

Zur Kenntnis der Kalkinkrustation und Kalkkorrosion im Seelitoral

Krustensteine und Furchensteine

Von STJEPKO GOLUBIĆ, Zagreb

Manuskript eingegangen am 4. November 1960.

Während limnologischer Untersuchungen am Vrana-See hatte ich oft Gelegenheit, Krusten- und Furchensteine sowie Felsen dieser Art näher kennenzulernen. Einige neue Ansichten über die Entstehung der Furchensteine habe ich anlässlich des 14. Limnologenkongresses in Wien angedeutet [2]. Seither habe ich noch einige Male die Verhältnisse im Litoral des Vrana-Sees untersuchen können und möchte nun die Ergebnisse dieser Bemühungen zusammenfassend darstellen. Eine ausführliche Beschreibung der bisherigen Untersuchungen an den Krusten- und Furchensteinen in den Seen verdanken wir KANN [4]. Ich möchte mich deshalb darüber nicht lange aufhalten und meine Erörterungen an diejenigen KANNs anschliessen. Lediglich sei erwähnt, dass die Krustenbildung meistens als spezifische Eigenschaft kalkablagernder Blaualgen erklärt ist, während die Kalkkorrosion in den Furchensteinen sowohl Tieren als auch kalklösenden Algen zugeschrieben wurde.

Unsere eigenen Anschauungen stützen sich auf die Ergebnisse der Untersuchungen der Kalktuffbildung an den Wasserfällen des Krka-Flusses und anderer Karstgewässer [1, 7].

Der Name «Krustenstein» hat sich aus der Arbeit von KANN allgemein eingeführt, und so sind andere Benennungen wie «Tuf lacustre» oder Ufertuff in der Literatur seltener anzutreffen. Diese Bezeichnungen sind aber nicht so unangebracht, wenn man unter Tuff nicht ein vulkanisches Sediment, sondern Kalktuff oder Kalksinter versteht, um so weniger als die beiden Bildungen weitgehend vergleichbar sind. Als *Krustenstein* bezeichnet man die mit einer Kalksinterkruste überzogenen grösseren und kleineren Steinstücke, welche am häufigsten an den flachen Uferstrecken anzutreffen sind. Die Krusten können aber ebenfalls an Felsen vorkom-

men, und so sind sie auch an steilen Felsufern anzutreffen. Im Vrana-See, woher unser Material stammt, kommen die Krusten an den Steinen und Felsen der steilen westlichen und östlichen Ufer wie auch am flachen Nordufer vor. Am Südufer sind sie nur stellenweise verbreitet, während sonst das Ufer flach, schlammig und von *Scirpus* und *Phragmites* bewachsen ist. – *Furchen* sind eine Begleiterscheinung der Krustensteine und sind besser an den Felsblöcken als an den vereinzelt Steinen ausgebildet.

An dieser Stelle danke ich Frau Dr. E. KANN für die Anregung zu dieser Untersuchung und ebenfalls Prof. Dr. O. JAAG und Prof. Dr. W. OHLE, welche sich dafür interessiert haben. Meinem Lehrer, Prof. Dr. V. VOUK, bin ich für die Anregung, limnologische Untersuchungen am Vrana-See auszuführen, welche mir so günstige Untersuchungsobjekte sicherten, grössten Dank schuldig. Die materielle Hilfe verdanke ich der Kommission für Karst der Jugoslawischen Akademie der Wissenschaften, Zagreb.

Beschaffenheit der Krusten- und Furchensteine

Der Beschaffenheit nach erwähnt KANN [4] zwei Hauptgruppen der Krusten. Die ersten sind hart und fest, aus kleinen, 1–10 mm grossen Knöllchen zusammengesetzt. Ich fand solche Krustensteine am flachen Ufer des Prošće-Sees im Plitvicer See-Gebiet; im Vrana-See jedoch wurden sie nicht beobachtet. Die Krusten des Vrana-Sees gehören der zweiten von KANN angeführten Gruppe mit schwammiger, poröser, mehr mürber Konsistenz an. Diese können in der Härte ebenfalls variieren, doch nie erreichen sie die Festigkeit der ersten Gruppe. Allgemein sind die Krusten in der Wellenschlagzone etwas dichter und fester gebaut. Tiefer im Wasser, wo die Wellenwirkung nicht mehr zur Geltung kommt, können die Krusten viel lockerer gebaut sein und stehen oft von der Unterlage ab. Oberhalb der Wellenschlagzone schliesst sich der Krustenzonen die «Schwarzbandzone» an, welche meistens aus Lithophyten zusammengesetzt ist [5]. Auch in dieser Zone findet eine geringe Kalkfällung statt; die Krusten sind aber sehr dünn und flechtenartig (Flechten kommen dazwischen auch vor). Die beiden Zonen sind mit Übergängen verbunden.

Die Krusten unterscheiden sich ebenfalls nach der Artenzusammensetzung. *Rivularia*krusten sind höckerig, knollig. Ähnliche, nur kleinere Knöllchen bilden auch *Schizothrix*arten (wie *Sch. lacustris*). Die Krusten,

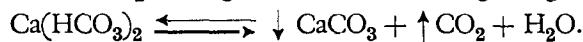
welche aus *Scytonema*, *Dichotbrix*, *Calotbrix* und anderen Arten zusammengesetzt sind, sind meistens schwammigfilzig (Abb. 1 u. 2)¹⁾.

Die Furchensteine sind ebenfalls eine Art «Krustensteine», da sie normalerweise mit Krusten bedeckt sind. Die Furchen werden meistens erst nach Entfernung der Krusten sichtbar. Sie sind verschiedenartig, labyrinthförmig gebogen und verflochten, manchmal ganz feine Kanäle und Löcher bildend. Zwischen den Furchen sind dünne, scharfkantige Kämme charakteristisch. Der Verlauf der Furchen ist in der Tiefe meistens regellos, nur im Eulitoral und in seiner Nähe neigen sie zu einer vertikalen Anordnung. Die Krusten sind locker über die Furchen hinweggebaut, nur auf den Kämmen ruhend. Über den Furchen sind sie meistens gewölbt, so dass unter ihnen kleine Hohlräume entstehen. Wenn man die Kruste sorgfältig stückweise entfernt, erscheinen oft kleine Löcher, welche sich nach innen verbreitern und in diese Unterkrustenräume führen. Falls die Furchensteine aufs Trockene gelangen, werden sie der atmosphärischen Verwitterung ausgesetzt. Zuerst verlieren sie die Kruste, und dann werden die scharfen Formen langsam abgeschliffen, bis die Profilierung milder und weniger ausgeprägt wird.

Kalkfällung und Kalkinkrustierung

In unserer Bearbeitung der Krka-Wasserfälle haben wir uns mit den Vorgängen der Kalkfällung und Kalkinkrustierung im Süßwasser näher befasst. Wir möchten nur kurz einiges davon wiederholen, sofern es für unsere heutige Fragestellung von Wichtigkeit ist. Wir haben schon damals hervorgehoben, dass die Kalktuffbildung ein komplexer Vorgang ist, wobei wir zwei Hauptprozesse getrennt verfolgen müssen: Kalkfällung im Wasser und Kalkinkrustierung an dessen Grund.

Die Kalkfällung aus einem kalkreichen Gewässer erscheint bekanntlich auf Grund des CO₂-Entzuges aus dem Karbonatgleichgewicht



Die Ursachen dieses Entzuges sind verschiedener und komplexer Natur. Wir könnten darunter folgende Möglichkeiten erwähnen:

- a) Partialdruckunterschied von CO₂ im Wasser und in der Luft,
- b) Temperaturerhöhung und Verdunstung des Wassers,
- c) CO₂-Assimilation der autotrophen Organismen.

¹⁾ Auf die Artenzusammensetzung der Krusten im Vrana-See wird hier nicht eingegangen. Sie wird in einer anderen Arbeit über die Litoralvegetation des Vrana-Sees näher erläutert werden.



Abbildung 1
Krustensteine am flachen Nordufer des Vrana-Sees.

In den Fließgewässern, Wasserfällen und vor allem in den Quellen scheint die erste Ursache weit zu überwiegen [1], im Seelitoral kommt sie aber kaum zur Geltung, da das CO_2 -Gleichgewicht zwischen Wasser und Luft ziemlich erreicht ist. Vielmehr ist die Kalkfällung der Erwärmung (als anorganischem) und der Assimilation (als biotischem Faktor) zuzuschreiben. Die biogene Entkalkung des Wassers muss gleichfalls dem Plankton wie den benthalen Pflanzen zugeschrieben werden, wovon ein gewisser Anteil auch den Krustenalgen zukommt.

Das ganze ausgefällte Ca-Karbonat gelangt aber auf den Boden und beteiligt sich einerseits in der Ausbildung des Kreidekalkes und andererseits in der Krustenbildung. Ähnlich wie an den Wasserfällen stellt das Auffangen und Inkrustieren des gefällten CaCO_3 ein Problem für sich dar, wobei die Krustenalgen die entscheidende Rolle spielen. Die Krustenbildung ist also keine spezifische Eigenschaft einiger Algenarten, welche als Ausdruck ihrer Lebensaktivität stattfindet. Vielmehr ist das Zugedeckt-

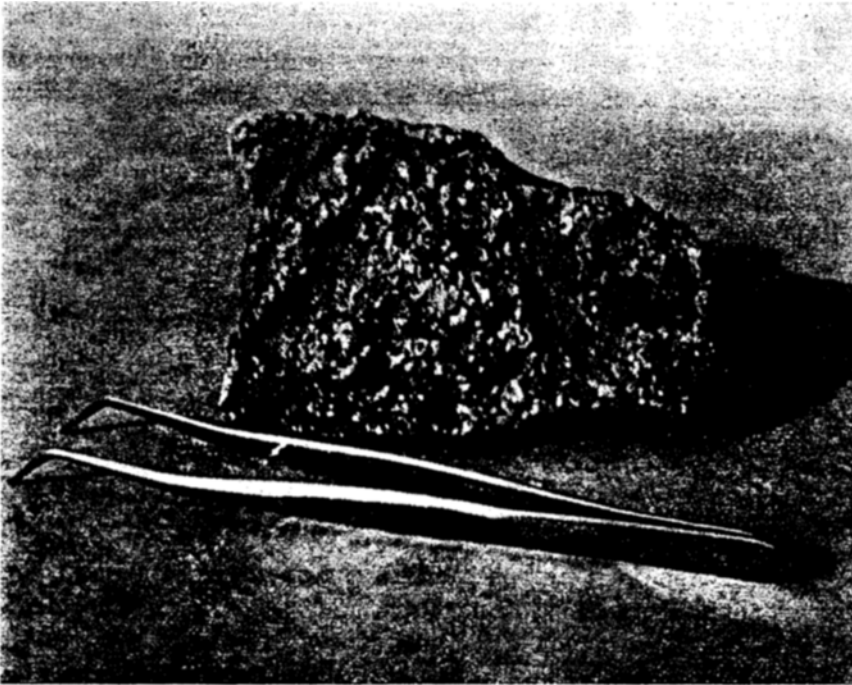


Abbildung 2
Krustenstein aus 6 m Tiefe.

werden mit Kalksinter höchst ungünstig für die Algen, welche dadurch dem Licht, dem freien Wasser und daher dem nötigen Stoffwechsel entgehen und absterben müssen. An der Krustenoberfläche wachsen aber die Pflanzen intensiv weiter aus dem Sediment in das freie Wasser, wo sie wieder mit Kalksinter zugedeckt werden. Dieser Vorgang ist für die Kalktuffbildung überhaupt bezeichnend und gilt ebenfalls für die Ausbildung der Krusten. Normalerweise entsteht so ein poröses Sediment, das viel voluminöser erscheint als die absolute Menge des Kalkes vermuten lässt.

Wenn wir nun jene Bedingungen, welche für das Vorkommen und die Verteilung der Krusten verantwortlich sind, erkennen wollen, müssen wir einerseits jene Faktoren berücksichtigen, welche die Kalkfällung ermöglichen und andererseits jene, welche das Gedeihen der Algen zulassen. In erster Linie ist hier der *Chemismus des Wassers* zu erwähnen. Nur kalkreiche Seen kommen für die Krustenbildung in Betracht. Wenn der Gehalt an CaCO_3 mit der Tiefe abnimmt, mit gleichzeitiger Zunahme

der freien Kohlensäure, wie dies bei meromiktischen und eutrophen Seen der Fall sein kann, wirkt dies für die Krustenbildung als ein zonal begrenzender Faktor, wobei ihr (wie auch der Kreidekalkablagerung) die Entwicklung nur in einem engen Ufergürtel zugelassen wird. – Für die Algenentwicklung ist die Unterlage als Faktor wichtig. Jedenfalls muss diese hart sein, um eine Krustenbildung zu ermöglichen. In erster Linie kommen hier Steine und Felsen in Betracht, aber auch Holzstücke, Äste oder versunkene, harte Gegenstände, wie dies leicht an den Plitvicer Seen zu beobachten ist. Faktoren wie Insolation, Wellenschlag und Temperatur mögen für die zonale Veränderung der Artenzusammensetzung der Krusten verantwortlich sein. Die obere Grenze des Vorkommens der Krusten ist gegeben durch die Austrocknung, während die untere dem Lichtfaktor zuzuschreiben ist.

Kalkkorrosion und die Entstehung der Furchensteine

Wie wir schon hervorgehoben haben, sind die Furchensteine im Seelitoral normalerweise eine Begleiterscheinung der Krusten. Die gleichzeitige Kalkablagerung und Kalklösung im Wasser erscheint aber paradox, und man versuchte, beide Erscheinungen getrennt zu erklären. Einige Autoren setzen eine anfängliche Kalklösung voraus, auf welche dann unter anderen Bedingungen eine Kalkfällung folgt. Die beiden Prozesse werden demnach zeitlich getrennt betrachtet. Die Häufigkeit der Furchensteine und deren rezente Entwicklung sowie die chemischen Eigenschaften unseres Sees stehen freilich zu dieser Vermutung im Gegensatz. Zweckmässiger ist es, die Vorgänge der Kalkfällung räumlich von denen der Kalklösung (im mikroklimatischen Sinne) zu trennen.

Als Ursachen der Kalklösung wurden in der Literatur einerseits krustenbohrende Tiere und andererseits spezifische kalklösende Algen erwähnt; ein eindeutiger Beweis für eine dieser Möglichkeiten wurde aber nicht gefunden [4].

Wir betrachten die beiden Erscheinungen, die Kalkinkrustierung und die Kalklösung, als komplexes Zusammenspiel, wobei die Kruste an sich eine entscheidende Rolle spielt, da sie eigentlich die Barriere zwischen den mikroklimatisch verschiedenen Milieux darstellt, wo sich dann auch verschiedene Prozesse abspielen können.

Unsere Auffassungen schliessen sich an die obenerwähnte Darstellung der Kalkablagerung in den Gewässern an [4]. Es wurde schon gesagt, dass in den unteren Krustenteilen die zugeschütteten Algen absterben

müssen, während die Kruste an ihrer Oberfläche weiter wächst. Wir möchten nun das weitere Schicksal dieser Pflanzenreste verfolgen. Die abgestorbenen Pflanzenreste in den unteren Krustenteilen werden bakteriell zersetzt – sie verfaulen also. Dabei können sich unterhalb der Kruste genügende Mengen von freier Kohlensäure anreichern, um die Umgebung zu korrodieren. Dabei wird die Kalksteinunterlage wie auch die Kruste selbst von innen angegriffen. So entstehen unterhalb der Kruste kleine Räume, wir können sie Lakunen nennen, welche allmählich grösser werden. Die Kruste wächst nach aussen unter dem Einfluss des sauerstoffreichen Litoralwassers und dessen biogener Entkalkung, während sie von innen durch Fäulnisprozesse und CO_2 -Bildung zersetzt wird. Gleichzeitig wird der darunterliegende Kalkstein aufgelöst – so entstehen die Furchen. Die Kruste wird immer lockerer, und der Vorgang dauert so lange, bis sie abbricht.

In diesem Moment verschwindet die trennende Barriere, und das gepufferte Wasser des freien Litorals dringt unter die Kruste, was eine Unterbrechung jeder Korrosion zur Folge hat, und die Krustenbildung kann an der Gesteinsoberfläche von neuem beginnen (Abb. 3).

Das Wachstum der Krusten, deren innere Auflösung und die Entstehung der Furchen ist ein in sich geschlossener Vorgangszzyklus, der sich selber auch begrenzt. Damit erklärt sich auch die verhältnismässig geringe Dicke der Krusten. Das Abbrechen der Krusten geschieht in der Tiefe hauptsächlich ohne äussere Einflüsse. Nähern wir uns der Wellenschlagzone, so wird beim Abbrechen auch die Wasserbewegung mit-helfen. Dies erklärt die Tatsache, dass die Krusten in diesem Gebiet viel dichter und weniger locker gebaut sind. Die gleichen Prozesse werden hier öfters wiederholt und spielen sich innerhalb kleinerer Räume ab. Oberhalb der Wasseroberfläche, also in der Wellenschlagzone, rinnt das Wasser in vertikaler Richtung von den Felsen ab. In der gleichen Richtung rieselt ebenfalls das CO_2 -reiche Wasser unterhalb der Kruste. So wird auch die Korrosion vorwiegend in dieser Richtung wirken, woraus sich die vertikale Richtung der Furchen in dieser Zone erklärt (Abbildungen 4, 5 und 6).

Unsere Erklärungen der Krusten- und Furchensteine beruhen also auf der Voraussetzung, dass unterhalb und ausserhalb der Krusten verschiedene chemische Verhältnisse herrschen. Wir versuchten deshalb, diese zu analysieren. Die Analyse des freien Wassers im Litoral bietet an sich keine methodischen Schwierigkeiten. Das Problem entsteht aber beim Versuch, die Verhältnisse in den Mikroräumen unterhalb der Kruste zu

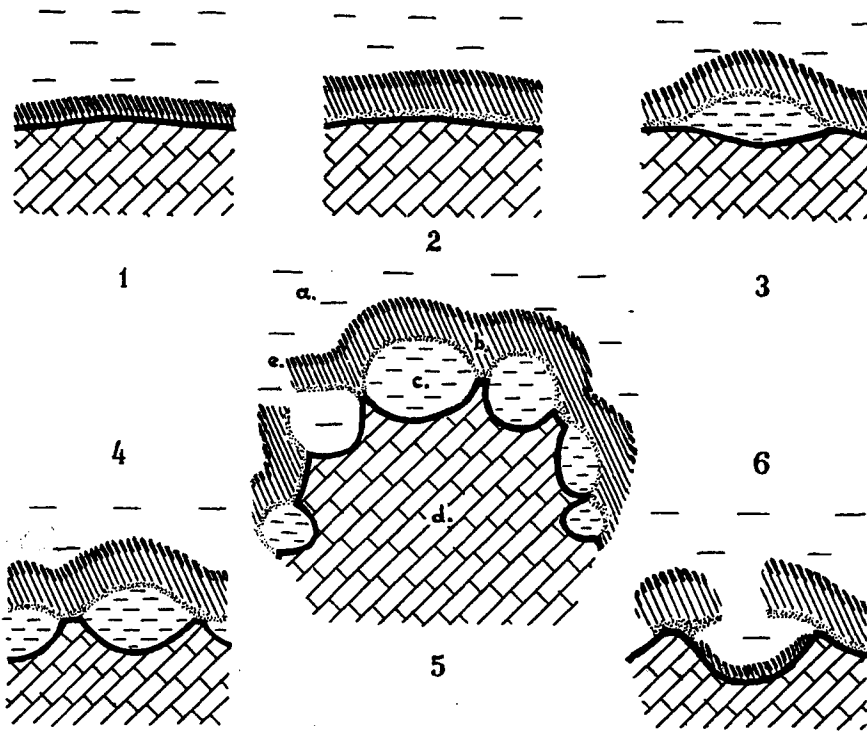


Abbildung 3

Schematische Darstellung der Krusten- und Furchenbildung; *a* freies Litoralwasser, *b* Kruste, *c* Lakune, *d* Kalkstein, *e* Algenschicht (Erklärung im Text).

erfassen. Jedenfalls sind für diese Messungen chemische Mikromethoden erforderlich, da nur geringe Wassermengen zugänglich sind. Das Sammeln des Wassers unter der Kruste stellt aber die Hauptschwierigkeit bei dieser Arbeit dar.

Die Krusten wurden an Ort und Stelle durch Tauchen (mit oder ohne Presslufttauchgerät) erreicht und die Proben unmittelbar entnommen, um den natürlichen Zustand möglichst wenig zu stören. Das Wasser wurde mit einer «Syringe»-Mikroinjektionsspritze (1 ml Inhalt) unter den Krusten gesammelt, und zwar so, dass die Injektionsnadel durch die Kruste durchgestochen wurde, oder durch eine kleine Öffnung weiter unter die Kruste eingeführt wurde. Obgleich das Wasser sehr langsam aufgesogen wurde, kann man nicht erwarten, dass auf diese Weise die Verhältnisse in situ erfasst werden können. Schon beim Einführen und besonders beim Saugen dringt zugleich eine gewisse Menge des äusseren Wassers unter die

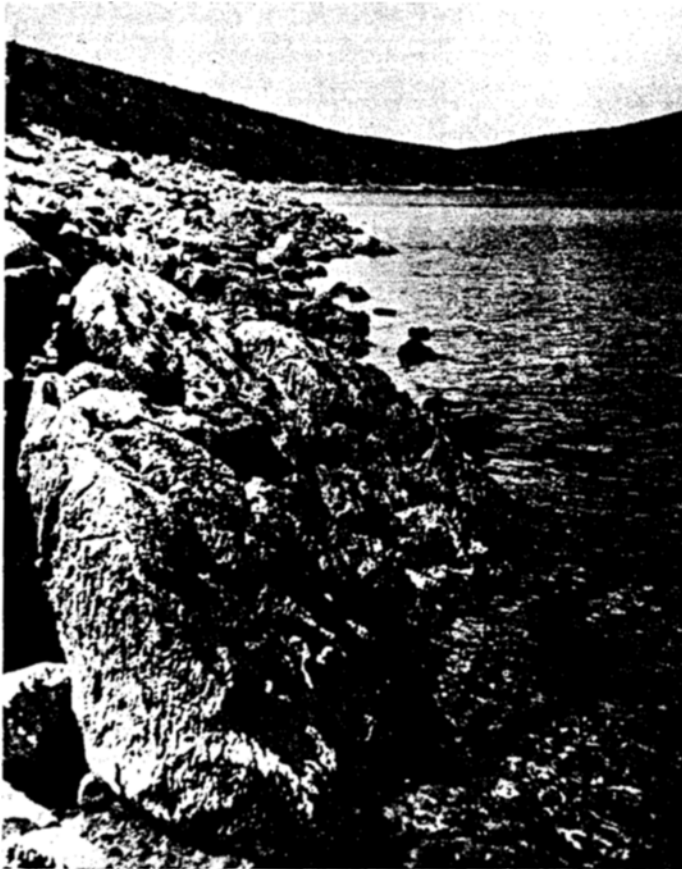


Abbildung 4
Vrana-See, Westufer; im Vordergrund Furchensteine.

Kruste, und wir erhalten eine Mischung. Zudem ist für eine einzige Spritzenfüllung, d. h. für 1 ml Probe, Wasser aus vielen Stichstellen erforderlich. So erhalten wir eigentlich ein Durchschnittsergebnis. Man kann dabei nicht von aussen beurteilen, welche von den Furchen «tot» sind, d. h. wo die Kruste schon durchbrochen ist und sich darunter das gewöhnliche Litoralwasser befindet. Aus diesen Gründen müssen wir uns bewusst sein, dass sich unsere mikrochemischen Messungen auf eine Mischung des Unterkrustenwassers und des Wassers des freien Litorals beziehen. Da aber der Chemismus des freien Litoralwassers einheitlich ist, müsste sich bei der Analyse unserer Mischung ein Unterschied zeigen,



Abbildung 5
Furchenstein, Detail.

der auf die Anwesenheit der vorausgesetzten Unterkrustenkomponente schliessen liesse.

Dies war unsere Problemstellung, und wir versuchten pH-, Alkalinitäts- und O_2 -Messungen, welche wir für unsere Frage am wichtigsten hielten, durchzuführen.

pH wurde mit Methyleneblau im Hellige-Komparator sowie mit Nitrophenol nach der Michaelis-Methode gemessen.

Die Alkalinität wurde mit $n/20$ und $n/10$ HCl titriert mit Methylorange als Indikator. Es wurde im Mikromaßstab mit 1 ml Wasser in einem kleinen Reagenzglas gearbeitet. HCl wurde aus einer Mikro-

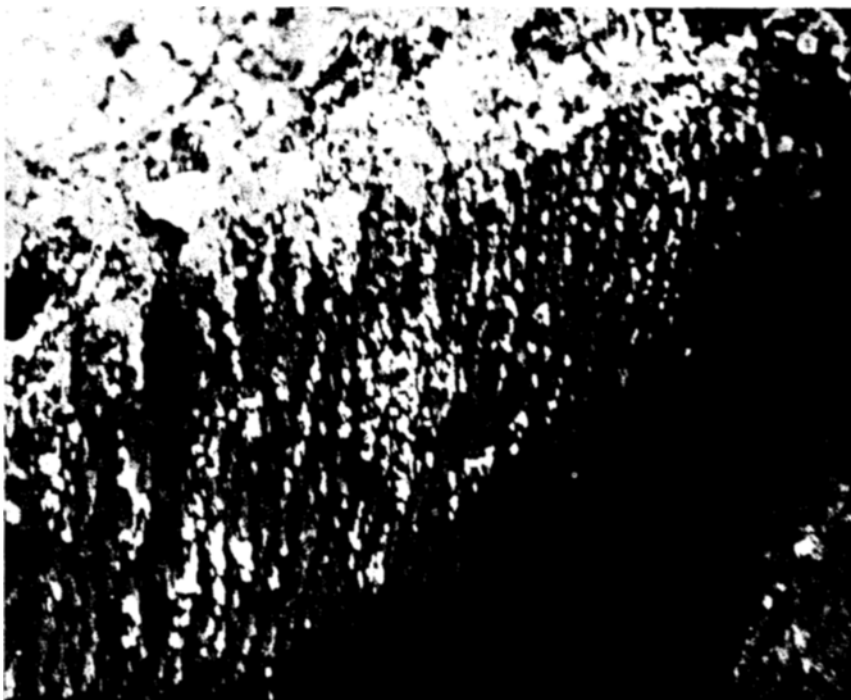


Abbildung 6
Ein Fels in der Wellenschlagzone mit vertikalen Furchen.

bürette von 0,1 ml Inhalt und einer Einteilung auf 0,001 ml eingemessen. Die Mikrobürette wurde aus einer entsprechenden Mikropipette hergestellt, indem diese zweimal sigmoid gebogen wurde. Sie wurde horizontal gestellt mit dem Mundteil nach oben und Ausguss nach unten gekehrt und bis an die Marke durch Saugen gefüllt. In dieser Stellung läuft die Flüssigkeit nur aus, wenn der Ausguss in die Probe eingetaucht ist. Die Geschwindigkeit des Ausfließens ist durch die Neigung der «Mikrobürette» einzustellen. An dem horizontalen Teil der Mikrobürette ist der Verbrauch leicht ablesbar. Der Vorteil dieser Methode liegt auch darin, dass die Flüssigkeit nicht abtropft, sondern kontinuierlich aus der Bürette ausläuft, was eine viel präzisere Arbeit ermöglicht.

Die O_2 -Bestimmung wurde nach WINKLER durchgeführt und ebenso als Mikromethode adaptiert. Die Fixierung des Sauerstoffes wurde sogleich in der Syringe-Spritze, wo das Probewasser gesammelt wurde, durch Einsaugen von $MnSO_4$ und $KJ+NaOH$ durchgeführt. Nach der

Absetzung des Niederschlags saugte man eine gewisse Menge konzentrierter HCl in die Spritze ein, um das Jod freizumachen. Nachdem der Niederschlag aufgelöst wurde, goss man die gelbe Flüssigkeit in das kleine Titrationsgläschen und titrierte mit Na-Thiosulphat mit Stärke als Indikator. Für die Titrierung wurde ebenfalls die früher beschriebene Mikrobürette verwendet.

Die Ergebnisse unserer Messungen sind als Durchschnittswerte in der Tabelle 1 wiedergegeben. Serie I wurde am 3. November 1959 und Serie II am 22. August 1960 durchgeführt. Sauerstoff wurde nur im Sommer 1960 gemessen. In Abbildung 7 sind die Werte graphisch dargestellt.

Tabelle 1

	pH		mg CaCO ₃ /l		mg O ₂ /l
	I	II	I	II	II
Freies Litoralwasser	8,1	7,97	114	88	8,6
Lakunenwasser unter den Krusten	8,1	7,79	136	131	6,4

Unterhalb der Krusten zeigte sich ständig eine höhere Alkalinität, während der pH-Wert nur wenig oder gar nicht abnahm, was bedeutet, dass die überflüssige Kohlensäure schon an der Korrosion beteiligt war. Dies ist in so kalkreicher Umgebung auch zu erwarten. In ähnlichen Verhältnissen in der Tiefe meromiktischer und eutropher Seen, wo kein CaCO₃ mehr vorhanden ist, sinkt auch das pH durch die Anhäufung der engagierten Kohlensäure. Gelangt ein Kalkstein in die Tiefe, so wird er von dieser «aggressiven» Kohlensäure angegriffen und aufgelöst. Solche Tiefenkorrosion ist wohl bekannt und, wie wir sehen, in gewissem Sinne mit der Korrosion unter den Krusten im Litoral vergleichbar. In allen Fällen war unter den Krusten der summarische CO₂-Wert höher als im freien Litoralwasser. Fragen wir uns, woher diese Kohlensäure erscheint, bleibt uns als einzige Antwort: aus den verfaulten Algen und andern organischen Resten unterhalb der Krusten. Dies deckt sich völlig mit der Tatsache, dass unterhalb der Krusten ein gewisser Sauerstoffschwund nachweisbar ist (Abb. 7). Die Lebensaktivität der Tiere wirkt sich im gleichen Sinne auf die Umgebung aus, ihr Anteil an diesen Prozessen wird aber bescheidener sein, als man dies glaubte, da ja die Tiere unter den Krusten nicht so zahlreich sind. Wir können unseren Vergleich mit den Seetiefen wei-

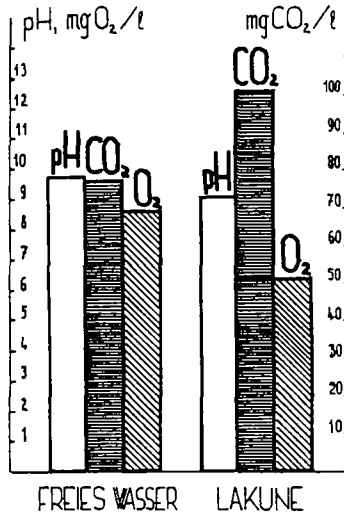


Abbildung 7

pH, Karbonathärte (ausgedrückt als mg CO₂/l) und Sauerstoff im freien Litoralwasser und unterhalb der Krusten.

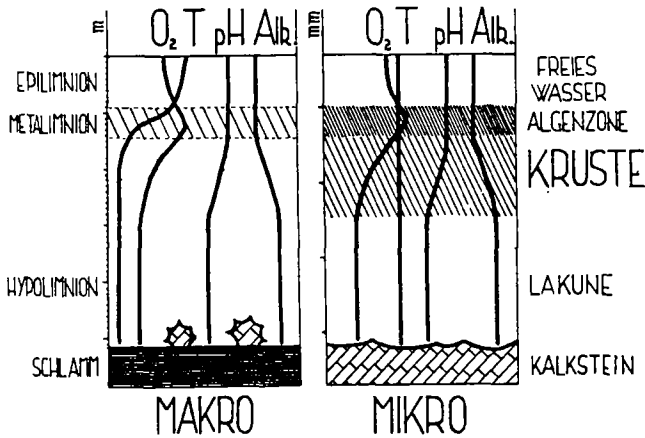


Abbildung 8

Vergleich der chemischen Schichtung in einem meromiktischen See (makro) mit der Mikro-schichtung im Krusten-Furchen-System im Seelitoral (mikro).

terführen, da dort der Sauerstoffschwund durch die Fäulnisprozesse im Schlamm verursacht wird. Die Prozesse unter den Krusten werden, obgleich öfters unterbrochen, im Litoral durch höhere Temperatur gefördert.

Ein Furchen-Krusten-System an einem Stein oder Fels stellt also im weiten Vergleich eine Art Mikromeromixis dar, wobei die Trennung

nicht durch die Wasserschichtung, sondern durch die Kruste aufrechterhalten wird. Man könnte unter der Kruste von einer «tropholytischen» Zone sprechen. Die höchste Produktion dagegen, etwa wie im «Metalimnion», ist natürlich in den oberen Krustenschichten, wo lebende Algen gedeihen, zu erwarten (Abb. 8).

Die Korrosion im Litoral ist unseres Erachtens ein Prozess, der nicht nur eng mit der Krustenbildung verbunden ist, sondern der durch die Krusten, ihr Vorkommen, ihre Zusammensetzung und ihre isolierende Funktion, überhaupt bedingt ist. Nur dank diesem Mechanismus sind im Seelitoral Korrosionsvorgänge möglich, welche an Intensität die durch Regenwasser erzeugten Karren des Karstes weit übertreffen und mit der Tiefenkorrosion vergleichbar sind.

Zusammenfassung

1. Krustensteine und Furchensteine sind eine komplexe Erscheinung im Litoral kalkreicher Seen.

2. Die Krusten bilden sich durch das Zusammenwirken von Kalkfällung im Wasser und Blaualgenbewuchs an den Steinen und Felsen. Die Blaualgen übernehmen einen Teil der biogenen Entkalkung; ihre Hauptrolle bezieht sich aber auf das Auffangen und Inkrustieren des Kalkes in die Krusten.

3. Die Krusten sind in ihrer Verbreitung einerseits durch den Kalkgehalt des Wassers bedingt, andererseits vom Vorkommen der Algen des Bewuchses abhängig.

4. Die Algen der Kruste werden in unteren Teilen derselben mit Kalk zugedeckt, sterben ab und verfaulen. Diese Fäulnisprozesse verursachen einen Sauerstoffschwund mit gleichzeitiger Zunahme an Kohlensäure, welche auf die Umgebung korrosiv einwirkt. Auf diese Weise entstehen die Furchen unter den Krusten. So entwickeln sich unter der Kruste lakunenartige Räume, in welchen eine höhere Alkalinität nachweisbar ist.

5. Die Krusten wachsen nach aussen und werden von innen aufgelöst. Sie werden dadurch immer lockerer, bis sie sich von der Unterlage abschälen. Das Durchbrechen oder Abfallen der Krusten bringt das Wasser des freien Litorals in die Lakune, unterbricht die korrosiven Prozesse unter der Kruste, und eine neue Kalkfällung findet an der Steinoberfläche statt.

6. Die Kruste wirkt also als ein Isolationsmechanismus, welcher zwei chemisch verschiedene Mikromilieus trennt, in welchen so zwei gegen-

übersetzte Vorgänge, die Kalkinkrustation und die Kalkkorrosion, möglich sind. Die Kruste selbst wird durch diese Prozesse gebildet und in ihrem Wachstum begrenzt.

Der Komplex Kruste-Furche stellt ein in sich geschlossenes System im Seelitoral dar.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] GOLUBIĆ, S., *Die Algenvegetation an den Wasserfällen des Flusses Krka in Dalmatien*, Rad J. A. Z. U. 312 (1957), 208–259.
- [2] GOLUBIĆ, S., *Prana-See an der Insel Cres – ein Cbara-See*, Verh. Internat. Verein. Limnol. 14 (1961), 846–849.
- [3] KANN, E., *Ökologische Untersuchungen an Litoralalgen ostholsteinischer Seen*, Arch. Hydrobiol. 36 (1940), 177–269.
- [4] KANN, E., *Krustensteine in Seen*, Arch. Hydrobiol. 37 (1941), 504–532.
- [5] KANN, E., *Die eulitorale Algenzone im Traunsee*, Arch. Hydrobiol. 55 (1959), 129–192.
- [6] OHLE, W., *Kalksystematik unserer Binnengewässer und der Kalkgehalt der Rügnerbäche*, Geol. d. Meere u. Binnengewässer (1937).
- [7] PAVLETIĆ, Z., und GOLUBIĆ, S., *Oocardium stratum Naeg. in den Karstgewässern Südkroatiens*, Bull. Sci. J. A. Z. U. (1956).
- [8] RUTTNER, F., *Grundriss der Limnologie* (2. Aufl., Berlin 1952).