universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Höhlenkunde

Knebel, Walther von

Braunschweig, 1906

Dreizehntes Kapitel. Die Entstehung von Höhlenflüssen

urn:nbn:at:at-ubi:2-3838

Sie sind auch bisher niemals direkt nachgewiesen worden, vielmehr gibt sich ihr Vorhandensein nur gelegentlich durch das Auftreten von Brackwasserquellen zu erkennen. Diese naturgemäß nur sehr viel unbedeutenderen Meeresschwinden würden nicht zu der Reihe der Karstphänomene zu zählen sein.

Die echten Meeresschwinden aber, welche bisher beobachtet wurden, sind Karstphänomene. Sie sind in zwiefacher Hinsicht von großer Bedeutung: Einmal liefern sie den **sicheren Beweis für die Existenz unterirdischer Höhlenflüsse** und zweitens geben sie uns Zeugnis von einer wichtigen Kraft, der **Saugkraft der Quellen.**

Dreizehntes Kapitel.

Die Entstehung von Höhlenflüssen.

Übergang des Grundwassers in einen Höhlenfluß. — Zerklüftungszonen. — Grundwasserströme. — Höhlenfluß und Grundwasserstrom. — Entstehung der Zerklüftung. — Experimente Daubrées. — Zerklüftungszonen im Fränkischen Jura. — Zerklüftungszonen und Grundwasserströme in der Paderborner Hochfläche. — Saugkraft der Quellen. — Quellströme und deren Saugkraft. — Entstehung der Flußponore durch die Saugkraft unterirdischer Flüsse. — Rückwärtsschreitende Korrosion. — Nachlassen der Saugkraft bei zunehmender Verkarstung. — Zusammenfassung.

Da die Höhlen, welche den Flüssen des Karstes als Flußbetten dienen, nicht primär im Gestein vorhanden waren, sondern später durch das fließende Wasser als Erweiterungen von Spalten sich gebildet haben, ist die Frage nach der Entstehung der Höhlenflüsse zugleich die nach der Entstehung der Höhlen selbst.

In den stark zerklüfteten Karstgesteinen rieselt das Wasser auf den Spalten von der Oberfläche zur Tiefe, um dort in das Grundwasser überzugehen. Auf dem Wege, den es dabei zurücklegt, entfaltet es, wie wir gesehen haben (vgl. Kap. V), seine Korrosionstätigkeit und schafft sich Höhlungen im Gestein, welche als Abzugskanäle in die Tiefe führen. So entstehen einerseits

die sogenannten Naturschächte, andererseits jene Höhlen, welche als mehr oder weniger große Erweiterungen von Spalten anzusehen sind, deren Böden aber ein so verschieden gerichtetes Gefälle besitzen, daß sie niemals fließendem Wasser als Flußbett gedient haben können.

Jene Höhlen aber, welche als unterirdische Flußbetten auftreten, können, wie ihre Längserstreckung innerhalb einer ziemlich horizontalen Ebene anzeigt, ursprünglich nur dort angelegt sein, wo das Wasser der Niederschläge in das Grundwasser übergehend in horizontaler Richtung weiterströmt. An der Grenze der Vertikalentwässerung, da wo diese in die Horizontalentwässerung übergeht, also im fließenden Grundwasser des Karstes, können die Wasserhöhlen allein sich gebildet haben.

Es war in dem Abschnitt über Grundwasser und Quellen (S. 20) gezeigt worden, daß das Grundwasser eine bestimmte Strömungsrichtung besitzt, und zwar von der Mitte zum Rande der Gebirgsteile hin, wo es in Quellen zutage tritt. Aus dieser langsamen Strömung des in engen Spalten sich bewegenden Grundwassers muß sich nun im Laufe der Zeit ein echter Fluß gebildet haben, welcher einen tunnelartigen Höhlengang sich zum Flußbett geschaffen hat. Die Frage, wie dies geschehen, ist das wichtigste Problem, welches das Auftreten von Höhlenflüssen der Forschung stellt. Wir wollen versuchen, der Lösung dieses Problemes näher zu treten.

Bei Annahme vollständig gleichmäßiger Zerklüftung muß das Grundwasser die Neigung haben, innerhalb des Netzes von Spalten von allen Seiten her auf dem kürzesten Wege — also radial — zu den Quellen hinzuströmen. Wenn die Bewegung aber von allen Seiten her gleichmäßig erfolgt, ist leicht einzusehen, daß sich Höhlenflüsse auf diesem Wege nicht bilden können. Denn zur Entstehung dieser ist erforderlich, daß gewisse Stromwege derart begünstigt sind, daß das strömende Grundwasser sie immer wieder benutzt und so in unterirdische Flußbetten umwandelt.

Die Möglichkeit zur Entstehung von unterirdischen Flüssen ist vielmehr nur dann gegeben, wenn die Klüfte nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern wenn bestimmte Zonen vorhanden

sind, welche sich durch einen höheren Grad von Klüftigkeit auszeichnen. Dann wird das Wasser vorwiegend in diesen Bruchzonen sich bewegen, weil der Reibungswiderstand in diesen ein geringerer ist.

Wenn also im Gestein zwischen minder zerklüfteten Massen Zonen stärkerer Zerklüftung vorhanden sind, dann können letztere als zur Entstehung von unterirdischen Flußbetten gleichsam prädestiniert angesehen werden.

Nun scheinen die verschiedenerorts gemachten und durch Experimente bestätigten Beobachtungen darauf hinzuweisen, daß solche Zerklüftungszonen tatsächlich auftreten, ein Umstand, auf welchen später noch zurückzukommen ist.

Da das Wasser in diesen Zerklüftungszonen sich weit schneller bewegt, als im übrigen Grundwasser, so wird es hier auch seine Korrosionstätigkeit in höherem Maße entfalten. Dadurch werden die vorhandenen Klüfte dieser Zonen beständig erweitert, so daß sie in ständig zunehmendem Maße vom fließenden Grundwasser in Anspruch genommen werden, bis sie schließlich die unterirdische Drainage allein vermitteln und die benachbarten Gebiete mit geringerer Zerklüftung nur noch feinere Wasseradern dem Hauptdrainagesystem tributär zusenden.

Diese in besonderen Zerklüftungszonen sich bewegenden Grundwassermassen seien kurzweg Grundwasserströme benannt.

Man kann die Grundwasserströme auch als unterirdische Flüsse bezeichnen, wenn auch noch nicht als Höhlenflüsse. Denn solche Grundwasserströme können auf die angegebene Weise in vielen Gesteinen sich bilden, während echte Höhlenflüsse nur in Karstgesteinen vorkommen. Denn nur in diesen vermag das Wasser die Spalten in größere Tunnelhöhlen zu verwandeln, so daß Höhlenflüsse entstehen.

Der Übergang der Grundwasserströme in Höhlenflüsse ist also, wie aus dieser Entstehungsart hervorgeht, kein unvermittelter, sondern ein allmählicher. Der Höhlenfluß ist das Endergebnis eines lange zuvor eingeleiteten Prozesses.

Das erste Stadium desselben ist durch die Entstehung eines Grundwasserstromes gekennzeichnet.

Das zweite Stadium ist die Erweiterung einzelner der Spaltenkanäle des Grundwasserstromes in Tunnelhöhlen.

Da dieser Prozeß nur allmählich vor sich geht, erscheint es als ganz selbstverständlich, daß zuweilen ein Höhlenfluß plötzlich in einzelne Spalten übergehen kann, zwischen welchen er eine gewisse Strecke eingeengt dahinfließt, um dann aber wieder ein Höhlenfluß zu werden. In einem solchen Fall ist die Umwandlung eines Grundwasserstromes in einen Höhlenfluß noch als unvollständig anzusehen, da noch Strecken darin vorkommen, an welchen das ursprüngliche Grundwasserstrombett beibehalten ist.

Grundwasserströme sind in Karstgebieten also gleichsam embryonale Höhlenflüsse, und diese „ausgewachsene" Grundwasserströme.

Die hier niedergelegte Auffassung unterscheidet sich wesentlich von der im XI. Kapitel erörterten Grundwassertheorie. Denn nach dieser wird ein Übergang des Höhlenflusses in das allgemein verbreitete Grundwasser angenommen, während nach unserer Auffassung der Übergang nicht in dieses, sondern in einen Grundwasserstrom erfolgt, welcher nach einiger Zeit in einen echten Höhlenfluß übergeht, bzw. übergehen kann. Die Grundwasserströme sind eben nichts anderes, als unterirdische Flüsse, deren Wasser indessen vielfach in zahlreiche Arme gegabelt dahinfließt. Bald vereinigen sich die Arme zu einem Höhlenfluß, bald teilen sie sich wieder und es entsteht ein Grundwasserstrom. Es bleibt unbestimmt, ob nicht viele der als „Siphone" bekannten Unterbrechungen der Höhlenflüsse Reste aus jener Zeit sind, als der gesamte Fluß ein Grundwasserstrom war.

Im Laufe der Zeit wird jedenfalls der Grundwasserstrom immer mehr zum Höhlenfluß werden, falls nicht etwa die Höhle durch Einstürze zuvor verschüttet wird.

Die hier ausgeführte Erklärung der Entstehung von Höhlenflüssen beginnt jedoch mit einem „Wenn". Wenn die Gesteinsmassen eines Gebirges derart zerklüftet sind, daß neben der das ganze Gebiet gleichmäßig durchsetzenden Zerklüftung noch besondere Zonen existieren, in welchen die Klüftigkeit eine ganz besonders starke ist, dann können Grundwasserströme in der angegebenen Weise entstehen. Gibt es aber wirklich in den Gesteinen Zonen größerer Zerklüftung zwischen solchen ge-

ringerer, oder sind alle Teile eines größeren Gebietes in gleichem Maße zerklüftet? Diese Frage ist nicht einfach zu beantworten, da die Zerklüftung an der Oberfläche nur selten auf große Strecken zu beobachten ist.

Wie jedoch schon angedeutet, sprechen sowohl Experimente als auch Beobachtungen für die erstere Ansicht.

Die Entstehung der Zerklüftung; Experimente A. Daubrées; Zerklüftungszonen. Die Zerklüftung der Gesteine ist, wie bereits ausgeführt wurde (Kap. III u. IV), von der chemischen Beschaffenheit derselben abgesehen, die Hauptbedingung zur Entstehung der Höhlen und Karstphänomene. Die Entstehung der Klüftigkeit ist somit eine Frage, welche für das Verständnis des Höhlenphänomens von hoher Bedeutung ist.

Die Ursachen der Zerklüftung können einerseits im Gestein selbst (endogen) zu suchen sein, andererseits kann die Zerklüftung auch durch von außen her wirkende Kräfte (exogen) hervorgebracht sein.

Als endogene Zerklüftung ist zum Beispiel die Spaltbarkeit vieler Eruptivgesteinsmassen in Säulen oder Würfel zu betrachten. Diese Klüftigkeit ist eine Folge der durch Erstarrung des Magmas bewirkten Kontraktion.

Ebenso sind die sogenannten Trockenrisse, welche durch Volumverminderung eines schlammigen Gesteines oder besser Gesteinsbreies infolge der Verdunstung seines Wassergehaltes entstanden sind, als endogene Zerklüftungsursachen zu nennen. Trockenrisse kommen in der Natur ja allerdings vor, aber niemals können sie eine Zerklüftung im Gestein hervorbringen, so beträchtlich, daß Höhlen durch Erweiterung der Klüfte sich bilden können.

Zu den endogenen Zerklüftungsursachen muß auch die Dolomitisierung gezählt werden. Es ist nämlich von vielen Dolomitmassen mit einem hohen Grad von Wahrscheinlichkeit gezeigt worden, daß sie aus Kalk durch Infiltration magnesiaführender Gewässer in Dolomit verwandelt worden sind. Dieser Vorgang, die „Dolomitisierung" genannt, muß mit einer nicht unbedeutenden Volumverminderung verbunden gewesen sein. Denn das spezifische Gewicht des Kalkes beträgt **2,7**, das des

Dolomites **2,9** [1]). Es muß also die Kalkmasse nach ihrer Dolomitisierung um etwa $^1/_8$ ihres Volumens zusammenschrumpfen. Da die Kalke jedoch feste Gesteine sind, so wird die Volumverminderung durch Entstehung von Rissen und Klüften sich aussprechen. Die hochgradige Zerklüftung vieler Dolomitgesteine ist möglicherweise zum Teil wenigstens auf diesen Vorgang zurückzuführen. Dabei muß aber in Betracht gezogen werden, daß die stattgefundene Dolomitisierung eines Kalkes nur mit einem höheren oder geringeren Grade von Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann. In vielen Fällen sprechen jedenfalls unzweideutige geologische Beobachtungen dafür, daß der Dolomit sich unmittelbar als solcher niedergeschlagen hat, und daß er nicht durch chemische Metamorphose aus Kalk hervorgegangen sein kann. Abgesehen davon müssen wir erwähnen, daß die als metamorph angesehenen Dolomite im allgemeinen sehr porös sind; mithin kann die bei der Umwandlung des Kalkes in Dolomit vorgegangene Volumverminderung sich durch die Bildung der zahlreichen Poren kundgeben. Gleichwohl kann aber auch die Zerklüftung wenigstens zum Teil durch die Dolomitisierung hervorgebracht sein. Die durch den Dolomitisierungsvorgang hervorgerufene Zerklüftung bildet den Übergang zwischen der Zerklüftung aus endogenen und exogenen Veranlassungen. Denn die Schrumpfung ist endogen, die Herbeischaffung magnesiahaltiger Gewässer aber ist eine exogene Zerklüftungsursache. Ob eine Pressung durch Gebirgsdruck, also eine typisch exogene Zerklüftungsursache, oder ob chemische Kraft, nämlich die Neigung der durch die Wasser infiltrierten Magnesialösung, mit Kalk Doppelverbindungen einzugehen, die Zerklüftung bedingt, ist insofern das gleiche, als beides von außen her (exogen) wirkende Kräfte sind.

Ungleich wichtiger, als die endogenen Zerklüftungsursachen sind jedenfalls die exogenen. Die Kraft, welche sie bedingt, ist der Gebirgsdruck. Dieser wird auf die allmähliche Erstarrung unseres noch warmen Erdinnern und die dabei sich vollziehenden Schrumpfungsvorgänge zurückgeführt. Der Gebirgsdruck, oder

[1]) Die Zahlen der spezifischen Gewichte sind nur annäherungsweise angegeben. Da in der Natur die Gesteine niemals chemisch rein sind, genügt dies vollkommen. Reiner Kalkspat hat ein spez. Gew. = 2,72, Dolomit aber 2,90.

allgemein ausgedrückt, die tektonischen Kräfte wirken tangential zur Erdoberfläche; sie äußern sich also in horizontalem Schub. Dieser wiederum bewirkt, daß die Erdkruste in Falten zusammengeschoben oder heftig gepreßt wird. Faltung an einem Widerlager erzeugt häufig Torsion.

Als Produkt dieser tektonischen Vorgänge müssen wir im allgemeinen die Zerklüftung ansehen. Hierfür sprechen vornehmlich folgende vier Umstände:

1. die hohe Zerklüftung in tektonisch stark gestörten Gebieten;
2. die verhältnismäßig höhere Zerklüftung längs größeren Bruchlinien der Erdkruste;
3. die auf großen Flächen völlig parallel streichenden Klüfte, deren Richtung sich zumeist auch nur mit einer stattgehabten Richtungsänderung im Gebirgsdruck wechselt;
4. der häufige Übergang der Klüfte in benachbarte Gesteine verschiedenen Alters und oft auch verschiedener Entstehung.

Der Gebirgsdruck wirkt in zweierlei Weise:

1. durch einfachen Druck: Anfänglich entsteht eine einfache Pressung; bei Erhöhung des Druckes tritt Faltung ein;
2. durch Torsion; diese entsteht, wenn mit der Faltung auch zugleich eine Drehung um eine gedachte horizontale Achse erfolgt. Die Torsion wird beispielsweise dadurch verursacht, wenn die Faltung der Erdkruste durch irgend ein anderes Gebirgsmassiv gestaut wird, oder wenn der eine Teil der gefalteten Flächen sich senkt, bzw. der andere sich hebt usw.

Beide Formen des Gebirgsdruckes sind häufig in der Natur zu beobachten. Ihre Wirkungen sprechen sich auch in der für die Entstehung der Höhlen so wichtigen Zerklüftung der Gesteine aus.

Wir folgerten aus dem Vorhandensein der in den Klüften sich bewegenden Grundwasserströme, daß die das Gestein durchsetzende Zerklüftung nicht gleichmäßig verteilt sein könne, sondern daß sie ganz besonders gewisse Zonen betroffen habe, welche wir als Zerklüftungszonen bezeichneten; dies soll im folgenden dargetan werden.

A. Daubrées Experimente [1]). Die Wirkungen tektonischer Kräfte sind von A. Daubrée experimentell nachgeahmt worden. Die Ergebnisse der Experimente liefern wichtige Fingerzeige für die uns beschäftigende Frage nach dem Vorhandensein von Zerklüftungszonen.

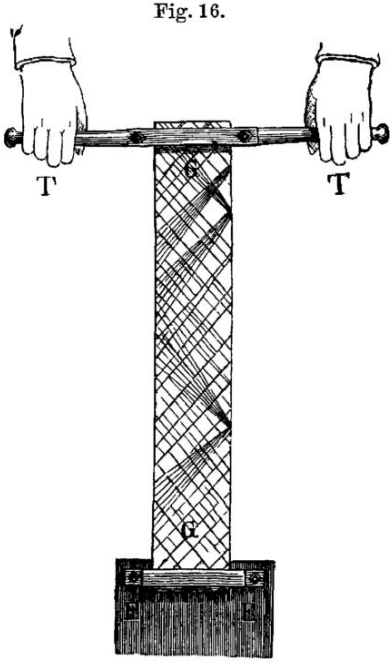
Fig. 15.



TT Drehschlussel, *G* Glasscheibe.

Um die Wirkung der Torsion auf die Schichten der Erdkruste zu ermitteln, hat Daubrée Scheiben von Spiegelglas, wie nebenstehende, Daubrées Werk entnommene Fig. 15 zeigt, eingespannt und einer leichten Torsion unterworfen [2]).

Fig. 16.



Die Art und Weise, wie die Spiegelglasscheibe durch Torsion gesprengt wurde, läßt die Fig. 16 erkennen.

In Hinsicht auf die die Scheibe durchsetzenden Sprünge ist folgendes wahrgenommen worden:

1. Die Sprünge verlaufen (streichen) in zwei Hauptrichtungen, welche einander unter sehr großen Winkeln (stets über 70°) schneiden. In der Natur wird gleiches bezüglich der Gesteinsklüfte ganz allgemein beobachtet.

---

[1]) A. Daubrée, Synthetische Studien zur Experimentalgeologie. Braunschweig 1879, Friedr. Vieweg u. Sohn.

[2]) Die Dimensionen der Scheiben waren beträchtliche: 90 cm lang, 3,5 bis 12 cm breit und 0,7 cm dick. Damit das Glas bei der Torsion nicht zersplitterte, wurde es zu beiden Seiten mit aufgeleimtem Papier belegt.

2. Es gibt neben der allgemeinen Zerklüftung der Platte auch Sprünge, welche eigentümlich geschart auf gewisse Zonen beschränkt sind. In diesen sind die zahlreichen Sprünge unter schwacher Divergenz rutenförmig angeordnet. Das sind Zerklüftungszonen analog jenen, welche wir in der Tiefe des Gebirges, da wo Grundwasserströme sich bewegen, vermutet haben.

3. Die Sprünge sind verschiedenwertig; einige haben zu einer völligen Zerreißung der Platte geführt, andere sind kaum angedeutet. Sie erreichen oft gar nicht einmal die Oberflächen der gedrillten Scheibe. Eine gleiche Verschiedenheit des Grades der Zerklüftung läßt sich auch in der Erdkruste vielfach beobachten.

4. Die Sprünge sind schiefe Flächen, wie die Fig. 17, der Querschliff durch die Platte (nach Daubrée), zeigt.

5. Die Sprungflächen sind keine Ebenen, sondern oft stark gedrehte Flächen, deren Streichrichtung allerdings nur unbe-

Fig. 17.



deutend wechselt. An verschiedenen Stellen besitzen sie aber ein ganz verschiedenes Einfallen.

6. Bei gewissen Gruppen von Sprüngen läßt sich jedoch auch ein Parallelismus der Spaltflächen erkennen.

Ganz ähnliche Wirkungen wie durch Torsion hat Daubrée durch das Experiment mittels einfachen Druckes erzielt. Hierzu wurden aus Formwachs geschnittene Würfel unter der hydraulischen Presse starkem Druck unterworfen.

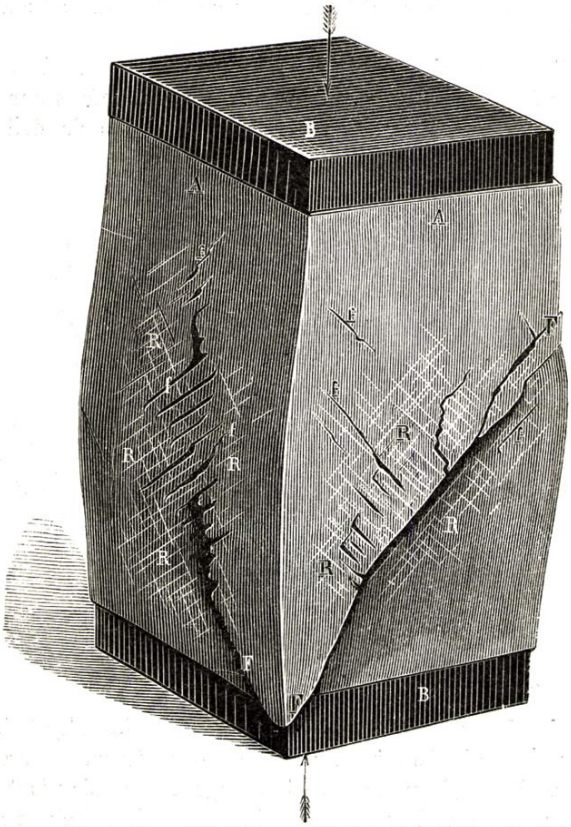
Das Ergebnis war, daß auch hier Spaltensysteme entstanden, welche aufeinander senkrecht stehen. Die Spaltungsflächen sind, wie die Versuche lehrten, stets um etwa 45° gegen die Druckrichtung geneigt. Die hier wiedergegebene Abbildung Daubrées erläutert trefflich die von ihm erzielten Druckwirkungen (Fig. 18).

Auch die zu technischen Zwecken mit Gesteinswürfeln vorgenommenen Druckproben liefern zuweilen merkwürdige Spaltungserscheinungen. Denn auch hier wird der Block oft, namentlich bei harten Gesteinen, in vertikal aufeinander stehende Sprünge zerlegt, wie unsere, ebenfalls Daubrées Experimentalgeologie entnommene Abbildung (Fig. 19) deutlich wiedergibt.

Die durch das Experiment gewonnenen Ergebnisse decken

sich vollkommen mit den Beobachtungen in der Natur. Daß die Klüfte parallel angeordnet sind und aus zwei senkrecht zueinander streichenden Systemen bestehen, ist vielerorts beobachtet worden. Auch die übrigen Ergebnisse der Daubréeschen Experimente,

Fig. 18.



Zerpreßter Würfel von Wachs (nach Daubrée).

namentlich die Wirkungen der Torsion, entsprechen den tatsächlichen Zerklüftungsverhältnissen.

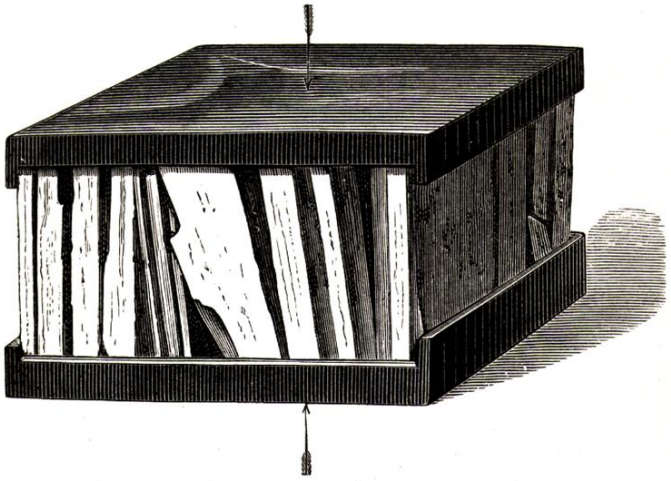
Das über die Sprünge jener Platten von Spiegelglas Gesagte findet der Bergmann täglich in seiner Grube bestätigt. Denn die von ihm abgebauten Erzgänge sind nichts anderes, als solche

durch gebirgsbildende Kräfte entstandenen Spalten; nur sind später nutzbare Mineralien in ihnen zum Absatz gelangt.

Es muß allerdings hervorgehoben werden, daß die Sprünge in den Gesteinen, die Klüfte, im allgemeinen ziemlich vertikale Flächen darstellen, wie es beispielsweise unsere Abbildung (Fig. 20) aus dem Quadersandsteingebirge der Sächsischen Schweiz erkennen läßt.

Daß die Klüfte aber auch zuweilen mehr oder weniger geneigt sind, zeigt die zweite Abbildung (Fig. 21), ebenfalls aus der Sächsischen Schweiz, die Felspartien bei Neurathen darstellend.

Fig. 19.



Zerpreßter Gesteinsblock (nach Daubrée).

Auch hierin erweist sich die Ähnlichkeit des Ergebnisses der Experimente mit dem in der Natur beobachteten. Denn die Sprünge der Glasscheiben waren, wie gesagt, gleichfalls nicht alle senkrecht, sondern viele waren geneigt, wenn ihre Neigung die Horizontale auch stets unter einem großen Winkel schneidet.

Für uns ist das eine Ergebnis der Experimente Daubrées von ganz besonderer Bedeutung: das ist der Umstand, daß sich bei Nachahmung der Wirkungen tektonischer Kräfte neben der, über die ganze von ihnen betroffene Fläche allgemein verbreiteten Zerklüftung deutliche Zonen



Ansicht von der „Kleinen Gans". Vertikale Zerklüftung im Quadersandstein.

unterscheiden, in welchen die Klüftigkeit eine intensivere ist.

Aus dem Vorhandensein von Grundwasserströmen bzw. Höhlenflüssen haben wir auf solche Zerklüftungszonen auch in den von tektonischen Kräften berührten Gesteinsmassen der Erdkruste

Fig. 21.



Felspartie bei Neurathen. Schiefe Zerklüftung im Quadersandstein.

geschlossen. Dieser vorerst nur hypothetische Schluß findet also durch die Experimente **seine Stütze.**

Neben dem Experiment sind es aber auch wirkliche Beobachtungen, welche auf das Vorhandensein von Zerklüftungszonen hinweisen. Ich will auf die Forschungsergebnisse in zwei weit

voneinander entfernt gelegenen Gebieten besonders hinweisen, in welchen das Vorhandensein von Zerklüftungszonen in neuerer Zeit zur Evidenz erwiesen ist; das eine derselben ist die Fränkische Schweiz, das andere Gebiet ist die Plänerkalkhochfläche südlich Paderborn. In letzterem Gebiete sind neben den Zerklüftungszonen auch echte Grundwasserströme gleich jenen vorhanden, welche wir in Karstgebieten vorausgesetzt haben, um das Vorhandensein der Höhlenflüsse zu erklären.

Zerklüftungszonen im Fränkischen Jura. Das Juragebirge Frankens ist ein Tafelland, aufgebaut aus horizontal gelagerten Schichten der Juraformation, deren oberster Teil namentlich im Norden des Gebirges, in der sogenannten Fränkischen Schweiz, aus Dolomit (Frankendolomit) besteht. Die Dolomite sind stark zerklüftet. Die Klüfte streichen in zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen, nämlich von NNW bis SSO und ONO bis WSW.

Da auf diesen Klüften das Wasser zur Tiefe gelangt, haben sich in vielen derselben schlotförmige Höhlenkanäle gebildet, welche von trichterförmigen Einsenkungen an der Oberfläche ausgehend und der Spalte folgend in die Tiefe verlaufen. Erdfälle oder Erdtrichter hat man jene Gebilde benannt. Sie sind ein charakteristisches Karstphänomen, auf welches in dem Abschnitt über Dolinen noch besonders zurückzukommen ist.

Solche Erdfälle weisen also stets auf das Vorhandensein von Spalten im Gestein hin. Oft liegt eine ganze Reihe von Erdfällen in einer geraden Linie; dann können wir mit Sicherheit auf eine Spalte schließen, welche diese verbindet, auch wenn eine solche durch jüngere Gebilde, Ackerkrume, Humusboden, Lehm oder dergleichen verdeckt ist.

In der Gegend von Muggendorf kommen die Erdfälle zu Dutzenden geschart vor. Wie A. Neischls[1]) eingehende Studien gezeigt haben, sind die Erdfälle auf breite Zonen verteilt, zwischen welchen weite Flächen vorhanden sind, auf denen nicht ein einziger Erdfall sich findet.

Aus der von A. Neischl und F. Schöndorf ausgeführten Kartierung der Erdfälle hat sich ergeben, daß diese Zer-

[1]) A. Neischl, Die Höhlen der Fränkischen Schweiz und ihre Bedeutung für die Entstehung der dortigen Täler. Nürnberg 1904.

klüftungszonen gleich den Klüften in zwei aufeinander senkrechten Himmelsrichtungen, also auch in nordnordwestlicher und ostnordöstlicher Richtung streichen.

Genau ebenso, wie die von Daubrée durch Torsion gesprengten Glasplatten unter den zahlreichen Sprüngen einzelne Sprungzonen erkennen lassen, so müssen auch — wie die Verteilung der Erdfälle andeutet — in der Juratafel bei Muggendorf jenen Sprungzonen analoge Zerklüftungszonen auftreten.

Wenn nun diese Zerklüftungszonen in das Grundwasser hinabreichen, so wird sich letzteres vorwiegend in ihnen bewegen, weil der Reibungswiderstand, welchen das Wasser überwinden muß, in den Zerklüftungszonen am geringsten ist. Es werden sich daher richtige Grundwasserströme in der bereits erläuterten Weise bilden können.

Die Annahme besonderer Zerklüftungszonen in jenen Gegenden, wo Höhlenflüsse und Grundwasserströme sich finden, ist also auf Erfahrungen gestützt, welche bei der geologischen Durchforschung anderer Gebiete gemacht sind.

In der Fränkischen Schweiz ist jedoch nur spärlich Grundwasser vorhanden, weil die reichlich auftretenden Talungen nicht allein den Grundwasserspiegel durchschnitten, sondern auch die Sohle des Grundwassers, da wo es auf wasserundurchlässigen Gesteinen sich ansammelt, erreicht haben.

Infolgedessen sind die Zerklüftungen hier auch keine Tracen von Grundwasserströmen. Letzteres ist aber, wie wir sehen werden, in der Paderborner Hochfläche der Fall.

Zerklüftungszonen und Grundwasserströme in der Paderborner Hochfläche. Südlich und südöstlich von der Stadt Paderborn, im Osten vom Eggegebirge, im Westen vom Tal der Alme begrenzt, ist die Paderborner Hochfläche gelegen, ein Tafelland, welches aus annähernd horizontal gelagerten Schichten der Kreideformation aufgebaut ist. Die zutage tretenden mächtigen Kalkmergel des Turon (mittlere obere Kreide), die sogenannten Plänerkalke, sind vielfach stark zerklüftet und, wie die geologischen Untersuchungen von H. Stille[1]) gezeigt

[1]) Dr. H. Stille, Geologisch-hydrologische Verhältnisse im Ursprungsgebiet der Paderquellen zu Paderborn. Berlin 1903. Abhandl. d. königl. preuß. geolog. Landesanstalt.

haben, von einer Reihe von Verwerfungen — also solchen Spalten durchzogen, längs deren eine Verschiebung der Gesteinsschichten gegeneinander in vertikaler Richtung erfolgt ist. In der Nachbarschaft dieser im allgemeinen untereinander parallel von SSO nach NNW streichenden Bruchlinien zeichnet sich das Gestein durch stärkere Klüftigkeit aus, und in der Verlängerung der Bruchlinien — auch da, wo eine Verwerfung der Gebirgsmassen gegeneinander nicht mehr wahrzunehmen ist — da hat Stille nachweisen können, daß Zerklüftungszonen an Stelle der Verwerfungen getreten sind. Diese Zerklüftungszonen geben sich durch zwei Erscheinungen deutlich zu erkennen:

1. Durch eine Fülle von Erdfällen, welche ebenso wie die in der Fränkischen Schweiz auf langgestreckte, aber verhältnismäßig schmale Streifen Landes beschränkt sind, welche durch breite von Erdfällen freie Flächen getrennt sind;

2. durch ihre reichlichere Wasserführung im Verhältnis zu den benachbarten minder zerklüfteten Partien.

Die reichlichere Wasserführung ist, wie wir sehen werden, darauf zurückzuführen, daß die Zerklüftungszonen bereits in Grundwasserströme umgewandelt worden sind. Daher kommt es, daß da, wo die Täler die Zerklüftungszonen schneiden, stets eine größere Anzahl von Quellen vorhanden ist.

Je nach dem Wassergehalt der Grundwasserströme variieren diese Quellen an Größe. In trockener Jahreszeit hören sie überhaupt zu fließen auf. Viele dieser Hungerbrunnen[1]) wirken dann sogar als Ponore, indem sie das am Talboden oberirdisch fließende Wasser aufsaugen.

Die Grundwasserströme der Paderborner Hochfläche erhalten ihr Wasser, abgesehen von dem Teil der Niederschläge, welches, auf Spalten in die Tiefe dringend, ihnen zufließt, aus einer Reihe von Flüssen, die vom Eggegebirge herabkommend westwärts über die Paderborner Hochfläche hinweg in das Tal der Alme sich ergießen. Diese Flüsse erleiden nämlich, sobald sie über die spaltenreichen Zerklüftungszonen hinwegfließen, beträchtliche Wasserverluste; und dieses Wasser ist es, welches in den Zer-

[1]) Die dortigen Hungerbrunnen führen den Namen „Quellspringe", ein Ausdruck, welcher indessen zu wenig verbreitet ist und weniger aussagt, als die alte Bezeichnung Hungerbrunnen.

klüftungszonen sich bewegend zu einem Grundwasserstrome geworden ist. In dem Gebiet zwischen dem Eggegebirge und dem Tal der Alme sind eine Reihe von Zerklüftungszonen vorhanden, welche die westwärts fließenden Flüsse durchqueren müssen; auf diesen verlieren letztere so viel Wasser, daß sie in trockenen Jahreszeiten oberirdisch überhaupt zu fließen aufhören, und ihre Täler als Trockentäler ins Almetal einmünden.

Da die Zerklüftungszonen eine nordnordwestliche Richtung einnehmen, können die von ihnen aufgenommenen Wasser unterirdisch nicht mehr weiter ihren westwärts in das Almetal gerichteten Verlauf verfolgen, sondern sie werden nordwärts abgelenkt. In den sogenannten „Paderbornen", einer Reihe von vielen hundert Quellen, treten sie innerhalb der Stadt Paderborn wieder zutage.

Wir haben in der Paderborner Hochfläche einen jener Fälle, in welchen zwischen einer orographischen und einer geologischen Wasserscheide unterschieden werden muß: orographisch gehören die vom Eggegebirge kommenden Wasser in das Gebiet der Alme, geologisch aber in das der Pader, jenes Flusses, welcher in den Paderbornen seinen Ursprung nimmt.

Die Trennung zwischen orographischer und geologischer Wasserscheide ist in verkarsteten Gebieten ganz allgemein; so gehört die obere Donau bekanntlich geologisch zum Stromgebiet des Rheins, da sie bei Immendingen unterirdisch in die Hegauer Aach geleitet wird, — orographisch aber ist die Donau vom Rheingebiet durch einen hohen Gebirgswall scharf getrennt, den südwestlichen Teil der Schwäbischen Alb. Ein gleicher Fall tritt uns somit auch im Ursprungsgebiet der Pader entgegen. Von ungleich höherer Bedeutung ist aber in diesem Gebiete ein anderer Umstand, nämlich daß daselbst der Beweis geliefert werden konnte, daß die von den Zerklüftungszonen aufgenommenen Wasser in stromartigem Zusammenhang bleiben und nicht etwa in das Grundwasser übergehen.

Auf eine Reihe planmäßig vorgenommener Färbeversuche gestützt, konnte dieser Nachweis von H. Stille geliefert werden. Es hat sich nämlich gezeigt, daß, je nachdem das Wasser der einen oder der anderen der Grundwasserströme der Paderborner Hochfläche durch Färbemittel gefärbt wird, nach einer gewissen

Zeit ganz bestimmte der vielen hundert Paderquellen gefärbt emporsprudeln, während die übrigen völlig klar bleiben. Dies beweist, daß die Paderquellen nicht dem Grundwasser entstammen können. Denn wäre dies der Fall, dann müßten alle Quellen — vorausgesetzt, daß die Quantität des Farbstoffes hinreichend war — gefärbt springen. Die einzelnen Quellen entstammen also ganz bestimmten Grundwasserströmen. Trotzdem die Quellen in so naher Nachbarschaft nebeneinander entspringen, besitzen sie also getrennte Zuzugsgebiete; und die Lage dieser Zuzugsgebiete fällt, wie die Färbeversuche erkennen ließen, mit jenen Zerklüftungszonen zusammen [1]).

In den Verhältnissen auf der Paderborner Hochfläche erblicken wir das beste Beispiel für die von uns zuvor gegebene Erklärung der Entstehungsweise von Höhlenflüssen aus Grundwasserströmen. Wir hatten dargetan, daß das Grundwasser bei seiner Strömung vom Innern des Gebirges zu den Quellen hin sich der Wege bedient, auf welchen es den geringsten Widerstand findet. Das Grundwasser bewegt sich daher in erster Linie in den Zerklüftungszonen. Letztere sind ja auch, wie sowohl die Beobachtung als auch das Experiment gezeigt haben, häufige Erscheinungen. Im Pader Ursprungsgebiet sehen wir nun die Zerklüftungszonen in unmittelbarem Zusammenhang mit Grundwasserströmen. Wenn nun solche Verhältnisse, wie sie uns in der Paderborner Hochfläche entgegentreten, in einem höhlenführenden Karstgesteine auftreten [2]), dann würde auch der letzte Schritt zur Entstehung eines Höhlenflusses, die Erweiterung des Grundwasserstrombettes in ein tunnelförmig gestaltetes Höhlenflußbett durch die Korrosion erfolgen können.

---

[1]) Die Untersuchungen von Dr. H. Stille im Padergebiet sind in der oben zitierten Arbeit eingehend niedergelegt; auf diese sei verwiesen, da wir uns hier nur sehr kurz fassen können, so daß die auch in so mancher anderen Hinsicht interessanten Verhältnisse daselbst nicht mit hinreichender Genauigkeit wiedergegeben werden können.

[2]) Der petrographische Charakter der Plänerkalke ist der Höhlenbildung nicht günstig, da zu viel mergelige Einlagerungen vorhanden sind. Nur reine Kalke und Dolomite sind als echte höhlenführende Karstgesteine anzusehen, wenn auch zuweilen in Kalkmergeln Höhlen vorkommen.

Als erste Vorbedingung zu der hier angegebenen Theorie zur Entstehung von Höhlenflüssen ist also das Vorhandensein einer Quelle angenommen. Denn das Ausströmen des Wassers aus den Quellen ist es ja, was dem Grundwasser die Bewegung erteilt. Dieses Ausströmen ist eine Folge der Schwerkraft, welche das Wasser zwingt, die tiefste Lage einzunehmen. Je größer der Druck ist, welchen das Grundwasser ausübt, mit um so größerer Gewalt wird das Quellwasser hervorbrechen. Die heftige Bewegung aber, unter welcher das Wasser den Quellöffnungen entströmt, muß eine weitere Wirkung ausüben: eine Saugwirkung.

Wir haben die saugende Kraft von Quellen bereits in dem Abschnitte über Meeresschwinden kennen gelernt. Dieselbe Kraft ist unseres Erachtens auch bei der Entstehung von Höhlenflüssen tätig. Ihr zufolge werden von den bereits vorhandenen Quellströmen andere Teile des Grundwassers herbeigesogen; diese Wasseradern üben ihrerseits wieder eine Saugwirkung aus — und so fort. Namentlich wird die Saugwirkung dann eine hohe Bedeutung erlangen können, wenn, wie dies sehr häufig der Fall ist, in den Spaltenhöhlungen größere Wasserfälle vorkommen; denn solche wirken tatsächlich analog der Wasserluftpumpe Bunsens. Dadurch, daß die Saugwirkung sich immer weiter rückwärts fortpflanzt, gelangt sie schließlich oftmals in den Bereich irgend eines oberirdisch fließenden Wassers. Dieses wird nun auf den anfänglich engen Spalten in das Gestein eindringen. Dadurch, daß immer neues Wasser in diese Spalten eindringt, werden sie durch Korrosion schnell erweitert, infolge davon wird auch eine ständig im Wachsen begriffene Wassermenge dem Fluß entzogen. So veranlaßt eine Quellströmung vermöge ihrer Saugkraft die Entstehung von Flußponoren. Sobald dieser Vorgang einmal eingesetzt hat, so wird er ununterbrochen seinen Fortgang nehmen und die von der Quellströmung herbeigesogenen Flußwasser werden immer weiter ihre Lösungskraft entfalten; viele der engen Spalten werden dabei in größere Tunnelhöhlen verwandelt, bis schließlich ein großes Höhlenflußbett entsteht. Die Bildung eines Höhlenflusses geht also durch **rückwärtsschreitende Korrosion** von einer Quelle aus vor sich.

Die hier gegebene Erklärung für die Entstehung von Höhlenflüssen läßt sich naturgemäß niemals streng beweisen; sie besitzt aber einen hohen Grad von Wahrscheinlichkeit.

Die Frage nach der Entstehung der Höhlenflüsse ist niemals eingehend diskutiert worden. Es ist von den meisten Autoren behauptet worden, daß die Erosion die Höhlen geschaffen hätte. Daß dies aber nicht möglich ist, darauf haben wir bereits früher hingewiesen. Denn die Erosion — also die mechanische Kraft des fließenden Wassers — setzt voraus, daß Wasser überhaupt fließt, und dieses wiederum, daß ein Flußbett vorhanden ist. Mithin kann die Erosion die Flußhöhlen unmöglich gebildet haben; sie vermag nur eine vorhandene Höhle umzugestalten.

Eine andere allgemein verbreitete, gleichwohl aber irrige Meinung ist ferner die, daß die zwischen Ponoren und Vauclusequellen befindlichen Flußhöhlen sich von ersteren aus gebildet hätten. Dies ist ebenfalls nicht möglich; denn wenn das Wasser von den Ponoren aus auch in das Gebirge einzudringen vermag, so werden doch die engen Spalten bald gefüllt sein und ein Stillstand wird in der Bewegung eintreten, welcher einen Rückstau des Wassers zur Folge hat. Das Gebirge wird sich hierbei wie ein Schwamm voll Wasser saugen, aber keineswegs kann der von den nur unbedeutenden Karstflüssen oberhalb der Ponore ausgeübte Druck es zustande bringen, daß der gewaltige, oft viele Kilometer breite Gebirgswall, welcher Ponore und Vauclusequellen trennt, einem allzu schwachen Damme gleich durchbrochen werde. Die Durchsickerung des von den Ponoren verschlungenen Wassers zu den Vauclusequellen kann unseres Erachtens nur dann stattfinden, wenn von letzteren aus gleichzeitig eine Kraft ausgeht, welche das Wasser herbeizieht. Und diese Kraft haben wir in der Saugkraft der Quellen kennen gelernt.

Man wird allerdings den Einwand erheben können, daß eine saugende Kraft nur in einem System von vollkommen geschlossenen Röhren denkbar ist. Nun sind aber die Wasserspalten der Karstgebirge nicht vollkommen geschlossen; vielmehr kommunizieren sie mit der Oberfläche. Wie aber die Existenz der Meeresschwinden lehrt, können auch die Karstwasser oftmals, namentlich infolge ihrer Stromschnellen, Saugwirkungen ausüben. Ganz abgesehen hiervon sind aber die Höhlenflüsse schon alt; sie haben sich zu einer Zeit gebildet, wo die Verkarstung noch nicht den hohen Grad erreicht hatte, wie gegenwärtig. Ehedem kann also viel eher eine Saugwirkung in geschlossenen oder nahezu geschlossenen Spaltenröhren stattgefunden haben.

Eine Kommunikation mit der Außenluft in den Wasserspalten beeintrachtigt allerdings in hohem Maße die Saugwirkung; aber nicht immer wird sie hierdurch völlig aufgehoben. Hierzu kommt, daß die Saugkraft keineswegs Außergewöhnliches leisten muß. Durch sie wird nur der Reibungswiderstand überwunden, welcher verhindern würde, daß auf den engen Spalten das in die Tiefe sickernde Wasser weiterfließt.

Vermöge der Zerklüftungsverhältnisse wird durch die Saugkraft das Wasser in bestimmte Bahnen geleitet; und in diesen folgt es durchaus der Schwerkraft. Wenn jene Grundwasserstrombetten und Höhlenflüsse bereits vorhanden gewesen wären, dann bedürften wir keineswegs der Saugkraft der Quellen, um die Entstehung von Höhlenflüssen zu erklären. Aber diese haben sich doch erst im Laufe langer Zeiten durch die Korrosion des fließenden Wassers gebildet; die strömende Bewegung des Wassers wurde unseres Erachtens erst durch die Saugwirkung der Quellströme eingeleitet und dadurch die Korrosion ermöglicht. Jetzt aber, nachdem die Verkarstung in hohem Maße angewachsen ist — jetzt ist die Saugkraft nicht mehr denkbar; der Vorgang aber, den sie eingeleitet, ist nun im Gang — jedoch folgt er einer anderen Kraft, der Schwerkraft.

Wir wollen die hier gegebene Theorie der Entstehung von Höhlenflüssen durch die saugende Kraft der Quellströmungen an dem Beispiel der schon so oft genannten unterirdischen Verbindung zwischen Donau und Rhein (Aach) erläutern. Wir wissen, daß bei Immendingen etwa 4000 Sekundenliter Donauwasser versinken, welche in einer Entfernung von 13 km als Aach wieder aus dem Gebirge hervortreten. Die Aachquelle enthält zwar, wie bekannt (vgl. S. 60) das gesamte Donauwasser, keineswegs aber nur Donauwasser. Von den 7000 Sekundenlitern, welche der Aach durchschnittlich entströmen, kommen 3000 Sekundenliter auf einen eigenen Quellstrom. Dieser an und für sich schon gewaltig große Quellstrom hat unseres Erachtens die Saugwirkung ausgeübt, derzufolge die Donauwasser die engen Spalten benutzend in die Tiefe gerissen wurden. Durch die Korrosion sind dann die Spalten hinreichend erweitert worden, so daß der Höhlenfluß sich gebildet hat.

Zusammenfassung: Wir fassen die Ergebnisse unserer Studien über die Entstehung von Höhlenflüssen kurz wie

folgt zusammen. Eine Quelle übt vermöge ihrer oft sehr heftigen Strömung eine Saugwirkung aus; die Saugkraft des **Quellstromes** wirkt zunächst auf die ihm benachbarten Grundwassermengen. In diesen pflanzt sie sich fort. In den Zonen, in welchen die Zerklüftung am stärksten ist, in den Zerklüftungszonen, fließt das Grundwasser zum Quellstrom hin, es wird zum **Grundwasserstrom**, und dieser durch seine höhlenbildende Tätigkeit endlich zum **Höhlenfluß.** Der Höhlenfluß bewegt sich dann nicht mehr infolge der Saugkraft der Quellströme, sondern er fließt durch die Schwerkraft. Die Saugkraft aber, die eine Quelle oder ein Höhlenfluß auszuüben vermag, hört mit zunehmender Verkarstung auf.

Vierzehntes Kapitel.

Dolinen.

Definition. — Erklärungsversuche. — Morphologie. — Schüsselförmige Dolinen. — Trichterförmige Dolinen. — Brunnenförmige Dolinen. — Genetische Einteilung. — Einsturzdolinen. — Einsturzbeben. — Subaërisch gebildete Dolinen. — Nomenklatur. — Verteilung der Dolinen.

Als Dolinen werden allgemein die trichterförmigen Einsenkungen von kreisförmiger bis elliptischer Gestalt bezeichnet, welche in Karstgebieten oft in solch großer Anzahl geschart vorkommen, daß sie der Erdoberfläche ein gleichsam „blattersteppiges“ Antlitz verleihen. Das Wort Doline stammt aus dem Südslawischen, in diesen Sprachen bedeutet „Dolina“ so viel wie Tal. Wenn nun auch die Dolinen mit dem, was wir Tal zu nennen pflegen, wenig gemein haben, so hat dennoch das Wort Doline in die Reihe der wissenschaftlichen Fachausdrücke Eingang gefunden, zumal auch in den südslawischen Karstländern nicht allein die echten Täler — deren es nur wenige gibt —, sondern auch die „Karsttrichter“ diese Bezeichnung führen.

Unter der gemeinsamen Bezeichnung Doline fassen wir eine große Gruppe von Karstgebilden zusammen,