

# Die Kalkkorrosion, das zentrale Problem der unterirdischen Verkarstung

VON ALFRED BÖGLI (Hitzkirch, Schweiz)

## Einleitung

Die Verkarstung von Kalkgebieten ist ohne Kalklösung undenkbar. Die Verknüpfung von Kalklösung und Verkarstung ist derart evident, daß es naheliegt, das aktuelle Ausmaß des Verkarstungsfortschrittes mit der Größe der abtransportierten Kalkmenge zu identifizieren. Das führt jedoch zu Trugschlüssen.

Der Begriff der Verkarstung umfaßt zwei verschiedene Inhalte. Im engeren Sinne ist sie die Verlegung des Wassers in das verkarstungsfähige Gestein des Untergrundes, im weiteren schließt sie jedoch auch die Umwandlung der Oberfläche in ein Karstrelief ein, welche Fassung entschieden vorzuziehen ist. Auf der Oberfläche liegen häufig Verwitterungsprodukte, Denudations- und allenfalls auch Moränenschutt. Hier laufen intensive Lösungsvorgänge ab, die mit Verkarstung nichts zu tun haben. Das zeigt sich im hohen Kalkgehalt der Quellen aus Moränendecken und lehmigem Schutt, während jene des nackten und sogar des grünen Karstes, denen solche Decken fehlen, viel weniger Kalk führen. Die aus einem Karstgebiet abtransportierten Kalkmengen sind daher keineswegs ein Maß für die Größe des aktuellen Verkarstungsfortschrittes, höchstens ein Hinweis.

Hydrologisch interessieren auch im Karst die Gerinne, ihr Werden und Vergehen. Im Reifezustand dieses Landschaftstyps sind sie zum größten Teil, häufig sogar zu 100%, in den Untergrund verlegt. Diese Erscheinung ist nur durch die Löslichkeit und Klüftigkeit des Gesteins erklärbar, in unserem Falle der Karbonatgesteine, im besonderen des Kalks. Die große Reinheit des Gesteins — voll verkarstungsfähige Kalke enthalten meist 95 bis 98%  $\text{CaCO}_3$  — verhindert eine nachträgliche Kolmatierung der Klüfte und Fugen durch Lösungsrückstände. Es muß nach O. LEHMANN (1932) unterschieden werden zwischen hydrographisch wegsamen und karsthydrographisch wirksamen Klüften. Hydrographisch wegsam sind alle Klüfte und Fugen, die das Wasser, wenn auch zum Teil erst

unter Druck, durchlassen. Das ist für die Verkarstung so lange bedeutungslos, als mangels Vernetzung dieses Wasser nicht weiter wandern kann. Erst wenn ein Durchfluß möglich ist, werden die Spalten karsthydrographisch wirksam und können sich zu unterirdischen Gerinnen entwickeln.

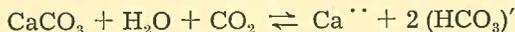
Die Durchlässigkeit des Kalkes hängt stark vom Druck ab. Ist er hoch genug, so können fürs Auge unsichtbare Fugen noch wasserführend werden. Druckversuche an einer Kalkbank der Zementsteinschichten (oberer Malm der Axendecke) von der Glattalp im Einzugsgebiet der Muota (Kanton Schwyz) ergaben eindruckliche Resultate. Nach dem Einschleifen des Druckringes auf der Schichtfläche hatte der unversehrte Kalkblock noch eine Dicke von etwa 25 cm. Bei 40 m Wasserdruck begann bei einer subkapillaren, vorher nicht sichtbaren Fuge Wasser tropfenweise durchzutreten. Bei 50 m tropfte es in schneller Folge ab, und einzelne Stellen der Unterseite zeigten Vernässungen, die bei 60 m ebenfalls zu tropfen begannen. Bei 80 m wurde der Versuch abgebrochen, einerseits, weil die Dichtung nicht mehr genügte, andererseits, weil ursprünglich eine Druckhöhe von 60 m Wassersäule als genügend erachtet wurde. In der subkapillaren Fuge war es nicht zu einem eigentlichen Rinnen gekommen, was bei einer kapillaren sicherlich eingetreten wäre. Damit ist jedenfalls gesichert, daß, genügender Druck vorausgesetzt, jede Fuge im Kalk hydrographisch wegsam sein kann. Hierdurch erhalten Beobachtungen aus dem Hölloch (Kanton Schwyz) erst ihren vollen Wert. Im Frühjahr, wenn die Wände trocken sind, treten bei Regen oder Schneeschmelze an vielen Wänden Nässestellen auf, ohne daß vorher eine Fuge erkennbar gewesen wäre. Diese Flecken werden allmählich größer, vor allem durch die Kapillarität der rauhen Oberfläche, und es kommt zuletzt häufig zur Tropfenbildung. Diese Erscheinung ist bedeutungsvoll für die Erklärung von Korrosionskolken und von eigentümlichen Löcherbildungen, die an Wänden und Decken wahrscheinlich durch Mischungskorrosion entstehen. Sie kann aber andererseits auch in der Initialphase der Höhlenbildung durch Mischungskorrosion eine Rolle spielen.

Welche von den ungezählten Möglichkeiten des Wasserdurchtrittes zur karsthydrographischen Wirksamkeit und damit zur Bildung größerer unterirdischer Gerinne gelangt, bestimmt die Durchlässigkeit der einzelnen Wege. Je größer sie ist, um so mehr Wasser wird hier durchfließen. Dadurch verringert sich der Druck, und die Wahrscheinlichkeit, daß benachbarte Fugen auch an der karsthydrographischen Wirksamkeit teilnehmen können, sinkt schnell ab. Sind aber benachbarte — seitlich oder auch überein-

anderliegende — Fugen gleichwertig, so entstehen parallele Gerinne, die dem Speläologen als Doppelgänge bekannt sind. Im weiteren Verlauf der Höhlenentwicklung können sie zu einem einzigen Gang verschmelzen.

## 1. Die konventionelle Auffassung von der Kalklösung

Die Entwicklung der Fugen und Klüfte zu leistungsfähigen unterirdischen Gerinnen erfolgt in der ersten Phase durch Korrosion, der sich in späteren Erosion in örtlich und zeitlich sehr verschiedenem Ausmaße zugesellt. Für die Kalklösung durch Bildung von Hydrokarbonationen gilt die bekannte Summengleichung:



Zur Kalklösung ist somit  $\text{CO}_2$  unerlässlich. Dieses steht unterirdisch nur in den drei folgenden Fällen zur Verfügung:

1.  $\text{CO}_2$  wird im aggressiven Wasser ins Erdinnere verfrachtet. Fließt es in dünnen Schichten über den Kalk, was bei Primärklüften und Primärfugen die Regel ist, so wird das  $\text{CO}_2$  in sehr kurzer Zeit durch die Reaktion mit dem Kalk aufgebraucht. Der Wirkungsbereich übersteigt dabei selten einige cm oder dm. Eine Erweiterung dieser Spalten ist im Erdinnern auf diesem Wege daher nicht möglich. In Höhlenflüssen, die jedoch bereits stark erweiterte Primärhöhlräume zur Voraussetzung haben, wirkt sich die Aggressivität bis weit ins Erdinnere aus, da das  $\text{CO}_2$  nur allmählich mit dem Kalkgestein in Berührung kommt. Die Wirkungsdistanz kann bei Hochwasser einige hundert Meter bedeutend übersteigen. Beim Erreichen der phreatischen Zone verlangsamt sich die Wasserbewegung, das verbleibende  $\text{CO}_2$  wird zur Gänze verbraucht und überschreitet auch im günstigsten Falle die hochphreatische Zone nicht. Die durch das aggressive Wasser ausgelöste Korrosion ist gering und erreicht höchstens einige mg Kalk pro Liter.
2. Wasser kann auch innerhalb des Gesteins mit Luft in Berührung kommen (Gravitationsgerinne, Tropfwasser, Seen). Wenn der Kalkgehalt niedriger ist, als es dem Partialdruck des  $\text{CO}_2$  entspricht, so wird dieses aufgenommen, und es kommt zur Korrosion. Diese Bedingung kann nur in der vadosen Zone erfüllt werden, wobei nicht außer acht zu lassen ist, daß so geringe Kalkgehalte im Erdinnern nicht häufig sind. Das Gleichgewicht mit der Höhlenluft stellt sich gewöhnlich bei 75 bis 90 mg  $\text{CaCO}_3$ /Liter ein, wobei der Wert von der Temperatur, vom Luftdruck und dem  $\text{CO}_2$ -

Gehalt, somit vom Partialdruck des  $\text{CO}_2$  abhängig ist. Bei Primärhohlräumen ist der Querschnitt so klein, daß infolge der Kapillarwirkung nicht gleichzeitig Luft und Wasser zirkulieren können, so daß eine Erweiterung auf diesem Wege nicht möglich ist.

3. Von der Erdoberfläche werden organische Stoffe ins Erdinnere eingeschwemmt. Sie werden zum Teil oxidiert und bilden das biogene  $\text{CO}_2$ . Höhlenluft oder sauerstoffreiches Wasser sind hierzu unerläßlich. Untersuchungen an rezenten und pleistozänen Höhlenlehmen lassen eine Verminderung der Humusgehalte als sehr wahrscheinlich erscheinen. Das durch dieses biogene  $\text{CO}_2$  gelöste Kalkvolumen dürfte jedoch kaum mehr als 1% des Volumens des Höhlenlehms ausmachen und wird in der Regel bedeutend darunter liegen. Primärhohlräume werden kaum jemals von organischen Substanzen erreicht, da deren Transport schon ein erweitertes Kluftsystem verlangt.

Folgerungen: Die Entwicklung der Primärhohlräume zu Höhlen ist durch die bisher bekannte Korrosionsform nicht erklärbar. Einzig die seltenen Urhohlräume im Sinne von O. LEHMANN, klaffende Klüfte größeren Querschnittes, können sich als Gravitationsgerinne gleich verhalten wie schon bestehende Höhlen. Bei Druckfließen und im phreatischen Bereiche ist mit seltenen Ausnahmen von geringer Wirksamkeit nicht mit einer korrosiven Erweiterung im oben genannten Sinne zu rechnen. Die zahllosen Höhlen und die unterirdische Entwässerung zeugen jedoch von einer starken korrosiven Erweiterung der Primärhohlräume, woraus kategorisch folgt, daß noch auf eine bisher nicht erkannte Art und Weise Kalk gelöst wird.

## 2. Die Mischungskorrosion

Einer jeden Kalkkonzentration im Wasser ist eine bestimmte, temperaturabhängige Menge an gelöstem  $\text{CO}_2$  zugeordnet, die Gleichgewichtskohlensäure, das  $\text{CO}_2$ eq. Die Abhängigkeit zwischen beiden Stoffen folgt einer quadratischen Gleichung, die graphisch als Gleichgewichtskurve dargestellt wird. J. TILLMANS (1932) bestimmte die dazu gehörigen Werte empirisch, doch lagen sie so weit auseinander, daß eine größere Zahl von Zwischenwerten durch Interpolation gewonnen werden mußte. Um die Stetigkeit der Gleichgewichtskurve zu gewährleisten, sahen wir uns gezwungen, geringfügige Korrekturen vorzunehmen. Die praktischen Ergebnisse der

Analysen bei der EAWAG (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz) ergaben unterhalb einer Kalkkonzentration von 200 mg/l eine befriedigende Übereinstimmung mit den TILLMANS'schen Werten, darüber aber zunehmend stärkere Abweichungen des CO<sub>2</sub>eq. Daraufhin entwickelten ZEHENDER, STUMM & FISCHER (1956) eine quadratische Gleichung, die den vorgefundenen Werten gut entsprach.

$$\frac{K}{f} \cdot H^3 = \text{CO}_2\text{eq. mg/l}$$

Diese Gleichung vom scheinbar dritten Grade besitzt in f einen von der Härte H (fH) abhängigen Korrekturfaktor, so daß sie tatsächlich zweiten Grades ist. K ist eine temperaturabhängige Konstante. Diese Gleichung gilt nur für reine Karbonatwässer.

**Tabelle 1:**

CO<sub>2</sub>eq. in mg/l nach TILLMANS sowie ZEHENDER, STUMM & FISCHER bei 17° C

CaCO <sub>3</sub>	TILLMANS	ZEHENDER STUMM FISCHER	CaCO <sub>3</sub>	TILLMANS	ZEHENDER STUMM FISCHER
	CO <sub>2</sub> eq.	CO <sub>2</sub> eq.		CO <sub>2</sub> eq.	CO <sub>2</sub> eq.
10	0	0	190	13,38	13,14
40	0,41	0,16	200	15,97	15,19
60	0,80	0,50	220	22,29	19,98
80	1,41	1,14	240	30,27	25,41
100	2,27	2,14	260	39,99	31,87
120	3,46	3,59	280	51,30	39,27
140	5,15	5,54	300	64,00	47,7
160	7,61	8,08	320	77,9	57,2
180	11,12	11,28	340	93,0	67,8
			360	109,4	79,6
			380	126,9	92,5
			400	145,9	106,8

Mischt man zwei Wässer von verschiedenem Kalkgehalt, dann liegen die Mischungspunkte auf einer Geraden, die die beiden Komponenten W<sub>1</sub> und W<sub>2</sub> auf der Gleichgewichtskurve verbindet. Sie liegt im Bereiche des Wassers mit überschüssigem CO<sub>2</sub>.

Die Berechnung der Kalkmenge, die durch das beim Mischen entstehende freie CO<sub>2</sub> gelöst werden kann, erfolgt durch Näherungsverfahren und ist daher bei komplizierten Mischungsverhältnissen recht langwierig.

**Tabelle 2:**

Zusätzlich lösbar Kalkmengen, nach den abgeänderten Werten von  
TILLMANS berechnet (17° C)

Ausgangskonzentrationen		Mischungsverhältnis T und die zusätzlich lösbar Kalkmenge in mg/l.				
W <sub>1</sub> mg/l	W <sub>2</sub> mg/l	9 : 1	3 : 1	1 : 1	1 : 3	1 : 9
11,5	125,0	0,6	1,1	1,8	1,2	0,75
11,5	221,6	4,5	10,1	15,9	12,9	6,0
11,5	329,6	17,2	38,8	50,1	29,1	12,6
73,9	125,0	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2
73,9	221,6	3,3	7,5	10,5	7,7	3,7
73,9	329,6	14,9	30,2	33,7	20,4	8,9
125,0	170,5	0,4	0,6	1,0	0,6	0,3
125,0	272,7	5,5	11,0	13,3	8,8	3,9
125,0	358,0	14,0	25,7	26,3	16,1	7,0
170,5	272,7	2,7	5,4	6,6	4,3	1,9
170,5	301,4	4,3	8,5	9,6	6,1	2,7
170,5	358,0	8,6	15,5	16,1	10,2	4,5
272,7	358,0	1,0	2,1	2,6	1,9	0,8

**Tabelle 3:**

Zusätzlich lösbar Kalkmenge auf Grund der Werte nach  
ZEHENDER, STUMM & FISCHER berechnet (17° C)

Ausgangskonzentrationen		Mischungsverhältnis T und die zusätzlich lösbar Kalkmenge in mg/l.				
W <sub>1</sub> mg/l	W <sub>2</sub> mg/l	9 : 1	3 : 1	1 : 1	1 : 3	1 : 9
10	120	0,8	1,7	2,5	2,1	1,0
10	240	5,5	11,9	16,0	11,6	5,4
10	320	12,1	25,6	31,7	21,7	9,4
10	400	22,3	44,9	51,5	33,3	14,7
80	120	0,2	0,3	0,5	0,3	0,2
80	240	3,4	6,8	8,8	6,3	3,0
80	320	8,5	17,0	20,6	14,1	6,4
80	400	16,6	31,9	36,5	23,7	11,4
120	180	0,5	1,0	1,3	0,9	0,3
120	240	2,0	4,0	5,2	3,8	2,0
120	320	6,2	12,2	15,0	10,1	4,6
120	400	13,0	34,6	28,4	17,8	8,4
180	240	9,5	1,0	1,1	1,1	0,6
180	320	3,0	6,0	7,4	5,2	2,4
180	400	7,9	15,1	17,7	11,7	5,5

Das graphische Verfahren der Bestimmung von überschüssigem  $\text{CO}_2$  und der damit löslichen Kalkmenge ist vergleichsweise sehr einfach und ergibt Werte, die innerhalb der Fehlerquellen der  $\text{CO}_2$ -Bestimmung liegen. Man zieht zuerst die Mischungsgerade  $W_1/W_2$ . Durch den Teilpunkt T wird das Mischungsverhältnis festgelegt. Aus der Graphik sind die Mengen an  $\text{CaCO}_3$  und  $\text{CO}_2$ , die die Mischung kennzeichnen, direkt ablesbar. Das  $\text{CO}_2$ eq. wird durch den Schnittpunkt C der Waagrechten mit der Gleichgewichtskurve bestimmt. CT entspricht dem freigewordenen  $\text{CO}_2$ , das teils zur Kalklösung verwendet wird (TB), teils das damit steigende  $\text{CO}_2$ eq. deckt (CB). Der Punkt A wird durch eine Gerade bestimmt, deren Steigungsmaß immer gleich ist und vorher festgelegt werden muß. Dieses ergibt sich aus folgender Überlegung: Ein Molekül  $\text{CO}_2$  bringt ein Molekül  $\text{CaCO}_3$  zur Lösung. 22 mg  $\text{CO}_2$  ( $1/2$  Millimol) entsprechen daher 50 mg  $\text{CaCO}_3$  ( $1/2$  Millimol). Dadurch ist das Steigungsmaß festgelegt.

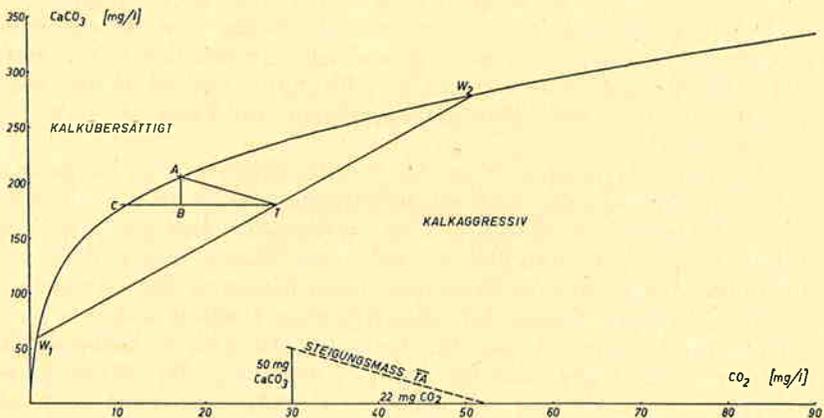


Abb. 1: Gleichgewichtskurve zwischen gelöstem Kalk und zugehörigem  $\text{CO}_2$ . (Für die Anwendung beim Bestimmen der Mischungskorrosion siehe Text.)

Aus der Graphik wie aus den Tabellen ist ersichtlich, daß beim Mischen beträchtliche Kalkmengen zusätzlich gelöst werden. Es erscheint paradox, daß dieser Betrag um so höher ist, je höher der Kalkgehalt der zweiten Komponente bei gleichbleibender erster ist. Die Mischungskorrosion ist um so wichtiger, als unter lehmigen und humosen Böden, wo das Wasser erfahrungsgemäß besonders kalkreich ist, nach der alten Auffassung überhaupt keine Korrosion mehr möglich wäre. Doch sind eben diese hohen Kalkgehalte für

die Mischungskorrosion von großer Bedeutung. Das erklärt das Paradoxon, daß im grünen Karst besonders viele große Höhlen angetroffen werden. Wo bedeckte, bewachsene und nackte Karstoberflächen nebeneinander liegen, da sind die Bildungsbedingungen für Höhlen ausnehmend günstig, treten doch nebeneinander Wässer mit hohen und niedrigen Kalkgehalten auf. Es ist deshalb nicht mehr notwendig, die Bildung dieser Großhöhlen in eine Zeit mit wesentlich anderen klimatischen Bedingungen zu verlegen; die heutigen würden durchaus genügen. In solchen gemischten Regionen treten vor allem Riesenhöhlen auf. Das Hölloch (78 km vermessen), die Eisriesenwelt (42 km vermessen), deren Oberfläche in der Entstehungszeit vermutlich viel stärker bewachsen war, die Aggteleker Höhle (22 km) und die slowenischen Höhlen in Europa, die Colossal Cave (59 km), die Carlsbad Caverns (52 km) und die Mammoth Caves (50 km) in den USA sind die entsprechenden Beispiele. Es darf jedoch nicht außer acht gelassen werden, daß bei diesen Höhlen die Erosion eine bedeutende Rolle spielte. Die Ausdehnung der Höhlensysteme und die Größe der Räume sind aber nur erklärbar, wenn ganz wesentliche Anteile des Verbruches und der Erosionsprodukte durch Kalklösung — und es kommt hier im wesentlichen nur Mischungskorrosion in Frage — entfernt wurden.

Mischungskorrosion tritt an der Erdoberfläche wie im Erdinnern auf. Beim Druckfließen und im phreatischen Raum ist sie die einzige wirksame Korrosionsform. Der Wirkungsbereich greift so tief in den Karstkörper hinunter als bewegtes Wasser möglich ist, somit durch den ganzen verkarsteten Raum hindurch. Sie ist verantwortlich für die Bildung der unterirdischen Gerinne aus den Primärhohlräumen und ist auch für die Erweiterung schon bestehender größerer Hohlräume wichtig. Die Anwendung der Mischungskorrosion zur Erklärung oberirdischer Karstformen steht noch in den Anfängen, doch ist vor auszusehen, daß sie hier ebenfalls eine bedeutende Rolle spielt.

### **3. Die Entstehung verschieden konzentrierter Wässer**

Wässer verschiedener Herkunft werden wohl immer eine Differenz in den Kalkgehalten aufweisen. Niederschlagswasser fließt auf nackten Karren meist mit weniger als 30 mg  $\text{CaCO}_3$  im Liter in die Klufftkarren. Die dazugehörigen Quellen erreichen selten mehr als 90 mg. Umgekehrt tritt Wasser aus bewachsenem Kalkschutt mit 120 bis 170 mg Kalk im Liter aus und erreicht bei kalk-

reichen, lehmigen Moränenböden 300 bis 400 mg. Diese verschiedenen Konzentrationen erhalten sich bei Druckfließen bis in große Tiefen, da sie jeweils ein im Gleichgewicht befindliches, geschlossenes chemisches Stoffsystem sind.

Wasser aus ein und demselben Reservoir kann mit Leichtigkeit verschiedene Konzentrationen erlangen, sobald es in getrennten Gerinnen wegfließt. Hierzu zwei Beispiele:

Aus einer Moräne sickere hartes Wasser mit 273 mg  $\text{CaCO}_3$  im Liter in zwei Klüfte. In der einen gehe es in Druckfließen über. Sein Kalkgehalt ändert sich daher nicht. In der anderen fließe es als Gravitationsgerinne mit freier Oberfläche. Es verliert durch Diffusion von seinem  $\text{CO}_2$  an die Höhlenluft, wodurch es zur Ausscheidung von Sinter kommt. Sofern genügend Zeit zur Verfügung steht, senkt sich der Kalkgehalt bis zum Gleichgewicht mit dem  $\text{CO}_2$  der Höhlenluft, das im Extremfalle bei 80 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  liegt. Das Wasser fließe nun bei einem Kalkgehalt von 125 mg/l in eine Kluft und vermische sich irgendwo in der Tiefe mit dem ersten Wasser. Die dabei auftretende Mischungskorrosion löst bei einer Mischung 1 : 1 mit jedem Liter zusätzlich 13,3 mg Kalk auf. Das ist mehr als im allgemeinen auf gewöhnlichem Wege unterhalb der oberflächennahen Zone aufgelöst wird.

Beim zweiten Beispiel sickere Wasser mit einem Kalkgehalt von 170 mg/l aus einem Bach in den Untergrund, teils in engere, teils in weitere Klüfte. Bei einem Gewitterregen sinke die Konzentration auf 74 mg/l. In den weiten Klüften dringt dieses Wasser schnell in die Tiefe, in den engen nur langsam. Wo sich die beiden vereinigen, da trifft nun kalkreicheres auf kalkärmeres Wasser, es gibt Mischungskorrosion, ganz abgesehen von der Tatsache, daß in den weiten Klüften das neue, kalkarme Wasser noch auf das vorausfließende kalkreiche stößt und ebenfalls Mischungskorrosion erzeugt. Später, lange nach dem Gewitter, erreicht in den weiten Klüften der Kalkgehalt wieder den alten Wert, während nun das kalkarme Wasser der engen erst eintrifft. Erneute Mischungskorrosion. Am „Schleichenden Brunnen“, der Austrittsstelle des endogenen Höhlenflusses im Hölloch (Kanton Schwyz), schwankt der Kalkgehalt zwischen 80 und 125 mg/l, wobei zu berücksichtigen ist, daß hier bereits Mischwasser vorliegt.

#### 4. Leitformen der Mischungskorrosion

Die bisherigen Untersuchungen ergeben eindeutig das Bestehen von Formen, die ausschließlich oder im Falle der Korrosionskolke nahezu ausschließlich die Mischungskorrosion als Entstehungs-

ursache aufweisen und nur durch sie geschaffen sein können. Hierher gehören hydrisch geformte Räume mit kleinen oder unbegehbaren Zuführungen, Ellipsengänge, Girlandengänge, Sackgänge und Korrosionskolke. Dazu kommen Formen, welche auf andere Art erklärt werden können, die aber auch durch Mischungskorrosion entstanden sein könnten, wie die Glockenformen bei Schachthöhlen oder die Labyrinth.

Auf der Schnittlinie zweier Klüfte oder Fugen kann sich Wasser mit verschiedenem Kalkgehalt mischen. Mischungskorrosion ist dabei unvermeidlich. Dieses Mischwasser muß auch wieder abgeführt werden, da ein solcher Vorgang nur im karsthydrographisch wirksamen Raume möglich ist. Das  $\text{CO}_2$ , das beim Mischen frei wird, reagiert bei der Berührung mit Kalk sofort, die Reaktion läuft ohne Verzögerung ab. Dagegen gibt es zwei Verzögerungsgründe, die für die Formgebung von großer Bedeutung sind. Einmal mischt sich das Wasser nur allmählich, und zwar um so langsamer, je langsamer sich das Wasser bewegt und je glatter die Wände sind. Zum andern muß das durch die Mischung freiwerdende  $\text{CO}_2$  mit der Kalkwand in Berührung kommen, was um so mehr Zeit beansprucht, je größer die Wassermenge ist, bezogen auf einen  $\text{m}^2$  Wandfläche und je glatter die Wände sind. Im Anfangsstadium, wo Klüfte und Fugen noch sehr eng sind, wird das  $\text{CO}_2$  sehr schnell aufgebraucht. Die Kalklösung konzentriert sich auf einen kleinen Raum, so daß er relativ schnell wächst. Die Vergrößerung des Raumes bedeutet aber eine Selbstabschwächung, indem pro Zeiteinheit ein immer geringerer Anteil des freiwerdenden  $\text{CO}_2$  aufgebraucht wird. Das muß jedoch keineswegs eine Abnahme der effektiv gelösten Kalkmenge bedeuten, da der Wasserdurchsatz voraussichtlich bedeutend ansteigt, ganz besonders bei Fugen. Das ablaufende Wasser ist im Initialstadium der Höhlenbildung schwach korrosiv und erweitert den unterliegenden Teil nur langsam. Später steigt seine Korrosionsfähigkeit, da der Wirkungsgrad im Bereiche des Mischungsbeginnes bei zunehmender Wasserführung abnimmt.

Die Form des Hohlraumes am Treffpunkt der beiden Wässer wird bestimmt durch die zufließenden Wassermengen, durch die tektonisch vorgezeichneten Zuflußrichtungen und die lithologischen Verhältnisse. Mischen sich die Zuflüsse infolge Turbulenz gründlich, bevor sie sich weit vom Treffpunkt entfernt haben, so entsteht ein großer Hohlraum mit relativ kleinem Ablauf. Ermöglichen die Bedingungen aber ein ruhiges oder gar laminares Strömen, so wird die Mischungsdistanz groß, und es ist zwischen den Querschnittsflächen im obersten Teil und im Abfluß nur noch ein geringer Unterschied feststellbar; die Unterscheidung zwischen Hauptraum

und Ablauf verliert morphologisch ihren Sinn. Diese Verhältnisse trifft man besonders beim Sackgang, erster Typ, an (siehe unten).

Das ablaufende Wasser folgt zuerst einer Primärklufft oder einer Primärfuge. Bei Fugen ist der Wasserdurchsatz geringer. Dadurch steigt der Druck bei genügendem Wasserangebot an, die Durchflußmenge nimmt zu. Das korrosive Mischwasser erweitert den anfänglich meist kapillaren Querschnitt. Je größer der Querschnitt, um so schneller die Fließgeschwindigkeit und um so länger die Mischungsdistanz und damit der korrosive Wirkungsbereich. Der Querschnitt wird elliptisch bis linsenförmig, gleichgültig ob es sich um eine Schicht- oder Kluffuge handelt, oder ob diese horizontal, schräg oder saiger verlaufen. Je nach den Bedingungen wird die Querschnittsellipse schmal oder hoch sein oder sogar Kreisform annehmen. Im Ellipsengang gelten ähnliche Korrosionsbedingungen wie bei der Bildung des Hauptraumes. Schnelle Durchmischung und schneller Verbrauch des Mischungs-CO<sub>2</sub> ergeben zwar große Querschnitte aber nur kurze Stücke, so daß bald eine bedeutende Querschnittsverkleinerung auftritt. Im Hölloch betragen die entsprechenden Mischungsdistanzen 20 bis 50 m, inbegriffen den Bereich des noch darüber hinaus wirksamen Mischungs-CO<sub>2</sub>, den man morphologisch nicht abtrennen kann. Im Hölloch sind jedoch jene Gangstrecken häufiger, bei denen das Mischen und das Heranbringen des Mischungs-CO<sub>2</sub> an die Kalkwände gemächlich abläuft. Die Mischungsdistanz, zu der immer auch der Bereich der Nachwirkung gezählt wird, beträgt dann 100 bis 200 m und mehr. Die Ellipsenbildung wird durch jeden neuen Zufluß belebt, so daß sich im Hölloch Ellipsengänge mit nur kleinen Unterbrechungen kilometerweit hinziehen können. So weist der Gangzug Quelle — Riesensaal — Biwak I — Silbernkreuz — Lochhalle eine Länge von ziemlich genau 2500 m auf.

Haben die Ellipsengänge einen größeren Querschnitt erreicht, und sind die Zu- und Abflüsse genügend leistungsfähig, so beginnt die Erosion hineinzuspielen. Sand und Kies vertiefen die untere Ellipsenhälfte und geben ihr eine stärkere Krümmung, die sich allerdings gut ins Gesamtbild einfügt. Ellipsen mit senkrecht stehender großer Achse werden unten sackförmig erweitert, wie das beim gotischen Gang in der Tantalhöhle schön zu sehen ist. Diese Erosion ist ein Zeichen höherer Leistungsfähigkeit der unterirdischen Entwässerung.

Ellipsengänge sind auf Grund ihrer Entstehung noch weitgehend an die Erzeugende, sei es nun eine Klufft, sei es eine Schichtfuge, gebunden. Aus ihnen läßt sich am ehesten entscheiden, ob eine

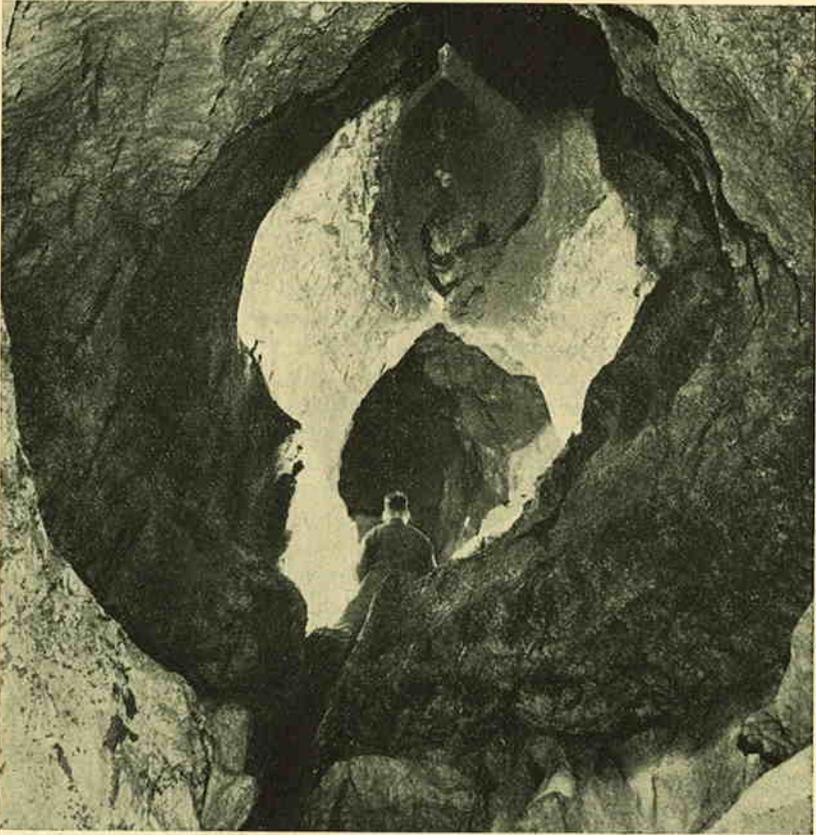


Abb. 2: Alligatorenschlucht im Hölloch (Kanton Schwyz). Ellipsengang mit senkrechter Ellipse auf steilstehender Kluff. Über der Ellipse ein Korrosionskolk.

Höhle eine Kluffhöhle oder Schichtfugenhöhle ist, deren Richtungen häufig durch tektonische Leitlinien bestimmt werden.

Ein Ellipsengang ist immer der hydrographisch bevorzugte Teil einer Fuge oder Kluff. Die Nebenstränge büßen infolgedessen im Verlauf des Verkarstungsfortschrittes an Wirksamkeit ein. Treffen nun solche Nebenstränge auf der Schicht- oder Kluffuge auf den Ellipsengang, so wird das hier austretende Fugenwasser sich mit dem Gangwasser mischen. Die Austrittsstelle erweitert sich durch Mischungskorrosion; es bilden sich Nischen. Der Vorgang entspricht in gewissem Sinne der Bildung des Sackganges, zweiter Typ, und

dem Korrosionskolk. Die Gangbegrenzung verläuft auf der Zuflußseite nicht mehr einfach, sondern in girlandenförmig angeordneten Buchten: der Ellipsengang wird zum Girlandengang. Infolge der geringen Wasserzufuhr ist der Girlandenteil merklich niedriger als der Ellipsenteil. In den Alpen ist die geneigte Lage der Fugen die Regel. Der Girlandenteil liegt auf der oberen Seite, dort, wo das Wasser normalerweise Zutritt. Die seltenen Fälle gegenteiligen Verhaltens weisen immer auf tektonische Besonderheiten hin. Die Form der Nischen beweist, daß sich das Wasser im Gang während der Bildungszeit nur langsam bewegte. Wo es schnell dahinfließt, wird jenes der Nebenstränge von der Austrittsstelle weggerissen, und es kommt höchstens zu einer schlitzzartigen Erweiterung. Da Zeiten der Bewegung mit solcher relativer Ruhe abwechseln, so gibt es vielerlei Übergänge.

Der Wirkungsbereich der Mischungskorrosion benachbarter Stränge kann sich überschneiden, so daß sich einzelne Säulen bilden. Sind die Nebenstränge vernetzt, so bilden sich sogar Labyrinth, wie das im Hölloch mehrfach beobachtet werden konnte. Diese können aber nicht als Leitform gelten, da der Begriff viele morphographisch und genetisch verschiedene Typen umfaßt.

Die Sackgänge sind ein Sonderfall der vorausgegangenen Formen. Es gibt verschiedene Typen. Verlaufen die zuführenden Stränge ein Stück weit nahezu parallel und ist ihre Wasserführung bescheiden, so wächst allmählich ein Ellipsengang nach oben bis der Abstand der Zuflüsse dafür zu groß wird. Der Abfluß ist ohnehin ein Ellipsengang. Das Ganze wirkt als Einheit und ist mit einer abschließenden runden Apsis versehen. Im zweiten, wesentlich häufiger auftretenden Typ erreicht ein Gerinne von der Seite her den wassererfüllten Raum. Durch Mischungskorrosion wird der Austritt verbreitert und vertieft. Es entsteht zuerst eine Nische, dann aber ein Gang mit relativ breiter Basis und geringer Tiefe. Auch er endet mit einer runden Apsis. Von einer Nische des Girlandenganges unterscheidet ihn die größere Wasserzufuhr und die größere Tiefe. Für beide Typen sind das Hinaufwachsen des Hohlraumes, dem fließenden Wasser entgegen, und die verhältnismäßige Kürze kennzeichnend. Sie wirken immer irgendwie als Anhängsel des Hauptganges, sogar dann, wenn sie ausnahmsweise größere Dimensionen aufweisen.

Korrosionskolkke bilden sich da, wo aus Fugen und Klüften Wasser in einen Gang einsickert. Der erste Typ ist selten und an den nackten Karst gebunden. Dabei sickert kalkarmes Wasser mit weniger als 80 mg  $\text{CaCO}_3$  im Liter in einen luffterfüllten Hohlraum.

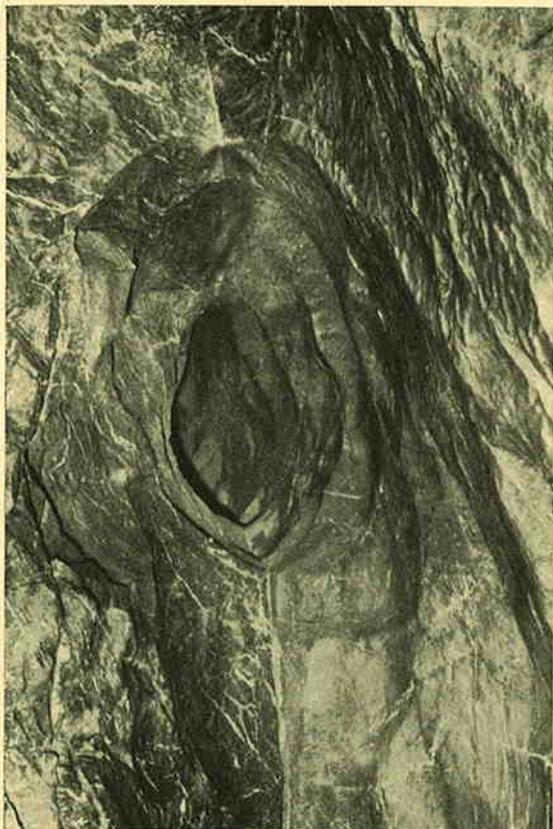


Abb. 3. Korrosionskolk auf einer Kluffuge im Titanengang des Höllloches (Kanton Schwyz), entstanden durch Mischungskorrosion.

Es nimmt  $\text{CO}_2$  auf, korrodiert und erzeugt eine kolkartige Vertiefung mit einer Ablaufrinne.

Der Normalfall ist jedoch der Mischungskorrosionskolk, der sich dann bildet, wenn Wasser aus einer Kluft oder Fuge in einen wassererfüllten Raum austritt. Im Gegensatz zum ersten Typ wirkt jedes Wasser durch Mischung korrodierend. In der Regel ist das Gangwasser kalkärmer als das Kluftwasser, besonders bei Hochwasser. Solche Korrosionskolke bilden sich in jeder Lage sowohl an der Decke wie an den Wänden ausnahmsweise auch an der Sohle. Es ist kennzeichnend, daß dabei kaum Formunterschiede feststellbar sind, denn die Dichten sind sich in den verschiedenen

Wässern so ähnlich, daß die gravitativen Kräfte nicht formbestimmend sein können. Mischungskorrosionskolke sind selten rund, sondern meist entlang der Fuge gestreckt. Trotzdem zeigen sie fast immer deutlich die Wirkung des bewegten Wassers.

Korrosionskolken ist noch eine weitere Erscheinung eigentümlich. Da das zusickernde Wasser häufig einen stark erhöhten Kalkgehalt aufweist, so kann es beim Trockenfallen des Ganges Sinter ausscheiden. Je höher der Kalkgehalt, um so mehr Sinter wird im luftgefüllten Gang ausgeschieden, doch auch um so größer ist die Mischungskorrosion im wassererfüllten Gang. Das Zusammentreffen von Korrosionskolk und Tropfsteinbildung ist daher nicht zufällig, sondern durchaus gesetzmäßig bedingt.

Überblickt man die Leitformen der Mischungskorrosion, so wird deutlich, daß sie eine Funktion der Wasserzufuhr sind und in beliebigen Tiefen des Karstkörpers auftreten können, im phreatischen Raum so gut wie im vadosen. Große, sich entsprechende Zuflüsse führen zur Bildung großer hydrisch geformter Gänge, kleinere bilden Sackgänge erster Art. Fließen kleine Mengen in größere wassererfüllte Räume, dann bilden sich Nischen, Girlanden und Korrosionskolke, während mittlere Wassermengen Sackgänge zweiter Art erzeugen. Erreichen mehrere Wasserstränge auf Klüften oder Fugen den Gang, dann bilden sich Girlanden, wenn der Zufluß auf der erzeugenden liegt, sonst entstehen Kolkreihen, die quer zur Gangachse verlaufen, aber auch längs der tektonischen Leitlinie des Schichtfugenganges verlaufen können. Das noch korrosive Ablaufwasser aller dieser Mischungsvorgänge führt normalerweise zur Entstehung von Ellipsengängen, wobei die geringe Wasserzufuhr bei den Korrosionskolken kaum noch einen Einfluß ausübt.

Da bei der Mischungskorrosion der kinetischen Energie des Wassers keine wesentliche Funktion zukommt, außerdem alle Räume voll Wasser sind, so kann sich unter günstigen Bedingungen die Korrosionswirkung summieren. Daher bilden sich auch bei kleinem sekundlichem Wasserdurchsatz gelegentlich große Räume.

In dieser Aufzählung ist nur ein Teil der durch Mischungskorrosion erklärbaren Erscheinungen erfaßt worden, doch ist anzunehmen, daß darunter alle unterirdischen Leitformen vertreten sind.

## Zusammenfassung

Die unterirdische Entwässerung ist ein Kennzeichen des Karstes. Sie ist eine Folge der subterranean Korrosion. Die konventionelle Auffassung von der Kalklösung verlangt die Zufuhr von  $\text{CO}_2$  von außen, größtenteils aus der Luft. Der Wirkungsraum dieses Korro-

sionstyps ist die vadose Zone mit ihren Gravitationsgerinnen, während die Druckgerinne mangels Luft ausgeschaltet sind. Die Oxidation organischer Stoffe liefert kleine Mengen an  $\text{CO}_2$ , die aber bei der Höhlenbildung nicht wesentlich ins Gewicht fallen.

Mischungskorrosion tritt auf, sobald sich zwei verschiedene konzentrierte Wasser mischen. Sie wirkt in den tiefsten Bereichen der phreatischen Zone ebenso wie in den Druckgerinnen oder an der Erdoberfläche. Sie umfaßt den ganzen verkarsteten Raum, während die bisherige, konventionelle Art der Korrosion sich auf den vadosen Bereich, im besonderen auf die Gravitationsgerinne beschränkte.

Bisher konnten die folgenden Leitformen erkannt werden: Große hydrisch geformte Räume mit kleinen, teilweise nicht betretbaren Zuführungen und deutlichen Abflüssen in Form von Ellipsengängen, Ellipsengänge, Girlandengänge, Sackgänge und Korrosionskolke. Die Anwendung auf die Oberflächenformen ist im Studium.

## Literaturnachweis

- BÖGLI, A.: Der Chemismus der Lösungsprozesse im Karst. Report of the Commission on Karst phenomena, IGU, New York 1956.
- BÖGLI, A.: Karsthydrographische Untersuchungen im Muotatal. Regio Basiliensis, Basel 1960.
- BÖGLI, A.: Kalklösung und Karrenbildung. Zeitschr. f. Geomorphologie, Suppl. Bd. 2: Karstmorphologie, 1960.
- BÖGLI, A.: Das Hölloch im Muotatal. Leben und Umwelt, 19, 1963.
- CORBEL, J.: Erosion en terrain calcaire. Annales de Géographie, 366, 1959.
- LEHMANN, O.: Hydrographie des Karstes. Enzykl. d. Erdkunde, Wien 1932.
- MOORE, G. W.: Introduction to the Origin of Limestone Caves. Bulletin of the National Speleological Society, 22, 1960.
- OERTLI, H.: Karbonathärte von Karstgewässern. Stalactite, 1953.
- PIA, J.: Theorien über die Löslichkeit des kohlensauren Kalkes. Mitt. Geol. Ges. Wien 1953.
- TILLMANS, J.: Die chemische Untersuchung von Wasser und Abwasser. Halle 1932.
- ZEHENDER, STUMM & FISCHER: Freie Kohlensäure und pH von Wasser. Schweiz. Ver. Gas- u. Wasserfachmänner, 11, 1956.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. ALFRED BÖGLI, Hitzkirch bei Luzern, Schweiz