Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 52 (1959)
Heft: 2

Artikel: Bakterien in tieferliegenden Gesteinslagen
Autor: Neher, Johannes / Rohrer, Ernst
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-162590

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

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

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

Download PDF: 13.12.2025

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

Bakterien in tieferliegenden Gesteinslagen

Von **Johannes Neher,** Zürich und **Ernst Rohrer,** Igis

Mit 5 Textfiguren

In Oberflächengesteinen, das heisst innerhalb der Verwitterungszone, ist das Vorhandensein lebender Bakterien und Pilze aller Art keine Besonderheit. Diese Mikroorganismen stellen ja einen integrierenden Faktor dar bei allen Abbauvorgängen, ob organischer oder anorganischer Natur. Etwas erstaunt ist man in der Regel ob der Fülle der Arten und ihren oft grossen Ansammlungen. Düggeli (1934) fand z. B. an Oberflächengesteinen des Karrengebietes der Frutt bis 15 Millionen Keime pro 1 Gramm feuchtem Material.

Wenn auch die Verbreitung der Spaltpilze als Ubiquisten bewiesen ist, so ist man doch über solches massenhaftes Auftreten verwundert. Bedenkt man, dass auch das Leben der Bakterien von einer ganzen Reihe von Bedingungen abhängt, so könnte man vielerorts an der Richtigkeit bakteriologischer Methodik zweifeln. An solchen Zweifeln hat es bekanntlich auch nie gefehlt, und besonders skeptisch wurde die Fachwelt bei den Ergebnissen der erdölbakteriologischen Forschung. Immer wieder wurde die Behauptung aufgestellt, dass es sich bei diesen aus sehr grossen Tiefen erhaltenen Bakterien um Bohrinfektionen handle. Es bedurfte unzähliger Versuche und Beweise, bis die Ergebnisse anerkannt wurden.

Allgemein glaubte man früher, dass mit zunehmender Bodentiefe, Fels inbegriffen, der Keimgehalt sehr rasch abnehme und die Erde schon in geringer Tiefe steril sei. Man versuchte diese Annahme durch Nährstoffmangel, zu hohe Temperaturen, Mangel an Austauschbarkeit der Stoffwechselprodukte, zu grosse Dichte der Materie usw. zu erklären. Doch ist dem nicht so.

Nährstoffe sind in allen Tiefen unserer Erdkruste genügend vorhanden, wobei es selbstverständlich Zonen mit besseren und schlechteren Bedingungen bzw. Zusammensetzungen gibt. Die Keimzahlen sind demzufolge sehr unterschiedlich, aber in der Regel hoch. Ssokolowa (1934) fand in Urallöss bei 17,5 m Tiefe noch 3 Millionen Keime pro 1 Gramm Material. Auch die sehr zahlreichen Untersuchungen von eingebrochenen Wässern beim Stollenbau der Kraftwerke haben nie sterile Verhältnisse aufgezeigt, obwohl die Gesteinsüberlagerung oft 1500 m und mehr ausmachte. In der Regel lagen die Keimzahlen zwischen 15 und 350 pro Kubikzentimeter Wasser.

Bei eigenen Bestimmungsversuchen in Gneis aus 160 m Tiefe (Neher & Rohrer 1958) lagen die Keimzahlen bei ungefähr 8 Millionen pro Gramm Gestein. Die Bestimmung der Anzahl Mikroorganismen im harten Gneis stösst auf beträchtliche Schwierigkeiten, und unser Wert ist demzufolge mehr eine gründliche Schätzung als eine exakte Zählung.

Die verschiedenen Gattungen und Arten sind natürlich je nach der Zusammensetzung der Nährböden ungleich vertreten. Sie können an günstigen Stellen praktisch als Reinkulturen auftreten (Rohrer 1952), an anderen Orten aber vollständig

fehlen. So findet man auch *Desulfovibrio halohydrocarbonoclasticus* ZOBELL vorwiegend in erdölhaltigem Sand, Bacillus und *Bacterium naphthalinicus* TAUSSON nur in ölhaltigem Gestein wie auch *Desulfovibrio aestuari* VAN DELDEN. Thiobazillen wie *Thiobacillus thiooxydans* WAKSMAN & JOFFE, *Thiobacillus novellus* STARKEY oder *Thiobacillus coproliticus* LIPMAN & MCLESS oxydieren Schwefel zu Schwefelsäure oder Sulfaten nur bei Anwesenheit von freiem Sauerstoff, während *Thiobacillus denitrificans* BEIJERINCK hierzu keinen freien Sauerstoff benötigt, sondern lediglich Nitrate und dabei freien gasförmigen Stickstoff bildet. In eisenhaltigen Wässern und Böden sind die Eisenbakterien angereichert, wobei *Bacillus ferrigenus* BARGAGLIO–PERTUCCI besonders die Brauneisenerzbildung hervorrufen soll (BARGAGLIO 1932).

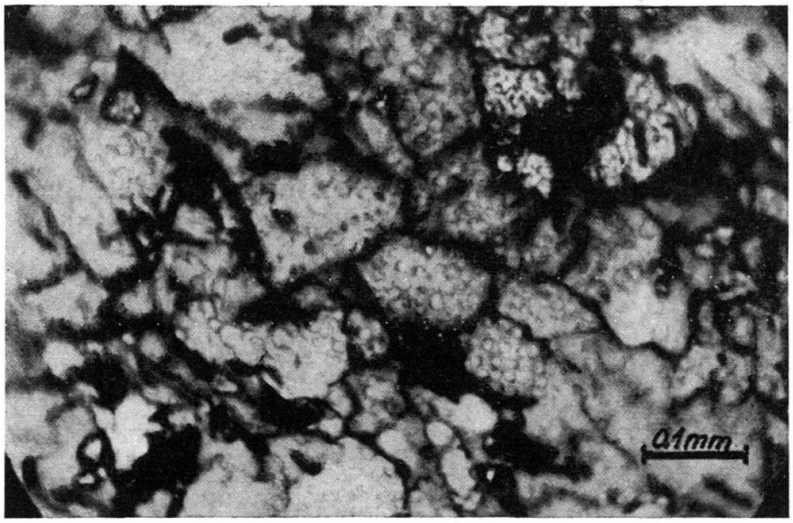

Fig. 1. Unpolarisierter Dünnschliff durch einen Silikatmarmor, dessen Karbonat weggelöst wurde. Man sieht noch Reste von Silikatmineralien (vgl. Fig. 2) und ein Netz von schwarzen Linien. Letzteres bildete die Umhüllung der Mineralien vor dem Weglösen des Karbonates und besteht aus gelartigen Stoffen, die das Gestein schwammartig durchsetzen.

Die Temperaturempfindlichkeit schwankt bei den Bakterien innerhalb weiter Grenzen, wobei sehr hohe Optimaltemperaturen seit langem bekannt sind. Es vermehrt sich *Bacillus thermotransluceus* BERGEY am besten bei 60° C, *Bacillus tostus* BLAU bei 60–70°, ebenso auch *Bacillus viridulus* (MIGULA) BERGEY et al. *Bacillus ferrugenus* BARGAGLIO-PERTUCCI ist fakultativ thermophil und vermehrt sich gut bei 65–70° C, während *Bacillus losanitchii* BERGEY sogar Temperaturen bis 78° C bevorzugt. In neuerer Zeit sind auch eine Anzahl Sporenbildner aus dem Boden isoliert worden, welche sich durch noch höhere Thermoresistenz auszeichnen (KURZWEIL 1956). Interessant ist, dass diese Gruppe von Spaltpilzen bis 100 Minuten bei 120° C überleben. Dabei hat es sich gezeigt, dass diese sich besonders gut entwickeln in Nährlösungen ohne Stickstoffzusatz. Das Angebot an Stickstoff verändert bei vielen Mikroorganismen ihre Optimaltemperatur, wie bei mehreren höheren Pflanzen die Frostempfindlichkeit damit in engem Zusammenhange steht.

Der dritte Einwand, die mangelnde Austauschmöglichkeit der Stoffwechselprodukte, die zu einer Art Selbstvergiftung führen sollte, ist deshalb nicht stichhaltig, weil auch in dichten Gesteinen ein steter Stoffaustausch, eine dauernde Zir-

kulation stattfindet. Die Gesteine sind bekanntlich poröse Festkörper. Die Porenweite ist ausserordentlich verschieden, und das ganze System besteht aus einem offenen kanalartigen und einem geschlossenen, mit Gel erfüllten Anteil (Fig. 1, 2, 3)[1]).

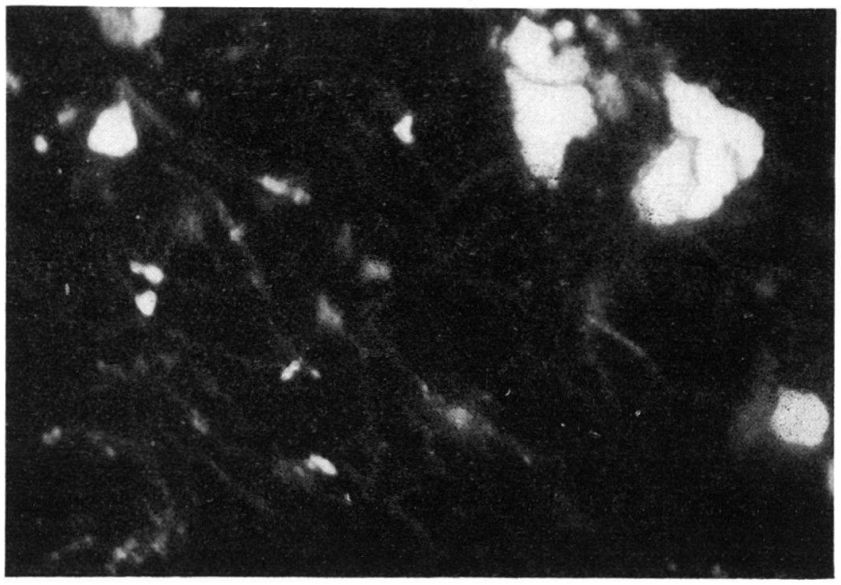

Fig. 2. Dieselbe Schiffstelle wie Fig. 1 polarisiert. Man sieht das starke Aufleuchten der Silikatmineralien und das durch Reflexbeleuchtung schwach erhellte, isotrope Gelnetz. Vergrösserung wie Fig. 1.

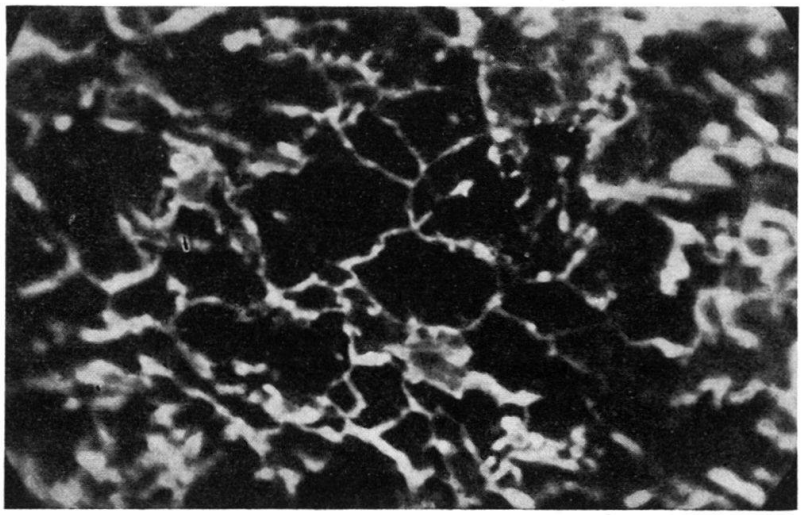

Fig. 3. Dieselbe Schliffstelle wie Fig. 1 zeigt im Auflicht das nach dem Weglösen des Karbonates zurückgebliebene, aus der Grundfläche hell herausragende Gelnetz. Vergrösserung wie Fig. 1.

In beiden Systemen findet der Stoffaustausch statt, je nachdem erfolgt der Transport von flüssigen oder gasförmigen Teilchen als eigentliche Strömung oder Diffusion. Ist der Querschnitt eines Kanals so gross, dass sich an den Wandungen eine ruhende Haftschicht bilden kann, d. h. ist der Radius der Kapillare im Vergleich

[1]) Das Dünnschliffmaterial des Silikatmarmors wurde in freundlicher Weise von Herrn Dr. M. ZIMMERMANN zur Verfügung gestellt, was hier bestens verdankt sei.

zur freien Weglänge der Moleküle gross, so kann sich eine laminare Schichtströmung ausbilden und man spricht von direkter Durchlässigkeit des Körpers. Die Beziehungen zwischen der Durchlässigkeit und dem Querschnitt der Kapillaren folgen dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz. Wird der Porenquerschnitt kleiner, so kann man die Feststellung machen, dass die Menge Flüssigkeit oder Gas, welche durch den Körper hindurchgeht, grösser ist, als diesem Gesetz entspricht. Dieser Effekt ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, dass keine ruhende Wandschicht mehr

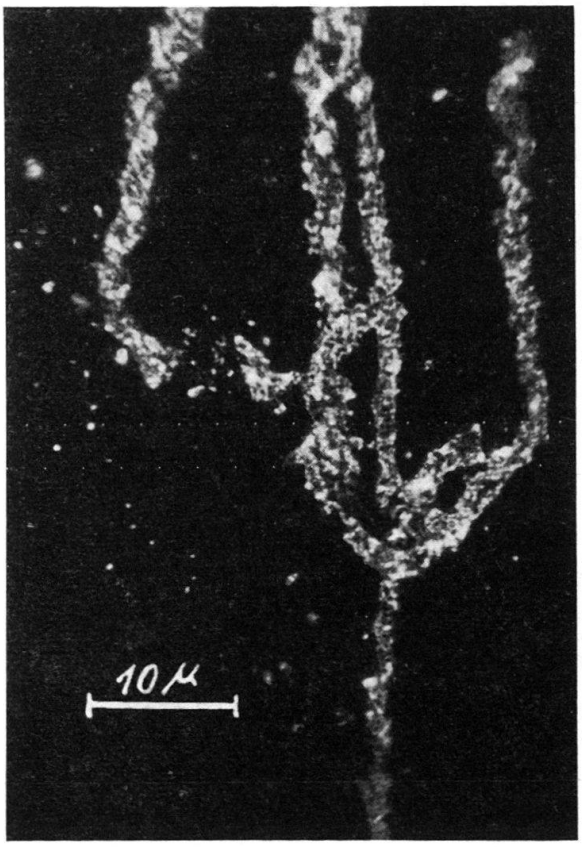

Fig. 4. Dunkelfeldaufnahme eines aus dem Hauptdolomit der Ortlertrias herauspräparierten Mycelfadens, der von Bakterien umgeben ist, die mit ihm symbiotisch leben und hier in Form von kleinen, weissen Punkten erscheinen.

gebildet wird. Solange der Querschnitt der Kapillaren noch grösser ist, als der freien Weglänge der Moleküle entspricht, geht die Permeation als Diffusion vor sich. Die Bewegung der einzelnen Moleküle wird nur noch bestimmt durch die Molekularkinetik. Der Austausch erfolgt auf Grund der örtlichen und zeitlichen Differenzen der Konzentration. Ist aber die Porenweite noch kleiner und entspricht etwa der freien Weglänge der permeierenden Moleküle, oder ist sie gar kleiner als diese, so tritt an Stelle der eigentlichen Diffusion die Knudsensche Kapillardiffusion (Knudsen 1909). Findet an den Porenwandungen eine Adsorption der bewegten Teilchen statt, so kann man eine Verschiebung letzterer entlang der Oberfläche feststellen. Diese Art des Stoffaustausches, die sog. Volmersche Oberflächendiffusion, wird mit abnehmender Porenweite immer ausgeprägter (Volmer & Estermann 1921). Auf welche Art der Stoffaustausch stattfindet, hängt also in erster Linie

von der Porenweite des Systems ab, praktisch ist es so, dass alle genannten Arten gleichzeitig nebeneinander auftreten.

Bei den Mikroorganismen kennen wir ausserdem noch eine weitere Möglichkeit, um diesem Übelstand, der Anhäufung von Stoffwechselprodukten, abzuhelfen: es leben mehrere verschiedene Arten symbiotisch (Fig. 4). Auf diese Weise erleichtern sie sich einander gegenseitig das Leben durch Wegschaffung ihrer Stoffwechselprodukte oder durch Konstanthaltung von Wasserstoffionenkonzentration, Redoxpotential usw. Die Endprodukte bakterieller Umsetzungen selbst helfen vielfach auch mit, Mineralien löslich – oder wenn man gar sagen will «verdaulich» – zu machen. Man kennt die Wirkung von Kohlendioxyd, Schwefelwasserstoff, Ammoniak oder gewisser Salze usw. als Abbaureagentien schon seit langem.

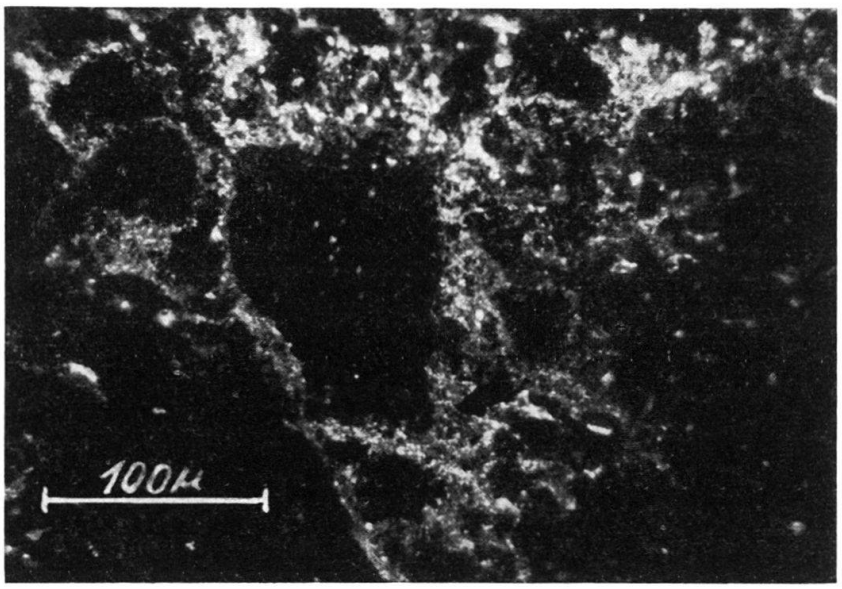

Fig. 5. Dunkelfeldaufnahme eines Dünnschliffes mit bakterienerfüllten Gelzonen. Die Bakterien erscheinen hier als kleine, weisse Punkte.

Die Mikroorganismen in grossen Tiefen der Erdkruste sind sehr stark spezialisiert, sie sind der dortigen Umwelt angepasst. So ergibt es sich, dass sie in der Regel schwer zu kultivieren sind. Schon seit langem sind Bakterien in Gesteinen entdeckt worden, da aber die Züchtung nicht gelang, sind sie öfters als fossil betrachtet worden. So berichtete schon RENAULT im Jahre 1897 von einer fossilen Form von Bakterien in ölführendem Gestein. Er nannte die Spezies *Micrococcus petrolei* RENAULT (1897), und seither hat es nicht an gleichartigen Funden gefehlt. Es stellt sich nun die Frage, ob diese Organismen tatsächlich fossil sind oder nur als solche erscheinen, da man ihnen keinen entsprechenden Nährboden geboten hat.

Bei Untersuchungen eines Biotitgneises (NEHER & ROHRER 1958), haben wir ebenfalls Bakterien gefunden. Durch verschiedene Methoden konnte die organische Natur dieser kleinen «Kügelchen» einwandfrei festgestellt werden.

Durch Weglösung des Gesteins blieb immer eine Schicht grauschwarzer, sehr dünner Häutchen übrig. Die Untersuchung solchen Materials hat ergeben, dass es sich um gelartige Massen handelte, die vollständig durchsetzt waren von Bakterien (Fig. 5). Es gelang aber vorderhand nicht, die Organismen zu züchten, denn

die mit starken Säuren gewonnenen Pilze konnten ja nicht mehr leben. Die Analyse dieses Materials hat ergeben, dass es neben Polysacchariden auch Eiweissverbindungen enthält. Eine Mikrokjeldahl-Bestimmung hat 0,5% N_2 ergeben. In der Folge wurde nun versucht, die Keime zu isolieren und zu züchten.

Ein frischer Bohrkern wurde an seiner Oberfläche zur Entfernung nachträglich aufgebrachter Pilze während 4 Stunden in 10%iger Salzsäure angeäzt, dann während einer halben Stunde in 5%ige Formaldehyd–Alkohol-Lösung eingelegt, mit sterilem Wasser gewaschen und in ebensolchem mit einem ausgeglühten Meissel in kleine Stücke zerschlagen. Letztere wurden auf die verschiedenartigsten Nährböden übertragen und auch in flüssige Substrate eingebracht. Die Bebrütung der Kulturen erfolgte bei Temperaturen bis 65° C. Die Züchtung war erstmals erfolgreich mit einem Substrat von aufgelöstem Gneis auf Kieselsäuregel unter Luftabschluss. Das Medium enthielt keinen oder höchstens Spuren von Stickstoff und die Bakterien bildeten nach 6 Wochen scharfrandige Makrokolonien von harter, spröder Beschaffenheit und durchscheinender milchigweisser Farbe. Über die Grösse eines Stecknadelkopfes wuchsen sie nicht an. Mikroskopisch gesehen bestanden sie aus zwei Arten, einfachen Kokken und beinahe ovalen Kurzstäbchen. Beweglichkeit konnte auch in flüssigen Substraten nicht festgestellt werden. Die die Zellkörper umhüllende Substanz war vorwiegend anorganischer Natur. Die Grösse der Einzelzellen liegt bei 0,2–0,3 $\times$ 0,2–0,5 μ. Die optimale Temperatur beträgt 55–58° C, bei 70° C findet nur noch sehr langsame, bei 80° C überhaupt keine Vermehrung mehr statt, und die Zellen sterben bei 85° C schon innert 10 Minuten ab. Das Wachstum wird auch eingestellt bei Temperaturen unterhalb 35° C. Wie die Kulturversuche ergeben haben, ist aber die Optimaltemperatur in einem gewissen Bereiche von der Ernährung abhängig. Die diesbezüglichen Versuche sind noch nicht abgeschlossen. Die Organismen sind streng autotroph und schon bei geringen Spuren organischen Stickstoffs oder von Kohlenhydraten stellen sie Vermehrung und Stoffwechsel ein. Die Gramfärbung gelingt nur teilweise. Die gezüchteten Keime waren stets grösser als die im Gestein direkt gefundenen, und nicht wenige teratologische Formen konnten beobachtet werden, besonders wenn der Nährlösung das Eisen entzogen worden war. Auch ist bei Eisenmangel zu sehen, wie die Bildung des Schleimes zurückgeht und das Wachstum nur noch stockend verläuft.

Bei der anaeroben Kultur in einem flüssigen Substrat, das durch Auflösung eines Bohrkernstückes von Biotitgneis erhalten wurde, konnte die Bildung von Dolomitkristallen festgestellt werden. Es ist dabei interessant, dass diese Kristalle stets aus dem «Bakterienschleim», also der gelartigen, anorganischen Masse um die Zellkörper herum, herauswuchsen. Wurde eine Kultur, die bereits kleine Kristallkeime aufwies, durch Hitze steril gemacht, so hörte jegliches Wachstum der Kristalle auf – es setzte aber wieder ein, wenn von neuem mit Bakterien geimpft wurde. Die Versuche durch Einengen der Lösung die Kristalle zu weiterem Wachstum anzuregen, verliefen ohne Ausnahme negativ. Mit Bakterien konnten auf diese Weise Kristalle gezüchtet werden von mehr als 1 mm Grösse, die dann röntgenographisch durch Einkristallaufnahmen nach Präzessionsmethode von BUERGER als reiner Dolomit identifiziert wurden (NEHER & ROHRER 1958).

Interessant bei diesen Mikroorganismen ist besonders auch die Zusammensetzung des mit Kupfer fällbaren Eiweisses. Die Analyse hat ergeben, dass diese

Körper nur 3,9% Stickstoff enthalten. Aber auch die Untersuchung der Gesamtsubstanz hat den niedrigen Stickstoffgehalt bestätigt – er liegt bei 0,56%. Der mit Kupfer fällbare Anteil liegt mit ca. 15% gegenüber andern Bakterien ausserordentlich niedrig. Es muss die Struktur des Eiweisses dieser Organismen gegenüber den bekannten verschieden sein. Mit diesen Beobachtungen in Zusammenhang steht sicher die sehr ausgeprägte Substratspezifität, und es ist zu erwarten, dass Bakterien auch bei andern Kristallisationsvorgängen in der Erdkruste aktiv beteiligt sind. Die Schwierigkeiten dieses Nachweises bestehen in der Hauptsache in der Unkenntnis ihrer Ernährungsverhältnisse und Temperaturansprüche.

Unbeantwortet ist aber immer noch die Frage der Herkunft dieser Organismen, bzw. wie die Bakterien in das Gestein hineingelangt sind. Während bei den Erdölbakterien die Möglichkeit vorhanden ist, dass sie mit dem ursprünglichen Material eingeschlossen wurden und dann die Umwandlung in Erdöl bewerkstelligt haben, ist es bei den Keimen aus dem Orthokristallin schwieriger, eine Erklärung zu geben. Bei den Sedimentgesteinen sind Einschlüsse von Mikroorganismen eine Selbstverständlichkeit, und es ist verwunderlich, dass dieses Gebiet noch nicht weiter untersucht worden ist. Durch einsickerndes Oberflächenwasser werden dauernd Keime in die Erdkruste eingeschwemmt, und durch Klüfte und unterirdische Wasserläufe gelangen sie in beträchtliche Tiefen, aber eine derartige Verteilung, wie sie selbst in scheinbar kompakten Mineralien des Kristallins zu finden ist, kann damit nicht erklärt werden. Da die Spaltpilze nicht altern, sondern bei der Zweiteilung die Zelle sich stets wieder verjüngt, können Bakterien schon seit urdenklichen Zeiten im Gestein vorhanden sein.

LITERATURVERZEICHNIS

BARGAGLI, G. (1932): *Sull'origine biologica* dei depositi di ferro e di solfo. N. Jb. Mineral. *2*.

DÜGGELI, M. (1934): *Bakteriologische Studien im Karrengebiet der Frutt.* Vjschr. naturf. Ges. Zürich *79*.

KNUDSEN, M. (1909): *Die Gesetze der Molekularströmung und der inneren Reibungsströmung der Gase durch Röhren.* Ann. Physik *28*.

KURZWEIL, H. (1943, 1954, 1955, 1956): *Höchstresistente Erdsporenbildner.* Archiv Hyg. 124, 138, 139, 140.

NEHER, J., & ROHRER, E. (1958): *Dolomitbildung unter Mitwirkung von Bakterien.* Eclogae geol. Helv. *51*, 2.

RENAULT, B. (1897): *Les Bactériacées des Bogheads.* C. r. Acad. Sci. Paris 124.

ROHRER, E. (1952): *Ein Beitrag zur Kenntnis der Eisenbakterien.* Schw. Z. Hydrol. *14*.

SSOKOLOWA (1934): Nachr. Acad. Wiss. *5*, Russland.

VOLMER, M., & ESTERMANN, J. (1921): *Über den Mechanismus der Molekülabscheidung an Kristallen.* Z. f. Physik *7*.