

# Vom Bakterienfilament zum versinterten Pool-Finger - Erste Untersuchungsergebnisse an Pool-Fingers aus der Blautopfhöhle (Schwäbische Alb)

Rainer Straub, Stefan Meyer & Leslie A. Melim

## Zusammenfassung

Die aktuell 14 km lange Blauhöhle (Kat.Nr.7524/30) gehört zu den längsten Höhlen in Deutschland und zeichnet sich besonders durch ihre außergewöhnliche Vielfalt an Speläothemen aus. Neben den klassischen Kalzit-Formationen sind sogenannte Pool-Fingers ein Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgemeinschaft Blautopf, die das Höhlensystem seit 1997 systematisch erforscht. Als Pool-Fingers, auch biogene Sinter genannt, werden Speläotheme bezeichnet, die am Rand von Sinterbecken vorkommen und deren Ursprung und Bildung auf den Einfluss von Mikroorganismen zurückzuführen ist. In den Jahren 2012-2015 wurden die Vorkommen in der Blauhöhle dokumentiert (MEYER & STRAUB 2015) und Proben entnommen. Der vorliegende Beitrag erläutert erste Untersuchungsergebnisse und den Versuch zur Genese dieser Bio-Speläotheme.

## Einleitung

Bakterien sind die „Schmiere“ der Welt. Kein Ökosystem auf dieser Erde kommt ohne sie aus. Sie sind mit bloßem Auge nicht zu sehen, stellen aber aufgrund ihrer hohen Anzahl an Individuen enorme Biomassen. Und nicht nur in ihrer Artenzahl und Vielfalt haben wir sie lange unterschätzt. Sie stellen die Hauptgruppe der Mikroben oder Mikroorganismen, zu denen die Wissenschaft auch Archaeobakterien, Protozoen, Viren, Pilze und viele Algen zählt. Bakterien sind winzig kleine einzellige Lebewesen, die alles umgeben, im Wasser, im Eis, in der Luft, in der Erde und im „Fels“. Sie entwickelten sich vor Milliarden von Jahren aus dem *Eobacterium*. Viel Zeit um sich allen Lebensbereichen und Gegebenheiten auf unserem Planeten anzupassen. Über die von uns bewusst wahrgenommene belebte Welt hinaus treffen wir sie in unserem Körper

genauso wie in heißen Tiefseequellen, in massigen Eisformationen oder tief im Untergrund in Gesteinen und in Höhlen an. Ohne Bakterien wäre vermutlich so manche Höhle nicht entstanden und jeder Mensch wäre im Durchschnitt 3 kg leichter. In den amerikanischen Höhlensystemen in New Mexiko würden wir nur durch enge Gänge schlafen und die südamerikanischen Höhlen in den Quarzit-Sandsteinen (Orthoquarzit) der Tepuis und in der Banded-Eisen-Formation in Brasilien dürften gar nicht existieren.

Eine erste deutschsprachige Übersicht von Mikroorganismen in Höhlen gibt CECH (2016) und eine aktuelle englischsprachige Übersicht von HAZEL A. BARTON erschien 2017 als dreiteilige Serie im Magazin DESCENT.

---

**Anschriften der Verfasser:** Dipl. Ing. RAINER STRAUB, HFGOK / Arge Blautopf, Uhuweg 7, 70794 Filderstadt, e-mail: Rainer.straub@gmx.de; STEFAN MEYER, HGN / ArGe Karstkunde Harz, Kirchfeld 14, 31171 Nordstemmen / Barnten, e-mail: androniscus@web.de; Prof. Dr. LESLIE MELIM, Dept. of Earth, Atmospheric and Geographic Information Sciences, Western Illinois University, 1 University Circle, Macomb, IL 61455, e-mail: la-melim@wiu.edu.

Wenn wir uns bewusst werden, dass Mikroorganismen überall gegenwärtig sind, können diese auch in Höhlen erkannt werden. Sei es an Bio-Filamenten in Wasseransammlungen, Biofilmen oder als Ergebnis ihrer Hinterlassenschaften, wie zum Beispiel Mineralablagerungen, biogenen Sinter, Mondmilch oder dicken Ablagerungen, genannt „Gorillashit“, wie er aus der Lechuguilla Cave bekannt ist. Die Erforschung des Höhlenmikrobioms (MEYER et al. 2015), also aller im Untergrund vorkommenden Mikroorganismen, steht noch am Anfang. Zu gewaltig ist der forschersiche und technische Aufwand die riesigen Artenaufkommen zu bestimmen, geschweige denn die biologischen Prozesse zu erforschen. Die Arten sind oft nur mit DNA-Analysen zu bestimmen und das Rasterelektronenmikroskop ist die einzige Möglichkeit, einen optischen Blick von dieser fremden Welt zu bekommen.

## Pool-Fingers in der Blauhöhle

In der Blauhöhle wurden bislang mehr als zwölf Vorkommen an Pool-Fingers bzw. biogenen Sinterformen gefunden. Sie befinden sich immer am meist überhängenden Rand von Sinterbecken. Ihre namensgebende „fingerförmige“ Ausbildung (Abb. 1) ist gut zu erkennen. Je nach Tropf-Wasserstand der Becken befinden sich die Speläotheme über bzw. auch unter dem Wasserspiegel.



Abb. 1: Fingerförmige Pool-Fingers, Loops und Webulite am überhängenden Rand des Sinterbeckens LW104 am Sinterplattentor. Foto: R. STRAUB.

Der Boden der Sinterbecken ist meist mit lehmigen Ablagerungen bedeckt. Bei den in der Blauhöhle vorkommenden Pool-Fingers handelt es sich um sogenannte „fossile“ Ausprägungen. Jedoch konnten auch „lebende“ Pool-Finger-Filamente nachgewiesen werden. Dabei handelt es sich nach dem Erstnachweis („Terra typica“, 2010) lebender Formen aus dem Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System (Hessen) erst um das zweite bekannte Vorkommen lebender Pool-Finger-Formen weltweit (MEYER 2012/13). Neben den typisch fingerförmigen Ausprägungen sind sogenannte U-Loops (Schlaufen) und Webulite (Stege zwischen Pool-Fingers) aus der Blauhöhle bekannt (Abb. 2), die einen mikrobiologischen Hintergrund der einst flexiblen „lebenden“ Formen anschaulich erkennen lassen.

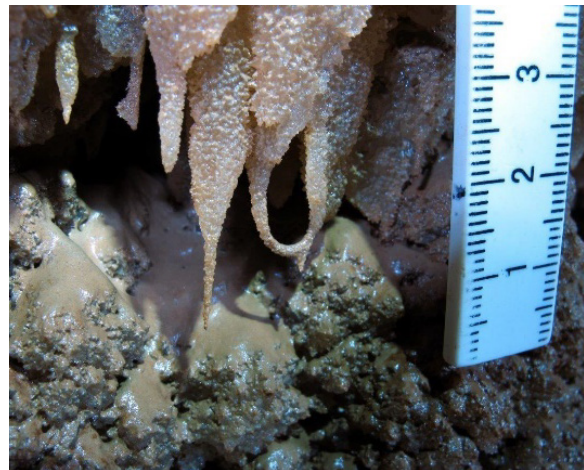


Abb. 2: Schlaufenförmige Verbindung (U-Loop) zwischen zwei Pool-Fingers (TEN25). Foto: R. STRAUB.

## „Lebende“ Pool-Finger-Filamente

Die Entstehung von Pool-Fingers und deren Kalzifizierung ist derzeit nicht eindeutig geklärt. Es wird von folgender Genese ausgegangen: Mikroorganismen werden durch Tropf- und Sickerwasser in Sinterbecken eingetragen. Es entstehen Lebensgemeinschaften, die unter den Bedingungen in den isolierten Becken verstärkt Biomasse entwickeln. Es ist anzunehmen, dass die biogene Aktivität stark abhängig vom jeweiligen Nährstoffeintrag ist. Als Nährstoffe kommen mineralische (anorganische) Verbindungen aus dem überlagernden Gestein in Frage

als auch organische Nährstoffe, die von der Erdoberfläche in den Untergrund eingetragen werden. Letztere stellen vermutlich den Hauptanteil. Auf die Nutzung von anorganischen Verbindungen / Mineralien (z.B. Pyrit) haben sich besondere Bakteriengruppen spezialisiert. Sie bilden teilweise schleimige, zapfenartige Gebilde außerhalb von Sinterbecken. Diese, als Snottiten bezeichneten, komplexen Lebensgemeinschaften können mit lebenden Pool-Fingers verwechselt werden (MEYER 2017).

In den Sinterbecken könnten auch absterbende Mikroorganismen die Bildung bzw. Entwicklung biogener Sinter fördern. In diesem aktiven Milieu aus Mikroorganismen bilden sich nun an den Rändern der Sinterbecken hängend Bakterienfäden (Filamente, Abb. 3). Vermutlich führen wechselnde Niveaus des Wasserspiegels zur typisch „fingerförmigen“ Ausbildung der Pool-Fingers am Harts substrat des Beckens oder bereits bestehender Pool-Fingers. Im Becken bewegen sich die flexiblen Bakterienfäden (Filamente) im Wasser oder auch durch Luftbewegungen. Sofern sie sich an benachbarten Filamenten verfangen, entstehen die bereits erwähnten U-Loops und Webulite (vgl. Abb. 1 und 2). MEYER & PLAN (2010) gehen von einer relativen jungen, nacheiszeitlichen Bildung aus.



Abb. 3: Lebendes Pool-Finger-Filament (L = ca. 12 mm) an der Spitze eines Pool-Fingers (LW40, Becken 4 der Blautopfhöhle). Foto: R. STRAUB.

## Kalzifizierung

Eine der sich aufdrängenden Fragen ist, wie sich „lebende“ Pool-Fingers nun in „fossile“ (kalzifizierte) Formen weiterentwickeln. An-

hand der Morphologie der in den letzten Jahren neu dokumentierten Pool-Finger-Formen in mehreren deutschen Höhlen konnte eine ungefähre Vorstellung zur Genese erarbeitet werden. Um dieser Fragestellung genauer nachzugehen, wurde für die Blauhöhle ein Probenahme-Konzept mit den beiden bereits im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System tätigen Wissenschaftlerinnen Prof. Dr. Diana NORTHUP und Prof. Dr. LESLIE MELIM erarbeitet.

Im Juni 2015 wurden durch die Autoren während einer 2-tägigen Forschungstour mehrere Proben aus verschiedenen Sinterbecken der Blauhöhle entnommen und an die Wissenschaftlerinnen weitergeleitet. Im Folgejahr 2016 und 2017 wurden erste Analysen durch LESLIE MELIM begonnen, deren vorläufige Ergebnisse hier vorgestellt werden. Im Vordergrund standen dabei die Kristall-Morphologie und die Wachstumsstruktur der Pool-Fingers sowie die Untersuchung vorkommender Biofilme.

Um mikrobiologische Filamente bzw. Biofilme auf der Oberfläche mit denen zu unterscheiden, die sich innerhalb des Kalzits erhalten haben, wurden manche der Proben mit 5%-iger Salzsäure für 5 bis 10 Sekunden angeätzt und mit vollentsalztem Wasser gespült. Im Nachgang entstanden REM-Aufnahmen der Kristallstruktur, Biofilme und Filamente. Mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDS), wurde die chemische Zusammensetzung ausgewählter Proben untersucht.

Sehr interessante Ergebnisse lieferte die am Sinterplattentor (Messpunkt LW104) entnommene Probe eines fossilen Pool-Finger (Probe Nr. LW104-150627-3). Dieses Pool-Finger-Vorkommen befindet sich 1.742 m vom künstlichen Höhleneingang entfernt. Im zirka 1 m<sup>2</sup> großen Sinterbecken (Abb. 4) finden sich an der Südwest-Seite, am Fuß einer mächtigen Sinterformation, viele fossile Pool-Fingers. Daneben enthält das Becken U-Loops und Webulite, einige bereits mit Kalzit überzogen. Schwer zu erkennen sind vereinzelte millimetergroße bewegliche (lebende) Mikroorganismen-Filamente. Der Grund des Sinterbeckens besteht aus einer glatten Sinterschicht, die mit einer dünnen Sedimentschicht bedeckt ist. Neben der Entnahme eines fossilen



Pool-Finger-Exemplars (Abb. 5) durch die Autoren am 27.06.2015 wurden auch sterile Wasser- und Filament Proben entnommen.



Abb. 4: Pool-Finger-Becken LW104 am Sinterplattentor. Foto: R. STRAUB.

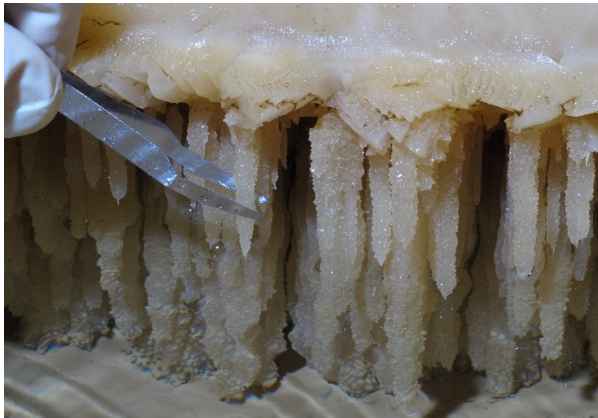


Abb. 5: Sterile Probenahme eines fossilen Pool-Fingers an LW104. Foto: R. STRAUB.

In der REM-Aufnahme des entnommenen Pool-Fingers von LW104 ist gut seine Kristallstruktur zu erkennen. Hierbei handelt es sich um einen skalenoederförmigen (hundezahnförmigen, engl. „dog-tooth spar“) Aufbau, wobei die Kristalle vom Zentrum weg ausstrahlen und zur Spitze des Pool-Fingers hin ausgerichtet sind. Im Zentrum sind die Einzelkristalle kaum mehr zu erkennen, da sie völlig miteinander verwachsen sind (Abb. 6). Neben den typisch skalenoederförmigen Kristallen konnten auch prismatisch ausgebildete Kristallformen nachgewiesen werden.

Die äußere Oberfläche ist, sofern nicht mit Biofilm überzogen, mit treppenförmigen „Kristalliten“ besetzt. Unter dem Begriff Kristallit sollen hier kleinste „Einzel-Kristalle“

verstanden werden, die dann zu einem großen Kristall zusammenwachsen können. Solche Einzelkristalle scheinen sich besonders an den äußersten Spitzen bzw. Kanten der Kristalle zu kumulieren (Abb. 7) und zeigen einen treppenförmigen Aufbau. Kristallite konnten bereits auf anderen Speläothemen aus Sinterbecken, z.B. auf Sinterplättchen (engl. „cave rafts“), nachgewiesen werden, sind sonst jedoch bisher kaum dokumentiert (TAYLOR & CHAFETZ, 2004).

Bisher fanden sich Biofilme und Filamente meist verteilt auf Pool-Finger-Oberflächen. Als besonderes Ergebnis der Untersuchungen konnte in den geätzten Proben erstmals Biofilme zwischen den Kristallen, speziell innerhalb der Kristalle selbst nachgewiesen werden. Diese neuen Erkenntnisse legen erstmals nahe, dass die „Kern-Bildung“ von Kristallen innerhalb von Biofilmen stattfindet und bestätigen das Modell (s. a. Abb. 16), dass Biofilme aktiv zum Wachstum von Pool-Fingers beitragen und nicht nur auf dem Substrat der Pool-Fingers leben. Bisherige Erkenntnisse konnten dies nicht zeigen (MELIM et al. 2001, 2009). Abb. 8 zeigt einen solchen Biofilm innerhalb der Kristalle nach dem Ätzen.

Neben Biofilm-Überzügen wurden bei den Untersuchungen röhrenförmige, gerippte, glatte aber auch netzförmige Filamente nachgewiesen. Mittels EDS-Analysen wurde der Nachweis erbracht, dass es sich bei diesen Filamenten eindeutig um organische Filamente handelt. Es wird derzeit von eingebetteten Mikroben ausgegangen. Frühere Entdeckungen von solchen netzförmigen Filamenten basierten immer auf geätzten Proben, nun wurden jedoch mehrfach auch in nicht-behandelten Proben „lebende“ Filamente nachgewiesen.

Solche genetischen röhrenförmigen Mikroben-Filamente sind mittlerweile aus vielen Kalk-, Lava- und Gips-Höhlen sowie aus Granit-Tunneln und sogar Riff-Höhlen bekannt. Grundbedingung für ihr Vorkommen scheinen Dunkelheit und Wasser (mindestens Tropfwasser) zu sein. Interessanterweise gibt es keine vergleichbaren Funde von der Erdoberfläche und jeder Versuch, sie künstlich im Labor zu kultivieren, ist bisher misslungen. Daher ist derzeit noch völlig unklar

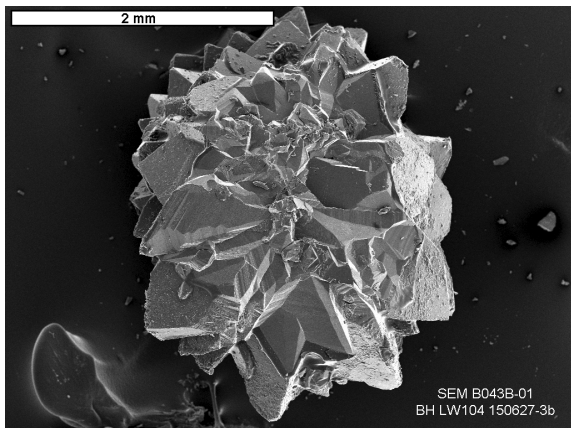


Abb. 6: Blick auf die Spitze eines Pool-Fingers aus dem Sinterbecken bei LW104. Probe B043B-01; Aufnahme: Prof. Dr. Leslie A. MELIM.

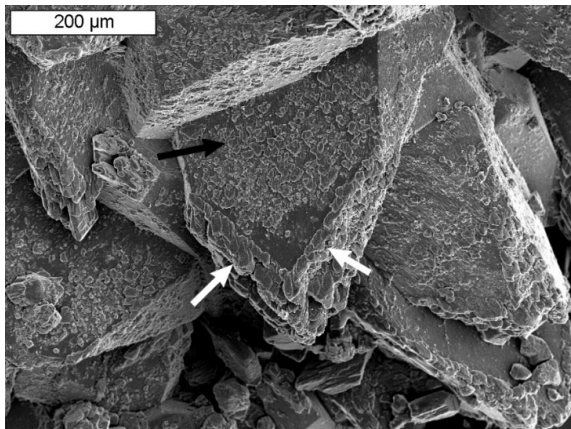


Abb. 7: Die REM-Aufnahme (frischer Anbruch, nicht geätzt) zeigt die mit „Kristalliten“ (weiße Pfeile) besetzten Kanten der skalenoeiderförmigen Kristalle. Probe Nr. 27-3E-04, LW104-150627-3; Aufnahme: Prof. Dr. Leslie A. MELIM.

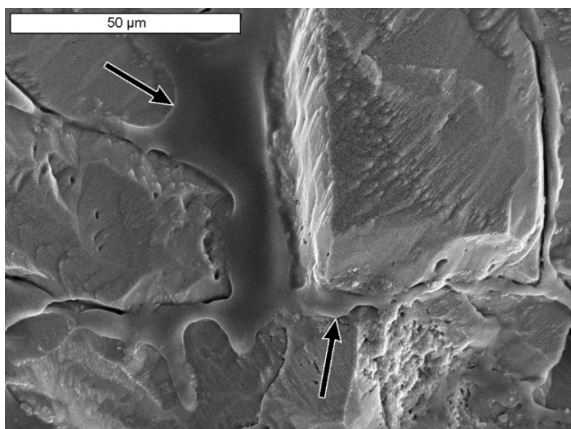


Abb. 8: Gut sichtbarer Biofilm zwischen Kalzit-Kristallen. Der Biofilm wirkt in der Aufnahme leicht herausquellend, was auf die vorherige Behandlung des Kalzits mit Salzsäure zurückzuführen ist. Probe Nr. B043C-06, LW104-150627-3; Aufnahme: Prof. Dr. Leslie A. MELIM.

um was es sich hierbei genau handelt. Aufgrund der unterschiedlichen Morphologie (unterschiedliche Größe und Form der Kammern) der bereits entdeckten Filamente wird jedoch davon ausgegangen, dass es sich nicht um eine einzelne Art, sondern um eine größere Gruppe von Mikroorganismen handeln muss. Sehr speziell und unerwartet ist die Entdeckung merkwürdiger ovaler Strukturen auf dem Biofilm einer Pool-Finger-Probe aus dem Vorkommen bei LW40, Becken 3 (Dolomiti).

Das REM-Bild der Probe zeigt ovale Strukturen mit im Kreis angeordneten Öffnungen um das sich leicht wölbende Zentrum der Struktur. Manche der ovalen Formen scheinen ineinander überzugehen. Die hier gefundenen Strukturen passen derzeit zu keiner bekannten Zell-Morphologie. Hier werden weitere Proben und Untersuchungen notwendig sein.

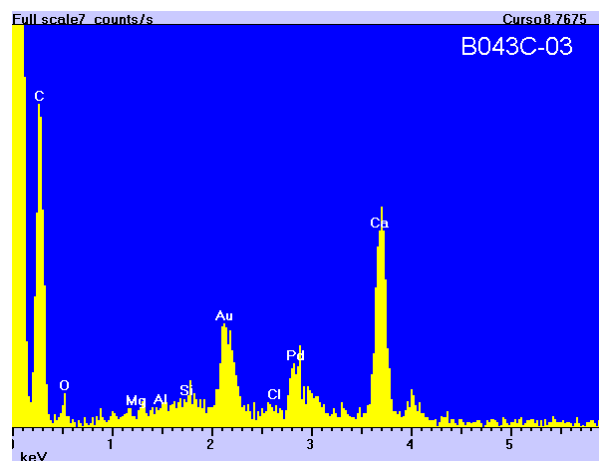


Abb. 9: EDS- Auswertung einer Biofilmprobe zwischen Kristallen aus dem Zentrum eines Pool-Fingers. Der deutliche Kohlenstoff-Peak (C) zeigt eindeutig das Vorkommen von Biofilm. Probe Nr. B043C-03, LW104-150627-3; Analyse: Prof. Dr. Leslie A. MELIM.

## Vom Bakterienfilament zum versinterten Pool-Finger – Versuch einer Genese

Sinterbecken beherbergen eine Reihe von verschiedenen Sintern, die in ihrer Genese und Morphologie von Mikroorganismen beeinflusst werden (MELIM et al. 2011). Die im bzw. unter Wasser gebildeten Pool-Fingers sind hier am auffälligsten. Die gut erkennba-

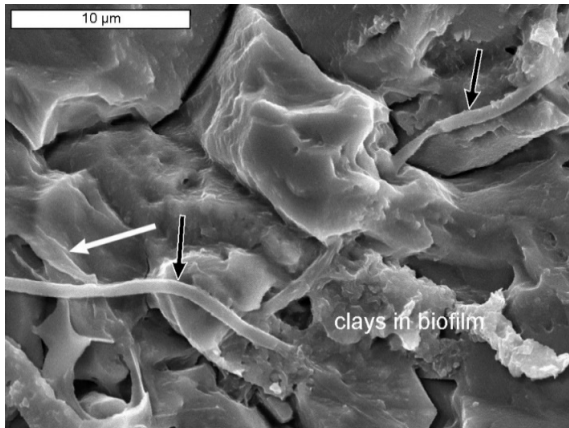


Abb. 10: Glatte Filamente (schwarzer Pfeil) sowie Biofilm-Überzüge (weißer Pfeil) sowie Sedimente, eingebettet im Kalzit, die nach dem Ätzen der Oberfläche im Dünnschliff sichtbar wurden. Probe Nr. 272t-049, LW83-150627-2; Aufnahme: Prof. Dr. Leslie A. MELIM.

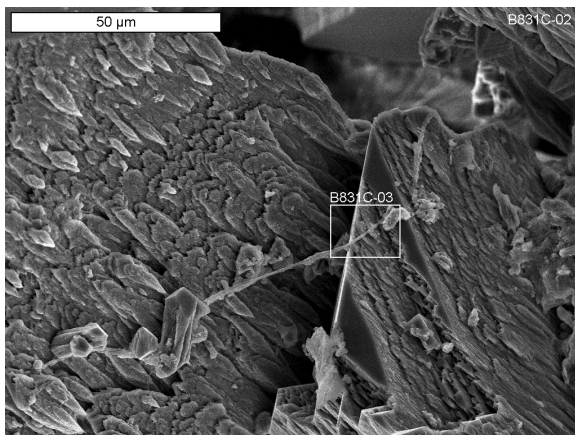


Abb. 11: Filamente zwischen Kalzitkristallen. Die Vergrößerung (Abb. 12) zeigt den Bereich innerhalb des Rahmens. Probe B831C-02, Aufnahme: Prof. Dr. Leslie A. MELIM.

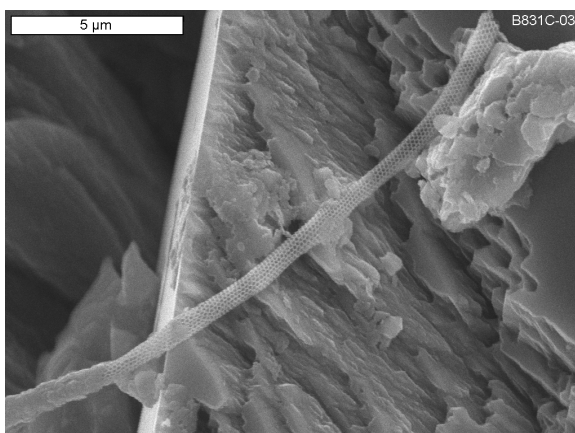


Abb. 12: In der Vergrößerung (weißer Kasten Abb. 11) ist die netzartige Morphologie des Biofilm-Filaments gut zu erkennen. Probe B831C-03; Aufnahme: Prof. Dr. Leslie A. MELIM.

ren U-Loops weisen eindeutig auf eine biogene Entstehung hin. Pool-Fingers und andere biogene Sinter finden sich nicht nur in klassischen Sinterbecken, sondern auch in anderen Bereichen in Höhlen. Dieses liegt daran, dass hier ähnliche Bedingungen herrschen/herrschen wie in einem Sinterbecken und so die Voraussetzungen für die Bildung gegeben waren bzw. sind. Wassergefüllte Gänge, Räume oder Kammern sind letztendlich nichts anderes als übergroße Sinterbecken. Nur in aktiven, von Wasser durchflossenen Bereichen konnten bisher keine fossilen Pool-Finger-Bildungen dokumentiert werden. Die an den Wänden siedelnden Biofilme bilden bei starkem Nährstoffeintrag periodisch fingerartige Bildungen, die nicht versintern. Vermutlich hängt dies damit zusammen, dass durch fließendes Wasser überschüssige Stoffwechsellösungen der Mikroorganismen abgeführt werden. Eine größere Anreicherung beziehungsweise Sättigung mit gelöstem Kalzium erfolgt somit nicht.

Doch wie bilden sich biogene Sinter und ihre populärsten Vertreter, die Pool-Fingers? Mikroorganismen bzw. Bakterien gelangen mit dem Oberflächenwasser in die unterirdischen Bereiche. Viele haben sich vor langer Zeit auf diesen Lebensraum spezialisiert und Formen gebildet, die sich eindeutig von den Mikroorganismen an der Erdoberfläche abgrenzen lassen. Wasser spielt dabei immer eine wichtige Rolle in der Verbreitung und Neubesiedelung. Auffällig sind genetzte (*retikulierte*) Formen, die derzeit nur aus unterirdischen Lebensräumen bekannt sind. Vermutlich handelt es sich bei solchen Ausprägungen um eine noch unbekannte größere Gruppe von Mikroorganismen, vielleicht sogar um einen eigenen Stamm, der sich auf unterirdische bzw. dunkle Lebensräume spezialisiert hat. Sie konnten in verschiedenen unterirdischen Lebensräumen und Sintern weltweit nachgewiesen werden. Unter anderem auch in den bisher untersuchten Pool-Finger-Proben aus Deutschland: Riesenberghöhle (MEYER et al. 2015), Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System (MELIM 2015) und Blauhöhle (MEYER & STRAUB 2015). Bis ins Jahr 2017 ist man davon ausgegangen, dass es sich bei allen in den Sintern dokumentierten Formen um fossile Relikte handelte. In den Sinterproben aus der Blauhöhle konnten





Abb. 13: Das Vorkommen LW40, Becken 3 im Dolomit. Fingerförmige Pool-Fingers und steriler Probenahme-Behälter vor der Entnahme. Foto: R. STRAUB.

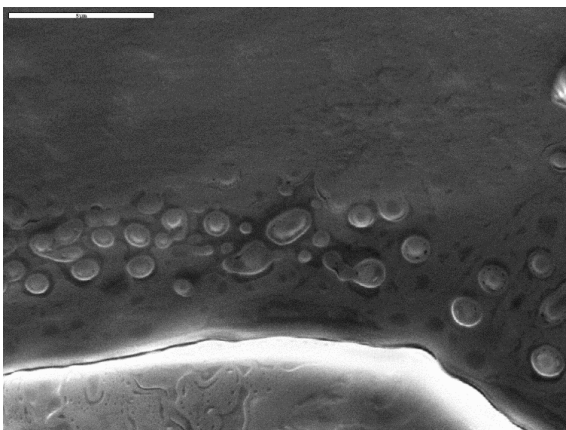
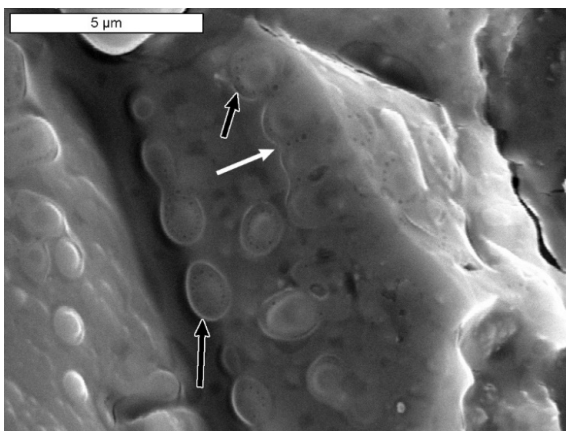


Abb. 14.1 und 14.2: Runde bis ovale Strukturen, eingebettet im Kalzit eines Pool-Fingers aus der Apokalypse (LW40). Probe Nr.28-3c-13, LW40-150628-3.; Aufnahmen: Prof. Dr. Leslie A. MELIM.

aber erstmals lebende Mikroorganismen nachgewiesen werden (unveröffentlicht MELIM 2017). Durch DNA-Analysen von Lehm- und Wasserproben aus Sinterbecken mit lebenden Pool-Fingers im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System fanden sich 15 ver-

schiedene bekannte Bakterienstämme, bis zu 45% konnten jedoch nicht bestimmt werden (NORTHUP 2012). Die netzartige Mikroorganismengruppe konnte gentechnisch bisher nicht bestimmt werden, so dass ihre Zugehörigkeit derzeit noch völlig „im Dunkeln“ liegt.

Lehme und Tonmineralien werden mit Wasser in neue unterirdische Lebensräume eingetragen. Sie stellen günstige Besiedlungsflächen und vermutlich eine Nahrungsquelle für Mikroorganismen da. Auch werden Sie oftmals durch organische Substanzen unter anderem aus oberirdischen Ökosystemen angereichert. Der Abbau von organischen Stoffen ist ein komplizierter langwieriger Prozess. Derzeit sind aber nur aus einer Pool-Finger-Form (Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System) solche organischen Restpartikel bekannt (Abb. 15).

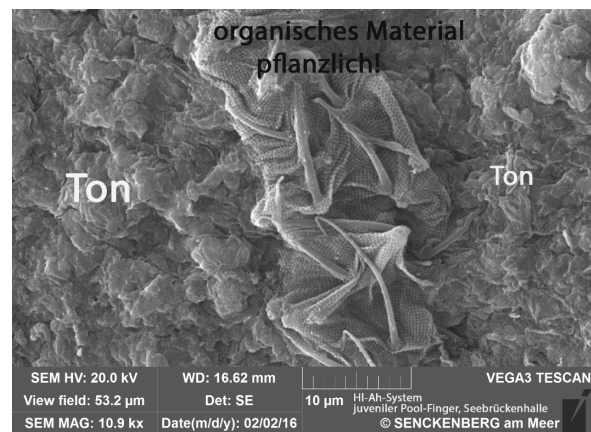


Abb. 15: Organische Restpartikel auf einer Pool-Finger-Probe aus dem Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System. Aufnahme Dr. Max. WISSHAK.

Diese Stoffe können bis zu einem gewissen Punkt die Mikroorganismen auch vor dem Austrocknen schützen. Diese Aufgabe erfüllen aber vor allem Stoffe, die von den Mikroorganismen direkt produziert werden. Dieser aus polymeren Zuckerverbindungen bestehende „Schleim“, auch als extrazelluläre, polymere Substanzen (EPS) bezeichnet, verbessert die direkten Umweltbedingungen und hilft den Mikroorganismen bei der Wasser- und Nährstoffaufnahme. Sie sind oft als sogenannte Biofilme sicht- und fühlbar. Die EPS fördert einen besseren Strukturaufbau und hält den Zellverbund zusammen. Ohne dieses EPS-Gerüst würden Biofilme bzw. Filamente instabil und

zerbrechen in kleinere Zellaggregate oder einzelne Zellen (Bakterien). Leider konnten bisher keine genetzten Mikroorganismen im Labor kultiviert werden, was eine Zuordnung besonders erschwert. Doch auch sie besitzen einen Stoffwechsel. Durch die Atmung ( $\text{CO}_3 / \text{O}_2$ ) entstehen feinste Gasbläschen. Ihr Vorhandensein ist hypothetisch und konnte mit den derzeitigen Untersuchungsmethoden bisher noch nicht nachgewiesen werden. Vermutlich fungieren die Gasbläschen bzw. die Ausscheidungsprodukte der Mikroorganismen als Kristallisationskeime. Sie sind die Grundlage der Bildung von Kalzitkristallen (u.a. Hundezahnkristalle). Durch ihren Stoffwechsel scheiden Mikroorganismen je nach Gruppe nicht nur Kohlendioxid beziehungsweise Sauerstoff aus, sondern auch unterschiedlichste Säuren. Die Entsorgung dieser energiereichen Stoffe ist für Mikroorganismen lebensnotwendig und wird zum Beispiel in der Lebensmittelproduktion (Essigsäure = Essig, Buttersäure = Schokolade) von uns Menschen genutzt. Mit dem Ausscheiden von Säuren werden die Mikroorganismen u.a. die für sie toxischen Kalziumionen ( $\text{Ca}^{+2}$ ) los. In einem Lebensraum wie Höhlen, in dem Kalkstein die Hauptumgebung darstellt, wird durch die Mikroorganismen somit auch mehr Kalkstein gelöst. Die Anhäufung von Kalziumionen stellt jedoch ein Problem für die Mikroorganismen dar, da diese ab einem gewissen Gradienten wieder in die Zellen der Mikroorganismen zurückströmen und diese aufgrund des thermodynamischen Gleichgewichtes zum Absterben bringen. Höhlenmikroorganismen scheinen diese Ionen abzufangen und in reinen Kalzit ( $\text{CaCO}_3$ ) umzuwandeln, was unter Laborbedingungen beobachtet werden konnte. Mikroskopische Vergrößerungen zeigen Mikroorganismen, die regelrecht in den Kalzitkristallen eingeschlossen sind beziehungsweise mit ihren Enden aus dem Kristall herauschauen, (BARTON 2017c). Nummer 4 in Abb. 16 zeigt diesen Initialprozess.

In den Proben aus der Blauhöhle konnten erstmalig lebende Biofilme und genetzte Mikroorganismenfilamente mit der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDS) direkt innerhalb von Kalzitkristallen nachgewiesen werden (MELIM 2017 unveröffentlicht.). Diese Beobachtungen scheinen die

Laborbeobachtungen von Hazel A. BARTON zu bestätigen sowie auch die hier in Teilen vorgestellte Initial-Filament-Theorie zur Entstehung von Pool-Fingers. Die gefundenen Mikroorganismen in versinterten und scheinbar fossilen Pool-Fingers im Sinterbecken LW104 am Sinterplattentor der Blauhöhle gleichen den schon bekannten genetzten, fossilen Mikroorganismen aus anderen, älteren bekannten fossilen Pool-Fingers (z.B. Riesenberghöhle, Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System). Sie alle gehören zu einer Gruppe von noch unbekanntem Mikroorganismen, die scheinbar nur in unterirdischen Lebensräumen existieren können.

Die Produktion von Kalzit ( $\text{CaCO}_3$ ) durch Mikroorganismen erscheint plausibel, wenn man Sinterbecken in unterschiedlichen Höhlensystemen miteinander vergleicht: Hier finden sich meist reinste, intensive Kristallbildungen wie sie sonst nur aus Gesteinsdrusen bekannt sind. Selbst in Höhlen, in denen durch Mineraleinlagerungen braune und ockerfarbene Sinter vorherrschen, finden sich in Sinterbecken meist reinweiße Kalzitkristalle.

Es kann angenommen werden, dass an der Bildung von biogenen Sintern nicht nur eine spezielle Gruppe von Mikroorganismen beteiligt ist. Im natürlichen Prozess sterben immer wieder Mikroorganismen ab. Diese zersetzen sich bzw. werden durch Kristallwachstum eingeschlossen und fossilisieren. Es handelt sich hier um ein sehr empfindliches System in starker Abhängigkeit von Wasser- und Nährstoffzufuhr, an die die Mikroorganismen ihre Vermehrung angepasst haben. Die Versorgung der Mikroorganismen durch eingebrachte Nährstoffe ist inhomogen. Dieses bedeutet ein zeitweises explosionsartiges Wachstum (Vermehrung) der Mikroorganismen bis hin zu mit dem menschlichen Auge sichtbaren Biofilmen und Filamenten (lebende Pool-Fingers). Andererseits führt ein Mangel an Nährstoffen zur Reduzierung bis hin zum Absterben der Mikroorganismen – Das Kristallwachstum überwiegt und schließt Mikroorganismen dadurch ein. Ist der Zeitraum der Mangelsituation begrenzt, können Mikroorganismen, die in den Kristallen überlebt haben, erneut wachsen.



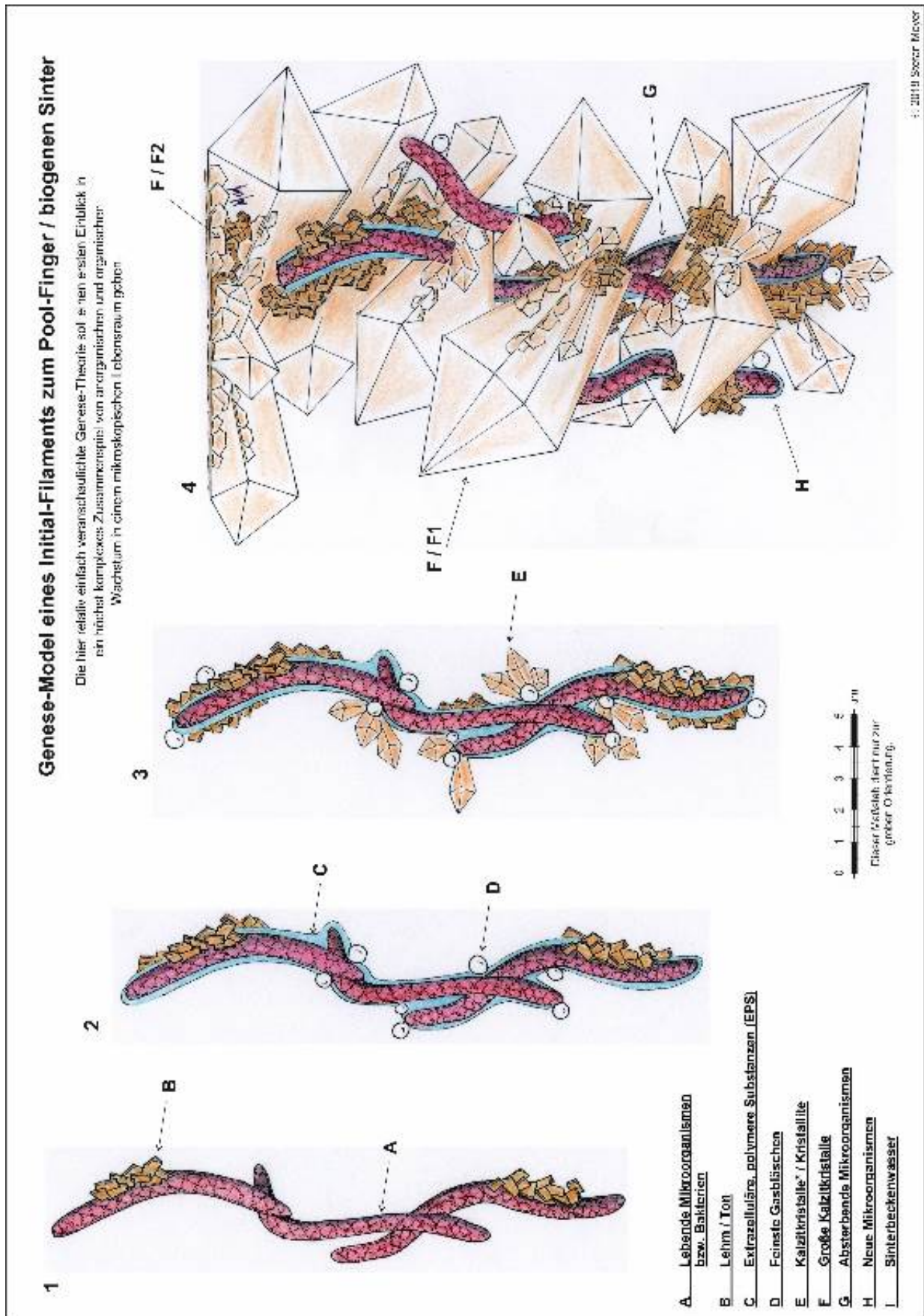


Abb.16: Genese-Model eines Initial-Filaments zum Pool Finger / biogenen Sinter. Zeichnung: Stefan MEYER.



Abb. 17: Bruchstück eines Bodensinters mit „eingeschlossenen“ Pool-Fingers. Museum an der Dechenhöhle. Foto. S. MEYER.

Der Wassereintrag in ein Sinterbecken ist nicht nur bestimmend für die Ernährung der Mikroorganismen. Neben der Lieferung von gelöstem Kalk bringt dieser auch eine „Bewegungsenergie“ (Tropfwasser – Wellenbewegung, Steigen und Absinken des Wasserspiegels) und bestimmt so indirekt auch die zukünftige Form der biogenen Sinter. Sind die Biofilme nur schwachen Bewegungen des Wasserstandes ausgesetzt, können sich diese zu Filamenten entwickeln und an die umgebenden Strukturen wie Felswände, Sinterbeckenränder (*Shelfstone*, *Rimstone*) anheften. Dabei kann zu viel Wasserbewegung die Filamente zerstören. Die Mikroorganismen bilden dann eher flächige Biofilme. Diese sind in Höhlenbächen und Flüssen dominierend. So lange die Kalzifizierung noch nicht eingesetzt hat, verbinden sich diese Filamente durch leichte Wasserstandschwankungen zu den typischen filigranen U-Loops. Sie sind der sicherste Nachweis von biogenen Sintern und mikrobieller Aktivität. Derzeit konnten in Deutschland diese Schlaufen in vier Höhlen (Riesenberghöhle, Herbstlabyrinth-Advent-

höhle-System, Blauhöhle und einer Höhle in der Fränkischen Schweiz) nachgewiesen werden. Die Bildung dieser filigranen Sinter und der Pool-Fingers selbst ist nur in einem geologisch kurzen Zeitabschnitt präsent und kann durch weitere Versinterungsprozesse bis zur Unkenntlichkeit überprägt werden (MEYER 2018 unveröffentlicht). Ganze Sinterbecken können so unter massiven Bodensinter verschwinden (Abb. 17).

## Dank

Unser Dank gilt der Arge Blautopf und der Höhlenforscherguppe Ostalb-Kirchheim e.V. sowie CONNY STRAUB für ihr waches Auge bei der Entdeckung der Pool-Finger-Vorkommen in der Blauhöhle. Weiterhin danken wir Dr. MAX WISSHAK, Forschungsinstitut Senckenberg am Meer in Wilhelmshaven, für die REM-Aufnahmen. Herzlichen Dank an ALLISON HARTMAN, Department of Geology, Western Illinois University, für die Aufbereitung der Proben sowie an Prof. Dr. DIANA NORTHUP, University of New Mexico.

## Schriftenverzeichnis

- ARBEITSGEMEINSCHAFT BLAUTOPF (2009): Faszination Blautopf - Vorstoß in unbekannte Höhlenwelten. – 136 S.; Ostfildern (Jan Thorbecke Verlag).
- BARTON, H. A. (2017a): Microbes mace caves. Life under Earth. A caver`s guide to the microbiology of caves. Part 1. – Descent, **255**: 24-27; 2017.
- BARTON, H. A. (2017b): Bring on the Microbes. Life under Earth. A caver`s guide to the microbiology of caves. Part 2. – Descent, **256**: 20-23.
- BARTON, H. A. (2017c): Building with life. Life under Earth. A caver`s guide to the microbiology of caves. Part 3. – Descent, **257**: 31-37.
- CECH, P. (2016): Mikroorganismen in Höhlen. In: SPÖTL, C., PLAN, L. & CHRISTIAN E. Hrg. (2016): Höhlen und Karst in Österreich. Verband Österreichischer Höhlenforscher / Akademie der Wissenschaften. Linz – Oberösterreichisches Landesmuseum. Monographien, Bd. XIII; Wien.
- DAVIS, D. G., PALMER, M. V. & PALMER, A. N.” (1990): Extraordinary subaqueous speleothems in Lechuguilla Cave, New Mexico. – NSS Bull., **52** (2): 70-86; Huntsville.
- FORTERRE, P. (2018): Leben- Die wahre Natur der Viren. – Spektrum Spezial Biologie Medizin Hirnforschung, Heft 2.18.
- LIESCHIEDT, R., MELIM, L., SPILDE, M. N. & NORTHUP, D. E. (2008): Quantification of Fossil Microbe Distribution in Pool Fingers from Cottonwood Cave, NM, USA. – Paper No. 215-6, Geological Society of America. Abstracts with Programs, **40** (6): 295.
- MELIM, L.A., NORTHUP, D. E., SPILDE, M., JONES, B., BOSTEN, R. J. & BIXBY (2008): Reticulated Filaments in Cave Pool Speleothems: Microbe or Mineral? – Journal of Cave and Karst Studies, **2008**: 135 – 141; Huntsville.
- MELIM, L. (2011): Preliminary Report on Pool fingers from Herbstlabyrinth and Adventhöhle, Germany. Samples collected Juli 2011 by LESLIE MELIM and DIANA NORTHUP with help from INGO DORSTEN, STEFAN MEYER, and SIMON MISCHEL. SEM work November, 2011 by LESLIE MELIM, MICHAEL SPILDE, DIANA NORTHUP and JORDAN MORONI. 11 S. 6 Fotos und 15 SEM-Aufnahmen. Unveröff. Mskr.
- MELIM, L., PLAN, L., BOGUSLAWSKI von, S. & MEYER, S. (2011): Terminologie biogener Beckensinter in Höhlen. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, **57** (1): 110-114; München.
- MELIM, L., PLAN, L., BOGUSLAWSKI von, S. & MEYER, S. (2013): Biogene Beckensinter in Höhlen – ein neues Forschungsfeld und seine Begriffe. – Mitt. Arbeitsgem. Karstkde. Harz **2013** (1/2): 3-8; Goslar.
- MELIM, L. (2013): Report on Riesenberghöhle samples. 5 Mikroskopaufnahmen und 7 REM-Aufnahmen. Unveröff. Mskr.
- MELIM, L. A., NORTHUP, D.E., SPLIDE, M.N. & BOSTON, P.J. (2015):– Update: Living reticulated filaments from Herbstlabyrinth-Adventhöhle-Cave System, Germany. – Journal of Cave and Karst Studies, **77** (2): 87-90; Huntsville.
- MELIM, L. A. (2017): Blauhöhle Pool Finger Summary, Nov. 16, 2017. Compiled by L. A. MELIM, Western Illinois University, Macomb, IL. Based on field work by R. STRAUB and S. MEYER and lab work by L. A. MELIM and A. HARTMAN; unveröff. Mskr.
- MEYER, S. & PLAN, L. (2010): Pool-Fingers – eine kaum bekannte Sinterform biogenen Ursprungs. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, **56** (4): 104-108; München.
- MEYER, S. (2013): Neue Pool-Finger-Funde im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid / Hessen. – Mitt. Arbeitsgem. Karstkde. Harz, **2013** (4): 21-29; Goslar.



- MEYER, S. (2014): Neues zu den Pool-Finger-Vorkommen im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System, Hessen. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, **60** (2): 42-49; München.
- MEYER, S. (2015): Befahrungsbericht Erdbach-Tunnel und Nordwest-Passage (Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System, Hessen) vom 9./10. August 2014. – Mitt. Arbeitsgem. Karstkde. Harz, **2015** (1-2): 31-39; Goslar.
- MEYER, S., MELIM, L. & SCHOLZ, D. (2015): Morphologie der Pool-Finger in der Riesenberghöhle (Süntel, Niedersachsen). – Die Höhle, **66** (1-4): 88-95; Wien.
- MEYER, S. & STRAUB, R. (2015): Pool-Fingers – Speläotheme biogenen Ursprungs in der Blautopfhöhle (Schwäbische Alb). – Laichinger Höhlenfreund, **50**: 57-72; Laichingen.
- MEYER, S. (2017): Pool-Finger und Snottiten – zum Stand der Erforschung. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, **63** (4): 132-140; München.
- MEYER, S. (2018): Drei neue Funde von biogenen Sintern im Rahmen der VdHK-Tagung 2018 in Letmathe (Sauerland). – Unveröff. Mskr.
- NORTHUP, D. E., REYSENBACH, A.- L. & PACE, N. R. (1997): Microorganisms and Speleothems. – In: Cave Minerals of the World. – 2. edition, 261-266; National Speleological Society, Huntsville.
- NORTHUP, D. E. (2012): Living Pool fingers, Germany / Previous Pool Genetic Results. – 5 S., 2 Fotos, 2 SEM-Aufnahmen und 5 Diagramme. Unveröff. Mskr.
- TAYLOR, P.M. & CHAFETZ, H. S. (2004): Loading rafts of calcite crystals in cave pools, central Texas, U.S.A: crystal habit vs. saturation state. – Journal of Sedimentary Research, **74**: 328-341; Boulder.