahlenförmig angeordnet, das Kalkpaket. Wo mehrere Klüfte sich kreuzen, liegen Punkte ganz besonders geringen Widerstandes und günstiger Erosionsbedin-

1) Penck, Das Karstphänomen a. a. O.

gungen. Indem sich das fließende Wasser diesen strukturell angelegten Verhältnissen anpaßt, entsteht ein Kluftkarrensystem, das in seiner Anlage die tektonische Prädisposition widerspiegelt, sie aufleben läßt. Ein solches Karrensystem, das sich schon von der ursprünglichen Abdachung emanzipiert hat, können wir als reiferes Entwicklungsstadium des Karrenphänomens betrachten, denn es fand schon eine gewisse Auswahl der günstigen Erosionsbedingungen statt.¹⁾ In allen Jugendformen sind die Rinnen schmal und tief, ihr Boden stellt nur eine Linie dar, ihr Durchschnitt hat die Form ∇ (Fig. 3 a), die Rillen haben scharfe, schmale und steile Gratformen. Im reiferen Zustande weisen die Karrenrinnen eine breitere, zugerundete, U-förmige Hohlform, und eine ähnlich zugerundete, erniedrigte Vollform auf (Fig. 3 b). Die weitere Einwirkung der chemischen Erosion des Wassers und Schnees, der Wurzeln, des Pflanzenkleides und der in der Verwitterungskurve enthaltenen Humussäuren bewirkt die Einebnung des Karrenfeldes, die Erstückung desselben unter einem Mantel von Verwitterungsschutt (Fig. 3 c).

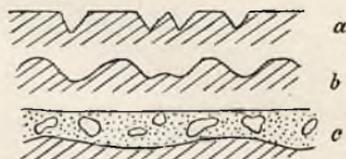


Fig. 3. Entwicklung des Karrenphänomens.

Karrenfeldes, die Erstückung desselben unter einem Mantel von Verwitterungsschutt (Fig. 3 c). Von dem in den Hohlräumen sich früher ansammelnden und länger andauernden Wasser, Schnee und Verwitterungslehm werden die Rücken gleichsam unterschritten, durch die Insolation abgesprengt und in lose Karrensteine aufgelöst. Eine unter Verwitterungsschutt begrabene, von losen Karrensteinen bestreute Karrenfläche können wir als greisenhaft betrachten; sie bleibt so lange nicht entwicklungsfähig, so lange der Deckmantel nicht weggeschafft, die Kalkoberfläche nicht entblößt wird. Dabei ist es nicht ausgeschlossen, daß die Karren unter einer noch etwas durchlässigen, etwa nicht genügend mächtigen Lehmdecke sich langsam weiter entwickeln; aber das ist nur ein bald ersterbendes Nachklingen des Lebens des Karrenphänomens, das so wie jede andere Formengruppe entsteht und vergeht.

An der Kreuzung mehrerer Klüfte findet die chemische Arbeit des Wassers besonders günstige Bedingungen für ihr Wirken. Bald entsteht dort eine Kluft-
röhre, durch die das Wasser in die Tiefe versinkt (Fig. 4 a).

Diese Kluft-
röhre hat so lange jugendliche Formen, als sie eng ist, ihre Wände steil sind, also so lange das Wasser noch nicht genug von der Umrahmung



Fig. 4. Junge und reife Doline.

gelöst hat, um sie abzuböschern. Mit der Zeit (Fig. 4 b) wird diese Arbeit des Wassers, zusammen mit Massenbewegungen, die an der übersteilen Umrahmung

1) Wir dürfen allerdings nicht übersehen, daß wir über die Bedingungen, wann vorwiegend Kluftkarren und wann Abdachungsrillen entstehen, noch nicht ganz klar unterrichtet sind. Ich möchte nur erwähnen, daß ich z. B. gelegentlich der Exkursion des IX. intern. Geographen-Kongresses 1908 auf das Désert de Platé unter Führung Prof. E. Chaix' feststellen konnte, daß hier trotz der geologischen Jugendlichkeit des prachtvollen Karstphänomens (postglazial) und trotz der steilen

besonders wirksam sein können, die Steilheit derselben verringern und den Boden der Hohlform verschütten. So wird als reife Form die typische Doline entstehen, die ihre Entstehung der vertikalen Entwässerung und der chemischen Auflösungsarbeit des Wassers dankt. An ihrem Grunde sammelt sich mit der Zeit der Rückstand des bei der Bildung der Doline gelösten Kalkes an. Eine geböschte, an ihrem Grunde von Terra rossa erfüllte, an den Gehängen noch nackte Doline können wir als reif betrachten. In der weiteren Entwicklung

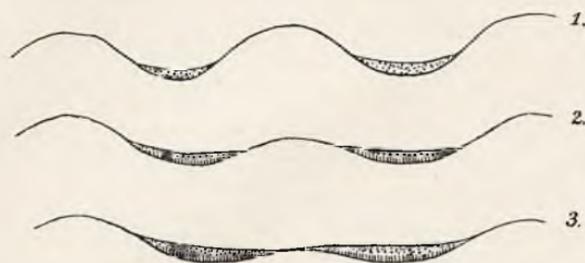


Fig. 5. Umformung von Dolinen zu Uvalen (und Talungen).

(Fig. 5) werden einzelne der die Dolinen trennenden Rücken erniedrigt und die Böden der Dolinen aufgeschüttet, besonders wenn dieselben mit Roterdeso verschmiert sind, daß ihre Undurchlässigkeit dem Wasser nicht gestattet, gelösten Kalk zur Tiefe zu entführen, und damit die Weiterbildung der Doline unter-

bindet. Gewöhnlich erniedrigen sich einzelne Teile der Dolinenumrahmung, die durch Exposition oder Schichtbau dazu besonders prädisponiert erscheinen, rascher als andere, und so verwachsen benachbarte Dolinen zu Großformen

(Fig. 6), die Cvijić Uvalen¹⁾ genannt hat; damit ist ein weiterer Schritt zur Ausreifung getan. End-

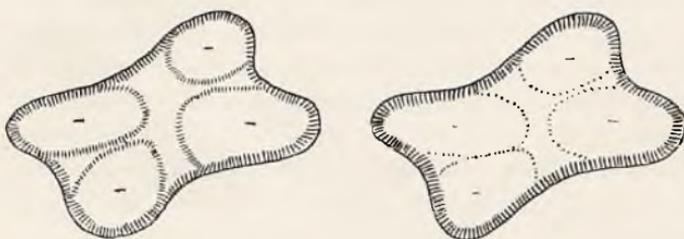


Fig. 6. Bildung von Uvalen aus Dolinen.

lich wird durch beständige Erniedrigung der Umwallung und durch beständige Aufschüttung des Dolinenbodens die ganze Dolinenlandschaft eingeebnet und mit einer mehr oder minder mächtigen, lokal in den

Dolinenböden anschwellenden Verwitterungsschicht bedeckt werden; diese weitgehende Einebnung einer Karstlandschaft durch die normale Dolinenentwicklung unter Bildung eines Mantels von Roterde, können wir als seniles Stadium des Dolinenzyklus betrachten.

Ähnlich kann man eine gesetzmäßige Entwicklung beim Höhlenphänomen feststellen. An einer Stelle, die sich der unterirdischen Auslaugung günstig erweist, besonders entlang einer Kluft, wird sich ein Hohlraum bilden. Das durchsickernde oder durchströmende Wasser wird entlang den Wänden den Kalk-

Abdachungen des über 2000 m hoch gelegenen Geländes der Charakter der Kluftkarren weitaus überwiegt. Wir sind noch weit entfernt von der Lösung aller hierher gehörigen Fragen.

1) Cvijić, Morphologische und glaziale Studien aus Bosnien usw. Abhdl. d. Geogr. Ges. Wien III, 2, S. 76.

stein auflösen und so die Höhle erweitern. Eine noch wachsende Höhle nennen wir eine jugendliche Form. Doch bald, oft schon gleichzeitig mit dem Erweiterungsprozeß, hinterläßt das verdunstende Wasser in der Höhle Sinterdecken und Tropfsteinbildungen; zugleich werden die oft übersteilen und von der Laugungsarbeit der Gewässer unterminierten Höhlenwände nachstürzen, sich abböschern, und so der Boden der Höhle mit Verwitterungsschutt bedeckt werden. Endlich wird die anderorts gebildete Terra rossa in die Höhle in Form sanfter Schwemmkegel eingelagert werden und den Boden erhöhen. Wenn diese Ausfüllungsprozesse der Tropfsteinbildung, der Terra rossa-Einschwemmung und der Schuttbildung ungefähr gleichen Schritt halten mit der Höhlenbildung, kann man vom Reifestadium der Höhle sprechen; wenn sie hingegen überwiegen und die Höhle zu ersticken beginnen, ist das greisenhafte Stadium dieser Formenreihe im Anzuge.

Nicht nur einzelne Formen — ich habe ihrer nur einige ausgewählt — haben ihre gleichsinnige, zusammenhängende Entwicklung auch im Karste, sondern auch ganze Gruppenscheinungen, Komplexe von Phänomenen wandeln sich unter dem Einflusse der modellierenden Kräfte gesetzmäßig um. Als Beispiel führe ich das hydrographische Netz des fließenden Wassers an. In der ersten Zeit kann sich, dank der Nähe des Grundwasserspiegels, und selbst wenn dieser gesunken ist, dank der relativen Enge und geringen Fassungskraft der Klüfte, die oberirdische horizontale Entwässerung erhalten. Mit dem weiteren Sinken des Grundwasserspiegels, wie es die Begleiterscheinung eines sich hebenden Karstes ist, und der Erweiterung der Klüfte, wird die oberflächliche, horizontale Entwässerung unterbunden; das ganze Niederschlags- und Flußwasser versinkt in den Klüften und wendet sich der senkrechten, unterirdischen Entwässerung zu. Oberirdische Flüsse werden eine lokal und fallweise bedingte Ausnahme bilden; auf den Höhen des Karstes herrscht Trockenheit, in dem tiefen Innern des Gebirges und wo der Grundwasserspiegel von der Oberfläche geschnitten wird, also in den Poljen und tiefen Tälern, übermäßige Feuchtigkeit und Wasserreichtum. Die hochgelegenen Täler wandeln sich in Trockenbetten um, hingegen entwickelt sich im Innern unter günstigen Umständen ein Höhlenfluß.

Im Laufe weiterer Entwicklung wird manches Höhlendach einstürzen und aus dem Höhlenfluß ein komplexer, aus ober- und unterirdischen Talstücken sich zusammensetzender Fluß werden. Zu Beginn war das hydrographische Netz oberflächlich zusammenhängend, dann mit dem teilweisen Versinken der fließenden Gewässer zerriß es und zerfiel in einzelne Glieder; manchmal kennen wir nur den Eintritt, manchmal nur den Austritt des Höhlenflusses, ja in der Baradla in Ungarn kennen wir einen hoch über dem Grundwasser gelegenen periodischen Höhlenfluß von 6 km Länge, von dem weder Beginn noch Ende derzeit bekannt sind. Endlich mit dem Einsturz des Höhlendaches tritt der unterirdische Fluß wieder an die Oberfläche, die einzelnen Glieder schließen sich wieder zusammen zu einem einheitlichen oberirdischen System.

Und so können wir überhaupt von der Jugend einer Karstlandschaft sprechen, wenn der Verkarstungsprozeß im Zunehmen begriffen ist, wo also Rillen, Kluftlöcher, Dolinen sich bilden und scharfe Formen haben, Höhlen wachsen, Flüsse versinken, usw.; von ihrer Reife, wenn zwar die Verkarstung noch fortschreitet, aber auch schon die die Karsterscheinung vernichtenden Prozesse kräftig ent-

gegenarbeiten, wo Dank der Verwitterung, den Kriech- und Absturzprozessen, den Wirkungen der Ab- und Einschwemmung die Karren sich abrunden, die Dolinen verflachen und verschütten, Uvalen sich bilden, die Höhlen durch Tropfsteinbildung und Einschwemmung von Terra rossa zu ersticken beginnen, Höhlenflüsse eine Zerstücklung des hydrographischen Netzes verursachen usw.; und endlich von der Senilität derselben, wo diese vernichtenden Prozesse das Übergewicht haben, alles unter einer undurchlässigen Verwitterungsschicht begraben und den Karst durch Vernichtung einzelner Karsterscheinungen wieder dem Aussehen einer undurchlässigen Landschaft nahe bringen.

C. Die Entwicklung der Karstlandschaft.

In einer Landschaft, wo das rinnende Wasser und das Kriechen des Schuttes die herrschenden morphologischen Agentien sind, herrscht eine großartige und einheitliche Koordination aller Formen. Alle Seitentäler stehen in ihrer Entwicklung in engem Zusammenhang mit den Haupttälern: wenn diese sich eintiefen, folgen alle Nebentäler in der Eintiefungsarbeit nach und suchen die gleichsohlige Mündung in die Haupttäler zu bewahren. Diese aber richten ihre Erosionsarbeit nach einer für die ganze Landschaft maßgebenden Erosionsbasis, dem tiefsten Punkte derselben. So lange die Täler überwiegend in die Tiefe arbeiten, so lange haben sie schmale Böden, steile Gehänge und oft unregelmäßiges Gefälle. Wenn die Tiefenarbeit schwächer wird, verbreitert die Seitenerosion die Talböden, gleichzeitig böschen die nun überhandnehmenden Massenbewegungsprozesse die Gehänge ab: alle Prozesse arbeiten an der Ausgleichung der Unregelmäßigkeiten, sei es im Gefälle der Täler, sei es in der Böschung der Gehänge. So erzeugen sie schließlich das Gleichgewichtsgefälle der Täler, die Reife der Hohl- und Vollformen der betreffenden Landschaft. Haben diese Prozesse endlich eine gewisse Harmonie und eine gewisse Beständigkeit der Formen zu erzielen vermocht, so sprechen wir von einer reifen Tallandschaft. Die weitere Tätigkeit der modellierenden Prozesse arbeitet nun daran, das Land zu erniedrigen und die Unebenheiten seines Reliefs möglichst auszugleichen, die relativen Höhenunterschiede zu verringern, bis zu einer so wenig geböschten Landschaft (Fastebene), daß deren Gefälle den fließenden Gewässern nicht mehr kinetische Energie genug gibt, um noch reicheres Material transportieren zu können. Diese greisenhafte Landschaft zeichnet sich auch durch greisenhafte Einzelformen aus, ganz sanfte, breite, wenig erhabene Rücken, wenig vertiefte, breitsohlige Täler. Allerdings finden wir selten den ganzen Formenschatz einer Landschaft so einheitlich ausgestaltet, daß wir es nur mit jungen oder reifen oder alten Formen zu tun hätten. Ganz abgesehen von der durch die verschiedene Widerstandsfähigkeit des Materials und das Emporwandern der Ausreifung von der Erosionsbasis gebirgseinwärts bedingten Mannigfaltigkeit der Formen, finden wir überdies oft junge Formen eingesenkt in alte, andererseits reife und alte Formen, welche durch die heutige Entwicklung vernichtet werden; sie gehören einer älteren Entwicklung, einem älteren Zyklus an, die jungen hingegen einem zweiten, jüngeren Zyklus. Wir sprechen dann diese Erscheinung als Verjüngung an, hervorgerufen durch eine relative Verschiebung der Erosionsbasis.

Nicht so einfach und klar verläuft der geographische Zyklus im Karst. Die obige Deduktion (Abschnitt B) leidet an einer Fehlerquelle: jeder einzelne der aufgestellten Sätze ist allerdings für sich richtig und durch zahlreiche Beobachtungen aus allen Karstgegenden belegt; wenn wir nur eine einzelne Form nehmen, können wir wirklich von ihrer Entwicklung, ihrem Alter, ihrem Zyklus sprechen. Aber wir können die Entwicklung einer Formengruppe im Karst nicht der Entwicklung einer anderen parallel setzen, denn es fehlt die tiefere Abhängigkeit aller von der eigentlichen Ursache alles Karstphänomens; die einzelnen Formen bedürfen zu ihrer Umwandlung so verschiedener Intensitäten oder Wirkungszeiten der morphologischen Prozesse, daß sie ihre Reife- und Altersstadien in von einander ganz verschiedenen Zeiten erlangen. Wir finden oft in ein und demselben Karste neben Formen, die nach dem obigen Schema als reif oder alt zu bezeichnen wären, ganz jugendliche Formen, ohne daß letztere etwa einer Verjüngung, einem jüngeren Zyklus zu danken wären: jugendliche Karren auf den Hängen ausgereifter Dolinen, senile Uvalen über ganz jugendlichen Höhlen, eine gealterte Oberfläche über einem zerrissenen hydrographischen Netz usw. Kurz gesagt, es fehlt die Einheitlichkeit dieser Formenentwicklung, die beim „normalen Zyklus“ im undurchlässigen Gebiet herrscht und die Gruppierung und Verwertung verschieden alter Formen dort so leicht, sicher und lohnend macht.

Auf solchen Grundlagen kann man den geographischen Zyklus im Karste nicht entwickeln und aufbauen, man muß sich nach anderen Kriterien umsehen und zwar nach den eigentlichen letzten Ursachen der Entstehung und Vernichtung des Karstphänomens überhaupt. In der nicht verkarsteten Landschaft hängt die Entwicklung, Richtung und Intensität der modellierenden Kräfte vor allem von der Lage der Erosionsbasis ab, des niedrigsten Punktes der Oberfläche der Landschaft, dem die aus der Gravitation ihre Energie schöpfenden Erosions- und Denudationsprozesse von allen Seiten zustreben. In der Karstlandschaft spielt nicht ein Punkt, sondern eine Fläche eine ähnliche Rolle, das ist der Spiegel des Grundwassers; auf dem kürzesten Wege, daher auch durch Klüfte und Höhlen in oft vertikaler Richtung eilt ihm das Lösungen chemisch und Rückstände mechanisch transportierende Wasser zu. Und diese Bewegung dauert so lange an, bis das Niveau erreicht wird. Ich nenne es deshalb Evolutionsniveau. Da mit der Bewegung die Transportkraft des Wassers verloren geht, stellt das Evolutionsniveau auch die Grenze dar, an welcher die Ablagerung der Rückstände erfolgen muß, und wo, — da das dort stagnierende Wasser nicht mehr neue Kohlensäure aus der Luft aufnehmen kann, — auch der Lösungsprozeß unterbunden wird. Von der relativen Lage des Evolutionsniveaus hängt die ganze Möglichkeit der Verkarstung ab; bei relativ tiefer Lage desselben ist der Verkarstungsprozeß intensiv, frisch und kräftig, die vertikale Entwässerung herrscht unangefochten, oberflächliche Flüsse verschwinden; bei relativ hoher Lage desselben erlahmt der Verkarstungsprozeß, die Tendenz der Entwässerung strebt von der vertikalen der horizontalen zu. Und mit diesen Tendenzen der Entwässerung hängt die ganze Entwicklung der Landschaft zusammen. Wir können daher als jugendlichen Karst denjenigen bezeichnen, der sich durch tiefe Lage, als greisenhaft denjenigen, der sich durch hohe Lage des Evolutionsniveaus auszeichnet.

Dem Verkarstungsprozeß arbeiten 1. der die Klüfte und Höhlen ausfüllende Prozeß, und 2. der die Oberfläche mit einer undurchlässigen Schicht bedeckende, verschmierende Prozeß entgegen: sie verwandeln die durchlässige Karstlandschaft in eine undurchlässige „normale“ Landschaft. Ein undurchlässiger Deckmantel an der Oberfläche kann nur dort sich bilden, wo a) der Kalk relativ unrein und die chemische Verwitterung kräftig ist, und wo b) die Möglichkeit der Hinausschaffung der entstandenen Verwitterungskrume so gering als möglich ist, wo also die Klüftigkeit des Kalkes klein ist, und wo die Niederschläge (die transportierende Kraft) gering und schwach sind. Wir sehen, daß neben der petrographischen Beschaffenheit des Materials und seiner Klüftigkeit auch das Klima eine ganz wesentliche, ja entscheidende Rolle spielt. Und je nachdem der die Rückstände, die undurchlässige Terra rossa bildende Prozeß oder der dieselbe denudierende Prozeß überwiegt, können wir zwei Typen in der Entwicklung der Karstlandschaften unterscheiden; in Europa verbinden sich mit den klimatischen Existenzbedingungen der Karste auch petrographische Verhältnisse in der Weise, daß ich die beiden Typen vorläufig nach den Gegenden, wo sie am besten ausgebildet sind, als mitteleuropäischen und mediterranen Karst bezeichnen möchte.

Wenn ich im folgenden den in jedem der beiden Typen sich abspielenden geographischen Zyklus kurz zu charakterisieren versuchen werde, so muß ich erinnern, daß fast die ganze Karstliteratur sich bisher nur mit dem Typus des mediterranen Karstes beschäftigt hat; die Entwicklung der mitteleuropäischen „nicht typischen Karste“ kann ich nur auf Grund meiner, im slowakischen Karste gewonnen und auf einige andere mitteleuropäischen Karste erweiterten Anschauungen ableiten.

a) Der geographische Zyklus im mediterranen Karsttypus.

In den mediterranen Gegenden Europas ist das Klima allerdings nicht gerade niederschlagsarm (liegt doch z. B. bei Cattaro die regenreichste Gegend Europas); aber die Regenverteilung auf die Jahreszeiten ist sehr ungleichmäßig, zeigt hohe Maxima und tiefe Minima; weiter zeichnet sich dieses Klima durch eine höhere Lufttemperatur überhaupt und große Temperaturschwankungen aus. Da überdies die mediterranen Karste der Dinariden durch hohe Klüftigkeit und Reinheit des Kalkes hervorrage, so ist 1. der Auslaugungs- und Lösungsprozeß intensiv, dagegen 2. die Bildung einer Verwitterungskrume gering und langsam; und sogar diese wird 3. von den reißenden Schlagregen bei der oft klimatisch bedingten Vegetationslosigkeit in die zahllosen Klüfte rasch denudiert und eingeschwemmt.

So bleibt die Oberfläche des mediterranen Karstes immer oder sehr lange Zeit nackt (nackter Karst), oder bedeckt sich höchstens mit dem reichen, durch die Insolation und in Folge der großen Temperaturschwankungen mechanisch abgesplitterten Scherbenmaterial (Scherbenkarst). Da heute bei diesen Karsten auch die Evolutionsbasis sehr tief liegt, entwickelt sich hier das Karstphänomen in ganz vorzüglicher und reiner Form; tief hinab greifen die Dolinen mit ihren steilen Gehängen, scharfe, oft zu Graten umgebildete Scheiden trennen sie (Velebit). Auf der Höhe herrscht vollkommene Wasserlosigkeit, in der Tiefe energische

Höhlenbildung. Wie lebhaft auch heute die Entwicklung des Karstphänomens in diesen hochgelegenen Karstlandschaften sein mag, auch sie wird ihr Ende erreichen, wenn die unaufhörlich sich erniedrigende Oberfläche, die durch die Karrenentwicklung und Dolinenbildung abgetragen, ja eingeebnet wird, sich dem Evolutionsniveau nähert. Denn die mechanische und chemische Erosion und Transportation hört in dem Augenblicke, wo das fließende Wasser das Grundwasser erreicht, auf. Aber damit ist nicht gesagt, daß die Entwicklung des Karstes ihr Ende erreicht, wenn, — natürlich bei Abwesenheit jeglicher tektonischer Vorgänge, — die Oberfläche das heutige Evolutionsniveau erreicht. Dieses hebt sich nämlich im Laufe der Entwicklung selbst, weil das an ihm seine Bewegung einbüßende Wasser die bis hieher transportierten Rückstände und zum Teil auch die Lösungen fallen läßt, die Klüfte und Höhlen, in denen das Grundwasser steht, ausfüllt und damit dieses emportreibt. Und so erfolgt im mediterranen Karst die Zuschüttung von unten gegen oben; nicht nur die Oberfläche sinkt, sondern das Evolutionsniveau hebt sich auch. Nach den wenigen bisher bekannten Ziffern müßten wir — ganz schematisch — die erste Bewegung, das Sinken der Karstoberfläche, als fünfmal so schnell vor sich gehend betrachten als die zweite, die Hebung des Evolutionsniveaus. Wenn wir nämlich nur ganz beiläufig mit Grund¹⁾ die Klüftigkeit gewisser mediterraner Kalke mit 0,5%, und die Verunreinigung selbst der reinsten Kalke mit v. Knebel²⁾ zu 0,1% annehmen, so ist klar, daß die Oberfläche um 5 m abgetragen werden muß, um, mit ihren Rückständen die Klüfte in der Tiefe ausfüllend, das Evolutionsniveau um 1 m emporzutreiben. Wir erkennen auch, daß bei einem über dem primären Evolutionsniveau 1200 m sich erhebenden Kalkblock die Denudierung von 1000 m des Blockes genügt, um die Klüfte der übrigen 200 m auszufüllen, das Evolutionsniveau um 200 zu heben, so daß dasselbe sich mit der Oberfläche begegnet und in + 200 über dem primären Niveau der Verkarstungsprozeß ausgeschaltet wird. Mögen auch die Ziffern selbst in ungefährem Umfange sich als haltlos erweisen, das Wesen der Entwicklung, die Tendenz derselben bleibt davon unberührt; immer wird in einem solchen Karste der Verkarstungsprozeß bis zur völligen und endgültigen Unterbindung desselben an der Oberfläche vor sich gehen, dieselbe regelmäßig abtragen, dagegen die Vernichtung der Entwicklung von unten herauf mit der Verringerung des durch die Hohlräume eingenommenen Volumens erfolgen.

b) Der geographische Zyklus im mitteleuropäischen Karsttypus.

Ganz anders läuft der geographische Zyklus in einem mitteleuropäischen Karste ab. Der Einfluß des Klimas äußert sich hier in einer ganz anderen Weise: die Niederschläge sind bedeutend geringer und ihre Verteilung auf das Jahr ist viel regelmäßiger, die Maxima und Minima von einander nicht so verschieden, die faktischen täglichen Niederschlagsmengen viel geringer als im Mittelmeergebiet. Aus diesem Grunde ist die Abspülungsmöglichkeit des Verwitterungsmantels durch die sanften, schwachen „Landregen“ viel kleiner. Hingegen begünstigt die andauernde Luftfeuchtigkeit und die bedeutsame Wirkung der Schnee-

1) Grund, Karsthydrographie 1903 l. c. 174.

2) v. Knebel, Höhlenkunde 1903 l. c. 30.

decke die chemische, die ausgiebige Frostwirkung die mechanische Zersetzung des Kalkes, beschleunigt die Bildung einer Verwitterungsrinde, die wegen der sanften Niederschläge nicht so leicht denudiert werden kann und überdies durch eine meist lückenlose und reiche Vegetationsdecke festgehalten wird. Wenn überdies, wie das in Mittel-Europa oft der Fall ist, der Kalk nicht sehr rein und seine Klüftigkeit nicht sehr bedeutend ist, so bedeckt sich seine Oberfläche mit dem undurchlässigen Mantel einer Verwitterungsdecke. Zwischen die Oberfläche des Karstes und seine Tiefen hat sich eine isolierende, undurchlässige Schicht eingeschoben; sie verschmiert und schließt die oberflächlichen Öffnungen der Klüfte und trennt die Oberfläche von der Tiefe. Vor allem wird damit im Augenblick, wo die Klüfte an ihrem Ausgang mit Terra rossa verschmiert werden, die vertikale Entwässerung unterbunden; das Niederschlagswasser kann nicht mehr zur Tiefe gelangen. Deshalb herrscht in der Tiefe jetzt völlige Entwicklungsstarre. Sowohl die Laugungs-, wie die Tropfsteinbildungsprozesse können nicht vor sich gehen, Höhlen bilden sich nicht weiter und können auch nicht erstickt werden; mit Ausnahme der durch die Schwere bewirkten Massenbewegungen herrscht dort Stillstand der morphologischen Prozesse. Der Spiegel des Karstwassers fällt, da die Zufuhr des Oberflächenwassers unterbunden wird, hört aber gleichzeitig auf, Evolutionsniveau zu sein; die an der Oberfläche arbeitenden Prozesse, durch eine undurchlässige Schicht vom Karstwasser getrennt, richten sich nicht mehr nach dessen Höhlenlage. Die Karstquellen werden zugleich ärmlicher, schwächer und auch geringer an Zahl.

Inzwischen hat sich auch auf der Oberfläche das Aussehen der Landschaft vollständig geändert. Die Roterdedecke, die sich hier als Verwitterungsrinde gebildet hat, wandert fortwährend, gezogen von der Schwere, von den Vollformen in die Hohlformen des Karstes hinab; dank der Durchfeuchtung des roten Lehmes kann die innere Reibung bei der Bewegung des Schuttmantels leichter überwunden werden. Der Boden der Hohlformen wird dadurch nicht nur vor



Fig. 7. Karsteinebnung durch Dolinen.

weiteren Angriffen der Verwitterungsprozesse geschützt, sondern sogar erhöht (Fig. 7), die Oberfläche der Vollformen dagegen dauernd angegriffen und erniedrigt. Dadurch verringern sich fortwährend die relativen Höhenunterschiede ($h_1 - h_2$); die Karrenfelder werden eingeebnet

und unter einer Verwitterungsdecke begraben, die Karströhren zugeschüttet und verstopft, die Rücken zwischen den sich zu immer größeren Uvalen verbindenden Dolinen abgetragen.

Die Verwitterungsdecke ist bis zu einem gewissen Grade geschichtet (siehe Fig. 7) insofern, als in der obersten Schicht sich am meisten ungelöstes, nur mechanisch zertrümmertes Gestein findet, während je tiefer, desto mehr die chemisch unlöslichen Rückstände des Kalkes, die undurchlässigen Lehme überwiegen. In der äußeren Schutthülle sammelt sich das Niederschlagswasser, fließt auf der undurchlässigen Grundschiebt gemäß dem Gefälle derselben ab und sammelt sich an den tiefsten Stellen, teils unter der Oberfläche als Schuttwasser, das zahl-

reiche aber schwache, leicht und oft versiegende Schuttquellen verursacht, teils als oberflächliches Wasser in Dolinenseen; die Schuttquellen sind an keine bestimmte Höhenlage gebunden und verursachen meist eine lokale Versumpfung der Karstlandschaft. Wenn das Einzugsgebiet einer Doline genügend groß ist, so wird der Dolinensee perennierend sein, sonst kann er auch periodisch, besonders nach heftigen Regengüssen oder in der Zeit der Schneemelze, auftreten; zu anderen Zeiten nimmt die Stelle des Sees ein Sumpf oder eine Lache ein. Das Wasser dieser Dolinenseen steht in keiner Verbindung mit dem eigentlichen Grundwasser des Karstes. Schuttquellen und Dolinenseen sind es, welche die Oberfläche des verschmierten, ausgereiften Karstes durchaus nicht so wasserarm erscheinen lassen wie die des nackten, mediterranen Karstes. Aber noch eine zweite wichtige Erscheinung steht mit diesen Verhältnissen im Zusammenhang: die an Wannenformen so reiche Oberfläche der Karstlandschaft verhindert, wenn durch die Verschmierung derselben die vertikale Entwässerung unmöglich gemacht ist, auch die horizontale; das Niederschlagswasser, das sonst in der gleichsinnig geböschten Landschaft in einem oberflächlichen hydrographischen Netze zum Abfluß kommt, stagniert hier in dem sich mit ihm ansaugenden Schuttmantel und verursacht eine viel länger währende, daher wirksamere Verdunstung des Niederschlagswassers als sonst. Nicht klimatische, sondern morphologische Gründe, der Mangel an Abflurinnen verringert in einem verschmierten Karste den Abfluß ganz ungeheuer dadurch, daß zwar nicht die Verdunstungsintensität, dafür aber die Verdunstungsdauer vergrößert wird. Wenngleich mir genaue zahlenmäßige Beweise mangeln, glaube ich annehmen zu dürfen, daß der Abfluß aus dem slovakischen Karste nur 1—2%, sicher nicht über 5% beträgt, während in dem umliegenden Theiß-, Alpen- und Elbegebiet die Abflußfaktoren 25, respektive 40—50 und 27% betragen.

Die bezeichnenden Züge der Karstformen an der Oberfläche müssen gleichzeitig immer mehr verschwimmen und verschwinden: die Massenprozesse, die jetzt das Übergewicht haben, vernichten sie und ebenen sie ein. Aus den in Uvalen umgewandelten Dolinen werden bei reihenförmiger Anordnung Talungen, die also weder mit Deckeneinbrüchen noch mit tektonischen Vorgängen etwas zu tun haben. Sie enden in einer Doline blind, und dort verursacht das träge Bächlein, das von Schuttquellen genährt die Talung durchzieht, einen Dolinensee oder einen Sumpf. Endlich werden sich die Talungen, besonders zuerst die peripherisch gelegenen, in echte Täler umwandeln dadurch, daß sie einerseits von dem normalen hydrographischen Netz der nachbarlichen, unverkarsteten Landschaft angezapft werden, andererseits unter gewissen klimatischen Verhältnissen die von Wasser erfüllte Talung über ihren das blinde Ende abschließenden Grenzwall überfließt. Jedenfalls wird dieser Wall auch immer schon durch die flächenhaften Abtragungsprozesse bedeutend erniedrigt. Die Talungslandschaft wandelt sich langsam in eine Tallandschaft um. Da die Erosionsbasis in dem verschmierten, noch nicht stark abgetragenen Lande noch sehr tief liegen kann, müssen die sich entwickelnden Bäche und Flüsse sofort einer intensiven Tiefenerosion unterliegen; dadurch wird 1. der nackte Fels im Talgrunde wieder bloßgelegt, die unter dem Verwitterungsmantel unverschmierten Karsthöhlungen und Klüfte aufgeschlossen, und 2. werden durch Unterschneidung der Gehänge und

dadurch beschleunigte Kriechprozesse auch die Gehänge und Rückenflächen entblößt. Es wird also der Mantel der undurchlässigen Verwitterungsschicht wegen seiner losen Beschaffenheit von der lebhaften fluviatilen Erosion und der flächenhaften Denudation schnell abgetragen, die felsige Oberfläche des Karstes von neuem vom Verkarstungsprozeß ergriffen. Die Tallandschaft verwandelt sich unter seinem Einflusse bald wieder in eine Karstlandschaft, es entwickeln sich wieder Trockentäler, Dolinen, Ponore, Höhlen usw., und die ganze vorhin skizzierte Entwicklung beginnt von neuem.

Wir haben es hier offenkundig mit einem sekundären, nicht durch tektonische Vorgänge inaugurierten Zyklus zu tun, der sich des öfteren wiederholen kann, bevor das Endziel des Hauptzyklus, die Einebnung der Karstlandschaft im Niveau des Grundwasserspiegels, erreicht wird. Das Ergebnis jedes einzelnen sekundären Zyklus ist die Erniedrigung der Karstoberfläche um so viel, als in der ersten Hälfte desselben durch die vertikale Entwässerung zur Tiefe, und in der zweiten Hälfte des Zyklus durch die horizontale Entwässerung aus dem Karste hinausgetragen wurde. Die sekundären Zyklen der Verkarstung und Verschmierung werden sich so oft wiederholen, bis die Oberfläche das Evolutionsniveau erreicht, bis die endgültige Einebnung stattfindet. Je reiner der Kalk, je größer die Klüftigkeit desselben und je energischer die Lösungs- und Transportkräfte wirken, desto länger wird ein sekundärer Zyklus währen, desto größer wird die durch ihn geleistete Arbeit, die durch ihn bewirkte Abtragung sein. Wir erkennen auch, daß die Entwicklung des mediterranen Karsttypus nur ein Grenzfall der allgemeinen Entwicklung ist, indem hier der einzige sekundäre Zyklus mit dem Hauptzyklus zusammenfällt. Die zyklodale Entwicklung des mitteleuropäischen Karstes ist wohl die erste derartige, bisher erkannte Entwicklung einer morphologischen Landschaft überhaupt und ließe sich nur etwa mit den oft zahlreichen, durch lokale Erosionsbasen bedingten sekundären Entwicklungsphasen einer undurchlässigen Landschaft vergleichen. Das Schema der Karstentwicklung können wir also in nebenstehender Tabelle zusammenfassen.

Neben dem noch ins Einzelne zu untersuchenden Einflusse des Klimas, besonders der Niederschlags- und Temperaturverhältnisse und des mit der Temperatur wachsenden Lösungsprozesses des Wassers, dann der quantitativen Bedeutung der Klüftung und der Löslichkeit des Gesteins, ist ein noch in der Größe seines Einflusses unbekannter Faktor in der Karstentwicklung die Vegetationsdecke. Ihre Bedeutung gründet sich auf drei bekannte Tatsachen: 1. Die Vegetationsdecke hält die einmal entstandenen Lösungsrückstände mit dem Verwitterungsschutt fest, so daß dessen Abspülung in die Tiefen stark behindert wird. 2. Die Vegetation vermag teils durch die in ihren Wurzeln enthaltenen, teils durch die bei der Verwesung der abgefallenen Bestandteile entstehenden Säuren das Gestein zu lösen, wenigstens dessen Lösung zu beschleunigen und auch durch die abgefallenen Blätter und die gefallenen vermodernden Stämme die undurchlässige Decke zu verstärken. Eckert¹⁾ hat der ersteren Eigenschaft eine bedeutende

1) Eckert, M. Das Gottesackerplateau. Wiss. Erg.-H. zur Ztschr. des D.-Ö. Alpenvereins.

Typus	Mitteleuropäisch	Mediterran								
Klima	feucht, kühl	trocken, warm								
Niederschläge	gleichmäßig, sanft	periodisch, heftig								
Kalkstein	stark verunreinigt	rein								
Klüftigkeit	gering	groß								
Vegetationsdecke	dicht und lückenlos	durchbrochen und dünn								
Entwicklungsphasen:	1.	Die Rumpffläche ¹⁾ hebt sich, das Evolutionsniveau sinkt relativ, der lockere Mantel der Verwitterungsdecke wird durch die sich eintiefenden Täler abgetragen; Erosion und flächenhafte Denudation, Abspülung und Kriechprozesse entblößen den Kalkstein.								
	2.	Verkarstung entwickelt sich in intensivem Grade auf der Oberfläche und im Innern.								
	3.	<table border="0"> <tr> <td rowspan="3" style="vertical-align: middle;">Sekundärer Zyklus wiederholt</td> <td rowspan="3" style="font-size: 3em; vertical-align: middle;">{</td> <td>a) Verschmierung der Oberfläche, Stillstand der ober- und unterirdischen Verkarstung.</td> <td>a) Hochentwickelte Verkarstung.</td> </tr> <tr> <td>b) Entwicklung einer Talungs- dann einer normalen Tallandschaft, Tiefenerosion, Entblößung der Karstoberfläche.</td> <td>b) Hebung des Evolutionsniveaus durch Ausfüllung der Klüfte von unten her, langsame Vernichtung der Karstformen.</td> </tr> <tr> <td>c) Neuerliche Verkarstung.</td> <td></td> </tr> </table>	Sekundärer Zyklus wiederholt	{	a) Verschmierung der Oberfläche, Stillstand der ober- und unterirdischen Verkarstung.	a) Hochentwickelte Verkarstung.	b) Entwicklung einer Talungs- dann einer normalen Tallandschaft, Tiefenerosion, Entblößung der Karstoberfläche.	b) Hebung des Evolutionsniveaus durch Ausfüllung der Klüfte von unten her, langsame Vernichtung der Karstformen.	c) Neuerliche Verkarstung.	
	Sekundärer Zyklus wiederholt	{			a) Verschmierung der Oberfläche, Stillstand der ober- und unterirdischen Verkarstung.	a) Hochentwickelte Verkarstung.				
					b) Entwicklung einer Talungs- dann einer normalen Tallandschaft, Tiefenerosion, Entblößung der Karstoberfläche.	b) Hebung des Evolutionsniveaus durch Ausfüllung der Klüfte von unten her, langsame Vernichtung der Karstformen.				
c) Neuerliche Verkarstung.										
4.	Abtragung des Karstes bis zum Evolutionsniveau.									
5.	Einebnung in der Nähe des Evolutionsniveaus zum Rumpfe, zur Karstpeneplain, durch α) die Prozesse der Massenbewegung (Karsteinbebung) und β) seitliche fluviatile Einbebung.									

Rolle bei der Karrenbildung zugeschrieben; Ototzkij²⁾ fand in südrussischen Wäldern die Bodenoberfläche in Folge starker Bedeckung mit Laub selbst Monate lang in der Dürrezeit feucht, während der durchbohrte tiefere Boden darunter vollständig trocken war. 3. Die Pflanzendecke absorbiert wegen ihres großen Wasserbedürfnisses viel atmosphärisches Wasser, das sie zur Transpiration und für ihren Holz- und Laubaufbau braucht. Dieses Wasser wird dem Verkarstungsprozeß entzogen. Ich schätzte diese durch die Pflanzendecke entzogenen Wassermassen im ungarischen Karste auf 120 mm von den 700 mm der durchschnittlichen Niederschlagshöhe. Die Vegetationsdecke arbeitet also, wie man sieht, der Verkarstung zumeist entgegen; die Größe ihres Einflusses ist allerdings noch unbekannt; deshalb können wir auch nicht sagen, ob durch die Aufforstung der mediterranen Karste mit der Zeit wohl hier auch die sekun-

1) Wir nehmen die Rumpffläche der Einfachheit halber als Ausgangspunkt; dieselbe Entwicklung gilt für jede andere Denudations- oder Schichtfläche.

2) Ototzkij. Einfluß d. Wälder auf das Grundwasser. Ztschr. f. Gewässerkd. I 214/25, 278/90, II 160 ff, III 153/62.

dären Zyklen sich zu entwickeln beginnen werden oder nicht. Jedenfalls aber vermag die Vegetationsdecke, so groß auch ihr verzögernder oder beschleunigender Einfluß sein mag, die Entwicklungsrichtung nicht prinzipiell zu ändern.

Es versteht sich von selbst, daß wir nur selten den Karstzyklus in der im obigen Schema skizzierten Einfachheit und Klarheit in der Natur wiederfinden werden. Daß aber eine große Menge bisher wohl schwer verständlicher Erscheinungen erst durch ihn ihre Erklärung und Deutung finden, möchte ich an einigen meiner im slovakischen Karste, in den Causses, im Jura und in Istrien gesammelten Beobachtungen nachweisen, wobei ich versuchen werde, mich recht kurz zu fassen.

(Schluß folgt.)

II. Der slowakische Karst.¹⁾

Der 400 m hoch liegende, stark bewaldete slowakische Karst, der im Nordwesten Ungarns dem Zips-Gömörer-Urgebirge im Süden vorgelagert ist, verdankt seine Existenz der mächtigen, kompakten, stark in sich gebrochenen und verschobenen triadischen Kalkplatte, die einst viel ausgedehnter war. Die stark gelöste Kalkmasse wurde bei relativ hoher Lage der Evolutionsbasis durch Flüsse aus dem Hinterlande, deren Schotter noch auf der Karstoberfläche sich stellenweise finden, zu einer Rumpflandschaft eingeebnet, die in fast gleicher Höhe die komplizierte tektonische Struktur abschneidet und über die sich nur wenige stehengebliebene Inselberge und Monadnocks erheben.

Die heute hochgelegene, ausgedehnte und zum größten Teile von Buchenwald bestandene Hochfläche mit ihrer unruhigen, verkarsteten Oberfläche, über die nur wenige, sanfte Höhen (Kis und Nagy Negyeshegy, Bercz, Nagy oldal, Fabianszög, Borzlyuk tető) emporragen, bildet einen Hauptzug im heutigen Landschaftsbilde (Fig. 8). Man

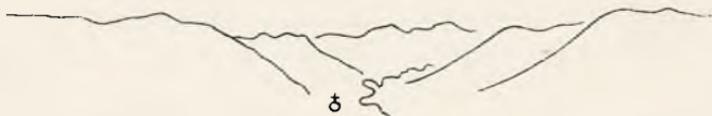


Fig. 8. Blick in das Csetnektal.

meinte bislang darin eine gewaltige, schwebende Schichtfläche zu sehen (Uhlig, Kiß, Sobanyi), aber es gelang sowohl den komplizierten Schichtbau im all-

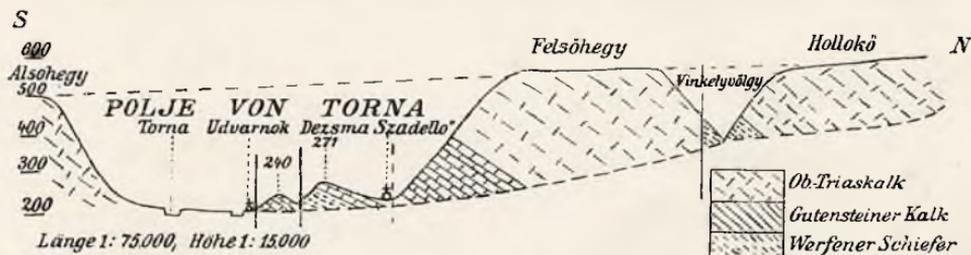


Fig. 9. Profil durch das Szadellöer Tal und das Polje von Torna.

gemeinen wie eine Reihe von Horsten im einzelnen nachzuweisen (Fig. 9), die alle von der Rumpffläche glatt abgeschnitten werden.

Eine gewaltige, jugendliche tektonische Bewegung brachte den eingeebneten Kalkblock zu der heutigen Höhe empor und stellte dabei den Block schief, so daß sein heutiges nordsüdliches Gefälle von 10‰ das der senilen Einebnungsform entsprechende nicht unerheblich überschreitet. Diese Hebung hat die Ausbildung des heutigen Formenschatzes inauguriert und zwar nach zwei Richtungen hin. Die großen, über ein ausgedehntes Einzugsgebiet im undurchlässigen Ober-

1) Sawicki, L. Skizze des slowakischen Karstes usw. Kosmos Lwów 1908, 395/445.

lauf (Urgebirge) verfügenden Ströme (Saja-Bodva) konnten sich bei ihrem Laufe durch den Karst erhalten, allerdings erst, nachdem der Einbruch der poljenartigen, breiten Talungen von Rosenau und Torna ihre Wassermassen um die nun zu ihnen abgelenkten Gewässer des Tatar (zum Sajo) und des Szadellö- und Idabaches (zur Bodva) vermehrt hatte. Bei der Tieferlegung ihres Bettes schufen sich diese konsequenten Ströme die steilwandigen felsigen Kalkschluchten, die heute so scharf von der waldbedeckten undulierten Plateaufläche abstechen.

Aber auch von den breitflächigen Talböden stechen die morphologisch jungen Talgehänge auffallend ab; sie sind teils mit fluviatilen ortsfremden Schottern, teils (am Rande) mit umgelagerten, aber lokalen, von den Talwänden herabgekrochenen Schuttmassen verschüttet. Die Wände dagegen bewahren ihre steile, kaum unter 30° herabgehende Böschung dank der geringen Abböschungsmöglichkeit im Karste (siehe S. 187). Doch stehen die beiden Talwände nicht unter gleichen Entwicklungsbedingungen, die Exposition verursacht eine gewisse Talasymetrie.

In diesen Tälern ist an mehreren Stellen die undurchlässige Unterlage des Karstplateaus, der Werfener Schiefer, angeschnitten. Es fehlen zwar weder an diesen zu Quellhorizonten prädisponierten Linien, noch am Fuße der Kalkwände der Täler, am Knicke derselben zum Talboden, Quellen von Karsttypus, wie die Quellen von Vigtelke, Gombaszög und Josvafö, aber sie sind im Verhältnis zu den gewaltigen benachbarten Plateauflächen, die sie entwässern sollten, an Zahl so gering und wenig ergiebig, daß sie nach unseren bisherigen Kenntnissen über die Karsthydrographie räthselhaft erscheinen mußten. Eine Klärung dieser Verhältnisse bringt uns die Betrachtung der hohen Plateauflächen.

Die präpontische Hebung des Kalkblockes des slowakischen Karstes verursachte neben der Tiefenerosion der beiden Plateauströme eine allgemeine Verkarstung der Plateauflächen. Das Karstgrundwasser mußte sinken, weil der hydrostatische Druck desselben an den Stellen der sich vertiefenden Täler keinen Gegendruck fand; dorthin mußte das Grundwasser abfließen und dabei seinen Spiegel erniedrigen. Die gleichzeitig einsetzende Verkarstung wurde durch die Beschaffenheit des Kalkes begünstigt; dieser ist gut löslich, wenn auch ziemlich reich an Rückständen und von zahlreichen Klüften, besonders in zwei, NW und NE gerichteten Systemen durchzogen. Damals begann der reiche Karstformenschatz sich zu bilden, dessen teils wohlerhaltene, teils stark veränderte Reste wir noch heute an der Oberfläche und in der Tiefe feststellen können. Die ganze Oberfläche wurde überzogen mit einem dichten Netz von mehr oder weniger tiefen und weiten Dolinen, deren Dichte, auf den Quadratkilometer bezogen, manchmal bis 15—20 beträgt und deren Tiefe bis an 80 m heranreicht. Die Gehänge der Dolinen überzogen sich mit Karren, die nun zumeist unter einem Verwitterungsmantel begraben und nur selten noch oberflächlich oder in Aufschlüssen zu sehen sind (Brzozowa, Almas, Vigtelke), immer im Kampfe mit der Vegetation. In dem Berginnern bildeten sich unterdessen schöne und gewaltige Höhlen; hier finden wir die größte bisher bekannte Höhle der Karpathen, eine der größten Europas, die Aggteleker Höhle (Baradla), die man ohne besondere Schwierigkeit in einer Haupttrichtung 6 km lang verfolgen konnte, an Neben-

armen dabei noch $2\frac{1}{2}$ km. Weiters erwähne ich die bekannte Sziliczer Eishöhle, die Ludmillahöhle, usw.

Aber alle diese Karstformen haben keine ganz jugendlichen Eigenschaften mehr. Die Karrenfelder sind meist zerstört, Karrensteine, in die Verwitterungsrinde eingebacken, zeugen von ihrer einstigen Ausdehnung; die einzelnen Dolinen haben trotz ihrer asymmetrischen Umwallungen meist schon schön abgeböschte Gehänge. Die benachbarte Dolinen trennenden Rücken sind durch die Kriech- und Abspülungsprozesse schon zugerundet worden, haben den Charakter von Graten vollständig verloren und zeigen höchst selten nacktes Gestein, und selbst dieses zumeist wenigstens von mechanischen Gesteinstrümmern bedeckt. Sekundäre Rücken sind so weit erniedrigt, daß in vielen Fällen mehrere Dolinen zu Uvalen zusammengewachsen sind (Fig. 6). Oft sind die einst trennenden Rücken nur mehr in Form ganz schwacher Leisten am Boden der so entstandenen Großform zu erkennen. Und auch die Höhlen scheinen, wenngleich sie sehr geräumig sind und noch relativ wenig Trümmermaterial fassen, doch durch den Tropfsteinbildungsprozeß und nicht unbedeutende Einschwemmungen von Terra rossa stark an Volumen eingebüßt zu haben. In der Baradla besorgt die Einschwemmung noch heute ein kräftiger periodischer Bach, dessen Bett ganz mit Geröll, Sand und Roterde ausgekleidet ist und der den Höhlenboden dauernd erhöht. Einschwemmungen haben hier auch die Reste steinzeitlicher Höhlenbewohner vollständig eingehüllt und tief begraben.

Vertragen sich schon diese Erscheinungen nicht mit dem Begriffe eines „typischen“, das heißt jugendlichen, nackten und an Schärfe der Formen zunehmenden Karstes, so noch viel weniger die Existenz einer oft mächtigen, allgemeinen und fast lückenlosen Verwitterungsschicht, eines Verwitterungsmantels. Das anstehende Gestein ist fast überall verdeckt, nicht einmal die Kalkscherben, die wir sonst im Karst zu sehen gewöhnt sind, können wir hier gewahren. Die Ausmündungen aller Karstlöcher und Karstklüfte sind verstopft; nur höchst selten belehrt uns die Existenz von kleinen, sogenannten Schwemmlanddolinen von der hier noch anhaltenden schwachen vertikalen Zirkulation des Wassers. Tiefere Aufschlüsse zeigen uns stellenweise eine ganz bedeutende Mächtigkeit der Verwitterungsrinde und dabei eine von vorn herein leicht begreifliche Schichtung (s. S. 200); eine Schichtung, die nicht entstanden ist durch eine Reihe auf einander folgender, ununterbrochener Ablagerungsprozesse, sondern dadurch, daß vom Hangenden zum Liegenden die Anreicherung an undurchlässiger Terra rossa, oder besser gesagt in diesem Klima an gelbbraunen, lehmigen Rückständen zunimmt, der Gehalt an ungelösten mechanischen Bruchstücken des Kalkes abnimmt. Der hydrophile Lehm erleichtert durch Verminderung der inneren Reibung alle Kriechprozesse und trägt dazu bei, daß durch Anreicherung loser Massen in den Hohlformen, durch Abtragung der Vollformen die relativen Höhenunterschiede immer mehr abnehmen (Fig. 7); er ist also die Veranlassung einer gewissen Einnivellierung, einer Einebnung des Karstes, die für den slowakischen Karst sehr bezeichnend und deutlich zu erkennen ist.

Eine weitere wichtige Folgeerscheinung der Existenz einer fast lückenlosen Verschmierungsdecke hängt mit deren Undurchlässigkeit zusammen. Das oberflächlich fallende Wasser wird von dem Verwitterungsmantel aufgesogen und

kann nicht in die Tiefe versinken. Die Anreicherung der Oberfläche mit Schuttwasser ist für den slowakischen Karst charakteristisch. Das ist es, was die allgemeine Fruchtbarkeit desselben verursacht, was gestattet, daß gewaltige zusammenhängende Buchenwälder die verkarstete, unruhige Oberfläche überziehen und eine geregelte Forstwirtschaft ermöglichen; dieser oberflächliche Schuttwasserreichtum ist es, der dort, wo Wälder gelichtet wurden oder deren Anpflanzung gehindert wurde, den Graswuchs gedeihen läßt, die waldlosen Partien in Schafweiden umwandelt. Wenn auch der Ackerbau nicht überall so intensiv betrieben wird, als es sein könnte, und die Bevölkerung der Hochfläche, dem Hirtentum ergeben, sich vorwiegend von der Viehzucht nährt, so ist doch die Existenz einiger größerer perennierender Ortschaften, die Existenz einiger tausend Menschen auf der Plateaufläche selbst nur möglich dank dem reichlichen Schuttwasser.

Dessen Ergiebigkeit zeigt sich vor allem in dem Vorhandensein einer großen Zahl von Schuttquellen. Meist genügt schon eine kleine künstliche oder natürliche Vertiefung in dem Schuttmantel, um das Wasser an die Oberfläche treten zu lassen, in Form einer Schuttquelle oder eines seichten Brunnens, der als Grundlage des animalischen Lebens gemäß seiner Bedeutung meist einen eigenen Namen trägt und besonderen Schutz genießt. Ebenso leicht wie sie auftreten, versiegen die Schuttquellen wieder, meist nach geringen morphologischen Leistungen. Die an einer Stelle versiegten Wasser kommen etwas weiter unterhalb wieder an die Oberfläche. Die Quellen sind auch nicht an bestimmte Höhen gebunden, wenn auch die Lage an dem einspringenden Knick zwischen Gehänge und Dolinenboden von ihnen bevorzugt wird.

Nach heftigen oder länger andauernden Niederschlägen und im Frühjahr während der Schneeschmelze sammelt sich das viele Wasser an der jeweilig tiefsten Stelle der Oberfläche, also am Dolinenboden, und versumpft diesen oder ertränkt ihn und verwandelt ihn in einen See. Sowohl die Dolinenseen wie besonders die versumpften Dolinenböden sind im slowakischen Karst keine Seltenheit und sind neben den Schuttquellen der sprechendste Beweis für die Undurchlässigkeit des Verwitterungsmantels. Denn mit dem Karstgrundwasser haben sie nichts zu tun. Die perennierenden Dolinenseen Verestó, Büdestó, Aggtelekitó usw. liegen 150—200 m über den nur 1—5 km entfernten Talböden bei Josvafő, wo Karstquellen den Austritt und das Niveau des Karstgrundwassers angeben. Die Unmöglichkeit der Annahme eines Gefälles des Karstwasserspiegels von 40—150‰ verbietet uns, die Existenz obiger Dolinenseen auf das Karstgrundwasser zurückzuführen. Überdies haben wir gerade hier den schlagendsten Beweis dafür, daß die Dolinenseen einzig auf die Undurchlässigkeit der Verschmierung und auf das Schuttwasser, und nicht auf das Grundwasser zurückzuführen sind; denn fast genau unter dem Boden der beiden Seen Verestó und Aggtelekitó befindet sich die 60 m tief liegende Höhle Baradla (Fig. 10), und diese ist vom Grundwasser weder dauernd noch jemals periodisch inundiert worden. Perennierend ist ein Dolinensee nur dann, wenn sein Einzugsgebiet so groß ist, daß das daraus ihm zufließende Wasserquantum der Verdunstung während der Trockenzeiten siegreich standhalten kann; selbstverständlich werden dieselben ebenso wie die Regenzeiten und Schneeschmelzzeiten sich im Wasser-

stande des Sees widerspiegeln; es gelang mir auch, am Verestó solche Wasserstandsmarken festzustellen. Ist das Einzugsgebiet der Doline hingegen klein, so wird ihr See periodisch sein und mit Sumpf- und Trockenperioden abwechseln. Auch das konnte ich im slowakischen Karste erkennen; mancher auf der Karte angegebene See war in der herbstlichen Trockenzeit, da ich ihn besuchte, ein Sumpf, oder war überhaupt spurlos verschwunden.

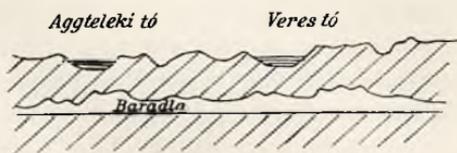


Fig. 10. Dolinenseen über Höhlen
(im slowakischen Karst).

Die großen Summen von Niederschlagswasser, die auf diese Weise als Schutt- oder Seewasser an der verschmierten Karstoberfläche festgehalten werden, werden dadurch dem Grundwasser vorenthalten. Dieses muß einen tiefen Stand seines Spiegels haben und, da es nur spärlichen Zuschuß bekommt, auch nur geringen Abfluß abgeben können; so erklärt sich uns die früher erwähnte geringe Zahl und geringe Ergiebigkeit der Karstquellen¹⁾ am Grunde der großen Täler des slowakischen Karstes; sie beruht auf ungenügender Ernährung des Grundwassers. Da dem Grundwasser weiter kein Wasser von der Oberfläche durch die Karstklüfte und Karsthöhlen zuströmt, so unterbleiben alle Laugungs- und Tropfsteinbildungsprozesse im Inneren der Höhlen. Die große Trockenheit der Baradla, der Mangel an Sickerwasser ist eine auffallende Eigenschaft dieser Höhle; und während man an vielen Orten den jährlichen Zuwachs der Tropfsteinbildungen zu berechnen unternehmen konnte, scheinen sich dieselben in der Baradla kaum merklich zu vergrößern. Sowohl die Höhlenbildung wie die Höhlenvernichtung ist unterbunden, es herrscht in jeder Richtung hier Stillstand der morphologischen Prozesse.

Da wir nun wissen, daß nur ein ganz verschwindender Bruchteil des Niederschlagswassers zum Abfluß gelangt, müssen wir uns fragen, was mit dem Reste geschieht. Wahrscheinlich wird etwa $\frac{1}{6}$ dessen (120 mm von 700) durch die Transpiration der Pflanzen an die Luft wieder abgegeben. Das übrige, das weder zum Abfluß gelangt, noch von den Pflanzen verbraucht wird, muß vollständig der unmittelbaren Verdunstung anheimfallen; dieselbe ist also im slowakischen Karste ganz auffallend groß, und zwar nicht in Folge klimatischer Verhältnisse, sondern dank dem Umstande, daß die morphologischen Wannenformen der Oberfläche den oberirdischen, die Verschmierung den unterirdischen Abfluß unmöglich machen und damit die Verdunstungszeit des als Schuttwasser und in Dolinenseen stagnierenden Wassers verlängern.

Endlich muß ich noch auf eine Gruppe hierher gehöriger Beobachtungen Gewicht legen, welche uns den Übergang der verschmierten Dolinenlandschaft in die Talungslandschaft und in die echte Tallandschaft zeigen. Nördlich Szilicze ist das Plateau eine echte blatternnarbige Karstplatte mit zahllosen, ungleichsinnig geböschten Wannenformen, die sich höchstens stellenweise in Uvalen verschweißen. Weiter gegen Süden — gegen den Außenrand zu — treffen wir

1) Ich glaube auf Grund einer Schätzung annehmen zu können, daß aus dem slowakischen Karste der Abfluß nur etwa 1—2% der durchschnittlich 700 mm mächtigen Niederschlagsschicht beträgt (siehe S. 201).

schon in der Umgebung von Borzova auf langgestreckte, oft einige Kilometer lange gleichsinnige Talungen, die ganz nach Art von Tälern von einheitlichen Gehängen begleitet, endlich in einem versumpften Dolinenboden ihr blindes Ende finden. Noch weiter am Außenrande, offenkundig von diesem her angezapft, finden wir in der Umgebung von Pelsöcz und Pelsöcz-Ardo schon echte Täler mit durchweg gleichsinnigem Gefälle, die aus dem Karste herausführen. Nur Mangel an oberflächlichem Wasser, das in den obersten Partien des Tales sich im Schutt abwärts bewegt und erst unten als Quelle demselben entspringt, und die relativ tiefe Lage sind daran schuld, daß diese Täler keine jugendlichen steilen und scharfen Talformen angenommen haben. Die Täler, welche die Karstplatte des Felsöhegy durchziehen (Szadellö, Aj) haben diese ganz jugendlichen, scharfen Formen und sind wegen ihrer landschaftlichen Schönheit, die sich darauf zurückführt, weithin bekannt.

Wenn wir alle oben erwähnten morphologischen und hydrographischen Merkmale des slowakischen Karstes überblicken, so ergibt sich, daß derselbe einen ausgereiften, dem Umwandlungsprozeß in eine Tallandschaft nahen Charakter hat; die momentane Entwicklung arbeitet der Weiterentwicklung der Karstphänomene entgegen, ohne sie jedoch bis heute auch nur verwischt, geschweige vernichtet zu haben. Da die Oberfläche des Karstes noch weit davon entfernt ist, sich dem durch die Talböden der großen Durchbruchstäler fixierten Evolutionsniveau anzuschmiegen, so ergibt sich daraus, daß dieser Karst erst am Ende eines, und wahrscheinlich des ersten sekundären Zyklus sich befindet (also etwa in der Phase 3b; S. 203). Wenig noch ist er erniedrigt unter die präpontische, nun schief gestellte Einebnungsfläche, noch stark muß er in vielen sekundären Zyklen abgetragen werden, bis seine Oberfläche mit dem Evolutionsniveau ungefähr identisch sein wird.

III. Die zentralfranzösischen Causses.¹⁾

Die Causses, die bekanntlich den ganzen Süden des französischen Zentralmassivs einnehmen, zeigen eine ganz frappante Ähnlichkeit mit dem slowakischen Karst, den sie an Ausdehnung ungefähr viermal übertreffen; die Analogien sind so groß, daß daneben die Unterschiede erst in zweite Linie treten. Die Entwicklung des Karstphänomens beruht hier auf dem Vorhandensein ganz gewaltiger Kalkpakete jurassischen Alters, die einst als Decke viel weiter reichten als heute und nur im Süden des Massivs erhalten blieben dank den postjurassischen Einbrüchen, welche große Teile der Kalkdecke in tiefere Lage brachten und so vor der Denudation bewahrten. Einzelne kleinere Schollen wurden dabei von der Hauptmasse abgetrennt und tragen heute den Namen der Petits Causses oder auch im Volksmunde der „Chans“, „Cans“ oder „Lachamps“, und bilden inmitten der herzynischen kristallinen Masse des Ilôt central kleine selbständige Karste. Auch wo der Kalk dolomitisch wird, setzt das Karstphänomen nicht aus; im ganzen und großen ist der Kalk der verschiedenen Juraserien dem Karstphänomen wegen seiner bedeutenden Reinheit und noch mehr wegen seiner großen Klüftigkeit sogar sehr günstig.

1) L. Sawicki: Die Causses, Skizze eines greisenhaften Karstes, Rozpr. Ak. Um. Wyzd. mat.-przpr. Kraków, 1909, 61—87, Bull. intern. Cracovie Ac. Sc. 1909. Märzheft.

Der bezeichnendste Zug in der Morphologie der Causses, der hier ähnlich wie im slowakischen Karst wiederkehrt, ist der gewaltige Gegensatz zwischen der ebenen, verkarsteten Plateaufläche und den tiefen, vereinsamten, wilden Talschluchten (Fig. 11). Nur ist in den Causses die Hochfläche noch seniler, noch greisenhafter und die steilen, bis 500 m tiefen Schluchten noch viel jugendlicher als dort. Betrachten wir vorerst die Hochfläche. In monotoner, scheinbar unbegrenzter Weite dehnen sich die an 2500 qkm großen Flächen der eigentlichen Causses vor uns aus, wenn wir eine der welligen Höhen des Plateaus bestiegen haben. Die allgemeine Abdachung dieser Flächen ist westwärts gerichtet, ihr folgen auch offenbar die einzelnen Glieder des oberirdischen Entwässerungsnetzes der Causses, so der Lot-, Tarn- und Jontefluß. Aber die Abdachung der Hochfläche fällt so sanft, daß sie fast nur auf der Karte zu erkennen ist.

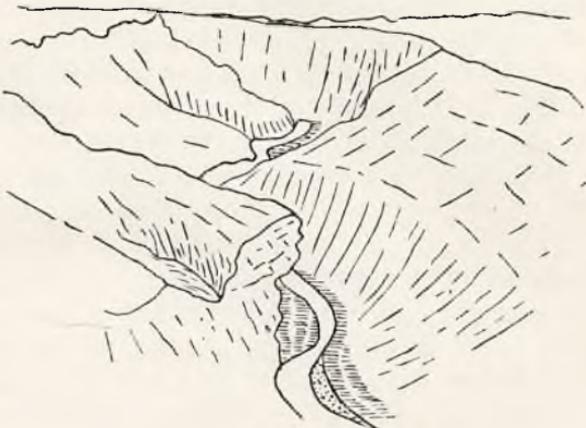


Fig. 11 a. Tarncañon und die Rumpffläche (oberhalb des Pont Sublime).

Etwas mehr wird der fast ebene Verlauf derselben durch kleine Stufen gestört, an denen ganze Partien der Kalkmasse gegen einander verschoben worden sind. Sonst aber stellen die Causses ein einheitliches großes Hochplateau dar, das, wie sich bei näherer Untersuchung herausstellt, nicht etwa eine Schichtfläche, sondern eine Denudationsfläche ist. Unbeirrt vom Verlauf der Schichten, unbeirrt von zahlreichen Brüchen, Ver- und Überschiebungen schneidet diese die

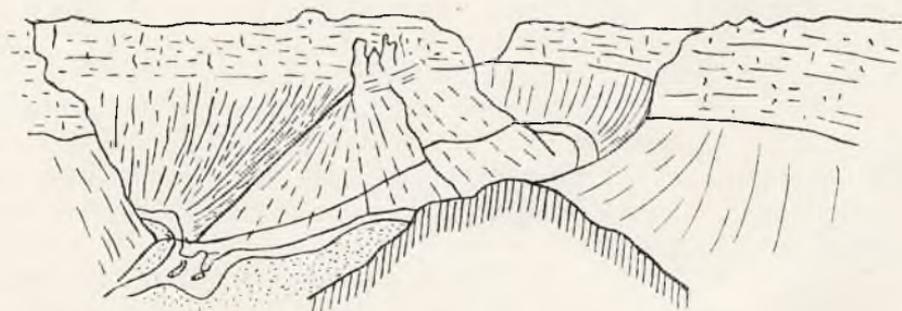


Fig. 11 b. Rumpffläche und Talschluchten an der Tarn- und Jontemündung.

Gesteinspakete des Lias, des unteren, mittleren und oberen Jura. In grellem Gegensatz zum gleichförmigen Verlauf der Rumpffläche oben stehen die oft intensiven tektonischen Störungen, die uns die Wandungen der tiefen Täler aufschließen und die neben Pressungs- und Zerrungserscheinungen manchmal in der sekundären Faltung weicherer, eingelagerter Gesteinskomplexe Ausdruck gefunden haben.

Aber nicht nur die verschiedenen jurassischen Bildungen, selbst das kristalline Gebirge beteiligt sich dort, wo es nicht versenkt ist, an der Zusammensetzung der Oberfläche. Während die großen Flächen des sich weit nach Norden dehrenden zentralfranzösischen Rumpflandes von einzelnen tektonischen Schollen wie der Margeride, dem Mercoire, der Lozère, den Bouges und dem Aigoual auch landschaftlich überragt werden, setzen sie sich ohne Unterbrechung in die Causses fort und schneiden so Kalk, Granit und kristalline Schiefer in gleicher Weise.

Aus dieser Tatsache schon ergibt sich das Alter der Rumpffläche; sie ist miozän oder prämiozän, denn auf ihr ruhen im Norden schon die miozänen Eruptionsmassen des Aubrac, Cantal und Mt.-Dôre. Andererseits wird diese Schlußfolgerung durch die zweite bestätigt, daß die Rumpffläche älter sein muß als die Verjüngung, die sich in den schluchtartigen, die Rumpffläche zerfurchenden Tälern ausspricht. Diese aber hängt mit der Ausbildung der relativen Höhenverhältnisse zwischen dem Rhönegraben, dem Zentralplateau und dem aquitanischen Becken zusammen. Beide Becken entstanden aber im Miozän¹⁾, als die Fernwirkungen der pyrenäischen und alpinen Faltung den Einbruch der Niederungen und die Emporhebung des Massivs zur Folge hatten, deren Begleiterscheinung die Verjüngung des hydrographischen Netzes war. Also auch diese Gedankenreihe zwingt uns zur Annahme, daß die Rumpffläche der Causses tertiär, und zwar miozän oder prämiozän ist.

Wie entstand wohl die Karstrumpffläche? Nur bei relativ hoher Lage des Evolutionsniveaus durch Kooperation der fluviatilen und Karsteinebnung. Wir haben noch heute Spuren davon, daß die heute tief eingefressenen Flüsse einst auf der Höhe der Rumpffläche flossen und diese einebnen halfen. 1. Man kennt ein altes, heute verlassenes Flußbett des Tarn von Florac gegen Montbrun, aus dem später der Tarn gegen Ispagnac und Javillet abgelenkt wurde. In diesem Bett fand man Quarzschotter und Sande, wie ich deren noch mehr an anderen Stellen sah, die nur aus den nachbarlichen kristallinen Gebieten durch Flüsse, die 450 m höher als heute flossen, hierher gebracht worden sein konnten. 2. Eine Reihe nur als Epigenesen zu deutender Erscheinungen in den Causses (besonders die Eintiefung der Flüsse im Kalk auf kurze Strecken, während sie ihn heute leicht hätten umgehen können) spricht dafür, daß diese Erscheinungen erst bei der Tieferlegung der einst hoch fließenden Gewässer entstanden. 3. Endlich können wir die allgemeine Neigung der Rumpffläche westwärts nur als Ergebnis einer fluviatilen gleichsinnigen Abtragung auffassen.

Zwischen den damals wohl zahlreichen Flüssen aber arbeitete auch der Karstprozeß an der Nivellierung des Landes, und das Ergebnis dieser Vorgänge liegt heute noch an der Oberfläche des Plateaus vor unseren Augen; es ist eine greisenhafte Karstlandschaft. Zahllose, aber sehr seichte, flache und oft sehr ausgedehnte, weitflächige Dolinen überziehen die ganze Hochfläche in sehr sanften Wellungen. Die die weiten Dolinen trennenden Rücken sind nur sehr niedrige, ganz sanft geböschte, vollkommen abgerundete Schwellen. Um vieles mußten sie abgetragen werden, bis sie aus ihrer ursprünglich jugend-

1) Barré, O.: L'architecture du sol de la France. Paris, 1903, p. 303 ff.

lichen Form die heutige Gestalt entwickelten. Von Karren ist kaum etwas zu sehen und ist wohl auch nichts unter der Verwitterungsrinde zu erwarten. Offenbar sind die in der Jugend der Landschaft gebildeten Karrenfelder zerstört worden, und auf den senilen Dolinenwällen waren die Gefälle zu gering, um neue zu erzeugen. So wie wir uns die weiten, flachen Wannsen der senilen Dolinen nicht anders als aus einer größeren Anzahl kleiner Dolinen zusammengewachsen vorstellen können, so sehen wir noch an zahlreichen Beispielen den Übergang benachbarter Dolinen in die Uvalenform, die sich bis zu den so bezeichnenden großen, flachen Becken erweitern können. Einige Beispiele davon konnte ich südlich von La Malène genau beobachten (Fig. 12 a).

Wir finden es weiterhin selbstverständlich, daß reihenweise angeordnete Dolinen sich durch Verschmelzen zu Talungen mit ausgesprochener Längsrichtung

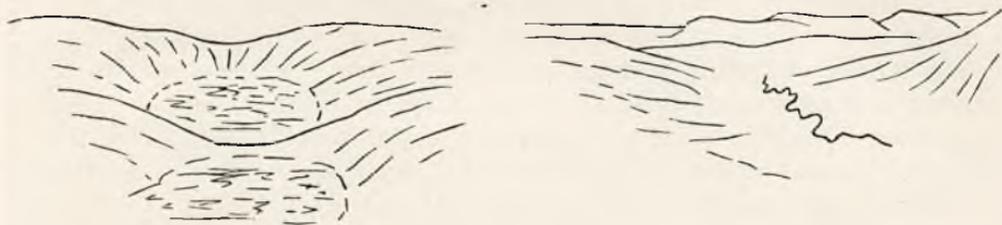


Fig. 12. Übergang von Dolinen

a) in Uvalen

b) in Talungen.

umwandeln konnten (Fig. 12 b), wie ich sie in großer Zahl in der weiteren Umgebung von La Parade auf der Causse Méjean oder bei Le Masegros auf der Causse de Sauveterre beobachtete. Auf der kleinen, ebenfalls ganz senilen Karstfläche der Plaine de Montbel bei Belvezet sah ich sogar die trägen, von der Verjüngung, die bei La Bastide und Chasserades schon recht wirksam war, noch nicht erreichten, senilen Tälchen und versumpften Bächlein an der Karstoberfläche selbst; die Tälchen serpentinisieren stark, sind etwa 5 m breit und höchstens 1 m tief. So brachten es Karsteinebnung und fluviale Einebnung zuwege, das tektonische, hauptsächlich von Brüchen beherrschte ursprüngliche Relief zu vernichten und niederzuschleifen.

In der letzten Phase der Abtragung blieben die dabei entstandenen Lösungsrückstände des Kalkes an der Oberfläche liegen, und sie bedecken heute noch in meist nicht allzu mächtiger Schicht die Karstoberfläche. Dieser hauptsächlich aus rötlichem, undurchlässigem Lehm bestehende Mantel verschmiert auch heute noch sowohl die kahle Kalkoberfläche selbst als auch die zahlreichen Klüfte und Gänge, wenigstens in ihren obersten Partien. Die Existenz dieser Verschmierungsdecke ist hier wie immer von kolossaler Bedeutung für die morphologischen Prozesse, für die Hydrographie und damit für die Entwicklung des vegetativen und animalischen Lebens.

Das Niederschlagswasser wird von diesem Mantel aufgesaugt, wodurch der Lehm noch undurchlässiger wird, und wird an der Oberfläche festgehalten. Damit hängt der relativ nicht unbedeutende Reichtum an Schuttquellen, Tümpeln und Sümpfen aller Art zusammen. Ein Loch, eine Zisterne genügt, um Wasser in ihnen zu sammeln. Allerdings macht die große sommerliche Hitze,

die intensiven Verwesungsprozesse im Wasser selbst, dieses bald nicht mehr schmackhaft, ja für den Menschen ungenießbar. Das sind die zahlreichen Viehtränken, die die Oberfläche der Causses überziehen und allerdings eine nicht sehr appetitliche, aber bedeutungsvolle charakteristische Erscheinung derselben darstellen. Diese Viehtränken, im Munde des Caussearden „lavogne“ genannt, finden sich bei jeder Hütte und sind die Grundlagen des tierischen, ja oft des menschlichen Lebens, die natürliche Grundlage der Siedlungen. Wenn sie im Hochsommer sumpfig werden und grünliches Wasser enthalten, nennt man sie „mares“ (Sümpfe). Die wenn auch schwache Durchtränkung der Verwitterungskurve während des größten Teiles des Jahres ermöglicht, trotz der unterlagernden durchlässigen Kalkmasse, den Ackerbau, der zwar wegen des Klimas, der Höhenlage und der petrographischen Beschaffenheit des Nährbodens nicht blühend ist, aber immerhin genügt, die kargen Bedürfnisse des Caussearden zu stillen. Dieser nennt auch den Kalkboden, im Gegensatz zum kristallinen Boden, der „terre de sègala“ heißt, bezeichnenderweise „terre de fromental“. Es gibt nichts Überraschenderes für den, der an den Anblick der nicht viel südlicher gelegenen Karste von Istrien, Dalmatien und Bosnien gewöhnt ist, als die wogenden, wenn auch ärmlichen Getreidefelder auf der Oberfläche der Causses.

Und noch eine zweite Art des landwirtschaftlichen Erwerbes ermöglicht die Verwitterungsrinde; auf den weiten, von ihr getragenen und von der andauernden Feuchtigkeit genährten Wiesenflächen vermag die Viehwirtschaft und zwar besonders die Schafzucht ganz gut zu gedeihen. Ja, die Caussearden scheinen ein typisches Hirtenvolk zu sein.

Das Vorhandensein von echten Steppengräsern vergewissert uns, daß die Causses seit jeher ein Grasland waren; das erklärt uns auch die Tatsache, daß in den Zeiten, da alle benachbarten Gebirge von dichten, undurchdringlichen Wäldern strotzten, hier die Bevölkerung zusammenströmte und ihr Dasein in zahlreichen megalithischen Denkmälern, die über die ganzen Causses verstreut sind, verewigte. Große Schafherden gehören auch heute noch zu einem echten Caussebild, und gerade die Causses sind ein Zentrum der Roquefort-Fabrikation, die jetzt besonders die „Société anonyme des caves et des productions réunies de Roquefort“ in über 150 Fabriken erzeugt; diese sind, wie z. B. in La Parade, Erwerbszentren der Bevölkerung geworden.

Nur selten hingegen trägt die Verwitterungsrinde Wälder; wie ich eben bemerkte, dürfte das auch in früheren Zeiten nicht anders gewesen sein. Nur die Causse noir trägt wohl diesen Namen wegen ihrer nicht unbedeutenden Bestände, vorzüglich von *Pinus silvestris*, die schwarz und traurig von den freundlichen Kastanien- und Eichenwäldern des kristallinen Gebietes derselben Höhe abstechen.

So sehen wir, von welch enormer Bedeutung die noch aus dem Tertiär stammende Verwitterungsrinde der Causses in jeder Hinsicht ist. Aber noch eine Seite derselben müssen wir eingehender besprechen: sie läßt das Niederschlagswasser nur in sehr geringem Maße zum Karstgrundwasser durch, zwingt ersteres, oberflächlich zu verdunsten, drückt so das Evolutionsniveau herab und verhindert die ausgiebige Speisung des Flußnetzes.

Noch zur Zeit als die Oberfläche der Causses so tief lag, daß das Evolutions-

niveau nahe an dieselbe heranreichte, bildeten die obersten Strömungen des Grundwassers und seiner unterirdischen Zuflüsse einige, meist mehr horizontale (galleries genannte), heute hochgelegene Höhlen, wie die Grotte de Dargilan, die Grotten unterhalb des Point sublime im Tarn-Cañon, die Grotte de Nabrigas (Fig. 13) usw. Dieselben wurden dann durch eingeschwemmtes Material zum Teil verschmiert, so daß heute z. B. in der Dargilan noch stehendes Wasser hoch über dem etwa 300—400 m tieferen Grundwasser sich erhält.

Wenn wir diese, durch Höhlenflüsse oder Strömungen gebildeten horizontalen, stark von Tropfsteinen erfüllten und mit Lehm verschwemmten Höhlen als senile Formen den greisen Oberflächenformen an die Seite stellen und in die Epoche der Einebnung und auf die damals herrschenden Verhältnisse zurückführen müssen, so steht es ganz anders mit der Formengruppe der Avens. Dieselben stellen, wie bekannt, Schlotte, senkrechte oder nahezu senkrechte Hohlräume von oft geradezu unglaublicher Tiefe dar. Man kennt ihrer in den Causses schon über 150 und manche, wie der berühmte Aven d'Armand (Fig. 14), erreichen einige hundert Meter Tiefe. Dabei ist ihre wahre Tiefe unbekannt, weil immer verstürztes Material die Forscher hindert, bis ans Ende der Höhle vorzudringen. Trotz ihrer bedeutenden Tiefe ist man in den Avens noch nie auf Grundwasser gestoßen, ein Beweis, wie tief dasselbe unter der Karstoberfläche mit seinen Dolinensümpfen liegen muß. Es ist klar, daß die Avens erst nach dem gewaltigen Sinken der Evolutionsbasis entstehen konnten, welches die Verjüngung der Causses mit sich brachte. Ich fasse daher die Avens ebenfalls als eine Verjüngungserscheinung des Causses auf, welche als unterirdische Form den oberirdischen Schluchten der Flüsse parallel zu setzen ist. Ihre Tiefe erkläre ich mir durch das kräftige Streben der Niederschlagswasser nach dem so tief gesunkenen

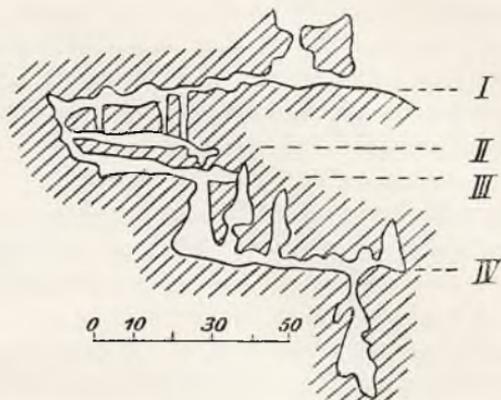


Fig. 13. Grotte de Nabrigas
(Form der Ausreifung).

Oberflächenformen an die Seite stellen

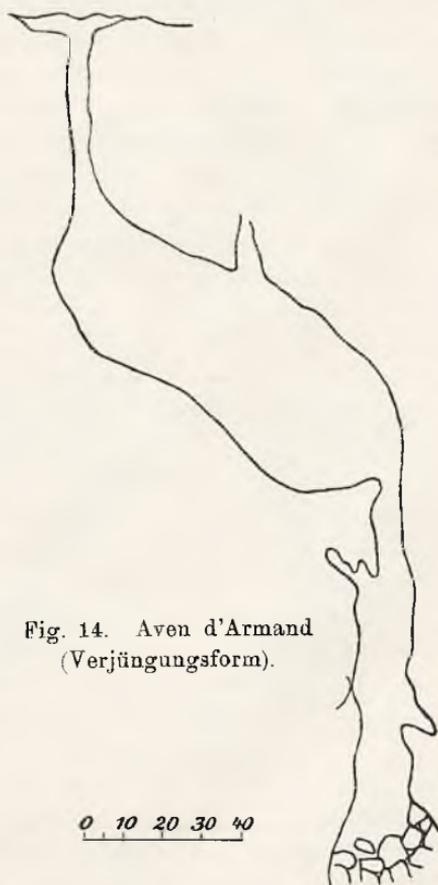


Fig. 14. Aven d'Armand
(Verjüngungsform).

Evolutionsebene. Sie können vorzüglich dort entstehen, wo es aus irgend einem Grunde den oberflächlichen Gewässern gelang, eine Kluft zu öffnen, nachdem sie die undurchlässige Verwitterungsschicht lokal zerrissen hatten.

Damit sind wir schon an die Verjüngungserscheinungen der Causses herangetreten. Die miozäne Hebung, welche die Rumpflandschaft der Hochfläche in ihre heutige Höhe brachte, verursachte die Tieferlegung der Flüsse. Es erhielten sich diejenigen Flüsse bei ihrem ursprünglichen, westwärts gerichteten Gefälle, die im undurchlässigen Terrain ein so großes Einzugsgebiet hatten, daß die daraus gesammelten Wasser trotz der, wie wir sahen, wieder außerordentlich spärlichen Speisung auf dem ganzen Wege durch die Causses nicht versiegten und auch nicht dem Verkarstungsprozeß erlagen. Als solche kräftige Flüsse stellten sich endlich drei heraus: 1. der Lot, dem folgende Bäche im undurchlässigen Gestein ihre Wasser zusenden: Sallèles, Esclamande, Rencros, Bramont und Colagne; 2. der Tarn, den die aus dem Granit und den kristallinen Schiefen kommenden Bäche Rioumalet, Brousse, Miral, Tarnon und Mimente speisen und schließlich 3. dessen Zufluß, die Jonte, die durch die Brèze, den Betuzon und Canon genährt wird. Diese drei Flüsse schufen sich so wunderbare, cañonartige Schluchten von 450 m Tiefe, daß sie in Europa ihresgleichen suchen und zu den überwältigendsten Talbildern gehören, die man in unserem Erdteil zu sehen bekommt. Besonders schön ist die große Reinheit der morphologischen Erscheinung, die Ruhe der Linien, die Regelmäßigkeit des Phänomens am Tarn in den bis zu 50 km langen Schluchten, auf deren Boden der Fluß schon fast durchwegs ein ausgeglichenes Gefälle erreicht hat. Die Schmalheit des Bodens, der dem Fluß selbst so wenig Raum läßt, daß er sich stellenweise, wie der Tarn bei St. Chely oder im berühmten le Detroit unter die Ufer eingefressen hat, und die oft 3—500 m hohen starrenden Felsenwände zeugen von der Jugendlichkeit dieses Formenkomplexes. Die drei großen Talfurchen zerschnitten die

ursprünglich einheitliche Rumpffläche in drei isolierte Hochplateaus, die Causse noir, die Causse Méjean und die Causse de Sauveterre.

Die Wände der Täler unterliegen einem immerwährenden Umwandlungsprozesse. Wir kennen morphologisch verschieden alte Gehängeformen in diesen Schluchten. Da gibt es ganz junge, fast unverwitterte Felswände, die von oben bis an die Talsohle ganz gleich beschaffen sind; an anderen Stellen, z. B. wo das Gesteinsmaterial weniger widerstandsfähig ist, ist schon die untere Gehängepartie verwittert, endlich in einen Schuttmantel gehüllt, der das horizontale Felsenband oberhalb um so prägnanter erscheinen läßt. (Fig. 15.) In den zum Teil undurchlässigen Schuttmassen des Gehängefußes entwickeln sich ganz kurze und sehr steile Wasser-

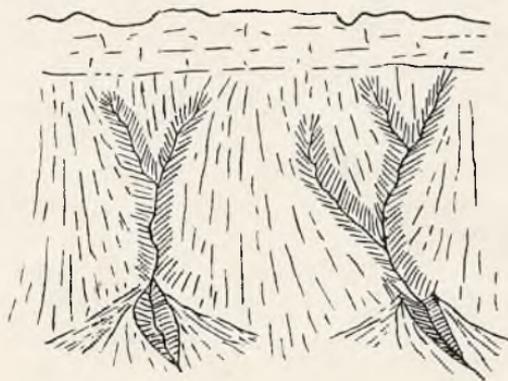


Fig. 15. Wandbildung in den Causses.

rungen, die endlich, wenn das ganze Gehänge unter dem Schuttmantel sich

vergräbt, diesen in einem dichten, allerdings ganz kurzstämmigen Netze überzieht.

Und doch hat sich bis heute noch keiner dieser Bäche ein eigentliches Tal eingegraben; nur höchst selten kommen den großen Haupttälern von der Seite kleine, wirkliche Tälchen zu, wie etwa dem Tarn bei la Malène, der Jonte bei Les Douzes; aber auch diese sind meist ganz wasserlos. Allerdings gibt es nahe am Talboden der großen Flüsse eine Reihe von Quellen, aber ihre Zahl und ihre Ergiebigkeit ist ganz auffallend gering. Wir müssen es als höchst wahrscheinlich aussprechen, daß die Speisung der drei großen Flüsse innerhalb des Karstgebietes eine ganz minimale ist, jedenfalls steht sie in gar keinem Verhältnisse zu der Größe des Einzugsgebietes, die beim Tarn im Kalke mindestens 1200—1500 qkm beträgt.

Wenn wir von der sogenannten „Quelle“ des Bramabiau absehen, so kennen wir im ganzen Gebiete der Causses keine eigentlich große Karstquelle, keine ergiebige Austrittsstelle des Grundwassers. Und die „Quelle“ des Bramabiau ist gar keine Quelle in dem Sinne, als sie mit dem Grundwasser nichts zu tun hat, sondern nichts ist, als der in einer Kaskade erfolgende Austritt des unterirdischen, 1 km langen Laufes des Bramabiau durch die unterliassischen, wohlgebankten Dolomite der Causse de Campriou, einer kleinen Scholle inmitten des Granits.

Was geschieht aber mit der großen Masse der Niederschläge? Nach den Regenhöhen einiger Lokalitäten der Causses zu urteilen¹⁾, dürften wir für die Plateaus etwa 800—1000 mm jährlicher Niederschläge annehmen. Da sie nur in unwesentlichen Mengen abfließen, auch von der grasartigen Pflanzendecke nicht sehr viel konsumiert werden dürfte, sind wir zu der unseren früher geäußerten Anschauungen konformen Annahme gezwungen, daß die Verdunstung im Gebiete der Causses ganz gewaltig ist und zwar wieder aus morphologischen Ursachen, die den Abfluß verhindern, die Verdunstungszeit verlängern. Diese große Verdunstung wird uns möglich und glaublich erscheinen, wenn wir die klimatischen Eigentümlichkeiten der Causses berücksichtigen: wir müssen das Gewicht legen auf die große Anzahl der Sonnentage, auf die andauernde Trockenheit der schon fast mediterranen Luft; dann besonders auf die außerordentlich starken Winde, die jedem Besucher der Causses sofort auffallen und die dank der Waldlosigkeit der Causses ungehindert kräftig über das Plateau streichen können. Ist es der Westwind, der Rouergue oder Vent d'Aubrac, der den Causses den Regen bringt, so sind es die kalten, sehr kräftigen Nord-, Nordost- und Ostwinde mit ihrem klaren, schönen Wetter, welche besonders die Verdunstung des Oberflächenwassers befördern. Schließlich muß noch darauf hingewiesen werden, daß die außerordentlich geringen Gefällsverhältnisse an der

1)	Höhenlage	Jährliche Regenmenge
Pont de Montvert	900 m	1220 mm
Florac	551 „	768 „
Cassagnas	835 „	1185 „
Meyrueis	710 „	803 „
Col de Montmirat	1046 „	1041 „
Mende	731 „	587 „
Marvejols	650 „	753 „

Oberfläche des senilen Karstes einer schnelleren Bewegung und Sammlung der Niederschläge nicht günstig sind, sondern die Gewässer im Gegenteil versickern und verdunsten lassen, bevor sie sich gesammelt haben und größere morphologische Effekte ausüben könnten.

Nach alledem erscheint uns die Karstlandschaft der Causses zusammengesetzt aus den wohl erhaltenen Resten einer alten, senilen Entwicklung, die im Miozän sich abspielte, und einer Gruppe von Verjüngungsphänomenen, die jung- und posttertiär sind. Die Causses haben, ähnlich dem slowakischen Karste, eine nur noch etwas mehr ausgereifte Oberfläche, die aber hoch liegt über dem Evolutionsniveau, also nicht dem Endstand eines Hauptzyklus entspricht. Während lokal die Verjüngung schon Beträchtliches geleistet hat, ist andererseits eine tertiäre Karstlandschaft fast intakt erhalten geblieben, weil jegliche morphologische Agens fehlt, das dieselbe umgestalten könnte; die geringen Gefälle der Oberflächenformen gestatten keine kräftige Aktion des fließenden Wassers oder der Massenbewegungen, die Verschmierung verhindert die chemische Erosion des Wassers. Die Karstwannen harren der nun auch drohenden Anzapfung von Seiten der großen Täler. Dann erst wird ein junger Verkarstungsprozeß und ein sekundärer Zyklus beginnen. Ob wir dem heutigen Zustand besser gerecht werden, wenn wir ihn als beginnende Phase 2, oder als eben vollendete Phase 3a (Schema S. 203) auffassen, möchte ich nicht entscheiden; es wird von weiteren Untersuchungen abhängen, ob die heutige Plateaufläche genau mit der alten Rumpffläche zusammenfällt, was mir wahrscheinlich dünkt, oder auch etwas tiefer liegt.

IV. Das jurassische Karstphänomen.

Nur wenige Worte möchte ich über das Karstphänomen im französisch-schweizerischen Jura sagen, das ich in der Umgebung des Lac de Joux und des Vallorbetales, im Becken von Le Pont und auf dem Plateau zwischen St. Jmier und Saintlegier beobachtete. Es hat diesen Erscheinungen auch schon Machaček in seiner Geomorphologie des Jura¹⁾ einen so breiten Raum gewidmet, daß ich hier Bekanntes nicht wiederholen möchte. Aber die Grundlagen, die Entwicklungsverhältnisse und den Zusammenhang der Erscheinungen möchte ich hier kurz betonen.

Ein grundlegender Unterschied zwischen der jurassischen und den bisher besprochenen Verkarstungen ist, daß im Jura eine Reihe relativ geringmächtiger, durchlässiger Kalkschichten mit weniger oder gar nicht durchlässigen Schichten, so mit den Mergelkalken des Dogger und des unteren Malm, wechsellagern. Daher ist das Evolutionsniveau durchaus nicht einheitlich, sondern ist aufgelöst in lokale Niveaus, die sich oft und leicht verschieben. Es kann sich also das Karstphänomen hier überhaupt nicht in großem, einheitlichem Stil entwickeln. Die lebhaft entwickelte Entwicklung einzelner Karstformen hindern aber die bei der großen Unreinheit der verschiedenen Kalkhorizonte entstandenen reichlichen Rückstände, die stark zu Verschmierungsvorgängen neigen und eine kaum begonnene Karstentwicklung schnell wieder unterbrechen. Diese Verschmierungsschicht, der

1) Machaček: Der Schweizer Jura. Versuch einer geomorphologischen Monographie. Pet. Mitt. Erg.-H. 150, 124—147. Gotha 1905.

selbst die großen Niederschlagsmengen nicht bekommen können, trägt überdies in dem mitteleuropäischen Klima eine zusammenhängende Vegetationsdecke, welche die Verwitterungsrinde festhält, und die wegen der gleichmäßigen Regenverteilung in den Jahreszeiten ohnehin sanfte Abspülung noch vermindert.

Nur ein Agens, dessen Einfluß wir bisher nicht betrachtet haben, spielt im Jura eine bedeutende Rolle auch in der Entwicklung des Karstphänomens, das ist die glaziale Tätigkeit. Einerseits hat sie mit ihren Geschiebelehmen und der Grundmoräne viele Karstformen verschmiert, andererseits wieder lokal den Verschmierungsmantel wegerodiert und so an einer Stelle die Existenz von Seen (Lac de Joux) und Sümpfen (Le Pont) ermöglicht, an der benachbarten einen Ponor geöffnet (entonnoirs), durch den das Wasser zu Karstquellen, zur Quelle der Orbe und zu den Quellen von Noiraigue, strömt.

Die Verkarstung mußte natürlich auch hier in dem Augenblicke einsetzen, wo die Emporhebung des Jura über seine Umgebung dessen Oberfläche von dem in der ursprünglichen Höhe verharrenden Evolutionsniveau trennte. Zu besonders intensiver Ausbildung des Karstphänomens scheint es überhaupt nicht gekommen zu sein, weil die vertikale Entwässerung immer bald an einer undurchlässigen Schicht eine unüberschreitbare Grenze fand. Aber selbst die entstandenen Karstformen gingen angesichts der starken Bildung von Verwitterungslehm und der dadurch bedingten, kräftigen Kriechprozesse schnell in den Reifezustand über; in diesem finden wir heute die Mehrzahl der jurassischen Karstphänomene.

Frische Karren finden wir nur selten, meist sind sie schon fossil, und zwar abgerundet, auch schon in Karrensteine zerfallen; die Furchen oft sehr breit, tiefgründig mit Verwitterungslehm und allerhand Konkretionen erfüllt. Und dies selbst in dem typischsten Karstgebiet des Jura, in den „tables lapiaires“ der französischen Plateaus.

An Dolinen ist besonders der Plateaujura recht reich, nicht so der Kettenjura; aber es sind durchwegs reife Dolinen, deren Tiefe gegenüber dem Durchmesser verschwindet, deren Umwallungsrücken schon sehr stark erniedrigt und abgerundet sind und deren Boden von oft mächtigem Verwitterungslehm überzogen wird. Schon der unregelmäßige, oft sternförmige Umriß der Dolinen spricht dafür, daß an deren Wandungen bereits das rinnende Wasser, also die horizontale Entwässerung wirkt. Zahlreich sind die Umwandlungsreihen und -formen von Dolinengruppen in Uvalen und von Dolinenreihen zu Talungen. Obgleich die allermeisten Dolinen absolut nicht bis zum Grundwasserniveau herabreichen, sind sie doch teils periodisch, teils ständig inundiert. Wenngleich die Karstwasserschwankungen auch im Jura sehr bedeutend sein mögen, wofür übrigens noch nähere Anhaltspunkte fehlen, so glaube ich doch der Ansicht Clercs¹⁾, der Machaček²⁾ entgegengetreten ist, beipflichten zu müssen, daß die zahlreichen Trichter zwischen der Forêt de l'Euthe und der Seille östlich von Lons-le-Saumier der durch die Verschmierung verringerten Abflußmöglichkeit ihren periodischen Wasservorrat danken. Ebenso halte ich es für problematisch, ob der periodische Ausfluß der Creux-Gena bei Pruntrut nach Regen-

1) Bull. de la société géogr. de l'Est. Nancy 1886, 174.

2) Machaček l. c. 123.

perioden der Überfüllung mit Grundwasser oder mit Regenwasser zu danken ist. Zweifellos ist aber, daß die zahllosen kleinen Seen, welche das mittlere und nördliche Juraplateau bedecken, so auch bei La Chaux nordwestlich St. Jmier, nur dem atmosphärischen Wasser ihre Existenz verdanken. Meist sind es in ausgedehnten Torfen eingebettete, braunschwarze Gewässer, von ganz unregelmäßiger Umgrenzung, umgeben von Sumpfwaldungen. Die zahlreichen Sümpfe ohne stehendes Gewässer zeugen von der einst noch viel größeren Zahl der Dolinenseen. Selbst eine Reihe größerer Seen in geschlossenen hochgelegenen Kreidemulden des Jura danken ihre Existenz der Verschmierung mit undurchlässigem Material, die hier besonders die glaziale Akkumulation besorgte, so in den Synklinalen von Bouliou und Belley.

Die Verschmierung im Jura ist außerordentlich bedeutend, daher auch ihre große Wichtigkeit für das Pflanzenkleid, das den ganzen Jura überzieht, Land- und Forstwirtschaft in so weitgehendem Grade ermöglicht, daß man kaum glaubt, sich in einem Karstgebiete zu befinden. Das Pflanzenkleid dankt seine Existenz der bedeutenden Oberflächenfeuchtigkeit, der damit verbundenen großen Verdunstung und der geringen vertikalen Entwässerung. Bekanntlich ist ja auch der Flußreichtum des Jura nur in den Plateaulandschaften ein geringer, sonst von der durchschnittlichen Flußdichte eines undurchlässigen Gebietes nicht sehr abweichender. Im Plateaugebiete scheint aber wieder die aus morphologischen Gründen zu erschließende Verdunstung, die sich auf die aus den oft großen Wannenformen erschwerte oder verhinderte Wasserabfuhr zurückführt, eine gewaltige Rolle zu spielen.

Allerdings hat sowohl die glaziale Ausschauerung, als auch die im Gefolge der Verschmierung sich entwickelnde oberirdische Entwässerung an zahllosen Stellen die Verschmierungsrinde wenigstens lokal entfernt, dadurch der subterranean Entwässerung neue Wege geöffnet, was sich in dem großen Reichtum an echten Karstquellen verrät. In großen Teilen des Jura ist durch Zusammenschluß von Dolinen zu Talungen und durch Anzapfung derselben von tiefgelegenen antezedenten und konsequenten Haupttälern her ein reichgegliedertes oberirdisches Flußnetz entstanden. Dasselbe entfernte die ursprüngliche, zum Teil noch aus der Epoche der Einebnung stammende Deckschicht und läßt die Wasser nun häufig wieder nach kurzem Lauf in Ponoren versiegen, verursacht die heute so häufigen Trockentäler, usw.

Die oben skizzierte Entwicklung, welche im heutigen Formenschatz Formen und Verhältnisse, die bei vorwiegend oberflächlicher Entwässerung entstanden, verknüpfte mit Formen und Verhältnissen, die bei vorwiegend vertikaler Entwässerung sich bildeten, prägt sich auch in der Entwicklung des Höhlenphänomens aus. Zwei Haupttypen kann man da unterscheiden: 1. zahlreiche, vorwiegend horizontale, meist aus Kammern (im löslichen Gestein) und Engen (im schwerer löslichen Gestein) sich zusammensetzende Höhlen (baumes, galleries), die wir wohl meist auf kontinuierliche, selbständige Wasserstränge zurückführen müssen; sie liegen zum größten Teil in bedeutender Höhe über dem heutigen Karstwasserniveau und entstanden wohl in Zeiten, als die Evolutionsbasis viel höher lag als heute. Heute werden sie von den sie nur streckenweise benützenden, niedersteigenden Strängen der vertikalen Entwässerung mehr zerstört als weiter

ausgebildet, so die Höhle des Bief Sarrazin bei Nans. In diese Gruppe gehören die gallerieartigen Höhlen der Grotte aux fées, die von Lançot, Baume und Jeurre; letztere hat sogar sechs über einanderliegende Gallerien, Flußhöhlen. 2. Als zweite Gruppe betrachten wir die avenartigen, mehr oder minder steil zur Tiefe gehenden Hohlräume mit teils breiter (caves, tanes) teils schmaler (fondrières) Öffnung an der Oberfläche, wie bei Lajoux im Berner Jura. Diese zweite Gruppe fasse ich als Formen der Verjüngung auf, die durch die Tieferlegung des Evolutionsniveaus seit dem Tertiär verursacht wurde und der Tiefenerosion der größeren oberflächlichen Flüsse parallel ging.

So erscheint uns der ganze, anscheinend so vielgestaltige und an Details reiche Karstformenschatz des Jura innerlich verknüpft und auf wenige Grundtatsachen zurückgeführt: neben der mannigfaltigen petrographischen Zusammensetzung, der reichen tektonischen Prädisposition und den, mit dem Klimacharakter zusammenhängenden Denudations-, Vegetations- und Verdunstungsverhältnissen, ist es die Zugehörigkeit der Formen zu zwei Karstzyklen, die ihre Mannigfaltigkeit bedingt; von diesen hat der erste sich zu weit fortgeschrittener Reife entwickelt, während der zweite erst in zunehmender Jugend begriffen ist.

V. Istrien.

Die für den Jura entwickelte Charakteristik entspricht in großen Zügen auch der für Istrien; nur ist hier die Entwicklung und Ausgestaltung der heutigen Verhältnisse viel klarer, ja geradezu schlagend in ihrer Einfachheit. Vor allem ist der Bau des Landes großzügiger: Zwei mächtige Kalkbänder wechseln mit ebensoviel breiten Flyschstreifen; gegenüber diesem großzügigen Gegensatz verschwindet die lokal komplizierte Struktur der einzelnen Teile. Der petrographische Gegensatz der beiden Bodenarten Flysch und Kalk ist so scharf als nur irgendwie möglich. Endlich gestatten die bedeutenden Unterschiede in der Höhenlage und der Meerferne der Kalkplatten gleichsam wie im Versuche die Einwirkung verschiedener Klimate auf die Umwandlung der Landschaft zu prüfen.

Auch die morphologische Entwicklungsgeschichte des Landes ist einfach, großzügig. Nachdem die tektonische Struktur in jungtertiärer, postoligozäner Zeit eine sehr weitgehende Einebnung erfahren hatte, hoben epirogenetische, allerdings nicht vollständig gleichmäßige Bewegungen den Block über sein Niveau empor; wenn bei dieser Hebung auch einzelne Schollen sich noch selbständig verschoben, manche Platte leicht aufgewölbt wurde, so fand doch hier nirgends eine faltende Gebirgsbewegung statt, welche das ursprüngliche Oberflächenbild bis zur Unkenntlichkeit zerstört hätte: Die Hebungsprozesse gingen in Etappen vor sich, verursachten eine periodische Eintiefung der Täler, ebenso eine periodische sprunghafte Entwicklung des hydrographischen Netzes. Die jungdiluviale, nicht bedeutende positive Strandbewegung hat auch für die Entwicklung des Karstphänomens in mancher Hinsicht Folgen gehabt.

Bei dieser klaren Lage der Dinge finden wir es begreiflich, daß die jüngste, in jeder Hinsicht musterhafte, mit Hilfe der neuesten Untersuchungsmethoden durchgeführte Monographie der istrischen Halbinsel¹⁾ auch in der Schilderung

1) Krebs: Istrien. Pencks geogr. Abhdlg. 1907. IX, 2.

der Entwicklung des Karstphänomens ein reiches Tatsachenmaterial für den Karstzyklus beibrachte, das ich auf Grund meiner kurzen Exkursion nicht bedeutend bereichern kann. Ich will daher unter Hinweis auf diese Arbeit nur versuchen, in der großen Mannigfaltigkeit der Erscheinungen die wesentlichen und ihre Entwicklung beherrschenden Grundzüge aufzudecken, die große Menge an Details in genetisch zusammengehörige Gruppen zusammenzufassen.

In der Epoche der Rumpfflächenbildung mußte das Evolutionsniveau knapp an der Oberfläche liegen. Damals erstarb das Karstphänomen so weit, daß 1. ein dichtes, oberflächliches hydrographisches Netz sich entwickeln konnte, und daß 2. die eigentlichen Oberflächengebilde des Karstes, vor allem die Dolinen, soweit gealtert, ihre Rücken abgetragen, ihre Mulden verschüttet und verschmiert waren, daß auch diese Denudationsvorgänge in bedeutendem Maße für die Einbnung verantwortlich gemacht werden müssen. Spuren der damaligen Landschaft sind uns in dem tiefgelegenen Plateau der istrischen Platte prägnant erhalten. Dieselbe zeichnet sich aus: 1. durch eine große Zahl außerordentlich flacher und weiter, kaum mehr isolierter Dolinen, die meist zu Uvalen verwachsen sind und selten erhebliche trennende Rücken aufweisen, und 2. durch eine meist mehrere Meter mächtige, sehr typische, grellgefärbte Decke von Terra rossa, die nicht nur in geologischen Orgeln in die Karstklüfte eingesenkt ist, sondern selbständig zusammenhängend die Kalkoberfläche bedeckt und die Weiterentwicklung des Karren- und Dolinenphänomens vollständig unterbunden hat. Überdies ist der große Reichtum an Dolinenseen, an Dolinensümpfen, Pfützen und Tümpeln in den feuchten Jahreszeiten ein positiver Beweis für die Undurchlässigkeit der Oberfläche. Daß sich die greisen Karstformen des ersten Zyklus gerade nur auf der istrischen Platte erhalten haben, und nicht auf dem Hochkarst des Tschitsch, ist wohl der relativ geringen Hebung derselben und der durch die Meeresnähe und die bedeutende Luftwärme bedingten, kräftigen Lösungsfähigkeit des Kalkes zuzuschreiben. Seitdem das Evolutionsniveau durch die mehrfachen Hebungen im Jungtertiär und Diluvium gesunken ist, ist auch gewiß hier wie anderwärts die Tendenz zur vertikalen Entwässerung und damit zur Verschärfung d. h. Verjüngung der Karstformen vorhanden. Es gibt auch Anzeichen dafür, daß diese Tendenz im Fortschreiten begriffen ist, und wenn heute die Verjüngungserscheinungen auf und in der istrischen Platte noch wenig augenfällig sind, so ist daran zweifellos die klimatisch bedingte und petrographisch geförderte Terra-rossa-Bildung schuld, welche einen verzweifelten, und die Verjüngung stark verzögernden Kampf gegen das Karstphänomen führt.

Daß dieser Gedankengang dem wahren Sachverhalt entsprechen dürfte, glaube ich aus der morphologischen Entwicklung der übrigen Landesteile entnehmen zu können. Die mit der Hebung beginnende starke Aktion der Abtragsprozesse hat durch kräftige, subsequeute Ausarbeitung der Flyschlandschaften zwischen diesen und den Kalkflächen einen landschaftlichen Gegensatz geschaffen, wie er für ausreifende Länder charakteristisch ist, wo die großen strukturellen Züge in der Herauspräparierung der widerstandsfähigen Schichten sich widerspiegeln.

Auch auf dem hoch gelegenen Tschitschenboden sind die Folgeerscheinungen der Hebung ganz bedeutende. Zum Unterschiede von der tiefgelegenen istrischen

Platte ist hier die bei der Einebnung des Tschitschenbodens, selbst wenn dieselbe nicht so weit vorgeschritten war als weiter meerwärts, gewiß entstandene Verwitterungsschicht schon vollständig abgetragen worden; nehmen ja auch im Karst die Denudationsprozesse mit der Höhe zu. Überdies arbeitete diesem Verkarstungsvorgang hier die Bildung von Rückständen nicht so kräftig entgegen, weil dieselbe langsamer vor sich geht als auf der istrischen Platte, und außerdem von der mechanischen Verwitterung übertroffen wird. Letztere hat auch bei der ihr günstigen petrographischen Beschaffenheit¹⁾ des Hochkarstes es vermocht, seine Oberfläche, die nach Abtragung der undurchlässigen Lehmschicht nackt war, in einen typischen Scherbenkarst umzuwandeln. Mit der Bloßlegung der Oberfläche konnte selbst bei gleichzeitiger Scherbenbildung die vertikale Entwässerung und damit die Dolinen- und Kluftkarrenbildung einsetzen. Sie hat auch bisher den Hochkarst mit einem, allerdings recht wenig dichten Netz von Dolinen überzogen, deren Steilheit, Tiefe und Umfang in lebhaftem Kontrast steht zu den sanften, weichen und seichten Dolinen der istrischen Platte. Es sind eben schon dem zweiten Zyklus angehörende, allerdings noch nicht weit gediehene, noch nicht volljugendliche Verjüngungsformen. Weder im Hochkarst noch in der istrischen Platte zeugt etwa die Tiefe der Dolinen vom Stande des Grundwassers; die Dolinenböden liegen in beiden Fällen hoch über dem Karstwasserspiegel, aber in der Platte haben sich junge Dolinen noch garnicht zu bilden begonnen, im Hochkarst wohl, wenn sie auch noch nicht weit gediehen sind.

Eine zweite, außerordentlich wichtige und charakteristische Gruppe von Verjüngungserscheinungen, die ebenso sprungweise sich entwickelt hat, als die tektonischen Hebungen vor sich gingen, ist das oberflächliche hydrographische Netz. In dem ursprünglich dichtmaschigen Flußnetze der Rumpffläche fand während der Hebungen eine Auswahl statt: diejenigen Wasseradern, die das größte Einzugsgebiet im Flysch haben oder es durch Anzapfungen erhielten, konnten sich am leichtesten erhalten. Schon bei der ersten Hebung, die zur Ausbildung des Villanovaterassensystems führte, verschwand eine große Anzahl von Bächen zweiten oder dritten Ranges von der Oberfläche, so daß das Flußnetz weitmaschiger wurde. Die zweite Hebung hatte weiter zur Folge, daß von diesem schon verdünnten Flußnetze nur die wenigen größten Flüsse ihre Eintiefungsarbeit bis zu der in jüngster Zeit erfolgten, positiven Strandverschiebung fortsetzen konnten, während alle kleineren als Trockentäler über ihnen hängen blieben, z. B. am Quieto, an der oberen Rosandra. Heute haben die Arsa, die Leme-Draga, der Quieto keine Zuflüsse im Kalk, keine gleichsohligen Mündungen von trockenen Nebentälern. Manche der Flüsse zerfielen in ober- und unterirdische Teilstücke²⁾, die nun durch Ponore und Vauclosequellen in einander

1) Wie stark dieselbe zur Scherbenbildung, wie wenig zur Terra-rossa-Bildung neigt, lehrt jeder Spaziergang über den Hochkarst, z. B. in der Umgebung von Rozzo.

2) Es unterliegt selbst nach den neuesten Erfahrungen über die gewiß zahlreichen Anastomosen des unterirdisch fließenden Wassers (Krebs: Neue Forschungsergebnisse zur Karsthydrographie; Katzer: Zur Karsthydrographie; Krebs: Erwiderung, Pet. Mitt. 1908) keinem Zweifel, daß man das rasche und mit einem Gefälle von vielleicht 60‰ fließende, stark erodierende Rekawasser als Höhlenfluß und nicht als Teil eines Grundwassers, dessen Bewegung wohl nicht so lebhaft und erosiv sein könnte, wenn es sich im Gleichgewicht befände, betrachten kann. Des-

übergehen; in selteneren Fällen ist die Eintiefungsarbeit keine konstante gewesen, sondern erst der Höhlenfluß durch Einsturz seiner Decke zum oberirdischen geworden; so entstand wohl der Rekalauft oberhalb Sanct Canzian, wie die beiden „Dolinen“ der Reka noch heute den Übergang darstellen vom unter- zum oberirdischen Lauf und wie die zahlreichen mächtigen steilwandigen und tiefen „Jamen“ westlich des Höhleneinganges wohl alte Einsturzstellen verraten.

Die eigentliche Ursache dieser komplizierten Entwicklung des hydrographischen Netzes ist, wie Krebs mit Recht hervorhebt, nicht etwa durch Abtragung des einst alles bedeckenden Flyschmantels bedingt worden; (— dieselbe war schon durch die Einebnung größtenteils von den Kalkplatten denudiert worden, denn die Rumpffläche schneidet schon die Struktur und verschiedene Glieder der Kreidekalke ab; nur lokal erklärt auch erst die spätere Abtragung des Flysches einzelne Talbildungsvorgänge und Epigenesen —); die tiefere und einzige Ursache ist das Sinken des Evolutionsniveaus und der damit einsetzende Kampf mit der vertikalen Entwässerung. Die Lage Istriens am Meer gestattet uns glücklicherweise gewisse Maximalwerte für den Karstwasserspiegel und sein Gefälle zu gewinnen. Die Haupttäler der Arsa, des Quieto und der Leme-Draga werden höchstens bei Hochwasser, also Hochstand des Grundwassers ein wenig inundiert — und dies ist sogar erst zu erweisen, denn die Inundation könnte auch nur durch Flußwasser bewirkt werden, was sogar bei der schnellen Bewegung des Wassers wahrscheinlicher ist. Aber in der Regel reicht das Grundwasser über die Talsohle der großen Täler nicht empor; der breite und weite Boden des Quietotales wird nur von einem ganz kleinen Bächlein durchströmt, der Boden der Leme-Draga ist überhaupt trocken. Die kleinen Tümpel, die ihn selten und nur stellenweise befeuchten und die gefährlichen Herde der Malaria sind, danken ihre Existenz nur der Undurchlässigkeit des Terra-rossa-Untergrundes und sind nur gespeist durch meteorisches Wasser. Nun haben aber diese größeren Talboden nur ein Gefälle von $0,6—1,6\text{‰}$; das normale Grundwassergefälle muß also selbst unter diesen kleinen Werten bleiben. Ähnliches lehrt uns auch der Grundwasserstand von Dignano¹⁾; bei normalem Grundwasserstande beträgt dessen Gefälle nur $2—3\text{‰}$, steigert sich allerdings bei Hochwasser selbst bis zu 5‰ .

Daraus ergibt sich, daß das Grundwasser tief unter der istrischen Karstplatte liegt; um so verwunderlicher ist es, daß die Verjüngung der Verkarstungserscheinungen hier so geringe Fortschritte zu machen scheint. Aber es scheint eben nur so: 1. es gibt doch eine ziemliche Anzahl von senkrechten tiefen Schlünden, die an den Orten entstehen, wo ein System sich kreuzender Klüfte den kürzesten senkrechten Weg zum Evolutionsniveau dem Wasser schon vorgezeichnet hat; es sind regelrechte, der Vertiefung der Flüsse parallel zu setzende Verjüngungserscheinungen; 2. zahlreiche, an der Küste meist unter dem Meeresspiegel ge-

halb halte ich auch die gewaltigen Hochstände des Rekawassers in den Canzianer Grotten, die durch, in 7,5 m Höhe eingeklemmte Hölzer und andere Marken nachgewiesen sind, für Stauerscheinungen und nicht für Beweise von Karstwasserschwan-
kungen.

1) Krebs: Morphogenetische Studien aus Istrien. 34. Jahrbuch der deutschen Staats-Oberrealschule in Triest 1904. VI.

legene (durch die quaternäre positive Strandbewegung versenkte) Karstquellen beweisen eine, immerhin schon recht bedeutsame unterirdische Wasserzirkulation in der istrischen Platte, wenn auch die von Hugues aus den Niederschlägen mit Vernachlässigung der Verdunstung berechnete Quellwassermenge am Strande (1 cbm/s auf 4 km Küstenlänge) der Wirklichkeit wohl nicht entsprechen dürfte.

Die vertikale Entwässerung wird durch zwei Umstände in ihrem Verlaufe und ihrer freien Entwicklung gehemmt. Es werden erstens die bei der Verjüngung der Karstlandschaft schon entstandenen Höhlungen, Kluftkarren und Avens lokal verschmiert und erstickt. Die Höhlen von St. Canzian zeigen, wie gewiß auch viele andere, daß die Einschwemmung von Terra rossa in sanften, aber oft mächtigen Schwemmkegeln (Tominzgrotte) und die Absonderung von Tropfstein und Sinter bei Übersättigung und Verdunstung des Sickerwassers nicht unbedeutende morphologische Wirkungen und noch bedeutendere hydrographische Folgeerscheinungen mit sich bringen. Zweitens aber findet die vertikale Entwässerung dort große Einschränkungen, wo die Bildung einer undurchlässigen Mantelschicht an der Oberfläche das Oberflächenwasser von der Tiefe abhält. Nicht alle Schichtkomplexe kalkiger Natur in Istrien sind der Terra-rossa-Bildung gleich günstig; abgesehen von den schwarzen Plattenkalken mit den Schiefern von Komen und den dunklen Cosinaschichten, zeigen auch die außerordentlich reinen Rudistenkalke und die mehr zur Scherbenbildung neigenden eoänen Nummuliten- und Alveolinenkalke wenig Terra rossa. Nur die Radioliten- und Hippuritenkalke liefern die gewaltigen Massen von greller und fetter Terra rossa, nach der die istrische Platte benannt wird. Die klimatischen Verhältnisse sind auch heranzuziehen und zwar insofern, als 1. größere Feuchtigkeit die chemische Zersetzung und Lösung fördert, 2. als die Wirkung des Frostes und der großen Temperaturschwankungen im Gegensatze dazu die mechanische Verwitterung begünstigen, 3. als intensive Winde (Bora) die dünnen Terra-rossa-Ablagerungen leicht auf große Distanzen vertragen und denundieren können, und endlich 4. als von der Verteilung und Intensität der Niederschläge, die bei der unlöslichen Terra-rossa allein in Betracht kommende mechanische Transportkraft der fließenden Gewässer abhängt. Aus allen diesen Gründen geht die Bildung der Rückstände auf dem Hochkarst mit seiner andauernden, gleichmäßigen Feuchtigkeit, seinen winterlichen Frost- und sommerlichen Hitzewirkungen, seinen sehr heftigen Winden und den nach mitteleuropäischer Art gleichmäßiger verteilten und weniger heftigen Niederschlägen langsamer vor sich als auf der istrischen Platte. Aufmerksam möchte ich weiter darauf machen, daß, wenn die Vegetation von großem Einfluß darauf ist, die Lösungsrückstände an Ort und Stelle festzuhalten, diese Funktion gerade dem Grasland zufällt und nicht so sehr dem Walde. Am SE-Abhang des Mte Maggiore erscheint bei ganz gleichen petrographischen, klimatischen Böschungs- und Expositionsverhältnissen in den Wiesen das nackte Gestein nie, dagegen sehr häufig in dem herrlichen Buchenwalde, der die Waldwiesen einsäumt.

Die auf der istrischen Platte angesammelte dicke Roterdeschicht, die besonders in den Dolinenmulden an Mächtigkeit bedeutend zunimmt, hält das Wasser in großer Menge an der Oberfläche auf; einerseits dadurch, daß sie sich selbst ansaugt und so noch mehr undurchlässig wird, andererseits dadurch, daß

sie das Niederschlagswasser in periodischen und perennierenden Dolinenseen, in versumpften Talungen usw. festhält. Beide Umstände vergrößern gewaltig die Verdunstung und mindern in demselben Maße den Abfluß. Die Verdunstung wird, abgesehen von ihrer klimatisch bedingten Größe, noch durch die morphologisch behinderte Abflußmöglichkeit gesteigert: die stagnierenden Wasseransammlungen und die durchtränkten Terra-rossa-Schichten sind eben der Verdunstung so lange Zeit hindurch ausgesetzt, bis der Wassergehalt sich ganz verflüchtigt hat. Schon experimentell hat man in Pola die Verdunstung mit 63,7% des Niederschlages gefunden (Periode 1897—1900: mittl. Niederschlag 887 mm, mittl. Verdunstung 562,2 mm), nachdem Stache sie schon vor einigen Jahrzehnten auf 60% (im Terra-rossa-Gebiete sogar auf 75%) geschätzt hatte. Aber selbst diese hohen Ziffern stehen den wahren Verhältnissen vielleicht noch nicht unbedeutend nach; man hat die Bedeutung der Aufsaugung, die das Wasser nicht zur Tiefe strömen läßt und die der sehr bedeutenden Wasserkonsumption der Vegetation zum Holz- und Laubaufbau, die schließlich auch der Verdunstung zu gute kommt, noch nicht einzuschätzen versucht. Diese Abschätzung wird auch in Istrien sehr schwierig sein, weil der Abfluß, der meist submarin direkt ins Meer geht, kaum genauer meßbar sein wird. Aber bei der intensiven Vegetationsbedeckung, die im ganzen und großen für die istrische Platte charakteristisch ist, und bei der Mächtigkeit der Terra-rossa-Schicht, der großen Austrocknung derselben im Sommer unter dem Einfluß der Hitze, im Winter unter dem Einflusse heftiger trockener Landwinde, dürfte der Einfluß der beiden Faktoren auf die Vermehrung der Verdunstung ganz bedeutend sein. Es ist selbstverständlich, daß die Verdunstung nicht zu allen Jahreszeiten relativ gleich groß ist; sie dürfte nach Beobachtungen in Pola im Winter $\frac{1}{9}$, im Frühjahr $\frac{2}{9}$, im Sommer $\frac{4}{9}$ und im Herbst $\frac{2}{9}$ der jährlichen Verdunstung etwa betragen. Und trotzdem klagt man in Istrien auch in der Hauptregenzeit, im Herbst, über Wasserarmut, und ebenso selbst im Winter mit seiner relativ geringen Verdunstung trotz der auch in dieser Zeit nicht ganz unbedeutenden Niederschläge.

Die große Feuchtigkeitskapazität der obersten Deckschichten ist andererseits die Grundlage der landwirtschaftlichen Kultur und des animalischen und menschlichen Lebens auf der istrischen Platte; gegenüber den relativ dicht besiedelten und gut bebauten Plateauflächen erscheinen die großen wasserarmen Täler, allerdings auch aus sanitären, eben mit der Wasserarmut zusammenhängenden Gründen als anökumene, siedlungsleere Gebiete.

Und noch eine merkwürdige Tatsache macht uns in auffallender Weise auf das mit der starken Verdunstung in Zusammenhang stehende Bewegungssystem des Grundwassers, respektive Kapillarwassers im istrischen Karste aufmerksam. Nicht nur ausnahmsweise, sondern an sehr viel Stellen Istriens findet man einen oberflächlich stark zementierten Gehängeschutt. Da gerade die obersten Partien desselben verfestigt sind, während darunter loser Schutt sich befindet, der die Untergrabung der ganzen Masse erleichtert, so ist klar, daß die Verkitung durch aufsteigende, mit Kalklösungen gesättigte an der Oberfläche verdunstende Wasserströmungen folgte, Strömungen, die eben nur durch die intensive Verdunstung an der Oberfläche emporgepumpt werden konnten und charakteristisch sind für aride Klimate (Davis, Penck). Ob dieser Prozeß heute

noch vor sich geht oder von einer trockeneren, vergangenen klimatischen Epoche zeugt, läßt sich vorläufig nicht entscheiden; ich halte das erstere, wogegen bis heute noch kein positiver Gegenbeweis vorgebracht worden ist, für das wahrscheinlichere.

Auf diese Weise erscheint uns eine ganze Reihe von für Istrien charakteristischen Erscheinungen nicht nur erklärlich, sondern auch genetisch und kausal bedingt; ihre Mannigfaltigkeit und manchmal gegensätzliche Entwicklungstendenz löst sich sofort bei der Deutung durch zwei Karstzyklen; in dem jüngeren hat der Hochkarst schon bedeutendere Fortschritte gemacht als die istrische Platte, dank seiner höheren Lage und petrographischen Beschaffenheit.

Auf einige wenige Karstphänomene sind wir sowohl bei der Charakteristik Istriens wie der anderen Karstgebiete nicht näher eingegangen, teils weil sie sich auf einfachere Erscheinungen zurückführen lassen, teils weil sie heute noch strittige Fragen darstellen und so kompliziert sind, daß sie das vorläufige Bild des Karstzyklus nur mit noch offenen Fragen belasten, ja stören würden. Um so dankbarere Objekte bieten sie weiteren künftigen Untersuchungen über den Karstzyklus und das Karstphänomen überhaupt. Dazu gehört unter anderem, neben gewissen Erscheinungen der Hydrographie, besonders die Poljenbildung. So weit dieselbe sich rein auf Denudations- oder auf tektonische Vorgänge zurückführen läßt, fügt sie sich leicht in das obige allgemeine Bild des Karstzyklus ein; so weit sie auf kompliziertere Vorgänge zurückgeht und heute noch nicht geklärt ist, wäre es verfrüht, sie in eine allgemeine Synthese einzuflechten. Künftige Untersuchungen, die sich mit der Prüfung, Vertiefung und Erweiterung des Karstzyklus beschäftigen werden, haben ein reichliches und dankbares Arbeitsfeld vor sich.

