Zeitschrift: Mitteilungen der Geographisch-Ethnographischen Gesellschaft Zürich
Band: 31 (1930-1931)

Artikel: Ueber die Karstdolinen
Autor: Lehmann, Otto
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-23605

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ueber die Karstdolinen.

Von OTTO LEHMANN.

I.

Als die Slawen im 6. Jahrhundert n. Chr. durch die Balkanhalbinsel zum Adriatischen Meer vordrangen, kamen sie in eine vorher nicht gesehene Gebirgswelt. Flüsse und ihre Täler waren darin selten. Vielmehr setzten Wasseradern auf Strecken mehrerer Tagemärsche ganz aus oder sie flossen nur zeitweilig und mit großen Schwankungen der Abflußmenge. Dafür mußte den sich hier niederlassenden Südslawen auffallen, daß nun zahlreiche, ringsum geschlossene Vertiefungen ohne jeden merklichen Abfluß das Landschaftsbild beherrschten. Die Größen dieser Vertiefungen, die eine spätere Gelehrsamkeit gelegentlich mit Kratern in Vergleich gesetzt hat, waren sehr verschieden, wenn auch vielleicht die größten noch nicht den Querschnitt großer Flußtäler besaßen, welche die Slawenstämme schon früher kennengelernt hatten. Das Wort für Tal und Niederung, « dolina » in ihrer Sprache [1]), war in dieser Landschaft in seinem ursprünglichen Sinne meist nicht anwendbar. Man übertrug es im Krainer Karst auf die dort herrschenden rundlichen, allseits geschlossenen Hohlformen und erfüllte es so mit einem neuen, alltäglich gewordenen Vorstellungsinhalt. Mundartlich zeigten sich dann gewisse regionale Verschiedenheiten: in Montenegro, wo diese Karstformen besonders groß vorkommen, heißen sie Do (Dol), in Istrien Dolac, in Südwestkroatien Duliba. [1]) In allen diesen Ausdrücken steckt etwas von « Tal » und Talartigem. In Krain, wo im 17. Jahrhundert Karsterscheinungen zuerst die Aufmerksamkeit der europäischen Wissenschaft erweckten, entstanden so die Voraussetzungen für die wissenschaftliche Verwendung des Wortes *Doline*. Es gibt für diese Hohlformen in mehreren europäischen Sprachen, wo die Menschen außer dem Karst auch die gewöhnlichen Gebirgstäler kannten und nahe hatten, eine Menge volkstümlicher Ausdrücke. Diese rücken meist eine besondere Eigenschaft der örtlichen Dolinen in den Vordergrund, so « entonnoir » = Trichter, so

[1]) Cvijić, Das Karstphänomen. Pencks Geogr. Abh., V. 3. 1893, S. 226. Wie Trampler meldet, heißt im mährischen Tschechisch nur die größte der dortigen Dolinen nw. von Ostrow, mit Durchmessern von 165 m und 262 m, « Dolina ». (Mitt. Geogr. Ges. Wien, 1893, S. 241 ff.)

« Erdfall », und sind daher nicht allgemein verwendbar, z. B. nicht für Dolinen, die Kessel- oder Schüsselform haben, oder für solche, die nicht durch einen Erdfall entstanden sind. Andere volksmäßige Namen, wie « Grube » im Toten Gebirge, « Buso » = Loch im Italienischen, sind ihrer Grundbedeutung nach wohl gar zu allgemein, obwohl man zusammengesetzt Karstgrube gut sagen könnte. [1]) Benennungen wie das tschechische Závrtek, das speziell serbische vrtača, welche beiden Worte Ein*bohrung* bedeuten, ferner das englische sink hole und französische bétoir würden sich dem Sinne nach wohl für alle oder die meisten Dolinen eignen, aber ihre Heimat ist zu abgelegen von den klassischen Gebieten der Karstmorphologie an der Adria, oder die Wortformen sind sonst für eine internationale Verwendung nicht ganz einfach. Daher bleibe ich beim Ausdruck Doline, der ebenso für Gebilde von 1 bis 2 m Tiefe, wie für solche von 300 m Tiefe und entsprechend ungleichen Breiten verwendbar ist. Für die einzelnen Abarten der Dolinen kann man immer Karsttrichter, Karstmulde, Erdfall oder « Schwalgloch » usw. sagen; das letzte Wort bezeichnet die Dolinen in den erst seit 250 Jahren kilometerweit ausgetrockneten Bachbetten des Paderborner Karstes im innersten Teil der Westfälischen Bucht.

Die Dolinen haben im Karst eine besondere Bedeutung für den Abfluß. Das Waser der Niederschläge im reinen Karst kann an der Oberfläche, wie man weiß, nur sehr kurze Wege zurücklegen. Ein Bach, der in einem Karstgebiet *ohne* alle Einlagerungen undurchlässiger Schichten, bei heftigen langen Regengüssen entstehend, 1 km Länge erreicht, ehe er dem Untergrund verfällt, ist schon eine sehr auffallende Ausnahme. Das gefallene Regenwasser verschwindet sonst viel früher in den Klüften des Gesteins, wie sie so zahlreich in Schrattenfeldern entblößt sind. Bäche und zeitweilige Flüsse, die in Karstgebieten *mit un*durchlässigen Einlagen möglich sind, verschwinden größtenteils in Höhlen oder in Schächten. Höhlen und Schächte, die als Fluß- oder Bachschwinden wirken, findet man oft im tiefen Teil größerer Dolinen. Ueberhaupt sind die Böschungen der Dolinen ganz gewöhnlich von wasserschluckenden Schrattenklüften zerrissen, auch wenn dies eine Bodenbildung dem Auge verhüllt.

In kleinen Dolinen von 2 bis 6 m Durchmesser und 0,5 bis 3 m Tiefe sind häufig die Schrattenklüfte und röhrenförmigen Abzugsfugen im Grunde so verteilt, daß man diese kleinen Dolinen als Regenschlucktrichter oder -mulden ohne weiteres bezeichnen kann.

---

[1]) Eine Grube wird im ältern Wienerisch auch Hülbe genannt, welches Wort wohl verwandt ist mit Hühle, womit man im Frankenjura, nach Gümbel, Dolinen bezeichnet. Mit dem Wort Trichter verbinde ich stets die Vorstellung eines Hohlkegels, obwohl man ab und zu auch bauchige Trichter sieht.

II.

Was die *Entstehung der Dolinen* betrifft, so entschied sich zwischen 1890 und 1900 in Mitteleuropa ein Kampf zweier allgemeiner Erklärungsversuche. Die eine gelehrte Richtung hielt sie für die Folge von Einstürzen, wobei vor allem an Zusammenbrüche der Decken felsiger Höhlen in der Tiefe gedacht wurde. Die andere gelehrte Richtung faßte die rundlichen Trichter- und Muldenformen, also die große Mehrzahl der Dolinen, als Gebilde der oberflächlichen Abtragung auf, in dem Sinne, daß der chemische und mechanische Angriff des Wassers im Bunde mit der Verwitterung die Dolinen im Umkreis besonders wirksamer Schwundstellen des Niederschlags schaffe. Danach waren die Dolinen nicht nur sprachlich, sondern auch sachlich als ein Ersatz der Täler angesehen, die *außerhalb* der Karstgebiete das an der Oberfläche bis zum Meere abfließende Wasser mit gleichsinnigem Gefälle ausnagt. Wenn man die Dolinen als Werk des Wassers, das eventuell im Bunde mit der Verwitterung arbeitet, auffaßt, so hat man damit erst nur den *Rahmen* für eine *wirkliche* Erklärung geliefert, welche Wert auf die mögliche Entwicklung der Formen legen müßte.[1]) Dem entspricht es, daß *Jovan Cvijić,* der in seiner Abhandlung die Einsturzdolinen als eine unregelmäßige, seltenere Gruppe von den *echten* Dolinen der *Oberfläche* absonderte, für die echten Dolinen sofort auch eine Entwicklungstheorie bereitstellte, die im nachfolgenden behandelt wird. Damit entschied Cvijić den Sieg seiner Gedankengänge über die verallgemeinerte Einsturztheorie jener Tage. Bei allen, welche fernerhin nicht mehr deren Anhänger blieben, galt seine Lehre zwanzig Jahre lang unbestritten. Aber 1913 trat ihr die Theorie Karl v. Terzaghis entgegen; diese zeigte, daß man *mit* Cvijić die Einsturztheorie ablehnen und im allgemeinen Rahmen auch mit der Arbeit des Wassers usw. an der Oberfläche rechnen und dennoch dabei eine ganz andere Formentwicklung ableiten kann. Die Lehre von Terzaghi, die 1913 erschienen ist[2]), wurde erst nach dem Kriege in weitern Kreisen zur Kenntnis genommen. Sie wurde aber nie so bekannt wie jene von Cvijić.

Ich will nun die Entstehung eines Karsttrichters, als der einfachsten Dolinenform im Sinne *beider* Lehren, in zeitlich aufeinanderfolgenden Querschnitten zeichnerisch vorführen, so daß Abbildung 1 und 2 unmittelbar verglichen werden können.

---

[1]) Die jetzt moderne, einseitige Ablehnung des Entwicklungsgedankens in der Morphologie mache ich nicht mit. Der Grund ergibt sich z. B. auch aus dem vorliegenden Aufsatz, der sich von einer Schematisierung dieses Gedankens wie sonstigem Mißbrauch fernzuhalten weiß. Obige Betrachtung hat übrigens, als ein Rückblick, die damaligen Gesichtspunkte mit geschichtlicher Treue zu entwickeln.

[2]) Mitt. a. d. Jb. der K. Ungar. Geol. Reichs-Anst. XX. 6: Beitr. z. Hydr. u. Morph. d. Kroatischen Karstes.

Nach Cvijić

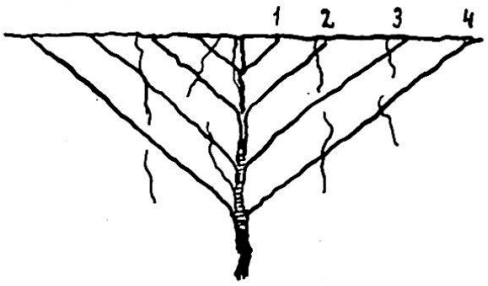

Abb. 1.

Nach v. Terzaghi

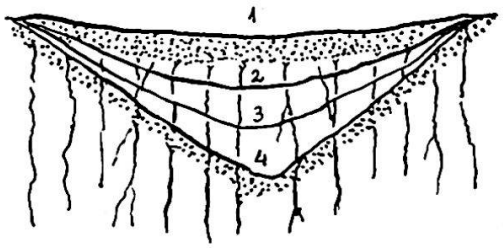

Abb. 2.

Entwicklung einer trichterförmigen Doline. Die Zahlen bezeichnen zeitlich aufeinanderfolgende Lagen der Oberfläche. Punktiert: Waldboden, in Abbildung 2 nur bei Lage 1 und 4 berücksichtigt.

Es ist erwünscht, die beiden Entwicklungslehren auch in Worten einander gegenüberzustellen. Nach der Lehre von Cvijić entsteht die typische Doline, indem der Eingang röhrenförmiger [1]) Klüfte, die das Wasser erweitert und vielleicht noch ausgerundet hat, *trichterförmig ausgestaltet* wird; und zwar entfaltet das Wasser auf seinem Weg zum Endpunkt seines oberirdischen Laufes eine abspülende und erodierende Tätigkeit. Für die Lehre von Cvijić ist das Vorhandensein einer Bedeckung des Karstfelsens ohne wesentliche Bedeutung. Denn das Wasser kann nach ihm auch unter einer Lehmhülle den Kalk rings um den Eingang einer Schlundröhre angreifen oder lösen, mit andern Worten, chemisch erodieren, es sei denn, daß die Lehmzufuhr überwiegt und die Doline, anstatt sich weiter zu entwickeln, ausgefüllt wird.

Dem Wortlaute nach schrieb Cvijić (a. a. O., S. 272):

> « Durch verschiedene Vorgänge, insbesondere durch Abwechslung von Erwärmung und Abkühlung und durch chemische Verwitterung bilden sich im Kalksteine vertikale und horizontale Fugen und Klüfte, in welche das Wasser einsickert, und welche es, da es direkt oder indirekt durch seinen Kohlensäuregehalt den Kalk lösen kann, zu Röhren erweitert. Diese in die Tiefe führenden Röhren schlucken das auf die Oberfläche des Kalkes fallende und auf derselben fließende Wasser und werden sohin Endpunkte von dessen oberflächlicher abspülender und erodierender Tätigkeit, so daß alle diese Vorgänge hier aufhören. Während in andern Gebieten durch Abspülung und Erosion eine Abdachung bis zum Meere hin geschaffen wird, endet hier die

[1]) Ich gebrauche das Wort röhrenförmig im weitesten Sinne, denn eine Röhrenströmung im Sinne der Physik ist auch in Hohlräumen mit eckigem Querschnitt möglich.

Abdachung an der entstandenen Schlundfuge. Der Eingang der letztern wird durch die verschiedenartige Tätigkeit des oberflächlichen Wassers erweitert und trichterförmig ausgestaltet. Das ist die *normale Doline.* Je reicher nun die Gegend an Verwitterungslehm ist, desto mehr wird der entstandene Trichter ausgefüllt, ja er verschwindet und dann liegt (eine, L.) *geologische Orgel* vor. Das ist nicht die einzige Möglichkeit der Dolinenbildung. Das Wasser vermag den Kalk auch *unter* einer Bedeckung mit fremdem Material anzugreifen und es kann rings um den Eingang einer Schlundröhre der Kalk gelöst werden, dann sinkt das Hangende nach und so entstehen die *geologischen Orgeln mit fremder Ausfüllung* oder, wenn das nachsinkende Material weniger voluminös ist als das gelöste, *Dolinen mit fremder Ausfüllung.* Beide Möglichkeiten dürften sich vielfach combinieren, indem eine Doline erst durch oberflächliche Tätigkeit des Wassers angelegt (wird, L.) und dann durch Lösung unter der hineingespülten Lehmdecke weiter wächst.»

Es werden dann noch andere Dolinen, die Cvijić nicht zu den normalen rechnet, behandelt, so die *Schneedolinen* im Hochgebirgskarst, wo sich der Schnee fast das ganze Jahr in einst unbedeutenden Depressionen ungenannter Herkunft hält und wo die subaerische chemische Erosion zweifellos eine größere Bedeutung erlange als in den übrigen. Schließlich spricht Cvijić über die gemischte Entstehung der Dolinen an der Grenze des Kalksteins und impermeabler Gesteine und von den Einsturzdolinen.

Die Ansicht von Cvijić, oder besser, was er von der normalen Doline lehrte[1]), beherrschte die wissenschaftliche Meinung über alle rundlichen Karstmulden und -trichter zwanzig Jahre lang unbestritten in allen Kreisen, welche die alte verallgemeinerte Einsturztheorie ablehnten. Dies wurde 1913 mit dem Erscheinen der genannten Ergebnisse *K. v. Terzaghis* anders. Auch seine Lehre trat mit dem Anspruch einer gewissen Ausschließlichkeit als Erklärung der normalen oder echten Dolinen auf.

Er bestritt, daß im nackten Karst, auf welche Art immer, Dolinen mit rundlichem Grundriß und einigermaßen glatten Böschungen entstehen könnten. Denn er hatte in einem so dicht zerklüfteten Karstgebiet gearbeitet, daß das Wasser dort schon größtenteils verschwand, ehe es den tiefsten Teil der Dolinen erreichte. Dafür hielt der Forscher eine nicht gar zu schnell durchlässige Bedeckung des Karstfelsens, und zwar einen Waldboden für

[1]) Was er über die andern Dolinen sagt, ist bezüglich der lehmbedeckten und Schneedolinen lückenhaft und doch wortreich und mehrdeutig, daß es nicht als ausgebildete Theorie gelten kann.

notwendig, damit Dolinen entstehen. Er erklärte es ferner für unrichtig, die häufige Tatsache der unter Dolinen stark erweiterten Klüfte als primäre Ursache zu deuten.[1]) Die Annahme, daß sich Steilwände abböschen, erklärte Terzaghi für wissenschaftlich unbegründet.[2]) Damit war auch die Erklärung, die Cvijić für die Trichterform des erweiterten Eingangs der Abzugsröhre am Dolinengrunde gibt, angefochten.

An Stelle der abgelehnten Ansichten setzte Terzaghi die folgende. Er geht von einer Art Urmulden aus, also geschlossenen Vorläuferformen, die Cvijić nicht zum Vorteil seiner Gesamtauffassung gerade nur bei den Schneedolinen nötig hat. Solche ursprüngliche Mulden in dem Urwaldboden, der einst den typischen Dolinenkarst bedeckte, reicherten nach Terzaghi das Wasser gegen die Mitte hin an, auch wenn ein dichtes Kluftnetz unter der Mulde nirgends eine von Anfang an ausgezeichnete Schluckstelle darbot. In der Mitte solcher Mulden wird übrigens das Wasser nicht nur angereichert, sondern auch am stärksten mit chemisch wirksamen Säuren des Bodens geladen und gerät in die lebhafteste Zirkulation. Dort greift es den Karstfelsen in und zwischen den Klüften am erfolgreichsten an. Er wird durch Lösung in der Mitte am raschesten niedergebracht und so wird aus der Mulde eine Trichterform, die stets vom Waldboden ausgekleidet bleibt. Dieser nähert sich als geschlossene Decke einer maximalen Böschung von rund 30°, die sich auch dem vom Bodenwasser angegriffenen Gestein darunter aufprägt. So entstehen die glatten Böschungen der vertieften Mulden und Trichter.

Dem Wortlaute nach schrieb Terzaghi[3]):

> « Denken wir uns nun im Waldgebiet des Karstes eine wenn auch sehr flache Mulde. Das Wasser wird den porösen Boden an der tiefsten Stelle verlassen. Um uns das zu vergegenwärtigen, denken wir uns eine flache, mit Humusboden ausgekleidete, siebartig durchbrochene Schüssel. Wenn wir auf diese Schüssel Regen fallen lassen, so ist es klar, daß die Schüsselporen an der tiefsten Stelle am meisten Wasser liefern werden. Je näher dem obern Rand, um so weniger. Direkt proportional der Wasserlieferung aus den Poren ist die Sättigung der Bodenschicht und Geschwindigkeit der Wasserbewegung. In unserer Waldmulde findet dasselbe statt. Nachdem aber die Lösungsfähigkeit des Wassers direkt proportional ist der Bodensättigung und der Zirkulationsgeschwindigkeit, so wird der Boden der

[1]) A. a. O., S. 321.
[2]) Ebenda, S. 337.
[3]) Ebenda, S. 346.

Mulde viel rascher tiefer gelegt als die Ränder. Zudem werden die Kalkklüfte unter dem Muldenboden viel rascher ausgeweitet als an den Rändern, weil sie intensiver durchströmt werden. In dem Maß als der Boden sinkt, folgt natürlich das Erdreich nach und wird mit seinem natürlichen Böschungswinkel die Steilheit der Dolinenhänge .....[1]) festlegen. Eine Doline muß mit Notwendigkeit entstehen. Den Anstoß dazu kann jede noch so unscheinbare Hohlform geben. Es genügt, daß das Wasser an jener Stelle durch lange Zeit, wenn auch nur um ein Differentiale, mehr löst als in seiner Umgebung.»

Wie man sieht, ist die Theorie von Terzaghi für normale Dolinen nicht nur grundverschieden von jener, die Cvijić dafür geschaffen hat, sie weicht auch wesentlich von dessen Erklärungsversuch für «Dolinen mit fremder Ausfüllung» ab, wenn auch die Notwendigkeit des Nachsinkens der Lockermassen einen Berührungspunkt beider Lehren schafft. Der Unterschied lässt sich auch im Hinblick auf die schüsselförmigen Dolinen aufzeigen. Nach Cvijić muß man diese als teilweise aufgefüllte Trichter, nach Terzaghi als noch unvollendete ansehen.

III.

Für jeden Geographen, der die Arbeit Terzaghis kannte, war es ein sehr unbefriedigender Zustand, daß eine so häufige Leitform der Karstmorphologie so verschieden erklärt wird, wie es die in den Abbildungen 1 und 2 zum Vergleich gebotenen Zeichnungen verdeutlichen. Seit dem Jahre 1918, als in Oesterreich die Karststudien sich vorwiegend auf den einheimischen Karst beschränken mußten, war es eine erwünschte Aufgabe, mit Hilfe alter und neuer Beobachtungen in die Dolinenbildung noch mehr Licht zu bringen, denn *beide* bestehenden Theorien waren an ältern Beobachtungen vorbeigegangen, so daß man nicht ohne weiteres beide anerkennen oder sich der logisch besser aufgebauten Ansicht von Terzaghi anschließen konnte. Zunächst gaben mir meine Höhlenforschungen Gelegenheit, so viele zur Tiefe führende Röhrenklüfte von unten zu sehen, daß ich mir eine Dolinenbildung, die der Erweiterung solcher Klüfte gar keine primäre Rolle zuschreiben will, wohl als möglich, aber bei weitem nicht als vorherrschend denken konnte. Wenden wir uns zu Beobachtungen an der Oberfläche. Wasser, das im nackten Karst von allen Seiten in eine Röhre rinnt, hat zunächst Formen geschaffen, wie sie die Abbildung 3 zeigt. *Distel* und *Scheck* haben eine solche von Rillenkarren erweiterte Röhre im Zahmen Kaiser

[1]) An dieser Stelle sind einige Worte des Hinweises auf Terzaghis Böschungstheorie weggelassen.

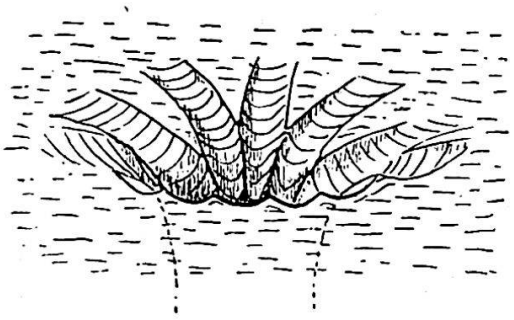

Abb. 3. Abzugsröhre für das Wasser im nackten Karst, deren Abzug von Rillen ausgestaltet ist.

gefunden. Terzaghi hat ähnliche Formen, nur mit plumpern Aufragungen um die Oeffnung, von Ponoren des kroatischen Karstes in Worten dargestellt. Im ganzen sind sie sehr selten und stets recht klein. Das Wasser hat hier wohl den Eingang der Röhre erweitert, aber in einer von Cvijić durchaus nicht vorgesehenen Form. Die normalen Dolinen zeigen keinerlei sternförmigen Grundriß von regelmäßiger Anordnung. Das Gebilde der Abbildung 3 wird, wenn es auch beträchtlich wachsen könnte, nie das werden, was Cvijić ableiten wollte. Die große Seltenheit dieser zierlichen Formen geht wohl vor allem darauf zurück, daß im nackten Karst die mechanische Verwitterung den obern Teil der Röhrenkluft und die Rillenbildung zerstört, ehe sie noch große Fortschritte gemacht hat. Das ist übrigens auch dort so, wo das Gestein nicht eine so regelmäßige Kannelierung erfahren hat. Der verwitterte obere Rand der Abzugskluft zeigt ein rauh gestuftes Aussehen und die erweiterte Oeffnung einen unregelmäßig polygonalen Umriß mit ein- und ausspringenden Winkeln. Die ungleich großen Zacken des Grundrisses strecken sich nach den Hauptklüften. Im Karst der Ostalpen kann man derart verwitterte Ränder der Kluftröhren oder « Karrenbrunnen » zu Tausenden finden, ich nannte die Hohlform in ihrem obern Eingang daher Karrendolinen. Selbst der Schnee kann ihnen die rundlichen glatten Umrisse echter Dolinen nicht verschaffen. Die kleinern Schneeflecken des Bildes 1, Tafel I, zeigen die Grundrisse von Karrendolinen an ziemlich steilem Hange an. Auch *sie* sind nicht die Gebilde, für die Cvijić eine Theorie aufstellen wollte. Im unbedeckten Karst erzeugt also das Wasser allein oder im Bunde mit der Verwitterung durchaus etwas anderes als was Cvijić zu deduzieren versucht hat, selbst wenn von Natur bevorzugte erweiterungsfähige Klüfte vorhanden sind. Die Erklärung, die Cvijić für die normalen Dolinen gibt, muß daher als unmöglich bezeichnet werden. Man muß Glück haben, wenn man einmal eine Beobachtung machen will, bei der man den allerersten Anfängen einer Dolinenbildung geistig beiwohnen kann. Diese Beobachtung hält Abbildung 4 fest.

In Oberösterreich liegt östlich des berühmten seenreichen Salzkammergutes, durch das die Traun strömt, das stillere Tal der Alm, unter den Nordabstürzen des Toten Gebirges entspringend. In den Voralpen überragt den Fluß auf dem rechten Ufer der breite Kasberg (1743 m), oben mit flachern Landschaften. Hier beobachtete ich im Sommer 1925 nordwestlich

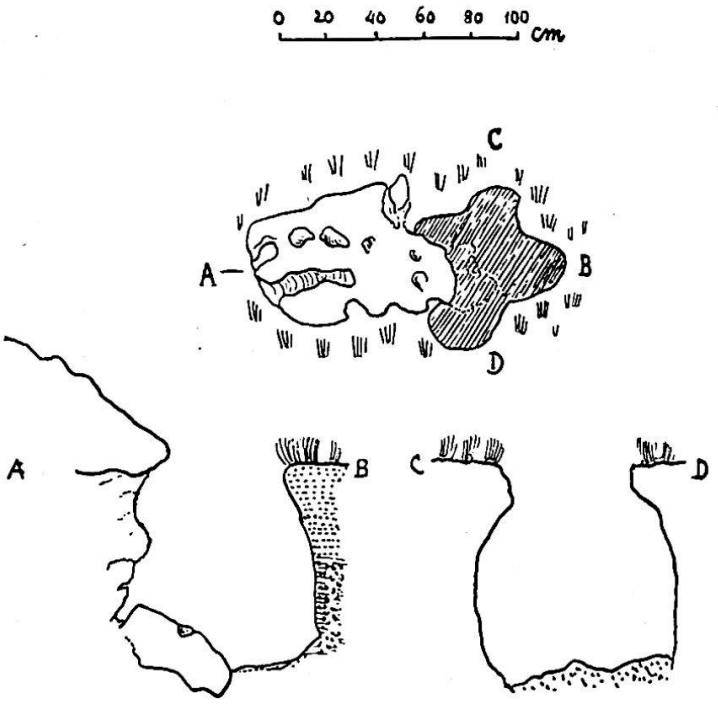

Abb. 4. Frische Erdeinsackung von der Kasbergalm (Oberösterreich). Grundriß und aufrechte Querschnitte; nach Zeichnungen an Ort und Stelle.

der Kasbergalm (rund 1500 m), was Abbildung 4 zeigt. Im Grasboden war ein 80 cm tiefer Schacht mit überhängenden Wänden. Sein oberer Rand zeigte unruhige Umrisse, wie sie etwa der Auflagerungsstelle der Felsblöcke mit Karren-Schrattenformen entsprechen. Die Wände des Schachtes bestanden auf drei Seiten aus Erde und Humus und darunter aus lehmigem Grus. Am Grunde lag lehmige Erde. Die vierte Seite bestand aus sehr morschem Kalkfels. Dort ragte ein frischer Kalkblock etwas über den Rand der Vertiefung. Ein dazupassendes Stück lag ebenfalls an ihrem Grunde. Hier hatte ich also eine ganz junge Einsackung des Lockerbodens gefunden. Daß ein Stück des Karrenblockes mit hinabfiel, denke ich mir natürlich nicht als Folge eines Abbrechens beim Niedergehen der Lockermassen, vielmehr war vom obern Block schon lange durch den Frost ein Stück abgesprengt, das nun plötzlich hatte der Unterlage folgen müssen. Die Trennungsfläche des Kalkes war angewittert und viel weniger frisch als alles, was man sonst bemerkte. Ich habe auch auf dem Grunde bereits ausgebildeter Dolinen der Raxhochfläche, die den Semmering überragt, frische Einsackungen gesehen, einmal mit einer Studentenexkursion, als die Hochfläche schon ganz begrünt war. In der steilen engen Doline stand ein fester, über 1 m langer Rest von Altschnee fast senkrecht auf der Kante seiner deutlichen Schichtköpfe, unten in ein Gewirr von nassem Lehm und zer-

rütteten Steinen verklemmt.[1]) Die Erscheinung bei der Kasbergalm war aber noch keine Doline. Hier war erst die Bedeckung des Felsuntergrundes hinabgerutscht, wie ein Korkstöpsel in einen sich ausdehnenden Flaschenhals. Die der Flasche selbst entsprechende Höhle hat man sich aber nicht hinzuzudenken, die Stelle liegt nämlich rund 950 m über dem benachbarten Almtal. Höhlen sind am Abfall höchstens hinter den im tiefen Tale gelegenen Karstquellen anzunehmen. Hätte der hinabgesackte zylindrische Erdkörper sich tiefer bewegen können, so wäre allseits ein Stück einer Felsröhre entblösst worden. Die stehengebliebenen Erd-, Grus- und Schuttwände der Sackform werden sich im Laufe der Zeit gewiß abböschen und so eine auf die Lockerdecke beschränkte Trichterform erhalten. Spätere Nachsackungen werden dem Tiefergreifen der erweiterten Röhrenquerschnitte folgen. Es ist nun ganz lehrreich, wie wenige hundert Schritte weiter im Nordwest eine dort vorkommende Doline im selben Gestein aussieht. Dies zeigt Bild 2, Tafel I. Es ist eine kleine 1,5 bis 2 m tiefe zylindrische Kesseldoline mit entblößter Felswandung. Eine schwache Trichterform wie ein Tellerrand beschränkt sich auf die hier nicht so dicke Erdbedeckung unter Gras; man sieht diese grüne Trichterform erst bei genauem Zusehen. Solche Beobachtungen stützen denn doch die Meinung, daß die Erweiterung von Röhrenklüften bei Dolinen eine primäre Rolle spielen kann. Wie die neuere Höhlenforschung ergeben hat, bedeutet die Ausfüllung einer Röhre mit Lehm und Erde keineswegs ein Aufhören der lösenden Tätigkeit des Wassers, das zwischen dem Kalk und der Füllmasse hindurchsickert, an jener das Gestein lösend, in dieser Kalzit ausscheidend. So werden auch die verstopften Röhren erweitert. Dies ist durch Abbildung 3 und Bild 2 nur für die Zylinderform belegt. Im Hinblick auf die gezeigte Kesseldoline meine ich, daß auch ihre *felsige* Wandung einst abgeböscht werde. Für Berggipfel und Talwände vertrete ich ebenso wie Terzaghi die Erkenntnis, daß sie nur parallel zurückwittern, während eine Schutthalde vor ihnen hinaufwächst. Abschrägend können höchstens Steinschlagrinnen wirken. Weder diese, noch Schutthalden auf festem Boden sind in zylindrischen Dolinen in normaler Weise anzunehmen. Daraus schließe ich gleichwohl nicht, daß die Wandung der Kesseldoline nie durch einen Schräghang ersetzt werden wird. Solche Dolinen bergen oft sehr kalte Luft lange Zeit, während ringsum im Boden binnen 1 m Tiefe starke Temperaturunterschiede auftreten und von dem Grasrande her Wasser hinabrieselt. Das alles zusammen dürfte doch

[1]) Jeder Anwesende konnte sich vom Fehlen menschlicher Fußspuren und sonstiger Anzeichen eines willkürlichen Eingriffes überzeugen. Das Vorkommen war in der Gegend des Schwaigriegels (1642 m).

dahin wirken, daß später die Trichterform auch den Fels ergreifen wird, während sie die Grasnarbe hinabzieht. Streng beweisen kann ich es noch nicht, aber die von Cvijić angenommene *trichterförmige* Ausgestaltung ist m. E. beim *Vorhandensein* einer Bedeckung, die keineswegs eine « fremde Ausfüllung » darstellt, in so kleinen Dolinen nicht einfach auszuschließen. Damit wurde ein Vorgang durch Beobachtungen belegt, den die Lehre von Cvijić nicht als die Bildung einer normalen Doline anerkennt, sondern höchstens als Bildung einer Doline mit sozusagen fremder Ausfüllung. Seine Theorie wäre hier aber lückenhaft, da sie bei der Lösung des Kalkes um den Eingang der Schlundröhre nicht die lange Aufrechterhaltung der Zylinderform an der Oberfläche betont und sich über die Umwandlung in die Trichterform keine Gedanken macht. Wir werden gleich sehen, daß auch diese Beobachtungen an kleinen Kesseldolinen nicht verallgemeinert werden dürfen. Zu einer Theorie der echten Dolinen kommt man noch nicht, indem man die Lehre von Cvijić für seinen Sonderfall einer Lehmbedeckung vervollständigt und zum Range des Normalfalles erhebt. Vielmehr entstehen keineswegs alle echten Dolinen auf übereinstimmende Art. Eine andere Beobachtung bietet Bild 3 auf Tafel II. In dieser Doline von etwa 200 m Durchmesser, die an der niedrigsten Stelle der Umwallung keine 10 m tief ist, hat eine ganze Almsiedlung Platz gefunden. Es gibt aber in seltenen Fällen Dolinen, die fast den achtfachen Durchmesser haben, ohne daß man sie als Poljen bezeichnen dürfte. Wir sehen auf dem Bilde eine ziemlich große Schüssel- oder Muldendoline vor uns. Es ist ohne Zweifel eine « echte » und « normale » Doline, denn über die Größe dieses Gebildes sagen diese Bezeichnungen nichts aus, so wie echte Erosionstäler auch klein und groß sein können. Der Boden dieser Doline ist dicht zerklüftet und ragt an mehreren Stellen aus dem Grase, sie ist *kein* aufgefüllter Trichter. Heftigste Regengüsse, durch zwanzig Stunden selten etwas nachlassend, konnten da und dort im Dolinengrunde kaum einige Meter weit fließende Rinnsale erzeugen, sonst verschwand alles Regenwasser sogleich im Untergrunde des Grases. Eine solche Klüftigkeit des Untergrundes wie auch der felsig breite Muldenboden schließen hier jede Anwendung der Gedankengänge von Cvijić aus. Dafür erweist sich hier die Lehre von Terzaghi nicht nur als möglich, sondern als sehr wahrscheinlich. Ein dicht zerklüftetes Karstgestein wird hier unter Gras und Erde als ganze Fläche tiefer gebracht durch den vielfältigen Angriff des säurereichen Wassers an und zwischen den Klüften. Daß daraus viel später eine Trichterform wird, erscheint bei der Kleinheit der wirklich ebenen tiefsten Bodenteile möglich und durchaus zulässig. Da bleibt nur noch die Frage der Ausgangsform der sogenannten

« Urmulde ». Wir sind hier in einem von quartärem Gletschereis bedeckt gewesenen Gebiet, welches vielleicht damals eine Wannenform erhielt, obgleich dafür kein besonderer Grund zu finden ist, der nicht auch die Dolinenbildung vor der Eiszeit hätte fördern können, nämlich eine besonders dicht zerklüftete Fläche und eine teilweise von der Umgebung verschiedene Kalkart. Die Anwendbarkeit einer Lehre — hier der Theorie Terzaghis — beweist ja noch nicht das örtliche Zutreffen ihrer Voraussetzung, d. h. hier, das einstige Vorhandensein einer Mulde im Urwaldboden wäre damit noch nicht bewiesen. Das aber spricht nicht gegen den Grundgedanken Terzaghis. Manche werden es als einen Schönheitsfehler seiner Lehre ansehen, daß er im Urwald geschlossene Mulden voraussetzen muß, wo später die Dolinen sich ausbilden sollen. Nun ist ja ein im allgemeinen *flacher* Urwaldboden gewiß nie tischeben, sondern wird in seinem Auf und Ab nicht selten auch geschlossene Hohlformen in schwacher Ausprägung enthalten. An kräftig geböschten Gehängen, wo dies unwahrscheinlich ist, gibt es auch meist keine Dolinen. Immerhin ist es gut, hier auch Terzaghis Theorie noch zu ergänzen. Denn in jedem Wald schaffen Windbrüche und selbst der Sturz überalter Bäume Lichtungen, bald da, bald dort. Auf solche Lichtungen fällt mehr Regen, den hier kein Kronendach hemmt. In solchen Lichtungen entziehen keine Baumwurzeln dem Boden so viel Wasser wie in der Umgebung. Aus beidem ergibt sich eine erhöhte Nässe in jeder Lichtung eines Urwaldes, die nicht so groß ist, daß die Sonne lange hineinbrennt. Hier wird der felsige Karstuntergrund chemisch stärker vom Wasser angegriffen als ringsum und tiefer gelegt, auch wenn er durchaus nicht stärker zerklüftet ist als die Umgebung oder mehr Abzugsröhren bietet als sie. Dazu kommen noch die tiefen Wunden im Waldboden, wo ein gestürzter Baum samt dem Wurzelstock aus dem Boden gedreht wurde. Das aufgelockerte Erdreich wird hier von dem absterbenden Wurzeldach nur vorübergehend und sehr unzulänglich vor dem Regen bewahrt. Es ist also sehr leicht, auch ohne Urmulde dem Grundgedanken Terzaghis zuzustimmen. Im Hinblick auf Bild 3 besagt das: es ist eigentlich nach Erkenntnis der Tatsache, daß hier der Karst unter der Alpweide auf ganzer Fläche durch Lösung niedergebracht wird, eine Frage geringerer Wichtigkeit, ob hier eine glaziale Wanne, eine nassere Lichtung im einstigen Urwald oder eine stärkere Zerklüftung auf rundlicher Fläche den ersten Anlaß zur Dolinenbildung gegeben hat. Hinzuzufügen wäre höchstens noch die nicht so unwichtige Erkenntnis, daß ein bloßer nasser Fleck im einstigen Karsturwald die Verwandlung der Muldendoline in einen Trichter nach Abbildung 2 nicht unbedingt gewährleistet wie Terzaghis Schüssel. Unter einem nassen Fleck könnte auch eine

tiefe, aber breite Kesselform entstehen. Nur wenn die Klüftung mitwirkt, indem sie von Anfang an in der Mitte dichter oder weiter war, kann ein Trichter in jedem Fall erwartet werden.

IV.

Nur scheinbar führt uns nun Bild 4, Tafel II, auf einen Seitenweg. Hier sieht man in einem lichten Walde, gegen 1650 m hoch, eine große Muldendoline. Ihr Durchmesser erreicht in einer Richtung wohl 100 m. Im Boden dieser « Grube » sind zwölf kleine Regenschluckstellen eingesenkt, von denen die Aufnahme nur einen Teil erfaßt hat. Das Gebilde liegt auf demselben Quadratkilometer wie die Doline mit den Almhütten. Wir haben es hier mit einer Art zusammengesetzter Dolinen zu tun. Solche sind im Toten Gebirge zwischen Wald- und Baumgrenze nicht selten. Zu ihrer Erklärung kommt hier abermals keine der Theorien von Cvijić in Betracht. Ueberhaupt liegt kein in seinem Sinn normaler Fall vor. Die große Grube ist nicht wesentlich von der Mulde mit den Almhütten verschieden. Die kleinen eingeschachtelten Regenschlucker sind nicht so vollständig von Erdkrume und Rasenwuchs ausgekleidet wie die große Form. Sie liegen offenbar an Stellen entweder besonders dichter Zerklüftung des Untergrunds oder im Umkreis einer röhrenförmigen steilen Abzugskluft. Es sind aber keine unzureichend ausgefüllten geologischen Orgeln. Ihre steile, oft scharfrandige Muldenform unterscheidet sich deutlich von einer Trichtergestalt. Auch der Grundgedanke von Terzaghi ist nicht für solche zusammengesetzte Formen ersonnen. Es wäre ihm nicht eingefallen, schon im Urwaldboden kleine Mulden auf dem Grunde größerer vorauszusetzen und im übrigen eine gleichmäßig allseitige Zerklüftung des Untergrundes anzunehmen. Die Verschiedenheit zwischen der Doline mit den Almhütten und dieser zusammengesetzten bestätigt ebenfalls, daß bei jener der Untergrund gleichmäßiger angreifbar war als bei dieser. Es zeigt sich, daß zur richtigen Deutung der großen Grube mit eingeschachtelten Regenschluckmulden die bisher berichteten Beobachtungen nicht ausreichen. Hier ist die Wirksamkeit der Schneeschmelzwässer zu beachten. Im Mai und Juni sind die großen Gruben von ebenso ausgedehnten Schneeflecken erfüllt. Diese schrumpfen und liegen dann bis Juli und August nur in den kleinen Mulden, wo sie schließlich verschwinden. Diese Beziehung zwischen zerfallenden Schneeflecken und einer im Vergleich zur Umgebung jeweils gesteigerten Klüftigkeit erlaubt es, sich die Entwicklung einer zusammengesetzten Doline nach Abbildung 5 vorzustellen.

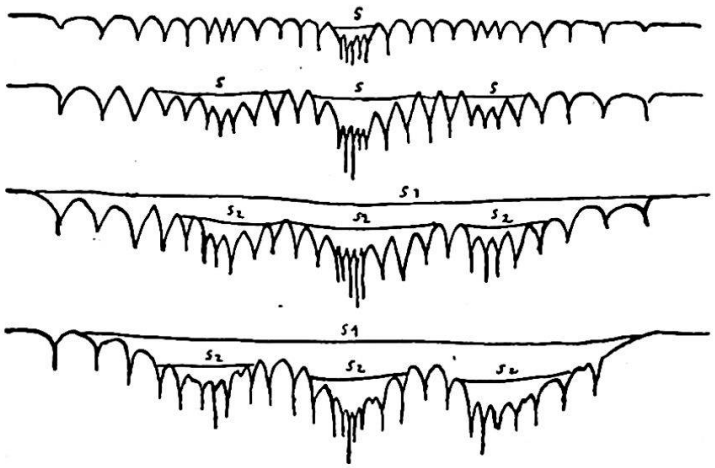

Abb. 5. Entwicklung einer großen Doline mit kleinern am Grunde.
S: Schneeflecken, S_1: großer Schneefleck, S_2: kleine Schneeflecken.

Anstatt einer Urmulde oder eines nassen Fleckes im Urwalde ist hier zeichnerisch schon für die große Grube eine im Vergleich zur Umgebung etwas gesteigerte Klüftung angenommen; für die kleinen steilen Mulden ist diese Annahme die einzige, die mit den vergleichenden Beobachtungen übereinstimmt, zum Teil auch mit den unmittelbaren Beobachtungen an Ort und Stelle. Es ergibt sich bei dem durch Abbildung 5 erläuterten Vorgang, daß die große Grube und die darin eingeschachtelten kleinen auf *dieselbe* Art und gleichzeitig, nur verschieden geschwind, in die Tiefe wachsen. Wenn die gebotene Erklärung richtig ist, so müssen zusammengesetzte Dolinen dieser Art auch *oberhalb der Vegetationsgrenze* vorkommen, dem Gebiete, wo der Zerfall der Schneeflecke sich ganz regelmäßig auf einen erheblichen Teil der warmen Jahreszeit erstreckt. Im Toten Gebirge trifft denn auch oberhalb des zusammenhängenden Pflanzenwuchses das Gesagte zu. Die schon beschriebenen, rauh polygonalen *Karrendolinen* des nackten Karstes sind auf flacherm Grunde fast immer in große Gruben eingeschachtelt, nur fehlt beiden die Glättung und Rundung, welche echte Dolinen kennzeichnet, und die Bild 4, Tafel II, *unter* der Vegetationsgrenze bei einem Erdbelag zeigt. Unter der Vegetationsgrenze, wo der Schnee, wenn auch nicht in einem Zuge, so doch rascher wegschmilzt, sind im Toten Gebirge die eingeschachtelten Dolinen sogar eine Ausnahme, über der Vegetationsgrenze sind wiederum die einheitlichen Dolinen selten.

Hier ist Anlaß, der Lehre entgegenzutreten, daß die eingeschachtelten kleinern Dolinen als Folge einer Gebirgserhebung sozusagen eine Verjüngung der chemischen und mechanischen Abtragung bedeuten, so wie eine enge Talkerbe oder Schlucht im Boden eines weiten Tales allerdings meist den Schluß auf eine Hebung erlaubt. Nun ist aber zu bedenken, daß

eine Hebung bei einem gewöhnlichen Fluß eine Vermehrung seines oberirdischen Gefälles herbeiführt, was ihm dann die Arbeit kräftigen Neueinschneidens ermöglicht. Eine nach unten führende Röhre wird aber durch die Hebung nicht steiler. Wenn auch nicht alle Klüfte senkrecht zur Tiefe führen, handelt es sich doch unter den Dolinen meist um so steile Winkel, daß die Folgerung, ein noch größeres Gefälle müsse zu rascherer Erosion führen, ohnedies nicht mehr gilt.[1]) Vergrößert konnte die Neigung einer solchen Kluft nur durch eine Schiefstellung während der Hebung werden — ebensooft aber auch verringert! Es ist also nicht *morphologisch* gedacht, wenn man die Entwicklung enger Dolinen auf dem Grunde weiter Gebilde mit den Hebungen in Zusammenhang bringt, die in der betreffenden Gegend stattgefunden haben. Vielmehr ist dies ein Denken in Altersstockwerken, das in der Morphologie nicht einmal bei Talterrassen stets am Platze ist. So hat auch die Erdeinsackung bei der Kasbergalm oder die berichtete « Verjüngung » der Doline mit der Schnee- und Steinsackung auf der Raxalpe nichts mehr mit den hier gewiß einmal eingetretenen Hebungen oder deren ruckweisem Wiederaufleben zu tun. Wenn in Verbindung mit einer Hebung *neue Risse,* sei es der Pressung, sei es der Zerrung, den Fels durchkreuzen, ihn dichter zerklüftend, dann allerdings können neue Stellen verstärkter Regenverschluckung entstehen, die früher oder später, vielleicht erst in der Gegenwart, neue Dolinen — natürlich auch am Grunde älterer — entstehen lassen. Ist es gelungen, Hebungen und ihre Erneuerung in eine der geologischen Altersstufen einzuordnen, so besagt das in keinem Falle etwas über das Alter eingeschachtelter Dolinen, die nach Abbildung 5 schon vorher dagewesen sein können. Ebensowenig beweist die Neubildung von Dolinen ein besonders spätes Wiederaufleben von Krustenbewegungen, auch wenn ein solches auf Grund anderer Tatsachen erschlossen werden kann. Somit hat sich hier die Heranziehung der Gruben mit eingeschachtelten Regenschluckmulden gelohnt.

V.

Nun sind noch wichtige Beobachtungen über einfache *Trichter*formen vorzunehmen. Ich beginne mit einer Abbildung im Werke von Cvijić, die in einem höchst merkwürdigen Mißverhältnis zu seinen theoretischen Ergebnissen steht, dafür aber nochmals gründliche Beachtung verdient. (Vgl. Abb. 6.)

---

[1]) Ich habe dies 1922 in den Mitt. d. Geogr. Ges. Wien in einem allgemein morphologischen Aufsatz näher begründet. Steile Wasserfallstufen werden viel langsamer beseitigt als z. B. Gefällsbrüche von 30 bis 40°. Diese sind demgemäß in Wasserläufen seltener als Wasserfallstufen.

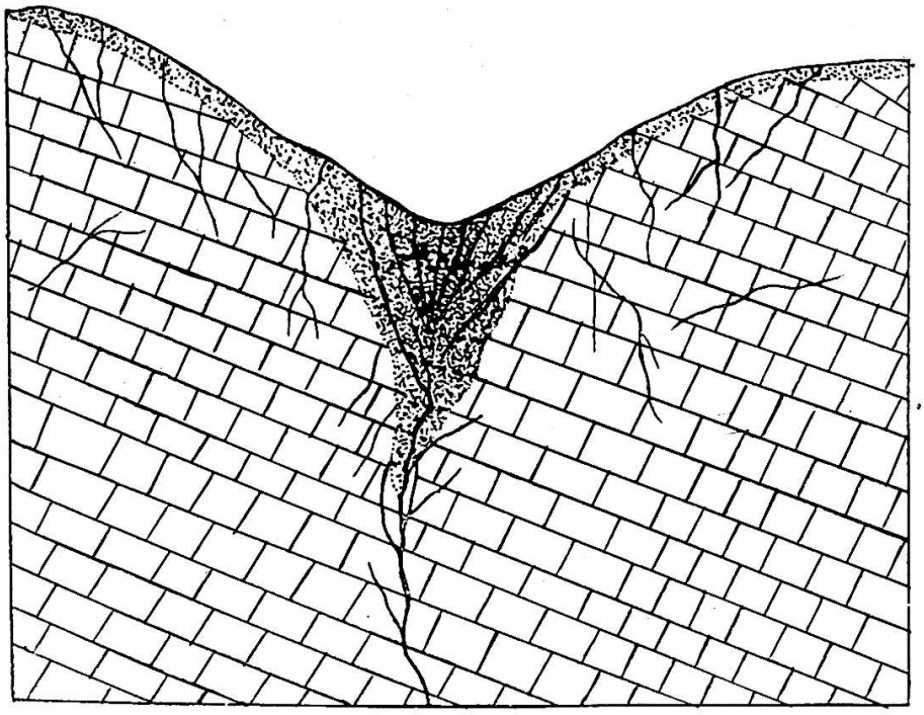

Abb. 6. Durchschnitt einer 3 m tiefen Doline mit Unterlage, bei Unterloitsch in Krain, nach Cvijić.

Cvijić benützte dieses Bild, das nach ihm nur *eine* von vielen ganz gleichartigen, künstlich angeschnittenen Dolinen zeigt, um die Bedeutungslosigkeit jeder Einsturztheorie für alle diese vielen Fälle darzulegen. Das Vorkommen selbst beschreibt er, wie folgt[1]:

> « Von dem Dolinenboden setzen sich zahlreiche Klüfte durch eine Zone verwitterten Kalksteines fort und sind bis in das frisch aussehende, wenig zersetzte Gestein zu verfolgen, welches die Unterlage bildet und ebenfalls entblößt ist (in einem Eisenbahneinschnitt, L). Es befindet sich also unter der Doline ein nach unten zugespitzter Keil von verwittertem Kalksteine, dessen Höhe 3 bis 5 m, dessen Breite 2 bis 3 m beträgt. Derselbe ist in nebenstehender Zeichnung punktiert. Der Keil ist von unzähligen Fugen und Spalten durchsetzt, so daß er aus einzelnen Kalksteinstücken besteht, welche in einer Umhüllung von terra rossa liegen. Stellenweise ist die terra rossa nesterförmig in den Lücken zwischen den Kalksteinstücken angesammelt. In der Doline selbst zeigen die Gehänge eine durch terra rossa gefärbte Zersetzungszone, welche ohne scharfe Grenzen in das frische Gestein übergeht. Alle durchschnittenen Dolinen zeigen dieselben Erscheinungen in größerm oder kleinerm Maßstabe. »

[1]) A. a. O., S. 259.

Diese Beobachtungen erlauben es mir, folgende Theorie der Bildung solcher Dolinen aufzustellen: Im Umkreis des Eingangs zu einer besonders in die Tiefe greifenden wasserdurchlässigen Abzugsfuge für den Regen hat sich das Gestein in besonders dichten Klüften zersetzt, soferne nicht schon der frische Fels hier einst dichter durchklüftet war. In die vorhandenen oder entstehenden Klüfte sickerte das Wasser und füllte die Zwischenräume zwischen den Kalkstücken zum Teil mit terra rossa aus. Gleichwohl überwog die Lösung des Kalkes in den Fugen diese Einschwemmungen, so daß die Fugen wasserdurchlässig blieben. Freilich, ihre *Erweiterung* machte *keine* merklichen Fortschritte, denn das Zusammensinken der Kalkstücke und die Einschwemmungen wirkten ihr entgegen. Aber diese beiden mit der Erweiterung der Abzugsröhre im Kampf liegenden Vorgänge bedeuten dennoch ein Einsinken der Erdoberfläche, die bei einer so kleinen Doline eine trichterförmige Vertiefung empfing. In dem Maße, als diese Dolinen häufig sind, ist damit eine Erklärung geboten, die über den Einzelfall hinausgeht. Sie weicht aber stark ab von der Erklärung der *normalen* Dolinen durch Cvijić, wie man leicht oben nachlesen kann. Demgemäß griff Cvijić auf die von ihm abgebildete Dolinenart dreizehn Seiten später zurück, im Anschluß an die « Dolinen mit fremder Ausfüllung » und an solche kombinierter Entstehung (vgl. oben), als wenn es sich in Abbildung 5 wenigstens um ein Beispiel für solche Fälle handeln würde. Er schrieb:

> « Unsere Beobachtungen an den angeschnittenen Dolinen bei Unterloitsch zeigen, daß die Bildung einer Doline längs Spalten vor sich geht. Die Gehänge dieser Dolinen sind durch eine Verwitterungszone charakterisiert und am Untergrunde der Dolinen erscheint ein Keil von verwittertem Kalkstein; beide Erscheinungen weisen auf die Erweiterung und Vertiefung der Doline, welche durch Auflösung des Kalksteines erfolgt. [1])

Hier zieht sich Cvijić auf den Standpunkt einer bloßen Rahmentheorie zurück, denn natürlich hängt alles mit Verwitterung und Auflösung des Kalkes zusammen, zugleich spricht er nur von der Weiterbildung der Doline, aber nicht von ihrer Entstehung, was nicht dasselbe sein muß. Wie wenig er hier eine Formenentwicklung und wirkliche Erklärung geboten hat, erkennt man am besten daraus, daß Cvijićs *erklärende* Worte ebensogut auf die Dolinen von Unterloitsch, wie die wesentlich anders entstehenden Bildungen auf dem Kasberg passen. An die sehr wichtige Frage, welche Rolle der frühere Waldboden bei den Krainer Dolinen gespielt habe, hat

[1]) Die Stelle folgt ohne Auslassung auf die im Abschnitt II angeführte.

Cvijić damals anscheinend noch nicht gedacht. Ich meine aber, daß die Glätte der heute vorliegenden, aus Krain beschriebenen Trichter besser im Sinne Terzaghis auf den humusreichen Lockerboden früherer Zeiten zurückgeführt werden kann, als auf die geringen Mengen von terra rossa, die von nicht stets eindeutiger Herkunft ist und erst spät in die Doline kam. Bedenkt man die unbestimmte Haltung der Lehren von Cvijić zum Falle der Abbildung 6, so findet man, daß Terzaghi mit Recht seine Grundauffassung nicht als Weiterbildung der speziellen Erklärungsversuche von Cvijić ansah, sondern als mehrfachen starken Widerspruch zu ihnen. Diesen Widerspruch konnte ich nur mildern, aber nicht beseitigen, indem ich auf dem Kasberg eine künftige Trichterform für das Ergebnis der natürlichen Entwicklung der zylindrischen Kesseldolinen ansah. Die Meinung, daß der Schnitt der Abbildung 6 vielleicht nicht durch die Mitte der Doline ging und deshalb eine erweiterte, oben trichterförmig ausgestaltete Abzugsröhre verfehlt hat, wäre nicht von Belang, denn Cvijić erklärt (S. 259) ausdrücklich, « die bloßgelegten angeschnittenen Dolinen geben einen vollständigen Aufschluß über die Zusammensetzung ihres Untergrundes », und zählt eine Reihe ähnlicher Beobachtungen anderer aus Krain, Istrien und selbst vom Libanon auf. Jedenfalls hat aber eine den Erscheinungen der Abbildung 6 genau angepaßte Erklärung mehr Anspruch, für die echten Dolinen zu gelten, als alles was Cvijić über « normale » Dolinen und geologische Orgeln gesagt hat.

Indem Trichterdolinen, welcher Entstehung immer, unter einer lockern Bedeckung in die Tiefe wachsen, wachsen sie unter ihr auch regelmäßig in die Breite, dabei bleibt es nicht aus, daß sie in ihre Gehänge noch *andere* regenschluckende Klüfte miteinbeziehen; dabei bewahren die Trichter meist ihre einheitliche Form ohne eingeschachtelte Mulden. Für die Lehre von Terzaghi liegt hier kein Problem vor, bzw. es ist bereits damit erledigt, daß die Trichterform schon zur Zeit ihrer ersten Vollendung über mehrere, ursprünglich gleichwertig schluckende Klüfte mit Hilfe des Waldbodens hinwegreichte und in der Mitte keine primär bevorzugte Abzugsröhre noch besonders dichte Zerklüftung brauchte. Wer aber, wie ich, eine dieser beiden Voraussetzungen zwar nicht für unbedingt nötig, wohl aber für sehr häufig vorhanden und wirksam ansieht, hat es weniger leicht, einen *einfachen,* großen Trichter aus einem kleinen abzuleiten. Im Toten Gebirge kann man sich dieser Aufgabe aber nicht entziehen. Es gibt dort im unbedeckten Hochkarst viele unregelmäßige Karrendolinen in großen Mulden, unter Grasboden schon glattere eingeschachtelte Dolinen in rundlichen Gruben, im Wald aber *einheitliche* Trichter, deren Größe die der einge-

schachtelten Dolinen zwar erheblich übertrifft, jedoch noch nicht die Größe der größern Mulden erreicht. Im Adriatischen Karst hingegen sah ich 1000 m über der Bucht von Risano [1]) einheitliche Riesentrichter von 300 bis 400 m Tiefe und über 1 bis 1,5 km Breite. Immerhin wird man die Trichter im Walde des Toten Gebirges schon als starke Vertiefung und Erweiterung früher kleinerer Formen auffassen müssen, wie sie im nackten Karst ganz gewöhnlich sind. Da fällt es nun sehr schwer, gerade unter dem alles verbergenden Waldboden *andere* Kluftverhältnisse als unter Grasboden oder im Bereich von Karrendolinen anzunehmen. Das heißt, auch unter dem Wald dürften Abzugsröhren und andere Klüfte dicht genug sein, daß jeder wachsende Trichter sein Gebiet über mehrere ausdehnt. Die Dolinentheorie hätte eine Lücke, wenn sie *einheitliche* Trichter nicht trotz dieser erschwerenden Umstände ableiten könnte und unter dem ratsamen Verzicht auf Terzaghis einfachere Voraussetzungen. Dabei erkenne ich gerne an, daß es im Jahre 1913 ein erheblicher Fortschritt war, ohne eine besonders stark wasserschluckende Kluftröhre als Vorbedingung auszukommen. Abbildung 7 stellt nun dar, wie ein Trichter auch über mehreren

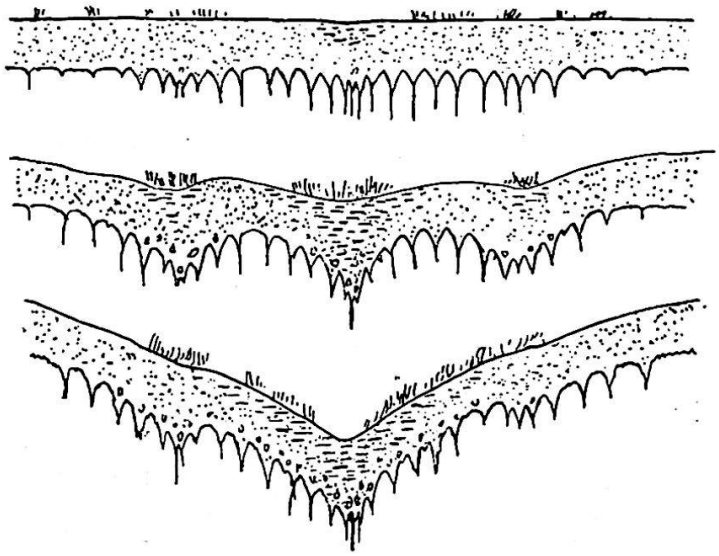

Abb. 7. Entwicklung eines einheitlichen Karsttrichters über wechselvoller Klüftung, welche ohne die Decke des Waldbodens mehrere Dolinen entstehen ließe. Bodenwasser gestrichelt.

solchen Klüften einheitlich bleiben kann. Sie beruht auf den vergleichenden Beobachtungen im Toten Gebirge, welche mich die hohe Bedeutung, die Terzaghi dem Waldboden beigelegt hat, erst recht würdigen lehrten.

[1]) Sie liegt zusammenhängend mit der Bucht von Cattaro hinter der Meerenge « Le catene », wo einst die Venetianer die Ein- und Ausfahrt der Schiffe mit Ketten sperren konnten, die von einer Felswand zur andern reichten.

Der Schnitt der Abbildung trifft drei besonders dicht zerklüftete Stellen, die mittlere ist es am stärksten. Der Waldboden bildet sozusagen eine Brücke, durch die ein Teil des Wassers über die seitlichen Schluckstellen hinweg zur mittlern gelangen und sich dort anreichern kann. Außerdem gelangt dorthin das Wasser von den Gehängen *zwischen* den Nebenschluckstellen. Größte Wasseranreicherung mit allen Folgen, in Verbindung mit größter Zerklüftung in der Mitte, bewirken, daß der Trichter sich hier rascher vertieft und die Nebendolinen des Uebergangsstadiums im Keime erstickt werden, indem sie durch Schuttkriechen und Abspülung in die Hangbildung einbezogen werden. Morphologische Spuren von einer oder zwei verkümmerten seitlichen Schluckstellen finden sich nicht selten am Hange sonst einheitlicher Dolinen.[1]) Diese Entwicklung mußte sich also auf das Zusammenwirken der Humusdecke mit einer entsprechend verteilten Klüftigkeit stützen, damit trotz der erschwerenden Umstände der Kalk an und zwischen den Klüften gegen die Mitte zu immer schneller niedergebracht werden und den Waldboden dorthin nachziehen konnte. Dabei ist es ganz gleich, ob in die Tiefe sackende Erdmassen, die ruckweise in zylindrische Röhren sinken, die Führung übernehmen, wie es am Kasberg vorkommt, oder ob es die Kalkbrocken und einiger Lehm tun, indem sie durch Zusammensitzen und Einschwemmung der Erweiterung der Abzugsklüfte in deren Mündungsbereich entgegenwirken, und so über sich den trichterförmigen Raum freigeben.

VI.

Obwohl schon das, was auf dem Kasberg geschehen ist, im wörtlichen Sinne einen Erdfall darstellt, verdient der volkstümliche Name im engern Sinne für Dolinen angewandt zu werden, welche einst plötzlich gleich einige Meter tief entstanden, so daß die Bevölkerung in manchen Fällen nach langer Zeit noch das Jahr der Entstehung anzugeben weiß. Es handelt sich dabei um eine Abwärtsbewegung von Lockermassen in die von Höhlen emporsteigenden *Schlote* und *nicht* um eine Folge des Zusammenbruches felsiger Höhlendächer. Diese Schlote sind steile, von der Höhlendecke hinaufführende Klüfte, die das zeitweilig hochanschwellende, unter Druck aufsteigende Höhlengewässer auslaugt und sie oft erheblich weiter macht, als das von oben nach unten gelangende Wasser die Abzugsröhren der Dolinen werden läßt. Bei einem gewöhnlichen Erdfall, der eine echte Dolinenform hat, verstopfen die niedergehenden Massen die Schlotröhren, gestützt von groben Verwitterungsblöcken, die darin eingekeilt bleiben. Wenn

[1]) Beispiele dafür sah ich auch im Weideland der Raxalpe.

dann wieder einmal das Wasser anschwillt und Schutt und Erde durchfeuchtet, vertieft sich der Erdfall durch Nachbrüche des sich umlagernden Materials. Daß man von diesen Vorgängen eine so genaue Vorstellung hat, ist das Verdienst R. Tramplers, der in den Jahren 1890 und 1891 zwei Erdfälle in Mähren bergmännisch öffnen ließ. Seinem Bericht über die Oeffnung des zweiten Erdfalles ist der Schnitt Abbildung 8 entnommen. [1])

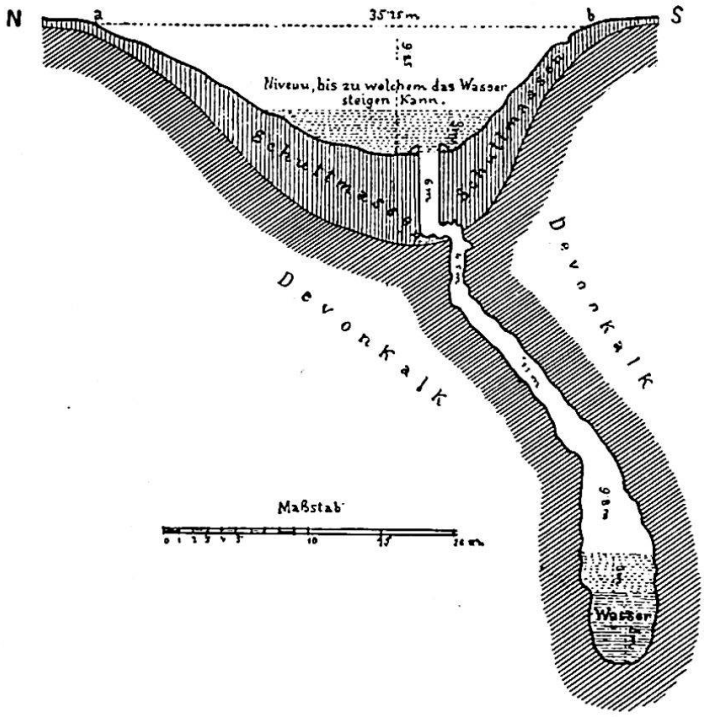

Abb. 8. Profil des Erdfalles Velký závrtek bei Ostrow im Brünner Karst, nach Trampler. Der künstliche Schacht in den Schuttmassen ist 6 m tief, der natürliche Felsschlot daran anschließend 4,5 m, die schräge Schlotstrecke ist 11 m lang und die Halle über dem Spiegel des Höhlensees 9,8 m hoch. Das Wasser ist 5 m tief und wird von einer Strömung senkrecht zur Bildebene gespeist.

Ich ziehe mit Vergnügen Tramplers wertvolle Ergebnisse aus dem Schatten der Vergangenheit und mangelnder Beachtung. Was er fand, war neu und von grundsätzlicher Bedeutung. Aber es erschien zu einer Zeit höchsten Kampfes zwischen der alten Einsturztheorie und den Lehren, welche die Dolinen als Abtragungserscheinungen deuteten, auf welchem Standpunkt ja auch Terzaghi und ich noch stehen. Zwischen den ringenden Theorien und bei der damit verbundenen Scheidung der Geister schienen die Erdfälle, die Trampler erforscht hatte, eine Art Kompromiß zu ermöglichen, das im ungünstigen Augenblick leicht von beiden Seiten

[1]) Mitt. der Geogr. Ges. Wien, 1893, S. 241 ff. Die Bergleute stellte damals der Fürst und Altgraf Hugo zu Salm-Reifferscheid von dem benachbarten Eisenbergbau in den Juraschichten zur Verfügung.

verschmäht wird. Heute ist dazu keine Gelegenheit und so sollten Tramplers Beobachtungen, nicht nur die in Abbildung 8 gezeigten, die verdiente allgemeine Beachtung finden, wozu ich anregen möchte. Von Abbildung 8 ist hier nur zu sagen, daß das Höhlenwasser nach starken Wolkenbrüchen im Gebiet einer 1,5 km östlicher liegenden Bachschwinde beim Erdfall selbst mehr als 30 m hoch anschwillt und auf dem Dolinengrunde erscheint. Es dringt dann also durch die 6 m mächtigen Schuttmassen aufwärts. Schon in 1,5 m Tiefe bestehen diese aus Kalkblöcken bis zu 1 m Durchmesser. Sie liegen zwischen fettem, grauem Letten oben und unten. An der Sohle des Schuttes liegen wieder große Kalkblöcke um die Mündung des felsigen Schlotes, der verzweigte Verbindungen zum Tage besaß, von denen eine Armesdicke hatte. Deutlich ist die Asymmetrie der Doline in bezug auf die tiefste Stelle ihrer felsigen Unterlage. Hier scheint eine normale Doline in Verbindung mit dem Schlot geraten zu sein, in den nun nach oder bei Wasserandrang die Schutt- und Erdrutsche hinabgehen. Tramplers Beobachtungen lassen auch hier die Dolinenform als eine Bildung *beweglicher* Massen erscheinen. Dadurch werden die bestehenden Theorien in wichtiger Weise ergänzt. Erdfälle gibt es auch im Paderborner Karst, seit dort einige Wasserläufe nur noch unterirdisch, seitab ihrer einstigen Betten fließen. Noch etwas lehrt uns Abbildung 8. Die Vertiefung einer Doline hat ihre untere Grenze *nicht* dann, wenn ihr tiefster Punkt das Karstwasser erreicht, bzw. wenn dieses zu ihm bei seinen Schwankungen emporsteigt; ja selbst wenn die Doline bis zum niedrigsten Stand des *heutigen* Höhlenwassers hinabreichen würde, so bedeutete dies noch nicht die absolute Grenze ihres Tiefenwachstums, insoferne ja der Stand dieses Karstgewässers sich wegen Weiterwerdens der Quellöffnungen in größere Tiefen zurückziehen kann. Damit ist eine Deduktion von A. Grund abgelehnt und außerdem ist der Lehre, daß eingeschachtelte Dolinen in weiten Gruben unter Umständen erst nach einer Senkung der Karstwasserstände möglich waren, von einer andern Seite eine grundsätzliche und allgemeine Bedeutung abgesprochen.

VII.

So habe ich an einer Reihe von Beispielen gezeigt, auf wie *verschiedene* Art echte und normale Dolinen entstehen und sich weiter entwickeln können. Die Weiterentwicklung ist von verschiedenen Forschern, so von L. v. Sawicki und A. Grund, zu einem theoretischen Endziel verfolgt worden [1]), im Rahmen von Studien über den Verlauf des geographischen Zyklus im Karst überhaupt. Auf genaue Darlegung des Widerstreites ihrer

[1]) Geogr. Zeitschr., 1909, S. 186 ff., bzw. Z. Ges. f. Erdk. Berlin, 1914, S. 1 ff.

Theorien gehe ich hier nicht ein. Hingegen werde ich versuchen, gewisse Fragen so zu beantworten, daß jeder, der sich auf derartige Forschungen einlassen will, sogleich einen begründeten Standpunkt beziehen kann. Die seit Terzaghis Ergebnissen gewonnene Erkenntnis, daß ein lockerer Waldboden, eigentlich jeder Humusboden, kein Hindernis, sondern eine wesentliche Bedingung für die Bildung ungezählter echter Dolinen ist, zerstört die Ansicht, es *müsse* einst zur Verschmierung und Ausfüllung aller Dolinen kommen, welche Meinung v. Sawickis schon Grund mit Erfolg bekämpft hat. Hierzu kommt noch die schon erwähnte, von der Höhlenforschung und in Tunnels als sehr wichtig erkannte Tatsache, daß man mit den Begriffen der « Ausfüllung », « Verstopfung » und « Verschmierung » mit unlöslichen Massen von länglichen und Röhrenklüften durchaus *nicht* die Vorstellung einer Sperrung des weitern Durchflusses verbinden darf.

Der Lösungsrückstand in einem ursprünglich unbedeckt gedachten Kalk kann also nie zur Ausfüllung der Abzugsklüfte von Dolinen führen, es sei denn, daß die Ablagerung in einer Höhle von unten in die Doline emporwächst, doch solche nahe Beziehungen zu Höhlen haben die wenigsten Dolinen. Nehmen wir einen Mergelkalk mit 20 % unlöslichen Bestandteilen her, weil solche Gesteine gelegentlich Dolinen erhalten [1]), so muß in diesem sehr unreinen Karbonatgestein rund fünfmal soviel Kalk gelöst werden, als ungelöste Masse frei wird. In reinen Karstgesteinen kann es das Fünfzigfache sein. Nehmen wir eine Doline an, deren Fläche 1000 m^2 beträgt, während eine einzige Abzugsstelle von nur 1 cm^2 zur Verfügung stehe. In dieser Röhre wird für jeden freiwerdenden Lösungsrückstand ein Raum vom fünf- bis fünfzigfachen seines Volumens ausgelaugt. Daher kann es von der Röhrenwand aus nicht zur Ausfüllung, geschweige zur Sperrung der Wasserabfuhr durch den Lösungsrückstand kommen. Machen wir nun die unmöglich hohe Annahme, daß von den 1000 m^2 der Doline in rund 28 Stunden (genauer 100,000 Sekunden) eine Schicht von 0,1 mm unlöslichen Rückstandes frei und gegen die Oeffung gespült würde, so müßte dort die Geschwindigkeit des Wassers auf 1 cm/sec sinken, damit das abgespülte tonige Material den Querschnitt der Oeffnung ausfülle, *ohne* übrigens darin steckenzubleiben. In Wirklichkeit ist gerade beim Fall des Wassers in die Tiefe die Geschwindigkeit am größten, gewiß 20- bis 30mal größer als 1 cm/sec, und es braucht in Wahrheit vielmal mehr als 28 Stunden, damit 0,1 mm tonig-lehmiger Rückstand von der Dolinenoberfläche ausgeflockt werde. Der Lösungsrückstand wird also mit dem Wasser,

[1]) Katzer, Karst und Karsthydrographie, Sarajewo 1909, S. 11 ff. (Zur Kunde der Balkanhalbinsel, H. 8.)

das ebenfalls den Abzug nicht ausfüllt, selbst wenn es im Durchschnitt der Dolinenfläche 1 mm tief ist, einfach in die Tiefe geschwemmt. Selbst wenn eine schon 1 km² große Doline nur die einzige Abzugsmöglichkeit von 1 cm² Querschnitt hätte, genügt dieser, um allen Lösungsrückstand ohne weiteres fortzuführen. Nun finden wir aber in vielen Dolinen Lockermassen in der Mitte angereichert. Der von den Pflanzen in langen Zeiten abgelagerte Humus, ferner was der Wind hineinweht, erleidet nur an seiner Oberseite eine gewisse Abspülung und diese Lockerstoffe werden dadurch in der Mitte der Doline bis zur Zeit der nächsten Einsackung mächtiger. Unter dem Humus ist die Wasserbewegung so langsam, daß es nicht verwundert, wenn dort Lehm gefunden wird, der als Lösungsrückstand gedeutet werden muß. Auch er kann sich anreichern, eben weil er im bedeckten Karst nicht so rasch abgespült wird, sondern in der Doline bleibt. Das ist aber gerade auch die Ursache, warum die Abzugsröhre lang ohne Ausfüllung bleibt, bis schließlich der Lehm mit der Erde nachsackt. Er folgt damit nur der andauernden Auslaugung der Röhren mit einer gewissen Verspätung nach. Daß schlammreiche Bäche in Dolinen verschwinden, gehört zwar nicht zu den hier betrachteten normalen Erscheinungen dieser Karstformen, aber es kann erwähnt werden, weil selbst dann die Verstopfung der Klüfte meist nicht so weit geht, den Abzug für das Wasser unwegsam zu machen. Es genügt meist der Druck einer zeitweiligen Ueberschwemmung, um ihr schließlich einen, wenn auch verlangsamten Abfluß zu ermöglichen. Im Adriatischen Karst findet man heute *nach* dem Schwinden des Waldes Roterde (terra rossa) in den Dolinen, auch als Ausfüllung geologischer Orgeln. Schon die oben erwähnten Erwägungen über Volumen und Geschwindigkeiten, zu denen mich in Wien der Mineraloge Prof. H. Leitmeier angeregt hat, erlauben es nicht, diese verbreitete Roterde als Lösungsrückstand der Karstgesteine anzusehen. Es bedürfte dazu vielleicht nicht einmal der mineralogisch-chemischen Einwände, wie wir sie den Forschungen zuständiger Fachleute verdanken.[1]) Da der Geograph mit Einschwemmungen der Bäche bei den heutigen Dolinen nur im Ausnahmefall arbeiten kann, so muß er die rezenten Roterdebildungen, soweit sie nicht ganz umgewandelte Reste einstigen Waldgrundes enthalten, als Staubablagerung ansehen. Staubablagerungen werden, wie selbst im Walde jeder eine Woche alte Schnee lehrt, zeitweilig überall viel rascher herangebracht, als sich der Lösungsrückstand bilden könnte. Anderseits

[1]) Vgl. die Arbeiten von Wilh. Graf zu Leinigen-Westerburg, Prof. an der Hochschule für Bodenkultur in Wien, bes.: Ueber die Einflüsse von äolischer Zufuhr auf die Bodenbildung (mit bes. Berücks. d. Roterde), Mitt. der Geol. Ges. Wien, VIII 1915, hg. 1916, S. 139 ff.

unterliegt dieser Staub, wo es an gewöhnlicher Erde mangelt, einer raschen Abspülung und Einschwemmung und es ist durchaus nicht zu verwundern, wenn er im entsprechenden Klima als terra rossa in der Mitte der Dolinen versammelt gefunden wird und sich in ihren Abzugsklüften festsetzt, im Gegensatz zum spärlich erscheinenden, flüchtigen Lösungsrückstand oder zur Humuserde im bedeckten Karst, welche noch von Pflanzenwurzeln festgehalten wird. Wieder ist zu erinnern, daß eine « Verschmierung » mit Roterde ebenfalls *nicht* die Sperrung weitern Wasserabzuges bedeuten muß. Ich sah in der Roterde, die am Straßeneinschnitt bei Opčina über Triest geologische Orgeln ausfüllt, schöne Kalzitdrusen, die das in den Fugen der Roterde bewegte Wasser abgesetzt hatte, nachdem es anderswo den Kalk gelöst hatte. Seit wir von dem Verhalten, der Herkunft und Bedeutung der Lockermassen und des Lehmes in Dolinen mehr wissen, als Cvijić oder v. Sawicki wissen konnten, hat jede Vorstellung eines gesetzmäßigen Alterns und Reifens der Dolinen, sowohl im adriatischen als auch im mitteleuropäischen Klima ihre Stützen verloren. Eine Doline kann ferner nicht nur bis zum tiefsten Stand des Karstwasserspiegels, sondern so tief hinabwachsen, als das Wasser, das in ihr verschwindet, zu fernen Quellen abströmen kann, d. h. eine Doline kann bis zur untersten Druckströmung des Karstwassers hinabgreifen, selbst wenn diese Strömung zu den tiefsten Quellen erst *auf*steigen muß. Weder aus eigener Anschauung noch aus Beschreibungen kenne ich einen einzigen Fall, wo die Vermutung Nahrung gefunden hätte, daß eine Doline irgendwo ihre größte theoretische Tiefe erreicht hätte, ehe sie durch neue Hebungen des Gebirges emporgetragen wurde. Wo wir eingeschachtelte Dolinen finden, sind die Gruben nichts « Reifes » oder « Altes » gewesen, auch wenn die eingeschachtelten kleinen Dolinen wirklich infolge *neuer* Spalten und Risse erst nachträglich entstehen konnten.

Mit alledem ist nicht gesagt, daß der Wasserabzug in Dolinen in gewissen Fällen nicht wirklich gesperrt werden kann, so daß solche Dolinen als Einzelformen ohne Rücksicht auf die Ereignisse ringsum aufgefüllt werden und sich ganz verflachen. Nur ist das nicht das ableitbare Schicksal aller oder der meisten. Man findet in den österreichischen Voralpen und Hochalpen dauernd *versumpfte* Dolinenböden ohne Bachzufuhr. Nur in sehr trockenen Sommern verzehrt die *Verdunstung* ihre Nässe. Vor solchen Erscheinungen ist zu bedenken, daß möglicherweise die Hebungen durch gleichzeitige Felsverschiebungen die einstigen Abflußwege dieser Dolinen *verriegelt* oder dem Wasser neue Wege gewiesen haben; dieser Gedanke findet an ganzen Höhlen, die durch Harnische wie zugemauert erscheinen,

einen gewissen Halt. Die « tektonische » Verjüngung der Landschaft im ganzen kann also viele einzelne Dolinen sogar zum Absterben bringen und ihnen ein vorher nicht vorhandenes « gealtertes » Aussehen verleihen. Aber auch ohne Krustenbewegungen muß ein solches Dolinenschicksal als möglich erklärt werden. Unter Umständen, die noch nicht ganz aufgeklärt sind, scheidet das Wasser den gelösten Kalk in vielen Fugen selbst wieder ab, sei es, wo ein Luftzug es verdunsten läßt, sei es, wo ihm CO_2 entzogen wird. Jedenfalls wird — nicht durch Einschwemmungen von Lehm und Erde, sondern durch die *Versinterung* — eine Anzahl ursprünglich durchfließbarer Klüfte und Röhren wieder gesperrt. An welcher Anordnung der Gesteinsfugen es liegt, daß dies nicht bei allen in gleichem Maße, bei vielen gar nicht geschieht, wissen wir nicht. Es handelt sich da um Bedingungen, welche das Wasser bei Beginn seiner Tätigkeit mit antreten muß. Gewisse Dolinen setzen also an Klüften ein, die als Abzugsbahnen des Wassers von Natur aus zur Kurzlebigkeit verurteilt sind. Die verengten Fugen führen schließlich kein oder so wenig Wasser ab, daß sie mit ihm gefüllt sein müssen, freilich in Gestalt einer spärlichen Feuchtigkeit. An der Oberfläche ist inzwischen jedes Nachsacken unmöglich geworden, die Abspülung von den Gehängen erhöht den Dolinenboden in der Mitte und zugleich vermoort er. Das meiste Wasser kann nur noch durch Verdunstung aus der Hohlform entweichen. Die Gehänge werden flacher. Es ist ganz beachtenswert, was unter solchen Umständen aus einem Trichter werden kann. Folgendes ergibt eine leichte Rechnung. Wenn durch Abflachung der Gehänge der obere Durchmesser der Doline auf das Dreifache gewachsen ist, so ist die aufgefüllte Doline in der Mitte nicht einmal mehr $^1/_{10}$ so tief wie der ursprüngliche Trichter. Man kann sich in jedem Karst leicht überzeugen, daß durch diese Vorgänge für die wenigsten Schüssel- und Muldenformen eine brauchbare Erklärung geboten würde.[1]) Die Abspülung führt also im nackten Karst im Fall der Abbildung 3 die normalen Formen der Dolinen *nicht* herbei. Im bedeckten Karst liefert sie im Verein mit dem Schuttkriechen entweder die Anhäufung von Lockermassen für die Nachsackungen, welche als der *leitende* Vorgang der Dolinenbildung erscheinen, oder — wo diese Nachsackungen über versinterten Röhren aufhören müssen — ist die Abspülung nicht der Erzeuger, sondern der Totengräber der Dolinen, der allerdings schon vorher durch verwischte Formen sein Ziel anzeigt.

[1]) War der Trichter 10 m tief, bei 35 m Durchmesser, so ist die Mulde, die aus ihm entstanden ist, bei 105 m Durchmesser kaum 1 m tief, also morphologisch kaum erkennbar. Dieselben Verhältnisse gelten ohne Einfluß der absoluten Größen allgemein.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

1. Die echten und normalen Dolinen, d. h. diejenigen mit rundlichen Umrissen und glatten Gehängen, in denen kein Fluß oder Bach verschwindet, sind *unter einem Lockerboden* entstanden, welcher wohl in den meisten Fällen ein Waldboden war.

2. Sie bilden sich über klüftigem, der Lösung verfallendem Karstfels, indem der Lockerboden entweder langsam nach*sinkt* oder in wiederholten, von Zeiten der Ruhe unterbrochenen *Rucken* in die Tiefe *sackt,* bzw. zusammensitzt. Diese Vorgänge beleben Schuttkriechen und Abspülung, ohne daß es zur Ausfüllung der Doline kommt.

3. Das *langsame Nachsinken* geschieht nach v. Terzaghis Abhandlung über gleichmäßig dicht zerklüftetem Karstfels, wenn eine ursprüngliche Mulde im Waldboden oder, wie ich meine, auch ein durch längere Zeit besonders nasser Fleck die Wasserwirkung im spätern Dolinenraum verstärken. Der Fels wird zwischen und an den Klüften durch chemischen Abtrag niedergebracht (vgl. Abb. 2).

4. Das *ruckweise Nachsacken* bzw. Zusammensitzen geschieht über Fels, der an gewissen, eng begrenzten Stellen gleich zu Anfang geradezu eine röhrenförmige Abzugskluft zunächst von eckig rauhem Querschnitt besitzt oder an dichtern Klüften sich spaltet. Im ersten Fall rutschen Lehm- und Erdzylinder mit kleinern steinigen Beimengungen in die gleichgeformte, aber zu weit gewordene Abzugskluft. In ihr kann zwischen der Füllmasse und der felsigen Röhrenwand die Auslaugung des Gesteins weitergehen. Im zweiten Fall beteiligen sich bedeutende Massen von Grobschutt und Blöcken an dem Zusammensitzen, welches der Erweiterung der Klüfte entgegenwirkt (vgl. Abb. 4 und 6).

5. Das ruckweise Nachsacken und Zusammensitzen tritt regelmäßig vereint auf und umfaßt Erde und grobes Blockwerk, wenn die nach unten führende Röhre zugleich ein Schlot über einer Höhle ist, der manchmal von unten Druckwasser in die Dolinensohle treten läßt. Dieser Vorgang ist an der Oberfläche ein *Erdfall* im engern ausgezeichneten Sinne. Der Name gilt im Volksmunde für die erzeugte Bodenform. Ihre Erkenntnis verdankt man R. Trampler.

6. Die Dolinen entwickeln sich zur *Trichterform im Falle des langsamen Nachsinkens* nur beim Vorhandensein der von Terzaghi vorausgesetzten ursprünglichen Mulde beliebiger Herkunft im Waldboden. Sonst sind Trichter nur dort zu erwarten, wo auf engem Raume sich das ruck-

weise Zusammensitzen oder Nachsacken wiederholt. Im Falle des langsamen Nachsinkens bleiben in steiler werdenden Trichterformen belebtes Schuttkriechen und Abspülung nicht aus. Sie füllen die Doline nur deswegen nicht auf, weil viele inzwischen erweiterte Klüfte alles Gelöste aufnehmen und genügend viel Lösungsrückstände fortführen.

7. Steile Kesselformen und sehr *steile* Muldenformen gehen der Trichterform voraus, wenn *zuerst* eine *zylindrische Oberflächendoline* vorhanden war, ferner bei bedeutenden Erdfällen, wo die Bewegung einen größern Teil des Dolinengrundes bei der Vertiefung umlagert.

8. *Flache* Mulden und Schüsselformen mit geringer Bodendecke gehen nach Terzaghis Lehre den Trichterformen voraus, wenn der Humusboden langsam nachsinkt. Schuttkriechen und Abspülung sind hier von nebensächlicher Bedeutung. Breite Schüsselmulden ziehen sich über viele Klüfte hinweg, beweisend, daß hier der Kalk auf *breiter* Fläche chemisch niedergebracht wurde. Flache Mulden und Tellerformen können mit sehr *beschränkten,* wenig veränderlichen *Größenverhältnissen* auch als theoretische Alterserscheinungen anderer, besonders trichterförmiger Dolinen vorkommen, wenn diese entsprechend aufgefüllt und am Rande abgeflacht werden. Diese Entartung ist Einzelschicksal auf Grund besonderer Vorgänge in der Tiefe und muß nicht mit gleichlaufenden Vorgängen in der übrigen Landschaft zusammenfallen. Als Ursache darf oft Versinterung der Fugen vermutet werden.

9. Wo in große flache Dolinen kleine steile eingeschachtelt sind, beweisen weder die flachen großen Formen ein vorgeschrittenes Alter der Landschaft in früherer Zeit, noch sind die kleinen das Merkmal einer wiederbelebten Hebung. Die kleinen können sich unter Mithilfe zerfallender Schneeflecke im Hochgebirge *zugleich* mit den großen entwickeln oder auch später, wenn neue tektonische Spalten hinzukommen.

10. Krustenbewegungen können nicht nur neue Spalten schaffen, sondern auch alte schließen. Dolinenformen müssen sich unter dem Einfluß dieser beiden Möglichkeiten in ganz verschiedener Richtung weiterentwickeln; sie können auch auf diese Art schließlich verwischt werden.

Erklärungen zu den nachstehenden Bildern.

Bild 1. Karrendolinen, verdeutlicht durch die kleinern, meist viereckigen Schneeflecke. Aussicht vom Großen Rinnerkogel (2008 m) im Toten Gebirge nach S.

Bild 2. Kesseldoline von 1½ bis 2 m Tiefe im westlichen Teil des Kasbergs, oberösterreichische Voralpen. Meereshöhe der Doline rund 1500 m.

Bild 3. Schüssel- oder Muldendoline, etwa 200 m breit, mit der Wildenseealp im Toten Gebirge (rund 1530 m hoch). (Der Bretterbau der Almhütten anstatt des sonst auch in den Ostalpen üblichen Blockbaues weist auf die strenge Sparsamkeit mit dem Holz des Karstwaldes. Wohngelasse im ersten Stock über den wärmenden Ställen.

Bild 4. Große Muldendoline, bis an 100 m lang, mit (12) eingeschachtelten Regenschluckstellen von mulden- bis kesselförmigem Aussehen. Höhe um 1650 m im Toten Gebirge.

Leere Seite
Blank page
Page vide

Bild 1. Karrendolinen. Aussicht vom Großen Rinnerkogel (2008 m) im Toten Gebirge nach S.

O. Lehmann

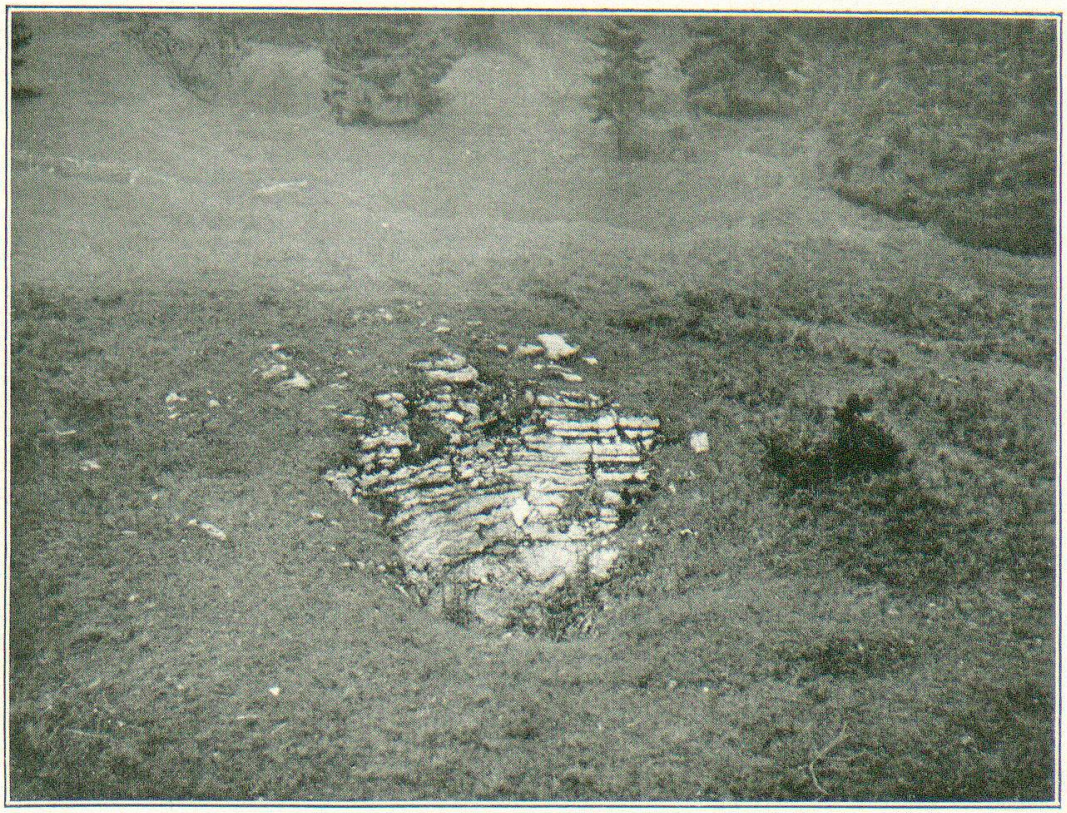

Bild 2. Kesseldoline im westlichen Teil des Kasbergs, oberösterreichische Voralpen.

O. Lehmann

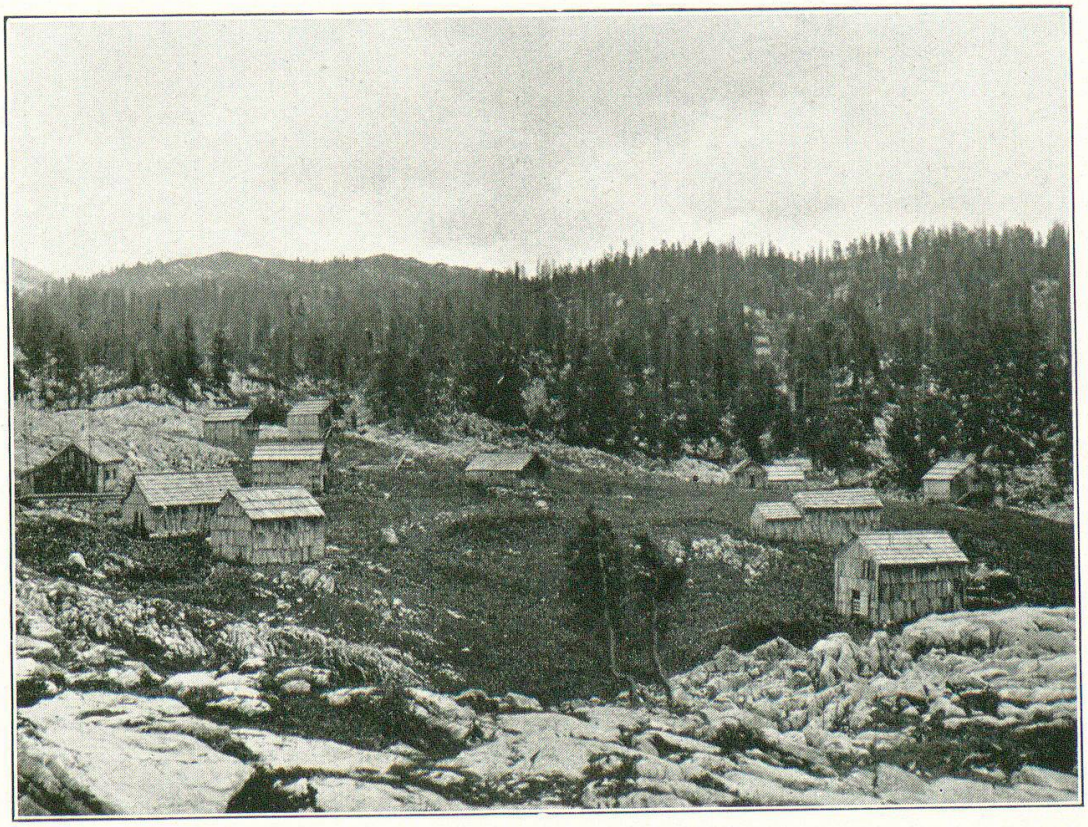

Bild 3. Schüssel- oder Muldendoline mit der Wildseealp im Toten Gebirge (rund 1530 m hoch).

O. Lehmann

Bild 4. Muldendoline im Toten Gebirge mit eingeschachtelten kleinen Dolinen. Höhe um 1650 m.