

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN DYNAMISMUS UND CHEMISMUS DER TROPFSTEINBILDUNG

VON

DR. LADISLAUS JAKUCS

In der Tropfsteinhöhle von Aggtelek sind 1954 bis 1959 systematische Untersuchungen zur Klärung der Gesetzmässigkeiten und der bestimmenden Faktoren der Tropfsteinbildung ausgeführt worden. Als Endergebnis dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der Bildungsvorgang der Tropfsteine (die Auflösung und Wiederausscheidung des Kalkes) von einer Zahl von chemischen und physikalischen zustandkennzeichnenden Grössen beeinflusst wird; der Dynamismus des Auflösungs- bzw. Ausscheidungsvorganges wird durch die komplexe Wechselwirkung dieser Faktoren geregelt. Nun wurde unsere Aufmerksamkeit auf einen unter diesen Faktoren gelenkt, dessen entscheidende Wichtigkeit von den bisherigen Forschern nicht hinreichend berücksichtigt worden ist. Dieser Faktor ist die Abhängigkeit der chemischen Aggressivität vom hydrostatischen Druck in den verschiedenen Tiefenzonen des Karstmassivs.

Im Bewusstsein, dass die Kenntnis der vom hydrostatischen Druck abhängenden Veränderungen der chemischen Aktivität über die richtige theoretische Erklärung der Tropfsteinbildung hinaus auch für die Theorie der gesamten Karstentwicklung, der Zonalität des Karstes und anderer Erscheinungen von ausschlaggebender Wichtigkeit ist, wollen wir nun unsere diesbezüglichen Untersuchungen und die aus den Ergebnissen notwendigerweise folgenden neuen theoretischen Erkenntnisse ausführlich schildern.

Zu diesem Zweck, und zur hinreichenden Beleuchtung dessen, was in unserer Auffassung als wahrhaftig neu gelten darf, dünkte es uns notwendig, vorangehend die Theorie der Tropfsteinbildung entsprechend der in der Fachliteratur vorliegenden modernsten Begriffen kurz zu kennzeichnen.

I.

Die moderne Theorie der Kalklösung und Tropfsteinbildung in der internationalen Literatur

Der Lösungsmechanismus des Kalksteines im kohlenensäurehaltigen Wasser wird in der einschlägigen Literatur in zahlreichen Aufsätzen gründlich und eingehend behandelt. Die wichtigsten dieser Aufsätze sind im Literaturverzeichnis unter den Nummern 1. bis 8. angeführt.

Nach der in der Fachliteratur geltenden Auffassung wird die Lösung des Kalksteines in hydrokarbonatischer Form sowie die Tropfsteinbildung (die teilweise Wiederausscheidung des aufgelösten Kalkes) durchwegs durch den Grad der Sättigung der Lösung (des Wassers) mit Kohlendioxid bedingt.

Das mit dem Kalkstein in Berührung kommende Wasser kann desto mehr CaCO_3 auflösen, je heftiger die Kohlenensäure-Aggressivität des Wassers, bzw. je niedriger seine Temperatur. Die Kalkauflösung und Wiederausscheidung gehen nach der folgenden Grundformel vor sich:



Die Reaktion ist eine sog. reversible, das heisst, es gibt in der Natur zahlreiche sich ständig verändernde Faktoren, deren Einwirkung die Reaktion in die Richtung bald des einen, bald des anderen Pfeiles verschieben kann. Die in Frage kommenden veränderlichen Faktoren sind wie folgt:

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Zunahme der Lösungstemperatur 2. Abnahme des Partialdruckes des CO_2 in der sich mit der Lösung berührenden Luft, und das dementsprechende 3. Teilweise Entweichen des CO_2 aus der Lösung 4. Verdampfen des Lösemittels (Wassers) 5. Anreicherung von Salzen der gleichen Ionen (Ca, CO_3, HCO_3) in der Lösung | <ol style="list-style-type: none"> 1. Abnahme der Lösungstemperatur 2. Zunahme des Partialdruckes des CO_2 in der sich mit der Lösung berührenden Luft, und das dementsprechende 3. Anreicherung von Kohlendioxyd in der Lösung 4. Verdünnung der Lösung 5. Ausfällung von Salzen der gleichen Ionen aus der Lösung. |
|---|---|

Die Forscher früherer Zeiten haben von diesen veränderlichen Faktoren den Verdampfungsfaktor Nr. 4 als entscheidend für den Vorgang der Tropfsteinbildung angesehen. Es ist jedoch eine heute bereits völlig bewiesene Tatsache, dass in den meisten Höhlen die Höhlenluft derart

mit Wasserdampf gesättigt ist, dass die Verdampfung des Lösemittels äusserst langsam erfolgt und dieser Faktor in den meisten Fällen für die Tropfsteinbildung praktisch belanglos ist.

Im Sinne der modernen Auffassungen ist der für die Tropfsteinbildung ausschlaggebende Faktor der Partialdruck-Unterschied des Kohlendioxids zwischen Lösung und angrenzender Luft.

Um eine gegebene Menge von gelöstem $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ in Lösung behalten zu können, muss das Wasser neben dem hydrokarbonatisch gebundenen CO_2 auch noch eine gewisse Menge ungebundener, sog. freier Kohlensäure enthalten. Dieser letzterer Anteil des CO_2 wird akzessorische freie oder Gleichgewichts-Kohlensäure genannt. Tillmans wies nun nach (1.—3.), dass die zur Einstellung des Gleichgewichts erforderliche Menge dieser akzessorischen freien Kohlensäure sich in Abhängigkeit von der Temperatur verändert.

In der ungarischen Literatur ist die Menge der akzessorischen Kohlensäure anhand der Formeln von Tillmans durch Sz. Papp (8) berechnet und tabellarisch für Wässer von 1 bis 50 Karbonathärtegraden und 5 bis 20°C Temperatur angegeben worden.

Gibt es nun in einer Lösung mehr freie CO_2 als die aus den Tillmans'schen Gleichungen berechenbare notwendige Menge der akzessorischen freien Kohlensäure, so bildet der Überschuss die sog. aggressive freie Kohlensäure, und die Lösung ist der Auflösung weiterer Mengen von Kalk fähig. Fällt jedoch die Gesamtmenge der freien Kohlensäure unterhalb des durch die Tillmans'schen Gleichungen für eine Lösung von gegebener Temperatur und Hydrokarbonat-Konzentration erforderlichen Wertes, so beginnt die Lösung Kalk auszuscheiden.

Ohne an dieser Stelle auf die praktischen Methoden der Bestimmung und Berechnung des äquivalenten akzessorischen freien Kohlensäuregehaltes eingehen zu wollen, möchten wir nun untersuchen, wie die moderne einschlägige Literatur die Tropfsteinbildung auf der soeben geschilderten theoretischen Grundlage stehend und jene als allgemeingültig annehmend erklärt.

Nach Trombe (14), der unter den heutigen speläologischen Forschern vielleicht über die gründlichsten chemischen Kenntnisse verfügt, gewinnt das Niederschlagswasser seinen kennzeichnenden Kohlensäuregehalt aus der oberen Bodenschicht der Karstoberfläche, im Laufe seiner Durchsickerung durch die Humusschicht. Seiner Meinung nach kann die Ansammlung von CO_2 -Gas in der Bodenschicht Ausmassen erreichen, die in der Atmosphäre niemals vorkommen können. Der Kohlensäuregehalt der Bodenatmosphäre ist im mindesten auf 1% zu schätzen, jedoch weist Trombe darauf hin, dass in gewissen günstigen Fällen sogar Werte von 10% und noch mehr möglich sind. Die durchsickernden Wässer kommen mit der Bodenatmosphäre in Berührung und sättigen sich dabei mit Kohlensäure, in einem Grade, der vom Partialdruck des CO_2 in der Bodenatmosphäre abhängt und durch die untenstehende Schloesingsche Tabelle angegeben wird.

Partialdruck des CO ₂ in der Atmosphäre	Gesamtmenge der gelösten freien Kohlensäure in mg/l, bei der untenstehenden Temperatur					
	0° C	5° C	10° C	15° C	17° C	20° C
1/10 000	0,34	0,28	0,23	0,20	0,19	0,17
3/10 000	1,01	0,84	0,70	0,60	0,56	0,52
1/ 1 000	3,36	2,80	2,34	2,00	1,88	1,72
1/500	6,73	5,59	4,69	4,00	3,76	3,45
1/100	33,6	28,0	23,5	20,0	18,8	17,2
2/100	67,3	55,9	46,9	40,0	37,6	34,5
3/100	101	83,9	70,4	60,0	56,5	51,7
4/100	135	112	93,8	80,1	75,3	69,0
5/100	168	140	117	100	94,1	86,2
6/100	202	168	141	120	113	103
7/100	236	196	164	140	132	121
8/100	269	224	188	160	151	138
9/100	303	252	211	180	169	155

Demnach wird die Kalklösungsfähigkeit des Wassers nicht vom praktisch überall gleichen, 0,03% betragenden CO₂-Gehalt der freien Luft, sondern vom viel höheren Partialdruck des CO₂ in der Bodenatmosphäre bestimmt.

Das nach unten absickernde Wasser trifft im Kluftnetz des Karstgesteins bis zum Niveau der weiträumigen Höhlengänge keine Luft mehr, in der der Partialdruck des CO₂ geringer sein würde; folglich wird die Auflösung von Kalk in den Karstklüften von der durch die Bodenatmosphäre aufgeprägten Kohlensäure-Aggressivität bedingt. So stellt sich im absteigenden Wasser der Kluftsysteme ein Gleichgewicht Kalk-Kohlensäure ein, welches — im Mangel an Hohlräumen mit kleinerem CO₂-Partialdruck — höchstens durch Temperaturveränderungen etwas verschoben werden kann. Da es jedoch im Gesteinsblock des Karstmassivs keine nennenswerten Temperaturänderungen gibt, bleibt das Wasser auf seinem Wege nach unten praktisch im gleichen Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, das sich bereits in den höheren Zonen des Karstmassivs eingestellt hat. Das Gleichgewicht kippt nur um, falls das Wasser einen Hohlraum erreicht, in dem die Luft mit der äusseren Atmosphäre in Verbindung steht, z. B. einen Höhlengang, in welchem der Partialdruck des CO₂ geringer ist als in der Bodenatmosphäre, die die Aggressivität des absickernden Wassers bestimmte. Im letzteren Falle wird nämlich die Lösung Kohlendioxyd abgeben, bis die Sättigung des Wassers durch CO₂ sich auf den Pegel einstellt, der dem Partialdruck des CO₂ in der neuen Umgebung entspricht.

Es ist z. B. aus der oben angeführten Tabelle ersichtlich, dass bei einem CO₂-Partialdruck von 8/100 in der Bodenatmosphäre, und einer Bodentemperatur von 5° C das Wasser, das in eine Höhle von 10° C Lufttemperatur und mit einem CO₂-Partialdruck von 2/100 eindringt,

224 — 46,9 mg Gleichgewichts-Kohlensäure pro Liter abgibt und eine entsprechende Menge von Kalk ausscheidet. Nachdem bei einer Temperatur von 5° einem Gehalt von 224 mg/l an Gleichgewichts-Kohlensäure 233 mg/l bikarbonatisch gebundenes CO₂, bei 10° C einem Gehalt von 46,9 mg/l bloss 132 mg/l entspricht, wird die Härte des Wassers im angegebenen Falle bei der Ankunft in der Höhle unter Tropfsteinausscheidung notwendigerweise von 30 zu 17 deutschen Graden abnehmen.

Ist in einer Höhle die Bedingung des Luftaustausches mit der äusseren Atmosphäre nicht erfüllt, so kann eine bedeutende Anreicherung von Kohlendioxydgas in der Höhlenluft stattfinden, mit einer gleichzeitigen Verlangsamung der Tropfsteinbildung. So kann der Kohlen säuregehalt der Luft in manchen Höhlen, die keinen Luftaustausch mit der äusseren Atmosphäre besitzen, dem mehrprozentigen CO₂-Gehalt der Bodenatmosphäre nahestehen. Jedenfalls ist in den meisten Höhlen der natürliche Luftaustausch gesichert, sodass kaum eine Anreicherung des CO₂ der Lufthülle gegenüber bemerkt werden kann und die beträchtliche CO₂-Abgabe bloss durch den Vorgang der Tropfsteinbildung ver raten wird.

Nach alledem soll in der Beziehung Wasser — Kohlensäuregas — Kalkstein alles von der CO₂-Konzentration im Wasser bzw. von der Temperatur abhängen. Solange das Wasser in den ungelüfteten Klüften und Hohlräumen vordringt, scheidet es, selbst wenn mit Bikarbonat hochgesättigt, keinen Kalk aus. Der einzige Faktor, der das Gleichgewicht einigermassen verschieben und daher eine gewisse Ausfällung von Kalk hervorrufen kann, ist die Veränderung der Temperatur. Folglich kann eine Kalkbildung grösserer Ausmassen, d. h. eine tiefgreifende Abänderung des Gleichgewichtszustandes nur in grösseren Hohlräumen erfolgen, die dabei noch über die entsprechende Lüftung verfügen müssen.

So werden die wesentlichen Züge der chemischen Theorie der Tropfsteinbildung in der einschlägigen Literatur geschildert. Einige Verfasser (16, 17) weisen auch noch auf die Effekte hin, die auf der veränderlichen Oberflächenspannung des Wassers beruhen und die soeben genannten Faktoren beeinflussen können. Demnach soll in einem Tropfen Wasser am First der Höhle bzw. in einem auf konvexer Fläche herabrieselnden Wasserfilm die Abnahme der Oberflächenspannung die Beschleunigung der CO₂-Abgabe herbeiführen und dadurch die Kalkausscheidung auf beschränkte Flächen lokalisieren (hohle Stalaktite, Kalksinter-Tetaraten, usw.) Jedenfalls werden auch diese richtigen Beobachtungen durchwegs mit der Annahme des beschleunigten Entweichens des CO₂ theoretisch begründet.

Man findet in der Literatur auch Angaben darüber, wann das Wasser mit aggressivem Kohlensäuregehalt in den Karstklüften den Gleichgewichtszustand erreicht. Nach einer Mitteilung von Trombe (14) findet die Sättigung des herabsickernden Wassers durch Kalk schon in der obersten Zone von 5 bis 15 m statt, wobei das Wasser seine Aggressivität einbüsst.

In Ungarn ist in dieser Beziehung durch I. Venkovits äusserst wertvolle Arbeit geleistet worden (16, 18, 19, 20). Nach ihm „reicht das

Lösungsvermögen der jetztzeitlichen kohlensäureführenden Niederschläge in wassergefüllten Klüften im allgemeinen nur bis zu einer Tiefe von 7 m, wogegen in klaffenden Spalten, wo das Wasser nur an der einen Wand herabrieselt, der Tiefgang der Lösewirkung 60 bis 70 m betragen kann" (18). In einem anderen Aufsatz (19) gibt I. Venkovits noch engere Tiefengrenzen der Lösungszone an: „Unsere Untersuchungen erklären den aus der Erfahrung bereits bekannten Umstand, dass die aushöhlende Wirkung der oberflächlichen Niederschläge — bedingt durch ihre Lösungsfähigkeit — nicht tiefer als 3 bis 7 m hinabreicht. Unterhalb dieser Zone wird in den Hohlräumen überall Tropfsteinbildung beobachtet. Nach der Auslaugung der löslichen Bestandteile des Bodens können die Niederschläge in ihrem Fortschritt durch die geschlossenen Kluftsysteme ihrem Gehalt an akzessorischer Kohlensäure nirgends loswerden. Das ist der Grund dafür, dass sie kein CaCO_3 ausscheiden. So wird es verständlich, warum die tiefen Karstwässer so hart sind, und warum ihre chemische Zusammensetzung von derjenigen der Niederschlagswässer am Tage so weitgehend abweicht."

Nicht minder eindeutige Ergebnisse haben unsere Untersuchungen im Aggteleker Karstgebiet erzielt; sie bekräftigen die Feststellungen der oben zitierten Autoren in allen Einzelheiten. Wir haben nämlich gefunden, dass die absickernden Wässer im Kalkstein ihre Aggressivität höchstens bis zu einer Tiefe von 10 bis 20 m bewahren. Ungesättigtes Wasser von einigem Korrosionsvermögen haben wir in grösseren Tiefen nur in den nicht ausschliesslich in Kalkstein entwickelten Höhlenabschnitten (z. B. im Dolomitgestein des letzten Baradla-Abschnittes bei Jósvalö) vorgefunden.

Auch den Dynamismus der Tropfsteinbildung betreffend finden sich in der Literatur zahlreiche Hinweise. Nach der amerikanischen Regel (21, 22) bildet sich an einem Tropfstein in 100 Jahren ein Kubikinch (gleich 16,4 Kubikzentimeter) Kalk. Nach einer Mitteilung von Martel (23) wachsen die Stalaktite in der Han-Höhle 1 mm pro Jahr. In den mährischen Höhlen ist die Ergiebigkeit der von den einzelnen Stalaktiten herabtraufelnden Lösungen erstmalig durch Kriz ermittelt worden. Kriz behauptet, in einem Falle 1,728 Kubikzentimeter pro Tag gemessen zu haben, was einer Ergiebigkeit von 631 dm^3 pro Jahr entspricht. Ein jedes Liter der Lösung enthielt 0,15 g CaCO_3 . Hätte sich diese Menge samt und sonders am Stalaktit ausgeschieden, so würde der Massenzuwachs 94,5 g pro Jahr bzw. 9,45 kg pro Jahrhundert betragen. Es scheidet sich jedoch — wie bereits durch Kriz selber erkannt — nicht der gesamte Kalkgehalt aus der Lösung. Aus dem gemessenen Gewicht des Stalagmits genannt „Gedenksäule" in der Höhle von Sloup berechnete dieser tschechoslowakische Speläologe eine Bildungsdauer von 3800 Jahren.

Die Röhrentropfsteine haben nach Kunskej (25, 26) ein Gewicht von 17 bis 26 mg, im äussersten Falle von 37 mg pro Millimeter, entsprechend einem Gewicht von höchstens 37 g pro Meter. Nach den obigen Ausführungen sollte ein Röhrentropfstein von einer halben Meter Länge 100 Jahre alt sein.

Nach einer Mitteilung von Perco bildete sich in der Postojanska-Jama (27) in 26 Jahren eine Tropfsteinschicht von 1 bis 2 mm Mächtigkeit. Demnach dauert die Bildung eines Stalagmits von 1 m Höhe 15 bis 20 Tausend Jahre. Perco erwähnt weiter, dass „der englische Forscher Body Dawkins in seinem Buche »Europäische Höhlen und ihre Ureinwohner« mitteilt, dass nach Messungen in den Kalksteinhöhlen von Yorkshire der Zuwachs der Tropfsteine in einem Falle 0,24 englischen Zoll, in einem andern 0,05 Zoll in 35 Jahren betrug. Das macht jährlich 0,0068 Zoll im einen und ein Fünftel dieses Betrages im anderen Falle aus. Diese Geschwindigkeit stimmt jedoch nicht mit den Angaben überein, die James Farrer in der Höhle von Ingleborough am Stalagmit genannt »Jockeys Cap« ermittelte und die durch Professor Philips mitgeteilt worden sind. Der Zuwachs dieses Stalagmits, an einer Stelle, wo ständig Wasser von dem First herabtropft, beträgt 0,2941 bis 0,2946 Zoll im Jahr. Das Alter dieser 75 cm hohen Tropfsteinsäule ist von Professor Philips in 1845 auf 259 Jahre eingeschätzt worden“.

Anhand von Betrachtungen ähnlicher Art setzt Farrington das Alter gewisser Stalagmite auf 90.000 bis 600.000 Jahre (28). In der Demänowa-Höhle berechnete Vitásek niedrigere Zeitwerte (29). Dagegen hält Kaspar (30, 31) die Tropfsteine der Domiza-Höhle für präpleistozän.

In der ungarischen Literatur finden sich Angaben über den Zuwachs der Tropfsteine in der Baradla-Höhle bei Dudich (16, p. 51.). Nach ihm dürfte der 975 kg wiegende Stalagmit genannt „Kéregető koldus“ („Bittender Bettler“) mit seinem Volum von 430 Kubikdezimeter 2322 Jahre alt sein. Dudich weist jedoch sehr richtig darauf hin, dass diese Berechnungen auf einer Reihe völlig unbewiesener Annahmen beruhen, weshalb man „aus ihnen keinerlei stichhaltige Folgerungen ziehen kann, zumal die Angaben sich auf momentane Werte beziehen und die Berechnungen mit so vielen Fehlerquellen behaftet sind, dass das Ergebnis von der Wahrheit vielleicht um mehr als 100% abweichen kann“.

Gleichfalls aus der Höhle von Aggtelek schreibt Kessler (17), dass er unter dem Sockel eines 170 cm hohen Stalagmits von 10 cm Durchmesser ein Scherbenstück der „Bükk-Kultur“ vorfand, wonach das Alter des Tropfsteins höchstens 5000 Jahre betragen kann. Nach Kessler war das höchste Alter der Tropfsteine in der Beatus-Höhle der Schweiz mittels pollenanalytischer Methoden auf 11.000 Jahre bestimmt worden.

Auch die Erforscher der Vass Imre-Höhle haben sehr interessante und wertvolle Angaben ermittelt, u. zw. betreffs der sog. „Fadentropfsteine“. Mit dem sog. „Robottropfstein-Messverfahren“ (32) haben sie festgestellt, dass „ein Fadentropfstein mit einem Wasserdurchfluss von 2 dl pro Tag, von 25 deutschen Graden durchschnittlicher Härte, im Mittel 6 mm pro Jahr wächst, sodass unter den genannten Umständen die Bildung eines Fadentropfsteines von 60 cm Länge durchschnittlich 100 Jahre erfordert“.

Alle diese Angaben sind in verschiedenen Lokalitäten mit verschiedenen Methoden ermittelt worden, und weisen solche Widersprüche auf, dass man aus ihnen gar keine Feststellungen von einigermaßen allgemeiner Gültigkeit über die den Dynamismus der Tropfsteinbildung bes-

timmenden Faktoren treffen mag. Deshalb haben wir in der Baradla-Höhle von Aggtelek eine Beobachtungsserie von mehreren Jahren ausgeführt, die aus vielen vergleichbaren Fällen gewisse Folgerungen von allgemeinerer Gültigkeit über den Dynamismus der Tropfsteinbildung gestattet.

Die Ausführung und die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im nächsten Kapitel mitgeteilt.

II.

Methodik und Ergebnisse unserer Untersuchungen

Die von uns entwickelte Methode dient zur Messung der effektiven Gewichtszunahme der Tropfsteine. Man legt im Wege des herabtropfenden Wassers eine glatte Glasplatte von 4 dm² Fläche in waagrechter Lage, und man bestimmt nach einer gewissen Zeit das genaue Gewicht der Glasplatte mit und ohne Tropfsteinüberzug. Gleichzeitig haben wir bei unseren Untersuchungen die Ergiebigkeit des Wasserzufuhrs sowie mittels systematischer Analysen auch die chemische Zusammensetzung des Wassers laufend bestimmt. Im Prinzip bestand unsere Apparatur, die diese Messungen ermöglichte, aus folgendem: (Abb. 1.)

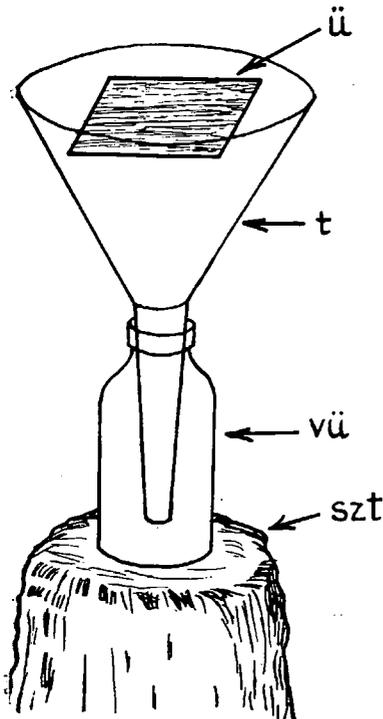


Abb. 1. ü: glatte Glasplatte von 4 dm² Fläche (vor einer jeden Messung mit Alkohol von Fett gereinigt) t: Trichter von 30 cm Durchmesser vü: Sammelgefäß, zugleich. Volummessereinrichtung szt: der untersuchte Stalagmit.

Mit dieser äusserst einfachen Einrichtung haben wir erreicht, dass ein jeder herabfallender Tropfen Wasser die gleiche Zeit zur Ablagerung seines überflüssigen Kalkgehaltes hatte, unabhängig von der Häufigkeit der Tropfen und von der Fallhöhe. Weiterhin berührte sich das Wasser an einer Fläche konstanter Grösse mit der Luft, an die es CO_2 abgab.

Aus den beschriebenen Vorstellungen der modernen Theorie der Tropfsteinbildung würde es folgen, dass in einer Höhle von unveränderlicher Temperatur und Partialdruck des CO_2 eine gegebene Wassermenge von konstanter Härte vom Zeitfaktor unabhängig immer die gleiche Menge von CaCO_3 auf die Glasplatte ablagern sollte. Mit anderen Worten soll die Menge des ausgeschiedenen Tropfsteins mit dem gelösten Kalkgehalt des Wassers und mit der abgetropften Wassermenge in einem eindeutigen, direkten Verhältnis stehen. Wenn also z. B. ein Wasser von 30 deutschen Härtegraden in einer Höhle von 10°C Temperatur 0,05 g Kalk pro zehn Liter Lösung ablagert, so soll in der gleichen Höhle, jedoch auch in einer anderen, wenn nur die gleiche Temperatur und der gleiche Partialdruck des CO_2 vorherrscht, ein Tropfwasser von 30 deutschen Härtegraden gleichfalls 0,05 g CaCO_3 pro zehn Liter ausscheiden, unabhängig davon, dass ein Umsatz von 10 Liter Tropfwasser an der einen Stelle vielleicht 60, an der anderen jedoch nur 10 Tage beansprucht.

Nun ergab sich im Laufe unserer Untersuchungen in der Baradla bzw. in der Friedenshöhle das unerwartete und verblüffende Ergebnis, dass diese Regel in der Natur entweder nicht gilt, oder aber von irgendeiner Einwirkung ausser Kraft gesetzt wird. In der Tabelle auf der nächsten Seite teilen wir die Ergebnisse unserer Messungen in der Baradla bzw. in der Friedenshöhle mit, die die Ungültigkeit der Regel bewiesen haben (s. Tabelle).

Würde die weiter oben formulierte Regel in der Natur auch wirklich gültig sein, so sollten die Kalkausscheidungsindizes auch bei unseren Messungen gleichgross oder wenigstens annähernd gleichgross ausfallen. Das ist jedoch nicht der Fall. Wir haben gefunden, dass die Indizes, die im wesentlichen die ausgefällte Menge CaCO_3 je 100 Liter Wasser je Karbonathärtegrad in mg angeben, voneinander ziemlich stark abweichen.

Wenn man die Eigenart der Abweichungen sorgfältig studiert, so fällt es auf, dass zwischen dem Kalkausscheidungsindex und der Karbonathärte eine im grossen und ganzen lineare Beziehung besteht. Je weitgehender also eine Lösung mit Kalk gesättigt ist, d. h. je mehr ihre Härte sich von der theoretisch berechenbaren Härte der sog. stabilen Grundlösung (die Härte, die durch den Partialdruck des CO_2 in der Höhlenluft in Gleichgewicht gehalten werden kann: bei einer Höhlenatmosphäre von $3/10.000$ Partialdruck und 10°C Temperatur beträgt das etwa 4,3 Karbonathärtegrade) unterscheidet, desto schneller geht die Ausscheidung einer gegebenen Menge Kalkes aus der Lösung vor sich.

Unsere Ergebnisse werden einleuchtender, wenn wir den oben geschilderten Zusammenhang diagrammatisch darstellen. Zu diesem Zweck

Ort der Messung	Wasser- tem- pera- tur	Gesamt- menge des abgetropf- ten Was- sers in sechs Mo- naten, Liter	Karbonat- härte des gesam- melten Tropf- wassers	Gebunde- ner CO ₂ - Gehalt des gesam- melten Tropf- wassers in mg/l	Freier CO ₂ - Gehalt des ge- sammel- ten Tropf- wassers in mg/l	Gewicht des an der Glas- platte aus- geschie- denen CaCO ₃ in mg	Gewicht des durch 1 Liter Wasser ausge- schie- denen CaCO ₃ in mg	Kalkaus- schei- dungs- index (das aus 100 l Wasser ausge- schie- dene CaCO ₃ in mg geteilt durch die Karbonat- härte des Wassers)
Säulenhalle 1.	10,3	51,3	27,5	216	205	282	5,5	20
Säulenhalle 2.	10,2	219,0	21,1	165	91	635	2,9	14
Säulenhalle 3.	10,3	99,0	16,9	134	48	188	1,9	11
Säulenhalle 4.	10,5	47,5	24,0	189	137	219	4,6	19
Säulenhalle 5.	10,0	297,8	22,5	177	112	1112	3,8	17
Tigersaal 1.	9,8	71,2	28,3	221	228	420	5,9	21
Tigersaal 2.	10,2	38,0	14,0	110	27	38	1,0	7
Riesenhalle 1.	9,9	427,5	15,0	118	33	513	1,2	8
Riesenhalle 2.	10,3	75,4	17,9	142	57	166	2,2	12
Märchenwelt	10,4	115,2	17,0	134	49	220	1,9	11
Friedenshöhle 1.	10,8	161,0	16,1	126	41	338	2,1	13
Friedenshöhle 2.	11,0	135,8	24,0	189	139	720	5,3	22
Friedenshöhle 3.	11,1	11,9	26,9	212	200	80	6,7	25
Friedenshöhle 4.	10,7	61,3	19,5	154	74	190	3,1	16
Friedenshöhle 5.	10,8	133,9	18,5	146	63	375	2,8	15
Entdeckerarm	11,2	74,2	21,0	165	94	282	3,8	18
Vass I.—Höhle 1.*	?	36,0	25,0	?	?	200	5,5	22
Vass I.—Höhle 2.*	?	38,2	15,0	?	?	67	1,7	11

* Fussnote: Die Untersuchungen in der Vass Imre-Höhle sind von L. Maucha und Mitarbeitern mit ihrem sog. „Robottropfstein-Messverfahren“ ausgeführt worden.

haben wir die Werte der Karbonathärte auf die Ordinatenachse, diejenigen des Kalkausscheidungsindex auf die Abszissenachse aufgetragen. Die Bildpunkte der zusammengehörenden Werte fallen alle in eine Zone, die mit zwei parallelen Geraden umrissen werden kann. Wir haben diese Zone das „Feld der Tropfsteinbildung“ genannt (s. untenstehendes Diagramm). (Abb. 2.)

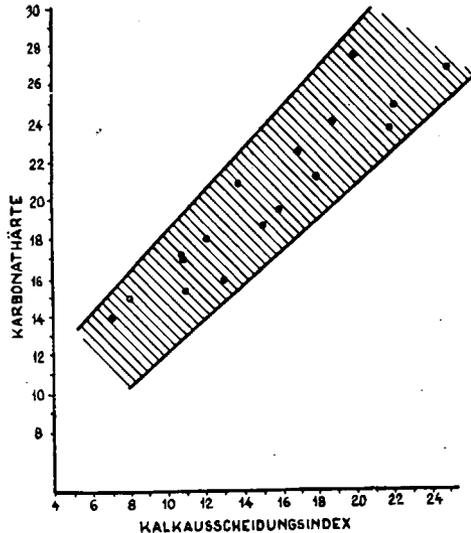


Abb. 2. Karbonathärte Kalkausscheidungsindex

Schon die Entdeckung dieses Feldes hat uns der Klärung der Gesetzmässigkeiten der Tropfsteinbildung nähergebracht. Unsere Untersuchungen haben aber auch noch viel wichtigere Zusammenhänge ergeben. Die Betrachtung des Feldes der Tropfsteinbildung führte nämlich zur Erkenntnis eines bislang ausser Acht gelassenen Faktors, des auf das Wasser einwirkenden hydrostatischen Druckes.

Es war uns zuerst unverständlich, warum die Punkte im Diagramm nicht an einer wohldefinierten Geraden liegen, sondern einen recht breiten Streifen einnehmen. Diese ziemlich starke Streuung der Punkte ist aus der Theorie der Kalkausscheidung nicht abzuleiten, und eine derartige Ungenauigkeit der Analysen ist schier unvorstellbar. Es fiel uns im Laufe unserer Betrachtungen erst nach einer Zeit auf, dass unser Diagramm noch etwas, u. zw. eine viel wesentlichere Beziehung darstellt. Es hat sich nämlich erwiesen, dass die in einer und derselben Höhle ermittelten Messwerte untereinander fast gar keine Streuung aufweisen, sodass für die Bildpunkte einer gegebenen Höhle das Feld fast zu einer Geraden zusammenschrumpft. Die derart gewonnenen

Linien, die sich auf die Tropfsteine einer und derselben Höhle beziehen, sind viel kennzeichnender als das gesamte Feld. (S. das Diagramm, Abb. 3.)

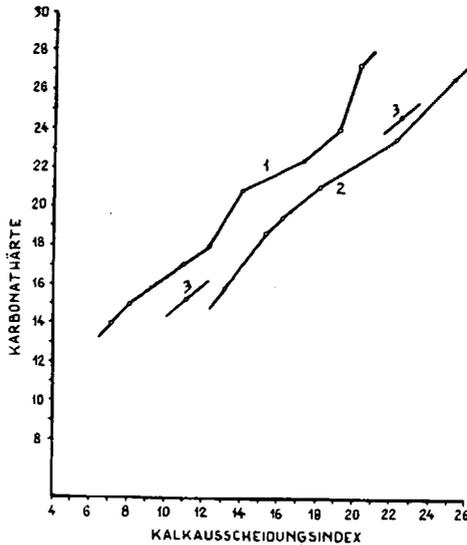


Abb. 3. Wie oben, und weiterhin. 1 = Baradla-Höhle 2 = Friedenshöhle 3 = Vass Imre-Höhle

Die Bildpunkte aus der Friedenshöhle liegen alle nahe an der rechten Seite des vormaligen Feldes, wogegen die Punkte aus der Baradla an der gegenüberliegenden, linken Seite auftreten. Die zwei Angaben aus der Vass Imre-Höhle sind zwar recht unzulänglich, jedoch ist die Anordnung der Punkte so auffallend, dass wir selbst anhand von diesen beiden Punkten zu behaupten wagen, dass der Dynamismus der Tropfsteinbildung in der Vass Imre-Höhle demjenigen der Friedenshöhle nähersteht als dem der Baradla.

Die Linien des soeben angeführten Diagramms bedeuten, dass die Tropfsteinbildung in der Friedenshöhle und in der Vass Imre-Höhle in einem rascheren Tempo erfolgt und dass sich die Unterschiede nicht mit den eventuellen Verschiedenheiten der Luftzusammensetzung oder der chemischen Zusammensetzung des Wassers erklären lassen. Die Auswertung unserer äusserst sorgfältig ausgeführten Analysen ergab eindeutig, dass sich in der Friedenshöhle aus dem Volumeinheit Wasser von gegebener Zusammensetzung (CO_2 -Gehalt) in der Zeiteinheit mehr Tropfstein ausscheidet als in der Baradla. Diese Unterschiede werden durch die Verschiedenheiten der atmosphärischen Verhältnisse der beiden Höhlen nicht erklärt; die Durchschnittstemperatur beträgt in der Baradla 10°C , in der Friedenshöhle 11°C , der CO_2 -Gehalt der Luft ist $0,03\text{--}0,04\%$ in der Baradla und $0,04\text{--}0,06\%$ in der Friedenshöhle, die

relative Feuchtigkeit der Luft ist 96—98% in der Baradla und 99—100% in der Friedeshöhle. Die besprochene Erscheinung kann nur darauf beruhen, dass die in die Baradla eindringenden Wässer im Kluftnetz des Karstes unter einem geringeren hydrostatischen Druck stehen als es bei den Wässern der Friedeshöhle der Fall ist.

Im Laufe der weiteren Besprechung dieses Problems wollen wir zur Untersuchung bzw. zum Beweis dieses Satzes noch zurückkehren. Demnächst begnügen wir uns, zu bemerken, dass die Anwesenheit von zahlreichen krummen, sog. „gepressten“ Tropfsteinen (Igel, Kleiderstöcke, usw.) in der Friedeshöhle und in der Vass Imre-Höhle davon zeugt, dass hier das Wasser vor dem Eintreten in die Höhle unter einem bedeutenden hydrostatischen Druck steht. In der Baradla sind derartige krumme Tropfsteine viel seltener, und auch diese treten meistens dort auf, wo die Höhlengänge am ältesten sind (z. B. im „Rákosi-Arm“). (Abb. 4.)

Wir mussten als Arbeitshypothese annehmen, dass das Wasser, welches im Kluftsystem des Karstes nach unten sickert und schon lange den Zustand des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes erreicht hat, unter einem zunehmenden hydrostatischen Druck selbst dann eine weitere Menge von Kalk verschlucken kann, wenn sein Gehalt an CO_2 der gleiche bleibt. In einer chemischen Formulierung besagt dieser Satz, dass sich infolge der intensiven Druckzunahme das Tillmans'sche Verhältnis

gebundenes CO_2 : akzessorisches CO_2

verschiebt und dass nunmehr zum Bestehen des Gleichgewichtes eine kleinere Menge von akzessorischem CO_2 bei einer gleichbleibenden Menge von gebundenem CO_2 hinreichen wird. Mit anderen Worten verlieren die klassischen Tillmans'schen Formeln unter den hydrostatischen Druckverhältnissen, die im Innern des Karstmassivs vorherrschen, ihre Gültigkeit. Folglich beruht die wiedererlangte Lösungsfähigkeit des Wassers nicht etwa darauf, dass der absolute Kohlensäuregehalt des Systems infolge der Druckzunahme (im Sinne des Satzes von Henry) zunimmt. Das kommt im geschlossenen Kluftsystem sowieso nicht in die Frage, da die Bodenatmosphäre mit ihrem hohen Kohlensäuregehalt ja nicht mehr in greifbarer Nähe liegt. Vielmehr beruht die wiedererlangte Aggressivität der betreffenden Lösungen darauf, dass ein Teil ihres akzessorischen Gleichgewichts-Kohlensäuregehaltes in aggressive Kohlensäure übergeht, unter den durch die Druckzunahme bedingten neuen Gleichgewichtsverhältnissen. Sobald dieses Wasser in den unter normalem Druck stehenden Luftraum der Höhle eintritt, beginnt es selbst dann Tropfstein auszuscheiden, wenn es gar keine Kohlensäure entweichen lässt. Die Menge des ausgeschiedenen Tropfsteins wird genau der Kalkmenge entsprechen, die das Wasser vorhin mittels seiner gesteigerten Aggressivität unter dem gewachsenen hydrostatischen Druck im Kluftsystem auflöste. Dabei muss sich der Kohlensäuregehalt des Wassers gar nicht geändert haben.

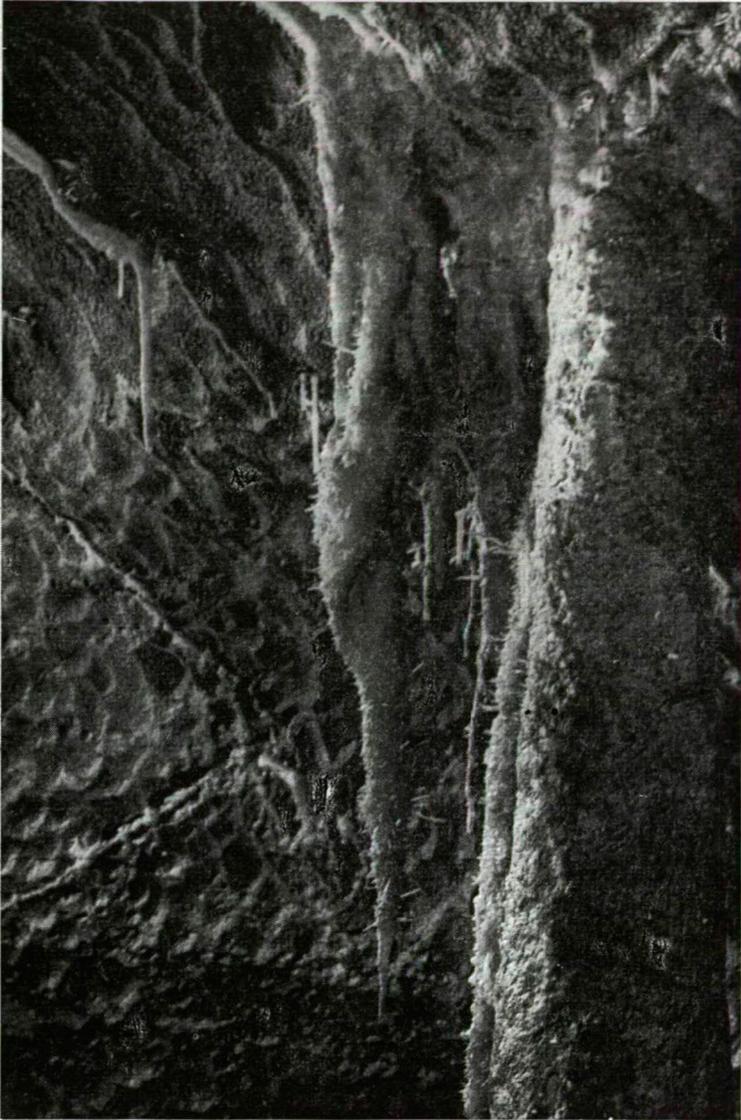


Abb. 4. Gepresster Tropfstein namens „Igel“ in der Friedenshöhle

Der soeben umrissene Satz, der uns in der ersten Zeit nur als Arbeitshypothese diente, ist ein völlig neuer, bislang ausser Acht gelassener, in der einschlägigen Literatur unbekannter Lehrsatz. Obzwar gewisse neuere speläologische Handbücher auf die Rolle der hydrostatischen Druckveränderungen in der Tropfsteinbildung hinweisen, geben sie eine falsche Deutung der Erscheinung.

So schreibt z. B. Dudich (16) folgendes über die Tropfsteinbildung in der Baradla-Höhle: „Die Tropfsteinbildung kann durch die Verdampfung des Wassers nicht erklärt werden, sondern nur durch die Entweichung der freien Kohlensäure. Letzteres kann zwei Ursachen haben. Die eine ist die Abnahme des Druckes. In den Klüften des Gesteins steht das Wasser unter ungeheuerem Druck, welcher jedoch bei dem Eintritt in die Höhle sofort auf eine Atmosphäre herabfällt; das hat jedoch das teilweise Entweichen der freien Kohlensäure zur Folge.“

Kessler stellt im wesentlichen dasselbe fest (17): „Bekanntlich ist die Menge der im Wasser aufgelösten Kohlensäure desto grösser, je stärker der Druck, der auf das Wasser einwirkt. Am einfachsten können wir uns darüber durch die Betrachtung einer Seltersflasche überzeugen. Wenn man ein wenig Wasser aus der Flasche lässt, d. h. wenn man den Druck auf das Wasser vermindert, so beginnt sofort Kohlensäure, oder genauer gesprochen Kohlendioxyd, zu entweichen. Andererseits hängt die Kalklösefähigkeit des Wassers von seinem Kohlensäuregehalt ab; falls das kalkhaltige Wasser infolge der Druckverminderung Kohlensäure abgibt, so kann es auch weniger Kalk in Lösung behalten, und der Überschuss wird ausgefällt. Das ist auch bei der Tropfsteinbildung der Fall. Als nämlich der Wassertropfen am First der Höhle erscheint, wird er von einem beträchtlichen hydrostatischen Druck befreit, an der äusseren Fläche des Tropfens tritt sogar infolge der Oberflächenspannung eine gewisse Zugkraft auf. Folglich verliert das Wasser hier, in der äussersten Hülle am meisten an Kohlensäure, und deshalb scheidet sich auch der Kalkgehalt hier aus.“

Wir müssen betonen, dass die Erklärungen beider hervorragender Forscher einen grundlegenden Irrtum bergen. Es ist zwar durchaus wahr, dass das mit Kohlendioxyd übersättigte Wasser, sobald es vom Druck befreit wird, einen Teil seines Kohlensäuregehaltes abzugeben strebt. Jedoch ist es auch klar, dass ein mit Kohlensäure übersättigtes Wasser in einer Luft von geringerer CO_2 -Konzentration selbst dann einen Teil seines CO_2 -Gehaltes abzugeben strebt, wenn es keinerlei Druckverminderung erfährt. Folglich ist die Abgabe von CO_2 nicht eine zwangsläufige Begleiterscheinung der auf das Wasser einwirkenden Druckverminderung.

Der Verlust des CO_2 -Gehaltes wird durch die Druckverminderung ausschliesslich nur dann beeinflusst, falls auch die Übersättigung mit CO_2 infolge der Druckzunahme des CO_2 in der sich mit dem Wasser berührenden Atmosphäre erfolgte (wie z. B. in der zitierten Seltersflasche). Davon kann jedoch im Karst nicht die Rede sein. Nichtsdestoweniger übersahen beide Autoren die wichtige Frage, wie das Wasser, das

erst im Kluftnetz des Karstgesteins unter Druck gelangt, sich daselbst mit Kohlensäure übersättigen hätte können?

Es ist nicht zu bezweifeln, dass der Wassertropfen in der Höhle CO_2 an die Luft abgibt, jedoch nicht weil er vom Druck freikommt, sondern weil der Partialdruck des CO_2 in der Höhlenluft viel geringer ist als in der obersten humösen Bodenschicht (wo übrigens das Wasser noch keineswegs unter hydrostatischem Druck stehen konnte!). Folglich ist die Menge der in der Höhle abgegebenen Kohlensäure ganz unabhängig davon, ob das Wasser bei dem Eintritt in die Höhle eine Druckverminderung erfährt oder nicht.

Die richtige Erklärung der Rolle der Druckänderungen ist, wie bereits angedeutet, wesentlich anders. Es handelt sich nicht um eine Zunahme oder Abnahme des totalen CO_2 -Gehaltes im Wasser, sondern vielmehr um eine weitere Aktivierung der Aggressivität des gegebenen und konstanten CO_2 -Gehaltes. Nun ist das ein grosser, ein sehr wesentlicher Unterschied, dessen Erkenntnis nicht nur für das tiefere Verständnis der Tropfsteinbildung, sondern auch für die richtige Deutung aller Lebenserscheinungen des Karstes von ausschlaggebender Wichtigkeit ist.

Wir haben bereits erwähnt, dass wir die Theorie der sekundären Kalklösung infolge hydrostatischer Druckzunahme vorerst nur als Arbeitshypothese auffassten, zwecks einfacherer Erklärung gewisser Erscheinungen. Später gelang es uns jedoch, in den Höhlen von Aggtelek Beobachtungen und Experimente auszuführen, die die objektive Gültigkeit dieses Satzes in der Natur endgültig bewiesen haben.

Des weiteren wollen wir nun die erwähnten Experimente besprechen.

Es galt also zu beweisen, dass die durch die hydrostatische Druckzunahme aktivierte Lösung selbst ohne Verschluckung weiterer Mengen von CO_2 eine sekundäre Lösungsfähigkeit erlangt. Die Umkehrung des Satzes erfordert, dass das in die Höhle eindringende und dort vom hydrostatischen Druck sich befreiende Wasser ohne Abgabe von CO_2 , sowie ohne Verdunstung und Temperaturveränderung Tropfstein ausscheiden soll.

Die ausschlaggebenden Experimente sind in der Friedenshöhle und in der Baradla im folgenden ausgeführt worden:

Experiment Nr. 1.

Wir haben einen Stalaktit mit innerer Wasserführung (Röhrenstalaktit) ausgewählt, bei welchem es anzunehmen war, dass das geförderte Wasser im Gestein unter beträchtlichem Druck steht. Über das Ende des ausgewählten Stalaktits haben wir eine dicht anliegende Gummiröhre gestülpt und stracks festgebunden, damit sie nicht herunterrutschen konnte. Die Röhre wurde dann 5—6 cm vom Ende des Stalaktits abgeschnitten. Das freie Röhrenende wurde über das eine Ende einer etwa 15 cm langen Glasröhre von 1 cm Durchmesser gestülpt, dessen andere Ende in der Bunsenflamme haardünn ausgezogen worden ist. Wir haben die Glasröhre mit einem dünnen Draht derart am Tropfstein festgebunden, dass die haardünne Öffnung der Röhre am höchsten zu liegen

kam. (Apparatur Nr. I.) Diese Anordnung war notwendig, damit das in die Röhre einsickernde Wasser die Luft daraus völlig verdrängen konnte. Die Einrichtung ist im montierten Zustand in der untenstehenden Abbildung sichtbar. (Abb. 5.)

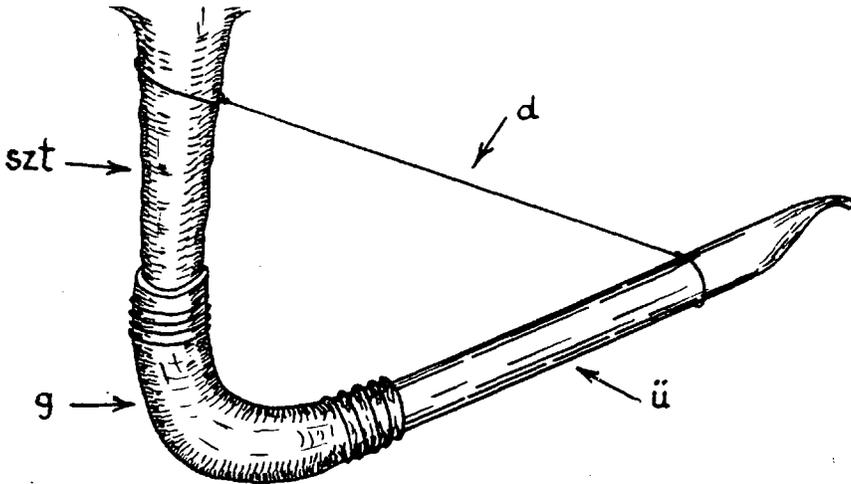


Abb. 5. szt: Röhrenstalaktit g: Gummiröhre ü: Glasröhre d: Montage draht

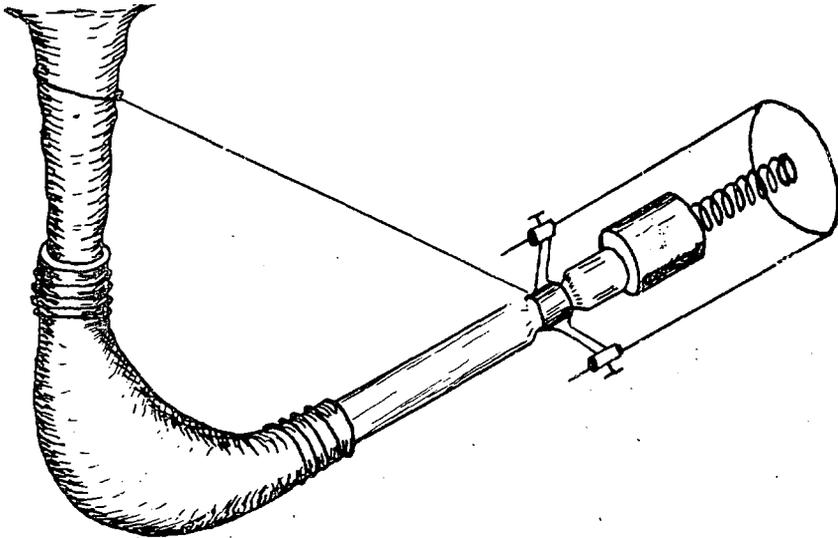
Selbstredend kann das aus der Rinne des Stalaktits über die Gummiröhre in die Glasröhre eintretende Wasser weder in der Gummi —, noch in der Glasröhre CO_2 abgeben, da es sich nicht mit der Höhlenluft berührt. Noch kann das Wasser im Innern der Röhren verdunsten. Da sich die Temperatur der Glasröhre auf diejenige der Höhlenluft, d. h. auf die Temperatur des umgebenden Felsens einstellt, kann das im Innern des Karstmassivs entstandene Gleichgewicht Kalk-Kohlensäure auch durch Temperaturveränderungen nicht verschoben werden. Folglich besteht die einzige Veränderung im Zustand des Wassers, das durch die winzige Öffnung am Ende der Glasröhre tropft, darin, dass der hydrostatische Druck, der im Innern des Gesteins herrschte, jetzt aufhört. Falls wir also im Innern der Röhre nach einer gewissen Zeit die Ausscheidung von Tropfstein beobachten sollten, so wäre das ein gewichtiges Argument für unsere Auffassung.

Wir haben das Experiment an vier verschiedenen Stalaktiten der Friedenshöhle viermal wiederholt. Wir haben in allen vier Fällen durchaus positive Ergebnisse erhalten. In 2—3 Monaten lagert sich auf der inneren Röhrenwandung ein dünner, durchleuchtender Belag von Tropfstein ab.

In der Baradla ist das Experiment in zwei Fällen ausgeführt worden. Im einen Falle liess sich erst nach einer Zeit von fünf Monaten eine sehr schwache Kalkausscheidung im Innern der Glasröhre wahrnehmen, im andern war das Ergebnis völlig negativ, selbst nach einer Frist von 6 Monaten.

Experiment Nr. 2.

Bei diesem Experiment haben wir das freie Ende der Glasröhre nicht dünnegezogen, sondern wir haben es mit einem Druckregulierungsventil versehen. Der Ventil bestand in einem Gummistoppel, der mittels einer Feder gegen das Ende der Röhre gepresst wurde. (S. untenstehende Abbildung.) (Abb. 6.)



Das Ventil konnte mit Hilfe der Feder bzw. des verstellbaren Armes der Federansatzscheibe auf beliebigen Druck, zwei, drei oder mehr Atmosphären eingeregelt werden. Das so eingestellte Ventil liess das Wasser aus der Röhre nur heraus, falls der Druck im Innern der Vorrichtung den erwünschten Wert erreichte. Diese einfache Einrichtung war zur Konstanthaltung des hydrostatischen Druckes im Innern der Glasröhre durchaus geeignet.

Das vorschriebliche Funktionieren der Vorrichtung konnte an der verbindenden Gummiröhre kontrolliert werden, da letztere anschwell, sobald die Anlage (meistens 1—2 Tage nach der Montage) unter Druck stand. Die Gummiröhre diente daher in diesem Falle auch als Manometer.

Übrigens stimmten Montage und Anordnung der Apparatur im Prinzip mit denen der Apparatur Nr. I. in allen Einzelheiten über ein (s. Abbildung.) (Abb. 7.)

Dieses zweite Experiment hatte das Zweck, zu untersuchen, ob im Innern der Glasröhre selbst dann eine Tropfsteinausscheidung vor sich geht, wenn, alle übrigen Umstände gleichgesetzt, die Abnahme des hydrostatischen Druckes im Wasser verhindert oder verringert wird.

Das Experiment endete an zwei Stalaktiten der Friedenshöhle mit Erfolg. In beiden Fällen haben wir bei der Anwendung eines Druckes

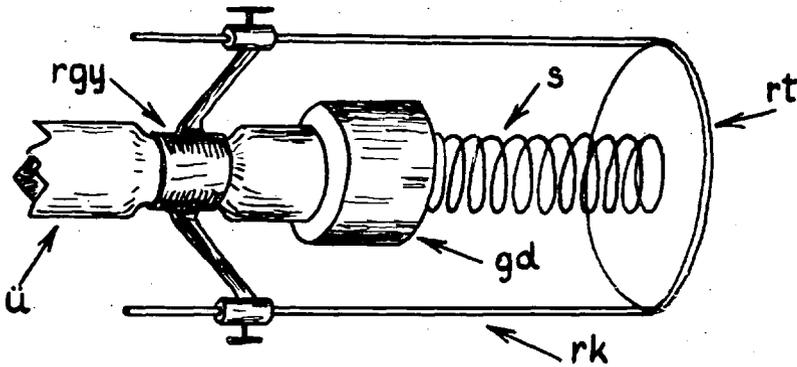


Abb. 7. ü: Glasröhre rgy: Montiering der Federansatzscheibe bzw. seiner Arme gd: Gummistoppel rk: verstellbarer Arm der Federansatzscheibe s: Spiralfeder rt: Federansatzscheibe

von etwa 2 Atmosphären die Erfahrung gemacht, dass in der Röhre zwar eine sichtbare Kalkausscheidung auftrat, jedoch nicht in 2—3 Monaten, wie im vorangehenden Falle, sondern erst nach 6—8 Monaten.

Leider konnten wir das Experiment an den übrigen untersuchten Tropfsteinen der Friedenshöhle bzw. am Tropfstein der Baradla, der sich im Experiment Nr. I. positiv benahm, nicht ausführen, da diese Tropfsteine sofort zu tropfen aufhörten, sobald die Vorrichtung mit dem Regulierventil montiert wurde. Gleichzeitig erhöhte sich die Ergiebigkeit der benachbarten Tropfsteine um den entsprechenden Betrag.

Es handelte sich also in diesen Fällen darum, dass die einzelnen Tropfsteine versorgenden Kluftkanäle miteinander verbunden waren, und als wir die eine Öffnung (den einen Stalaktit) sperrten, das Wasser durch die anderen in die Höhle drang. Auch das Gelingen der beiden Experimente in der Friedenshöhle war dem Umstand zu verdanken, dass wir zwei verhältnismässig einsame Stalaktite auswählen konnten.

Die obigen erfolgreichen Experimente haben also unter Beseitigung der letzten Zweifel bewiesen, dass der hydrostatische Druck des Karstwassers einer der grundlegenden Faktoren der Tropfsteinbildung ist. Diese Feststellung ist eine neue, bislang unbekannte Gestzmässigkeit der chemischen Prozesse der Kalklösung bzw. — Ausscheidung. Wir sind überzeugt davon, dass dieser sekundäre Kalklösungsfaktor nicht nur in der Tropfsteinbildung, sondern auch in den übrigen allgemeinen Lebenserscheinungen des Karstes von ausschlaggebender Wichtigkeit ist.

Literatur

1. Tillmans, J.: Die chemische Untersuchung von Wasser und Abwasser. Halle, 1932.
2. Bömer—Juckenak—Tillmans: Handbuch der Lebensmittelchemie, B. VIII., Berlin 1940.
3. Tillmans—Hirsch—Lurmann: Nouveau procédé de désacidification de l'eau. Gas und Wasserfach, 1931., Nr. 48., 49., 50., 51., 52.

4. Colas, R.: L'agressivité des eaux. L'eau, Nr. 6., 7., 8., 1949.
5. Schoeller, M.: Notions sur la corrosion interne des canalisations d'eau. Annales des Ponts et Chaussées, Nr. 8., 1938.
6. Laptew—Prikłonski: Felszínalatti vizek tulajdonságai és kémiai összetétele (Eigenschaften und chemische Zusammensetzung unterirdischer Gewässer), Budapest, 1952.
7. Laptew, F. F.: Agressivnoe deistvie vody na karbonatnye porody usw. Moskau—Leningrad, 1939.
8. Papp Sz.: A hidrológiai kutatás kémiai vonatkozásai (Die chemischen Beziehungen der hydrologischen Forschung), Mérnöki Továbbképző Intézet Kiadványa, Budapest, 1954.
9. Kyrle, G.: Grundriss der theoretischen Speläologie, Wien, 1923.
10. Prinz W.: Les cristallisations des grottes de Belgique. Nouv. mém. Soc. Belge de Géol. Bruxelles, 1908.
11. Schmidl, A.: Zur Höhlenkunde des Karstes, Wien, 1854.
12. Vrba, K.: Calcit-Stalaktiten von Niernschitz. Neues Jahrb. f. Min. etc. 1873.
13. Grund, A.: Die Karsthydrographie, Geogr. Abh. Wien—Leipzig, 1903.
14. Trombe, F.: Traité de spéléologie, Paris, 1952.
15. Schloesing: Die Rezension seines in 1872 erschienenen pädologischen Aufsatzes s. im Werk Nr. 14. Der Aufsatz selber ist mir unbekannt.
16. Dudich E.: Az Aggteleki cseppkőbarlang és környéke. (Die Tropfsteinhöhle von Aggtelek und ihre Umgebung), Budapest, 1932.
17. Kessler H.: Az örök éjszaka világában (In der Welt der ewigen Nacht), Budapest, 1957.
18. Venkovits I.: Újabb megfigyelések a karsztvízkérdéssel kapcsolatban (Neuere Beobachtungen über das Karstwasserproblem), MTA Műsz. Tud. Oszt. Közl., Bd. VIII, 1953.
19. Venkovits I.: Dorogi vízvizsgálatok (Wasseranalysen aus Dorog), Hidrológiai Közlöny, 1949.
20. Venkovits I.: Leszivárgó csapadékvizek vegyi összetételének változásai (Die Veränderungen der chemischen Zusammensetzung in absickernden Niederschlagswässern), Földt. Int. Évi Jel., 1949.
21. Davis, W. M.: Origin of limestone caverns. Bull. geol. soc. of America, 1930., pp. 457—628.
22. Hovey, H. C.: Celebrated American caverns, Cincinnati, 1882, 1896.
23. Martel, E. A.: Nouveau traité des eaux souterraines, Paris, 1921.
24. Kriz, M.: Die Höhlen in den mährischen Devonkalken und ihre Vorzeit. Jahrb. Geol. Reichsanst. Wien, 1891, 1892.
25. Kunszki, J.: Kras a jaskyne, Prag, 1950.
26. Kunszki, J.: Zur Altersfrage der Tropfsteine. Vestnik Stat. Geol. Ustavu, Prag, 1941., pp. 269—280.
27. Percó, G. A.: A postumiai cseppkőbarlang (Die Tropfsteinhöhle von Postumia), Verlag Panorama, Budapest—Wien—Postumia, ohne Jahresziffer.
28. Farrington, O. C.: Observations of India Caves, Field Columbia Mus. Geol. Series, 1901.
29. Vitásek, F.: Der Rhythmus im Wachstum der Tropfsteine und die Demänowá-Höhlen. Zeitschr. f. Geomorphologie, Berlin, 1940.
30. Kaspar, J.: O nekterych zajímavych krápnících, Veda prirodni, Prag, 1941, Nr. 29.
31. Kaspar, J.: O raspredelenii zinka, swinza i medy w iswestniakach i wodach pestschery Domica w Slowenskom karste, Akad. Nauk SSSR, 1936, pp. 267—271.
32. Maucha L.: Az É. M. K. E. Jósvalfői Kutatóállomásának 1959/60. évi munkáiról (Über die Arbeiten der Jósvalföer Forschungsstation der Universität für Bau- und Verkehrswesen in 1959/60), Karszt- és Barlangkút. Tájékoztató, Júni 1960.