

# Dornröschenschlaf bei Mikroorganismen?

Harald Binder, Taborweg 8, 78467 Konstanz

**Zusammenfassung:** Über die Isolierung und Reaktivierung von Mikroorganismen aus sehr alten Proben liegt eine Vielzahl von Dokumentationen vor. Die jüngste Veröffentlichung über kultivierbare Bakterien aus permischem Kochsalzkristallen (VREELAND et al. 2000) und die dadurch ausgelöste Diskussion haben dieses immer noch unverstandene Phänomen erneut ins Blickfeld gerückt. Die nach wie vor offenen Fragen beziehen sich vor allem auf die Diskrepanz zwischen behaupteten langen Überlebenszeiten und den dazu im Widerspruch stehenden molekularbiologischen und biochemischen Kenntnissen. In diesem Beitrag werden die ersten wissenschaftlichen Befunde von kultivierbaren Mikroorganismen aus Kochsalzkristallen vorgestellt, diskutiert und für deren Vertrauenswürdigkeit plädiert. Das bisher unbefriedigende Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen provoziert unkonventionelle Fragestellungen und motiviert zu neuen Untersuchungen.

## Einführung

Mikroorganismen treten als Lebewesen praktisch überall auf der Erde auf. Aufgrund ihrer überaus flexiblen Physiologie besiedeln sie eine unübersehbare Vielfalt von Lebensräumen. Man findet sie in Vulkanschlotten, heißen Quellen an der Erdoberfläche, aber auch am Tiefseeboden, im Eis der Arktis ebenso wie als Symbionten z.B. im Verdauungstrakt höherer Organismen oder im Toten Meer.

Für wissenschaftliche Untersuchungen wurden die Mikroorganismen vor allem durch die Einführung des Mikroskops durch Antoni VAN LEEUVENHOEK (1632-1723) zugänglich. Er berichtet bereits 1702 in einem Brief (DOBELL 1932) von Untersuchungen von „Animalcules“ (= Tierchen), die er in Sedimenten aus Dachrinnen gefunden hatte und die regelmäßig, selbst nach fünfmonatigem Trocknen – während dieser Zeit waren keine Lebenszeichen erkennbar – nach Zugabe von abgekochtem Regenwasser innerhalb weniger Stunden reaktivierbar waren und wieder die typischen Lebensäußerungen zeigten.

Dieses Phänomen, die Wiederbelebbarkeit von Mikroorganismen, nachdem sie über einen längeren Zeitraum keine feststellbaren Lebenszeichen gezeigt haben, wird im Folgenden in Analogie zum Märchen als „Dornröschenschlaf“ bezeichnet. In der Grimmschen Version finden die abrupt unterbrochenen Lebensvorgänge nach einem hundert

Jahre dauernden Schlaf unmittelbare Fortsetzung, ohne daß die verschlafene Zeit Spuren hinterlassen hätte.

Für das beschriebene Phänomen führte D. KEILIN (1959) den Begriff Cryptobiose ein und definierte ihn folgendermaßen: „... latent life, for the state of an organism when it shows no visible sign of life and when its metabolic activity becomes hardly measurable, or becomes reversibly to a standstill.“ Synonym für Cryptobiose wird auch der Begriff Anabiose benutzt (PREYER 1891; zit. in KEILIN 1959). Von verschiedenen Organismen, wie Rädertierchen, Bärtierchen, Nematoden, Bakterien, Pilzen und Pflanzensamen, aber auch von manchen größeren Organismen ist bekannt, daß sie z.B. unter Wasserstreß hohe Flüssigkeitsverluste während eines begrenzten Zeitraums überleben können, z.T. unter Ausbildung spezieller robuster Formen, wie Sporen oder speziell eingekapselter Larven. Die bisher dokumentierten Zeiträume, die Organismen unter für sie ungünstigen Lebensbedingungen überleben können, erstreckten sich von Wochen bis zu wenigen hundert Jahren.

---

## Das Vorkommen von reaktivierbaren Mikroorganismen in Proben, denen aufgrund ihrer geologischen Geschichte und Herkunft ein hohes Alter zugesprochen wird, erscheint gut begründet.

---

In diesem Beitrag wird eine kleine Auswahl von Befunden über reaktivierbare und kultivierbare Mikroorganismen aus tiefliegenden Sedimenten vorgestellt, denen aufgrund ihrer stratigraphischen Einordnung üblicherweise ein Alter von bis zu mehreren hundert Millionen Jahren zugesprochen wird. Besondere Berücksichtigung finden dabei Berichte über Isolierungen aus Salzlagerstätten. Aufgrund deren geologischer Einstufung (z.B. Perm, Silur oder auch Kambrium) ist es anhand bisheriger Erfahrung nicht vorstellbar, in solchen Proben lebensfähige Organismen zu finden. Sollte man doch fündig werden, ist die Kontamination der untersuchten Proben durch Mikroorganismen bei Probennahme, -aufbereitung oder der Analyse nicht sicher auszuschließen. Allerdings treibt die steigende Zahl der Veröffentlichungen von Cryptobiosen die Kritiker solcher Befunde zunehmend in

die Defensive, und zwar u.a. aus folgenden Gründen:

- bereits die ersten, aber auch die jüngsten Untersuchungen zeichnen sich durch umfangreiche und sehr rigorose Kontrollexperimente aus;
- eine Vielzahl voneinander unabhängiger Arbeitsgruppen beschreibt vergleichbare Resultate;
- einzelne Untersuchungsergebnisse von vergleichbaren Proben konnten bei Überprüfung durch unabhängige Arbeitsgruppen reproduziert werden.

Das Vorkommen von reaktivierbaren und kultivierbaren Mikroorganismen in Proben, denen aufgrund ihrer geologischen Geschichte und Herkunft ein hohes Alter zugesprochen wird, erscheint daher gut begründet. Daraus sich ergebende Probleme und offene Fragen werden nachfolgend angezeigt und diskutiert.

## Kultivierbare Mikroorganismen in alten Sedimenten — Befunde und Probleme

LIPMAN berichtete 1928 erstmals über kultivierbare Mikroorganismen in tiefliegenden Sedimenten und verschiedenen Kohlen (LIPMAN 1931). Auch von anderen Autoren wurden Bakterien aus Kohleflözen beschrieben (z.B. LIESKE [1932]; zit. in KENNEDY et al. 1994). LIPMAN legte auch Untersuchungen über Mikroorganismen aus Meteoritenproben vor und verband damit Spekulationen über die Infektion unseres Planeten mit Lebenskeimen aus dem Weltall (Panspermien-Hypothese). In jüngerer Zeit erschien eine Vielzahl von Publikationen, die auf dem Sonderprogramm des US-Energieministeriums basieren (Deep Microbiology Subprogram [Mikrobiologie in Tiefengestein]; FREDRICKSON & ONSTOTT 1996). Solche Veröffentlichungen fanden zwar kurzzeitig Resonanz in populären Medien, konnten aber bisher keine weiteren systematischen wissenschaftlichen Untersuchungen initiieren. KENNEDY et al. (1994) führen für die geringe Akzeptanz dieser Ergebnisse die Tatsache an, daß bislang viele Berichte zum Überleben von Bakterien für einen Zeitraum von nur 10–20 Jahren vorlagen, nun aber Überlebenszeiten von Jahrmillionen behauptet wurden. Für einen mittleren Bereich jedoch, d.h. für einen Zeitraum von Jahrhunderten und Jahrtausenden, lagen keine Belege vor. Ihrem Überblicksartikel legen KENNEDY et al. (1994) Arbeiten von 37 unabhängigen Arbeitsgruppen zugrunde. Sie kommen zu dem Schluß, daß selbst wenn einige der in ihrer Auflistung behaupteten Isolierungen von lebenden Bakterien aus alten Proben auf Kontamination zurückzuführen seien, die Datenmenge so umfangreich und die Untersuchungen von so vielen unabhängigen Arbeitsgruppen durchgeführt worden seien, daß es nun möglich sei zu sagen: die Reaktivierung von Millionen Jahre alten Lebewesen ist Realität.

Die erwähnten Befunden stoßen auf eine ausgeprägte Skepsis. In der vorgetragenen Kritik wird immer wieder eine Reihe von Problemen benannt, die einer Akzeptanz entgegenstehen:

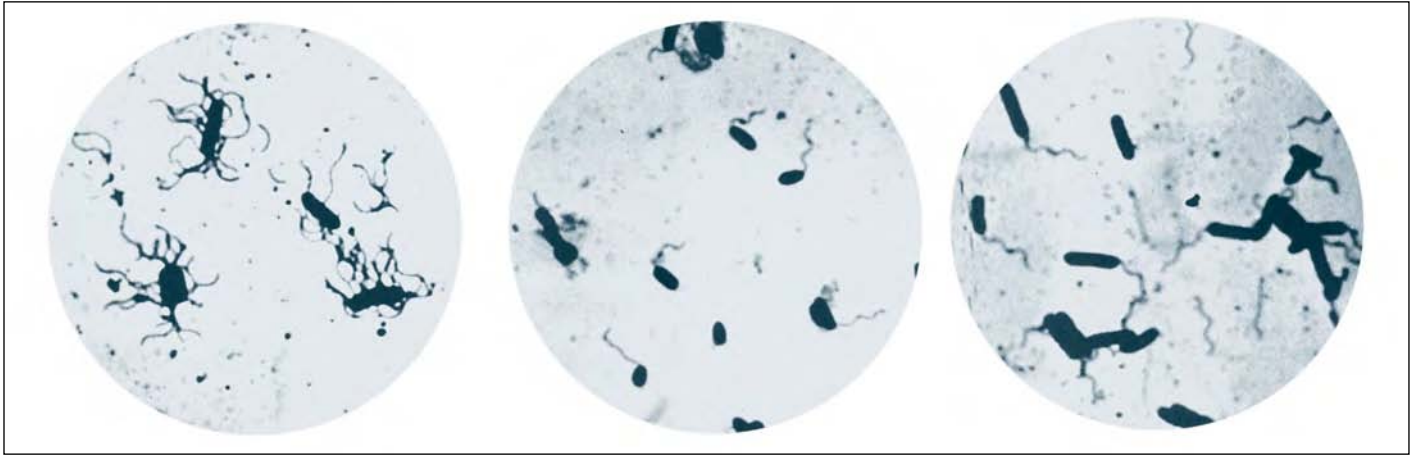
- Das Alter der isolierten Mikroorganismen kann nicht direkt bestimmt werden, sondern nur indirekt über eine Datierung der Matrix (z.B. mittels radiometrischer Methoden oder biostratigraphischer Zuordnung), in welche sie eingeschlossen sind. Damit kann eine Wanderung als Fehlerquelle nicht ausgeschlossen werden. Die Organismen müssen in die tiefliegenden Gesteinsformationen nicht zur Zeit von deren Entstehung gelangt sein, sondern möglicherweise zu einem späteren Zeitpunkt (z.B. durch Wasser in porösem Gestein).

• Die Gefahr von Kontamination der untersuchten Proben durch rezente (heute lebende) Mikroorganismen bei der Probennahme oder -aufbereitung ist auch durch strengste Kontrollexperimente nicht grundsätzlich auszuschließen. In der Regel werden jedoch in den Publikationen alle bekannten Kontaminationsquellen und -wege überprüft. Kritiker sollten konkrete nicht kontrollierte Möglichkeiten der Kontamination benennen. Die pauschale Kontaminations-Kritik verliert angesichts der Fülle präsentierter Daten an Glaubwürdigkeit.

- Die bekannten Mechanismen der Biochemie und Molekularbiologie der Mikroorganismen liefern keine Hinweise darauf, wie ein Überleben über einen postulierten Zeitraum von bis zu vielen hundert Jahrmillionen nachvollzogen und verstanden werden könnte. Die endliche chemische Stabilität der Nukleinsäuren ohne die Reparaturmechanismen des lebenden Organismus und ohne Nährstoffe steht nicht im Einklang mit einem sehr langen Überleben in einem „schlafenden“ Zustand.

## Nachweise von lebensfähigen Mikroorganismen aus primären Salzlagerstätten

H. J. DOMBROWSKI arbeitete als Mediziner (Dr. med.) und Naturwissenschaftler (Dr. phil. nat.) im Bereich der Balneologie (= Bäder-, Heilquellenkunde) und untersuchte u.a. die Bad Nauheimer Solequellen. 1960 berichtete er erstmals über Bakterien in primären Salzlagerstätten aus dem Zechstein (Gesteinsserie im Oberperm; Abb. 1). Diese konnte er zumindest teilweise reaktivieren und Kulturen davon anlegen. DOMBROWSKI sieht die Herkunft dieser reaktivierten Bakterien im Zechsteinsalz: „Damit sind m.W. erstmals Versuche geglückt, aus bergmännisch und mittels Bohrung gewonnenen Mineralsalzen bzw. Gestein Mikroorganismen zu züchten. Der Nachweis toter Bakterien aus dem Zechstein war schon Müller und Schwarz 1953 geglückt. In diesen Mikroben haben



wir die ältesten uns lebend überkommenen Organismen vor uns ...“ Weitere Untersuchungen bestätigten die ersten Befunde und so konnte DOMBROWSKI in verschiedenen nachfolgenden Veröffentlichungen (DOMBROWSKI 1961a, b, 1962a, b) seine ersten Befunde untermauern und ausweiten. In einer seiner Veröffentlichungen (DOMBROWSKI 1961b) faßt der Autor die Argumente zusammen, die ihn zur Überzeugung führen, daß die von ihm gefundenen Organismen Bewohner des Zechsteinmeeres waren:

1. „Bei wirklich aseptischem Heraustrennen von innerstem Material aus Zechsteinsalzen treffe ich Bakterien neben Gymnospermensporen und Holzfragmenten, deren Alter eindeutig permisch ist, an.“

2. Das Vorfinden vorzüglich erhaltener, an sich aber äußerst fragiler fossiler Protozoen bestärkt den Eindruck, daß die Salze günstige Bedingungen bezüglich des Fernhaltens mechanischer Schädigung geboten haben müssen.

3. Die nachpermischen Überlagerungen haben mit etwa 1400 m im Maximum die Mikroben einem Temperaturmedium von etwa  $+42^{\circ}\text{C}$  ausgesetzt, welches keineswegs ein Extrem darstellt.

4. Auffallend ist das Übereinstimmen des heute zu ermittelnden Wachstumsoptimum von  $+45$  bis  $+55^{\circ}\text{C}$  mit jener Temperatur, welche im Zechsteinmeer herrschte.

5. Von biochemischer Seite wird die Behauptung aufgestellt, daß sich Bakterien in wasserfreiem Zustand ihre Eiweiße unbegrenzt lebensfähig erhalten können. Die Funde könnten als Beweis für diese Hypothese angeführt werden. Man muß annehmen, daß die Bakterien in wasserfreiem Zustand auf unsere Tage überkommen sind.“

Die von ihm kultivierten Bakterien beschreibt der Autor nach bakteriologisch-morphologischen und biochemischen Merkmalen und vergleicht sie mit den bekannten Daten heutiger Mikroorganismen. Bereits in der Publikation von 1960 berichtet DOMBROWSKI von Modellversuchen, in welchen er Bakterien in übersättigter Salzlösung über 3 Monate bei  $31^{\circ}\text{C}$  eintrocknet und aus dem so gewon-

nenen, vollkommen eingetrockneten und auskristallisierten Salz nach einigen Tagen wieder Kulturen derselben Bakterien gewinnen konnte.

Die Vorbemerkung, welche die Schriftleitung der Zeitschrift „Kosmos“ einem Artikel von DOMBROWSKI (1962b) voranstellte, dokumentiert die Skepsis, mit der diese Befunde trotz der sorgfältigen und selbstkritischen Arbeitsweise aufgenommen worden sind. In einem Beitrag stellt DOMBROWSKI (1963) seine Arbeitsmethoden und Resultate noch einmal ausführlich dar und dokumentiert den Nachweis von reaktivierbaren Bakterien auch aus primären Salzlagerstätten des Mittleren Devons, des Silurs und des Präkambriums (vgl. Abb. 2).

BIBO et al. (1983) veröffentlichen Untersuchungen, in welchen sie die Resultate von DOMBROWSKI zu reproduzieren versuchten. In dieser Arbeit können sie mit den verfügbaren Methoden der Bakteriologie die Ergebnisse in vollem Umfang bestätigen. Sie weisen nach, daß die von DOMBROWSKI angewendete Methode zur Sterilisierung der Oberfläche der eingesetzten Salzproben mit modernen Alternativen vergleichbar ist und eine Kontamination von rezenten Mikroorganismen aus dem Oberflächenbereich der Proben äußerst unwahrscheinlich ist.

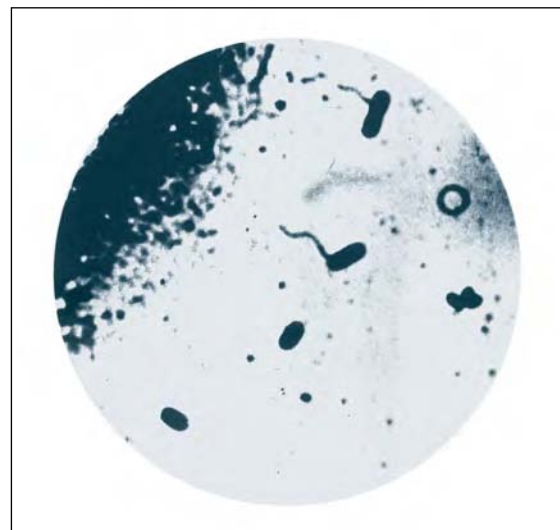


Abb. 1: DOMBROWSKI konnte Anfang der sechziger Jahre mehrfach reaktivierbare Mikroorganismen aus Salzlagerstätten isolieren. Die Abbildung zeigt stabförmige begeißelte Mikroorganismen aus dem Zechstein (Oberperm). (Aus DOMBROWSKI 1965)

Abb. 2: Bei diesen sehr alten noch lebensfähigen Organismen handelt es sich um Bakterien aus dem Unterkambrium, das auf über eine halbe Milliarde Jahre datiert wird. (Aus DOMBROWSKI 1965)

Abb. 3: Salzkristall, aus welchem neuerdings Bakterien der Gattung *Bacillus* isoliert und reaktiviert wurden. Der Kristall hat die Maße 3,5 x 3,5 x 2,5 cm. (Aus VREELAND et al. 2000)



Die Veröffentlichung von VREELAND et al. (2000), in welcher ebenfalls die Isolierung und Kultivierung von Bakterien aus Proben einer primären Salzlagerstätte aus dem Perm (Salado Formation, Carlsbad, New Mexico) beschrieben wird (vgl. Abb. 3), lenkte erst in jüngster Vergangenheit erneut die Aufmerksamkeit auf das Phänomen des „Dornröschenschlafs“ von Mikroorganismen. VREELAND und Mitarbeiter wenden äußerst rigorose Methoden zur Desinfektion der Probenoberfläche an. Sie dokumentieren aber keine direkten Nachweise von Bakterien (z.B. durch DNA-Isolierung und Sequenzierung aus einer Probe oder durch mikroskopische Untersuchung von Dünnschnitten) in den Proben. Auch diese Ergebnisse werden wieder intensiv diskutiert und kritisiert (PARKES 2000, HAZEN & ROEDDER 2001, GRAUR & PUPKO 2001). PARKES (2000) führt in einem den Artikel von VREELAND (2000) kommentierenden Beitrag das Argument von der nicht auszuschließenden Kontamination an. Er betont allerdings auch, daß die der „Unsterblichkeit“ der Bakterien zugrundeliegende Biochemie derzeit völlig unbekannt ist. HAZEN & ROEDDER (2001) zweifeln das Alter der Bakterien an, indem sie behaupten, ein späteres Eindringen der Bakterien in die Salzlagerstätte im Zusammenhang mit eindringenden wässrigen Lösungen sei nicht auszuschließen, sondern eher wahrscheinlich. POWERS et al. (2001) entkräften in ihrer Erwiderung diese Kritik.

GRAUR & PUPKO (2001) stellen die Resultate von VREELAND et al. (2001) auf der Basis von 16 S rRNA-Daten in Frage und zeigen, daß bei einer kladistischen Analyse von entsprechenden Sequenzdaten (Fähnlichkeitsvergleich) die von VREELAND et al. gefundenen Bakterien (*Bacillus* 2-9-3; bzw. *Bacillus permians*) keine Stellung im Wurzelbereich des Stammbaums einnehmen und auffällige Fähnlichkeit mit Bakterien (*Salibacillus marismortui*) aufweisen, welche 1999 aus dem Toten Meer isoliert und beschrieben worden sind. Letztlich stellt sich bei der Bewertung dieser Kritik die Frage, wie man kladistische Analysen von (partiellen) Sequenzdaten im Vergleich zu den experimentellen Resultaten gewichten will.

Bei der Aufmerksamkeit, die die Publikation von VREELAND et al. (2000) auf sich gezogen hat, sollte allerdings nicht übersehen werden, daß diese Arbeit nicht isoliert dasteht. Auch von anderen unabhängigen Arbeitsgruppen sind Bakterien aus Salzlagerstätten beschrieben worden (McGENITY et al. 2000).

Diese Forschungen zeigen, daß es sich bei den aus Salzkristalleinschlüssen isolierten Bakterien typischerweise um sporenbildende Stämme handelt (VREELAND et al. [2000] fanden allerdings keine Sporen) und den Haloarchaea zuzuordnen sind. Dabei handelt es sich um Archaea (Archaeobakterien), die obligat halophil sind, d.h. sie sind nur in Salzlösungen mit einem hohen Salzgehalt lebensfähig (diese Tatsache schränkt die Gefahr der Kontamination der zu untersuchenden Proben durch Bakterien im Labor sehr stark ein). Viele der beschriebenen Bakterien fühlen sich bei Salzkonzentrationen von 20% und mehr wohl (eine 32% - ige Kochsalzlösung ist gesättigt). Auch biochemische und molekularbiologische Untersuchungen (STAN-LOTTER et al. 1999) unterstützen die Befunde von reaktivierbaren Mikroorganismen in alten Proben.

## Versuch einer vorläufigen Bilanz und mögliche Perspektiven

Trotz der aufgezeigten Vielfalt von Befunden von einer über sehr lange Zeiträume hinweg anhaltenden Lebensfähigkeit von Mikroorganismen ist dieses Phänomen des „Dornröschenschlafs“ nach wie vor ohne Fundierung durch entsprechendes biochemisches Verständnis der zugrundeliegenden Stoffwechselvorgänge. SETLOW & SETLOW (1995) haben zwar in Bakteriosporen ein Peptid nachgewiesen, das sich an DNA anlagert und die chemische Stabilität dieses Makromoleküls bei Dehydratation (Wasserentzug) erhöht. Die bisher beschriebenen Zeiträume in diesem Zusammenhang sind allerdings um mehrere 10-er Potenzen geringer als die beim „Dornröschenschlaf“ gefundenen. Manche Autoren diskutieren auch die Möglichkeit einer in situ-Reproduktion der Mikroorganismen in der Probe, um die bisher unverständlichen langen Überlebenszeiträume verständlicher zu machen. Darunter versteht man die Vermehrung der Mikroben in der Probenmatrix: sie würden also nicht „schlafen“, sondern in der Probe als Mikroökosystem leben. Dabei bleiben allerdings vor allem für die Halobakterien viele offenen Fragen: woher sollen die Nährstoffe kommen? Würden sich in einem Mikroökosystem nicht toxische Stoffwechselprodukte sehr schnell akkumulieren? Woher kommt das lebensnotwendige Wasser? Woher die Energie? Bisher scheint dieser Ansatz keinen befriedigenden Lösungsweg zu eröffnen.

KENNEDY et al. (1994) bemerken in ihrem Überblicksartikel, es sei auffällig, daß sowohl Nachweise von Mikroorganismen aus relativ jungen, d.h. in diesem Fall bis zu zig-tausend Jahre alten Proben, wie auch von sehr alten, im Zeitraum von einigen bis mehrere hundert Millionen Jahren vorliegen. Für „mittlere“ Zeiträume – Größenordnung  $10^5$  Jahre – wurden bisher keine Ergebnisse publiziert. Dies mag damit zu begründen sein, daß keine systematischen Studien durchgeführt wurden; vielleicht liegen aber auch andere Ursachen zugrunde.

Die bisher vorliegenden Befunde für Mikroorganismen aus alten Proben erscheinen insgesamt überzeugend, d.h. es handelt sich dabei nicht um Artefakte. Verfügbare biologische Kenntnisse gestatten ein Verständnis eines viele Jahrmlionen dauernden Dornröschenschlafs von Mikroorganismen allerdings (noch?) nicht.

Zwei grundsätzliche Probleme, die bei der Interpretation der vorgestellten Befunde erkennbar werden, sollen hier abschließend noch ange deutet sein:

- Die Untersuchung von Fragestellungen, die sich auf Ereignisse in der z. T. weit zurückliegenden Vergangenheit beziehen, sind dem naturwissenschaftlichen Methodenarsenal nicht zugänglich. Sie müßten mit historischen Methoden bearbeitet werden. Die gestellten Fragen können naturwissenschaftlich gar nicht befriedigend beantwortet werden, weil sich die entscheidenden Fragestellungen dem Experiment entziehen.

- Das Phänomen „Dornröschenschlaf“ und die damit verknüpften offenen Fragen zeigen, daß von Seiten der Naturwissenschaften ganz elementare Aspekte unserer Wirklichkeit, wie „Leben“ und Tod, nicht befriedigend verstanden sind.

---

### Elementare Aspekte unserer Wirklichkeit, wie „Leben und Tod“ sind nicht befriedigend verstanden.

---

Das Alter der isolierten Mikroben ist wie oben erwähnt nicht direkt bestimmbar. Dieser Sachverhalt könnte bei den vorliegenden widersprüchlichen Befunde dazu motivieren, die Alter einer Revision zu unterziehen, die den Sedimenten, welchen die Proben entnommen worden sind, zugeordnet werden.

Vergleichende molekularbiologische Untersuchungen von Bakterien nach einen Dornröschenschlaf mit rezenten Bakterienstämmen könnten interessante Einblicke eröffnen. Vielleicht lassen sich auf der Ebene der Nukleinsäuremoleküle Spuren der unterschiedlichen Geschichte aufdecken. Erste vorliegende Ergebnisse (STAN-LOTTER 1999) jedenfalls scheinen ermutigend.

## Literatur

- BIBO F-J, SONGEN R, FRESENIUS RE (1983) Vermehrungsfähige Mikroorganismen in Steinsalz aus primären Lagerstätten. Kali u. Steinsalz, August 1983, 367-373.
- DOBELL C (1932) Antony van Leeuwenhoek and his 'little animals'. Bale & Danielsson, London, 1932; Reprint Dover Publ., New York, 1960.
- DOMBROWSKI HJ (1960) Balneologische Untersuchungen der Bad Nauheimer Quellen. Zentralbl. F. Bakteriologie, Parasitenk., Infektionskrankh. u. Hygiene 178, 83-90.
- DOMBROWSKI HJ (1961a) *Bacillus circulans* aus Zechsteinsalzen. Zentralbl. f. Bakteriologie, Parasitenk., Infektionskrankh. u. Hygiene 183, 173-179.
- DOMBROWSKI HJ (1961b) Ergebnisse balneologischer Arbeiten in Bad Nauheim. Arch. f. Physikal. Therapie 13, 192-197.
- DOMBROWSKI HJ (1962a) Creno-Paläontologie, ein neuer Zweig der Quellenforschung. Heilbad und Kurort 14, 50-53.
- DOMBROWSKI HJ (1962b) Lebende Bakterien – Jahrmlionen alt. Kosmos 58, 131-132.
- DOMBROWSKI HJ (1963) Bacteria from Paleozoic salt deposits. Ann. NY Acad. Sci. 108, 453-460.
- DOMBROWSKI HJ (1965) Das Alter des Lebens. Bild der Wissenschaft 2/1965, 654-663.
- FREDRICKSON JK & ONSTOTT TC (1996) Leben im Tiefengestein. Spektrum der Wissenschaft Dez. 1996, 66-71.
- GRAUR D & PUPKA T (2001) The Permian bacterium that isn't. Mol. Biol. Evol. 18, 1143-1146.
- HAZEN RM & ROEDDER E (2001) How old are bacteria from Permian age? Nature 411, 155.
- KEILIN D (1959) The Leeuwenhoek Lecture: The problem of anabiosis or latent life: history and current concept. Proc. Roy. Soc. London, Ser. B, 150, 149-191.
- KENNEDY MJ, READER SL & SWIERCZYNSKI LM (1994) Preservation records of micro-organisms: evidence of the tenacity of life. Microbiol. 140, 2513-2529.
- LIPMAN CB (1928) The discovery of living microorganisms in ancient rocks. Science 68, 272-273.
- LIPMAN CB (1931) Living microorganisms in ancient rocks. J. Bacteriol. 22, 183-198.
- MCGENITY TJ, GEMMEL RT, GRANT WD & STAN-LOTTER H (2000) Origins of halophilic microorganisms in ancient salt deposits. Environment. Microbiol. 2, 243-250.
- MORITA RY (2000) Is  $H_2$  the universal energy source for long-term survival? Microb. Ecol. 38, 307-320.
- PARKES RJ (2000) A case of bacterial immortality? Nature 407, 844-845.
- POWERS DW, VREELAND RH & ROSENZWEIG WD (2001) How old are bacteria from the Permian age? Nature 411, 155.
- SETLOW B & SETLOW P (1995) Small, acid-soluble proteins bound to DNA protect *Bacillus subtilis* spores from killing by dry heat. Appl. Environ. Microbiol. 61, 2787-2790.
- VREELAND RH, ROSENZWEIG WD & POWERS DW (2000) Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal. Nature 407, 897-899.