52. Jahrgang 2022 ISSN 0045-205X BLUZAR D 5627

2022

VBiO

Verband | Biologie, Biowissenschaften & Biomedizin in Deutschland

BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

Early View

www.biuz.de

DOI:10.11576/biuz-5738

Bezaubernde Halokline, gemusterte Biofilme

Der Bärensee in Siebenbürgen

PETER HANTZ | MINA BIZIC

mit István MÁTHÉ, Hans-Peter GROSSART, Kathryn FIXEN, Krisztina KOVÁCS, Bánk BESZTERI, Henk BOLHUIS, Tomas HAUER, Niels-Ulrik FRIGAARD, Michelle M. GEHRINGER, Hugo MOORS, Lujza KERESZTES, Zoltán KRISTÓF, Tom CLARKE, Bertalan BICSAK, Michael HOPPERT, Scott MILLER, Alfred WÜEST

Handkolorierte Postkarte mit Blick auf den Bärensee im heutigen Rumänien.

Der Bärensee in Sowata (Siebenbürgen) ist einer der größten heliothermischen Seen der Welt mit einem einzigartigen Unterwasserökosystem und „therapeutischem" Schlamm. Der See hat eine sehr stabile Dichteschichtung mit fast gesättigtem Salzwasser in der Tiefe und weniger salzhaltigem Wasser in seiner 2,5 Meter mächtigen Oberflächenschicht. In der Übergangsschicht (Halokline), in der die Salzkonzentration mit der Tiefe rasch zunimmt, ändern sich auch Temperatur und Lichtstärke sprunghaft, wodurch mehrere ökologische Lebensräume entstehen. Cyanobakterien, die in Biofilmen auf dem Schlamm des Seebodens oberhalb der Halokline leben, haben einen komplexen Jahreszyklus und zeigen im Spätherbst die Bildung von Netzmustern. In der warmen Halokline schwimmen riesige Mengen an Salzkrebschen, während der Schlamm über der Halokline mit Larven von Zuckmücken und Salzfliegen besiedelt und mit roten Flecken von mikrobiologisch oxidierten Eisenverbindungen übersät ist.

Der Bärensee (ungarisch: *Medve-tó*, rumänisch: *Lacul Ursu*, Abbildung 1), einer der ganz besonderen Salzseen der Welt, entstand auf spezielle Weise: Neben der Stadt Sowata (ung.: Szováta, rum.: Sovata) in einer Region bekannt als „Salzgebiet" des Szeklerlands in Siebenbürgen verstopfte im Jahre 1875 die Sinkhöhle einer Salzdoline. Bäche füllten das Tal um die Doline langsam auf und führten zum Einsturz zusätzlicher Salzfelsen [1]. Neben dem See, der von einem Wald mit meist Eichen und Buchen umgeben ist, finden wir derzeit auch aus dem Boden herausragende Salzformationen [2]. Der Bärensee ist ein ▸ meromiktischer See, d. h. er zeigt eine permanente Dichteschichtung (Abbildung 2). In den tiefen Schichten erreicht die Konzentration gelöster Salze fast die Sättigung (hauptsächlich NaCl mit Salzkonzentrationen von ~300 g/L). Der See hat eine Oberfläche von 40.100 m^2, während seine maximale Tiefe 18 m und die durchschnittliche Tiefe etwa 11 m beträgt. Die Oberflächenschicht, die neben einem Salzwasserbach auch von zwei Süßwasserbächen gespeist wird, ist dagegen deutlich weniger salzhaltig (~35 bis ~70 g/L). Diese Schichtung führt letztlich zum berühmten heliothermischen Effekt, bei dem Sonnenwärme in der Salzschicht gespeichert wird.

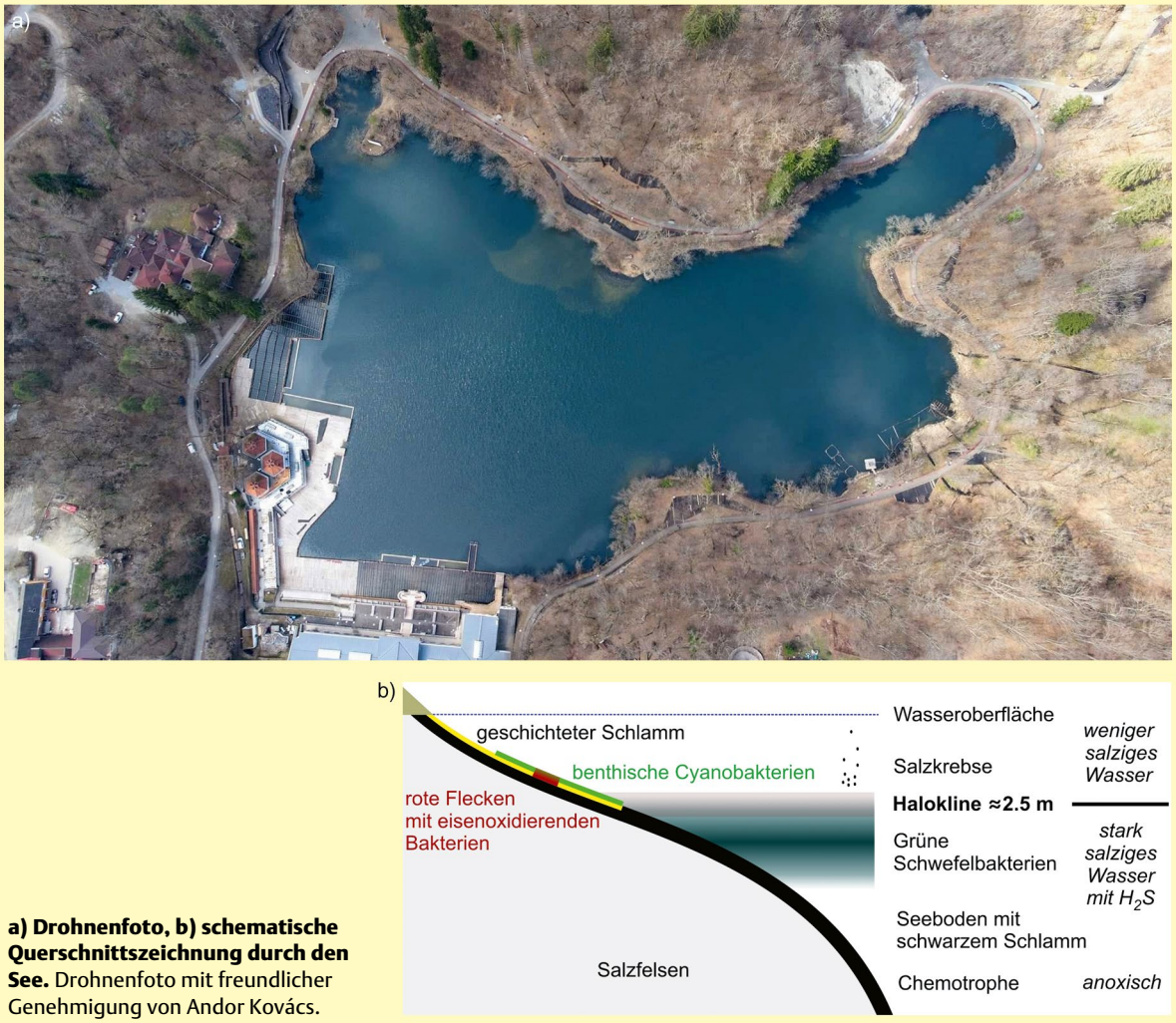
Die Oberflächentemperatur des Sees korreliert mit der Außentemperatur (im Winter kann sie unter den Gefrierpunkt fallen, im Sommer bis zu 25 °C erreichen), während die Temperatur in der Tiefe ständig um ca. 20 °C liegt. Die Temperatur der Halokline in etwa 2,5 m [3, 4] kann durch den heliothermischen Effekt allerdings höher sein als an der Oberfläche. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erreichte die Spitzentemperatur der Halokline im Sommer sogar 63 °C [3]. Diese Temperatur nahm im Laufe der Jahre allmählich ab und liegt heute bei etwa 40–45 °C. Ein Grund dafür ist eine Störung der Halokline durch das im Sommer für begrenzte Stunden zugelassene Baden in etwa einem Drittel des Sees. Wahrscheinlich kommen aber noch andere, unbekannte Faktoren hinzu, welche die Sommertemperatur der Halokline senken.

In einer ausgeprägten Halokline wie im Bärensee verhindert die starke Dichteschichtung jegliche turbulente Durchmischung. Zwar gibt es immer noch einen geringen Transport von Wärme und von Salz vom Tiefenwasser in Richtung Oberflächenschicht, doch bleibt

Online-Ausgabe unter: www.biuz.de

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

ABB. 1 | TOPOGRAFIE DER BÄRENSEES



a) Drohnenfoto, b) schematische Querschnittszeichnung durch den See. Drohnenfoto mit freundlicher Genehmigung von Andor Kovács.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite ■■■ erklärt.

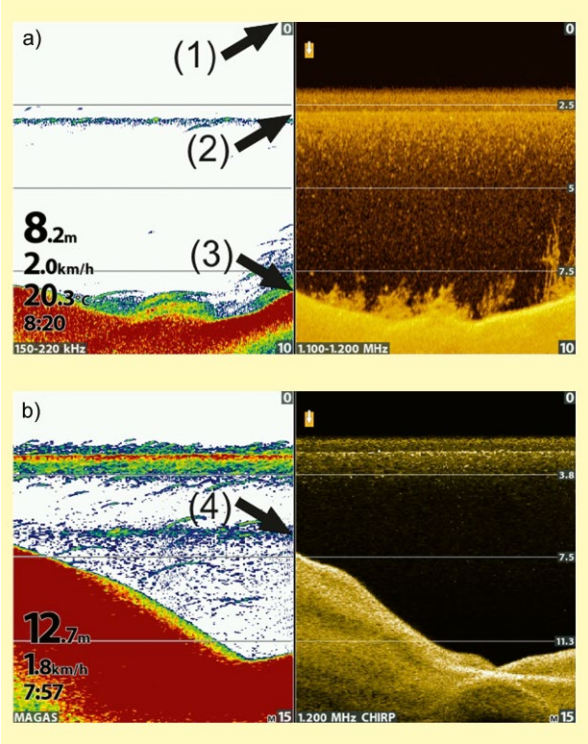
dieser auf die stets vorhandene molekulare Diffusion beschränkt. Da die Wärme 70-mal rascher als Salz diffundiert und weil die Wasserdichte sowohl von der Temperatur als auch von der Salzkonzentration abhängt, verändert diese molekulare Diffusion auch das Dichteprofil der Wasserschichtung. Unter besonders günstigen Verhältnissen der Schichtung von Temperatur und Salz kann diese Diffusion spontan zu einer Dichteinstabilität führen, welche lokal eine dünne vermischte Wasserschicht erzeugen kann. Dieses Phänomen, welches als „Doppeldiffusion“ bezeichnet wird, manifestiert sich meistens in perfekt homogen-gemischten Schichten. Diese Schichten sind durch extrem stabile Übergänge voneinander getrennt, wie dies beispielsweise beim Kivusee in Ostafrika sehr ausgeprägt der Fall ist. Unsere Forschungsgruppe verwendete unter anderem ein Sonar, um den See zu untersuchen (Abbildung 2). In der Tat zeigte das Gerät bei einer Messung im Oktober eine zweite Schichtung in etwa 10 m Tiefe, unterhalb der bekannten Halokline (Abbildung 2b).

IN KÜRZE

- *Der Bärensee in Siebenbürgen ist ein meromiktischer See mit **permanenter Dichteschichtung**. Das salzige Tiefenwasser speichert die Sonnenwärme, ein Phänomen, das als Heliothermie bekannt ist.*
- *An der **haloklinen Grenzschicht** mit ihrem starken Dichtegradienten können eindrucksvolle Experimente durchgeführt werden. So bleiben hier viele Partikel wie Pflanzenreste oder Samen in der Schwebe.*
- *Der **Jahreszyklus der Cyanobakterienmatten** beinhaltet eine musterbildende Phase im Spätherbst, während der sich retikuläre (netzartige) Strukturen bilden.*
- *Rote Flecken auf dem Schlamm werden wahrscheinlich von **eisenoxidierenden Bakterien** erzeugt, die Eisen(II)-Sulfid-Verbindungen zu Eisen(III)-Oxid oxidieren.*
- *Eine große Zahl von **Salzkrebsen der Gattung** Artemia kann im See beobachtet werden, welche hauptsächlich in der warmen Halokline vorhanden sind.*
- *Im Mai bildet sich eine „Wiese“ der **Grünalge** Entemorpha **sp.** im See aus.*

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

ABB. 2 | SONARAUFNAHMEN DES BÄRENSEES



Die Aufnahmen stammen von September (a) und Oktober 2020 (b) und zeigen vertikale Schnitte aus den Tiefen des Sees in zwei Frequenzbereichen. Der monochrome Teil von Bild (a) zeigt abgestorbene Vegetation am Grund des Sees (höhere Frequenz). Im Farbbild vom Oktober (b, niedrigere Frequenz) erscheinen Spuren einer zweiten Dichteschicht im See. Pfeile: (1) Wasseroberfläche, (2) Halokline, (3) Seeboden mit Schlamm (4), zweite Dichteschicht im Oktober.

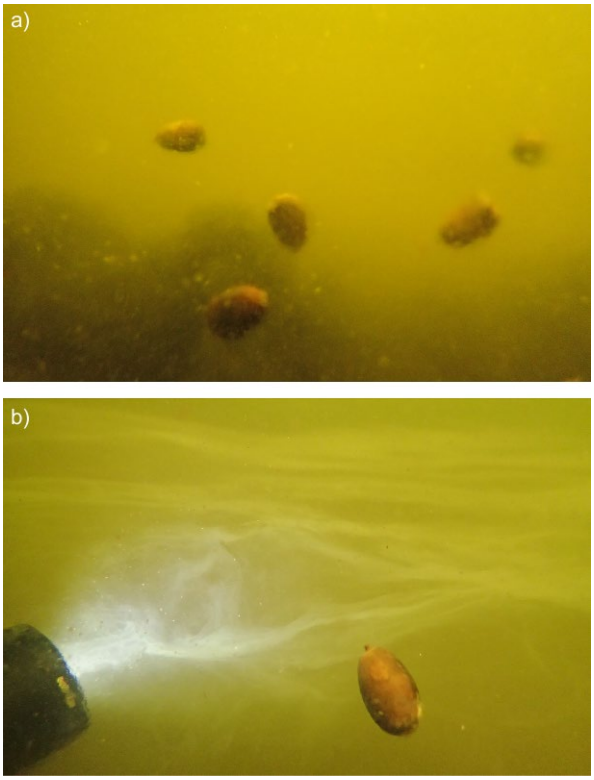


ABB. 3 In der Halokline schwimmen verstreute Eicheln. a) Die dunkle Wolke besteht aus grünen Schwefelbakterien, die direkt unterhalb der Halokline leben. b) Die in einem Experiment in die Halokline gegossene Milch breitet sich in einem Schleier entlang der Dichtesprungschicht aus.

Heliothermie – stabile Heißwasserschicht in der Tiefe

Heliothermie ist ein Charakteristikum einiger meromiktischer Seen [3, 4]. Dieses Phänomen beruht darauf, dass die tieferen Schichten des Sees durch die Sonneneinstrahlung stark erwärmt werden. Heliotherme Seen sind an der Oberfläche kühler, weil sie – besonders nachts – Wärme an die Atmosphäre abstrahlen, während die Wärme in den tieferen Schichten wie in einer Batterie „gespeichert" bleibt. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Dichte von Wasser zwar ab, da aber das warme Wasser in den tieferen Schichten durch seine hohe Salzkonzentration eine viel höhere Dichte als das Wasser in den flacheren Schichten aufweist, verbleibt es dauerhaft in der Tiefe. Daher können im Bärensee wärmere Schichten (die Halokline, die sich im Sommer bis auf 40–45 °C aufheizt) trotzdem unterhalb der kühlen Oberflächenschicht liegen bleiben und zu einer permanenten meromiktischen Schichtung führen. Andere eindrückliche Beispiele für dieses Phänomen sind die Salzseen in der libyschen Sahara-Wüste oder auch der Hot Lake in Washington (USA).

Die Halokline – schweben wie im Weltraum

In der permanenten Halokline können spektakuläre Experimente durchgeführt werden. Blätter, Eicheln und einige Früchte, die dichter als Oberflächenwasser sind, aber weniger dicht als das unterhalb der Halokline liegende, dichte Salzwasser, können in der Grenzschicht „schweben" (Abbildung 3a). Auch Milch (mit gut unterscheidbaren optischen Eigenschaften unter Wasser) kann man so in der Halokline ausbreiten (Abbildung 3b). Die Wasserschicht unter der Halokline ist eine Art zweiter „See im See", in der sogar (interne) Wellen schwingen. Die Grenze zwischen Ober- und Tiefenschicht ist jedoch deutlich zu erkennen, da sie von einer Gemeinschaft grüner Schwefelbakterien reichlich besiedelt wird, die in einer Tiefe von rund 2,5 bis 3 m leben und dort das Sonnenlicht nutzen können (Abbildung 4). Viele der in den See gefallenen Pflanzenreste sammeln sich in dieser Dichtesprungschicht an und werden durch die horizontalen Strömungen kontinuierlich zerkleinert und durch Mikroorganismen abgebaut.

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

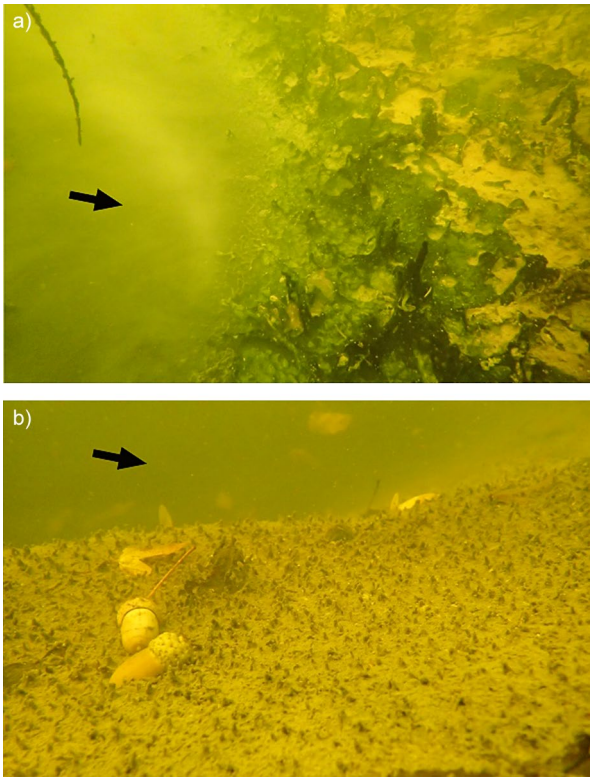


ABB. 4 a) Grüne Schwefelbakterien beschatten die Halokline. In der Schlammregion oberhalb der Halokline (rechter Bildrand) können Blaualgen (Cyanobakterien) beobachtet werden. b) Das grüne Feld im Bildhintergrund im stark salzhaltigen Wasser unterhalb der Halokline (~2,5 m Tiefe) wird von grünen Schwefelbakterien gebildet. Pfeile: Wasser unter der Halokline, deren Farbe von grünen Schwefelbakterien stammt.

ABB. 5 Der sauerstofffreie Schlamm unterhalb der Halokline wird nur von Bakterien und Archaeen bewohnt, jedoch ist er oberhalb der Halokline voller Leben. Neben den Röhren mit *Chironomus* sp. Mückenlarven (a) und den „Knospen" von Salzfliegenlarven (b) sind die Fäden der Grünalge *Enteromorpha intestinalis* (früher bekannt als *Ulva intestinalis*) sichtbar.

Große Anzahl von ökologischen Lebensräumen

Unterhalb der Halokline leben grüne Schwefelbakterien (meist *Prosthecochloris* sp.), die bei ihrer Photosynthese nicht die Wasserspaltung nutzen, um Sauerstoff freizusetzen, sondern Schwefelwasserstoff. Bei diesem Prozess der anoxygenen Photosynthese wird der Schwefelwasserstoff zu elementarem Schwefel oxidiert. Darunter – wo kein Licht ankommt, weil es bereits weitgehend von den grünen Schwefelbakterien in der darüberliegenden Schicht absorbiert worden ist – überleben nur ▸ chemotrophe und ▸ heterotrophe Bakterien und Archaeen. Am tiefen Grund des Sees leben verschiedene sulfatreduzierende Bakterien, die oxidierte Schwefelverbindungen zu Schwefelwasserstoff (H_2S) reduzieren [5–8]. Dieser Prozess wird als anaerobe Atmung bezeichnet und versorgt die Bakterien in Abwesenheit von Sauerstoff mit Energie. Dabei oxidieren die Bakterien die organischen Verbindungen im See und verwenden Sulfat als Elektronenakzeptor [9]. In den tieferen Regionen des Sees kann die Konzentration des Schwefelwasserstoffs sogar 250 mg/L erreichen.

Im Schlammboden oberhalb der Halokline, wo es noch Sauerstoff gibt, leben auch tierische Gemeinschaften. Hier findet man Unmengen von Larvenröhren einer halotoleranten (salztoleranten) Mücke (*Chironomus* sp.) und knospenförmige Larven der halophilen (salzliebenden) Salzfliege (Ephydridae; Abbildung 5). Salzhaltige Seen sind aufgrund der ▸ osmotischen Dehydratation sehr selektive Ökosysteme für spezielle halotolerante Insektenlarven, was sich in einer geringen Artenanzahl widerspiegelt. In einigen Teilen der Welt werden Salzinsekten auch als wichtige Proteinquellen verwendet: So sind in Nordamerika die Paiute-Indianer rund um den salzhaltigen Monosee auch als Kutzedika-Indianer bekannt, was Fliegenesser bedeutet.

Forschungstauchgänge im Bärensee zeigten eine Reihe roter Flecken auf dem Schlammboden oberhalb der Halokline (Abbildung 6a). Sequenzanalysen der 16S rRNA-Gene (Metabarcoding) zeigten, dass diese Flecken aus Bakteriengemeinschaften bestehen, die sich zum signifikanten Teil aus Mitgliedern der Familie der Rhodobacteraceae zusammensetzen. Zu ihnen gehört eine Reihe von

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

Eisen(II)-Oxidierern, die z. B. schwarzes Eisen(II)-Sulfid in rötliches Eisen(III)-Oxid umwandeln, wenn die Sauerstoffkonzentration niedrig ist. Daher werden diese Flecken auf dem Schlamm wahrscheinlich von eisenoxidierenden Bakterien erzeugt. Diese können die aus dem Fe(II)S-haltigen Schwarzschlamm stammenden Eisen(II)-Ionen zu rotem Eisen(III)-Oxid oxidieren [10]. Die Organismen gewinnen – wenn auch nur wenig – Energie durch diese sauerstoffabhängige Eisenoxidation. Das dabei entstehende Fe^{3+}-Ion ist schwer löslich und würde sich sofort an der Bakterienzelle anlagern. Um dies zu verhindern, produzieren die Eisenoxidierer große Mengen an extrazellulären Polymeren. Eisenoxid/-hydroxid lagert sich sofort an diesen Strukturen ab. Sie sehen unter dem Licht- und Elektronenmikroskop wie raue Fäden aus (Abbildung 6b und 6c) [11, 12].

Bei unseren Forschungen entdeckten wir sehr ausgeprägte Schichtstrukturen auf dem Schlamm oberhalb der Halokline: Über der tieferen, schwarzen (reduzierten) Masse befindet sich eine gelbe (oxidierte) Schicht (Abbildung 7). Die verschiedenen Farben stammen von unterschiedlichen Oxidationsstufen, vor allem von eisen- und schwefelhaltigen Substanzen.

Ende Mai sieht die Oberfläche des Sees wie eine grüne Wiese aus: Sie besteht größtenteils aus Grünalgen (*Enteromorpha* sp., Abbildung 8). Diese Röhrenalge ist in einigen Meeren weit verbreitet. Nach ein paar Wochen sinken die Algen ab und die Oberfläche wird wieder „sauber“.

Gemusterte Biofilme von Cyanobakterien

Beim Forschungstauchen entdeckten wir auch Biofilme von Cyanobakterien – umgangssprachlich als Blaualgenteppiche bekannt – auf dem gelben Schlamm oberhalb der Halokline. Diese sind in Abhängigkeit von Tiefe und Jahreszeit, in der sie auftreten, sehr unterschiedlich. Der obere (flachere) Teil des Biofilms bildet im Herbst in der Nähe der Halokline eine netzartige Struktur aus [13]. Im Frühsommer bildet sich auch in den flacheren Bereichen eine dicke grüne Schicht. Diese wird im Juli fragmentiert und „zerknittert“, während im August die Struktur großenteils verschwunden ist (Abbildung 9). In diesem Biofilm fanden wir mehrere Cyanobakterienarten, z. B. aus den Gattungen *Limnospira*, *Geitlerinema*, *Kamptonema* oder *Synechococcus*, die an die extremen Umweltbedin-

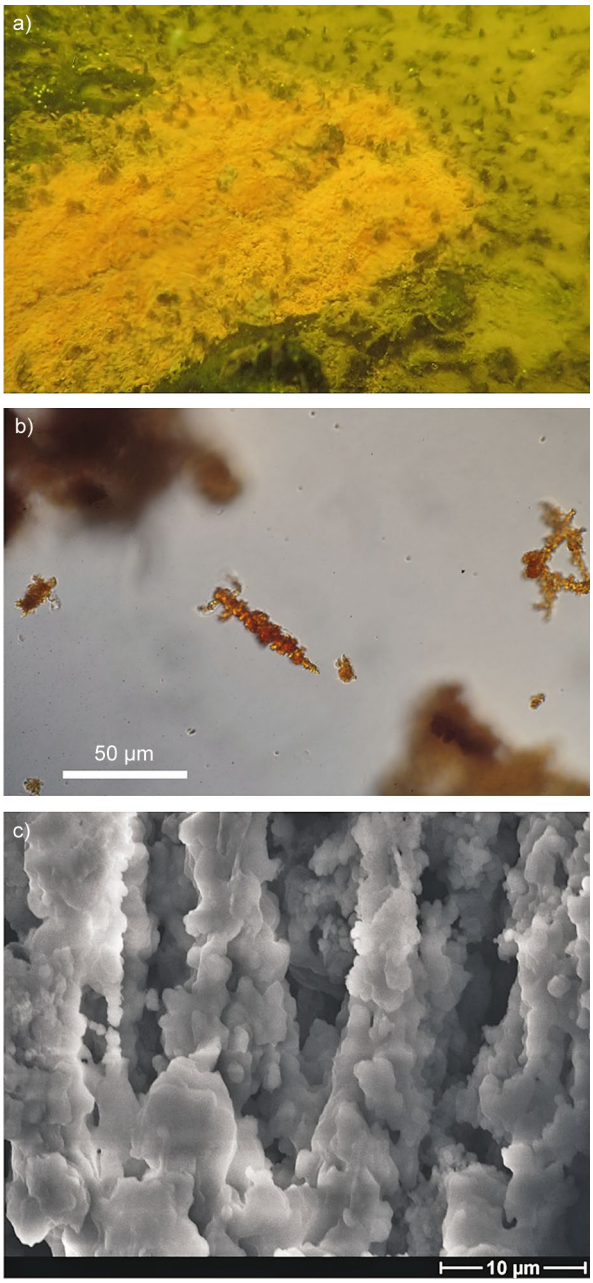


ABB. 6 Aktivität eisenoxidierender Mikroorganismen. Rote Eisen(III)-Oxide auf dem Schlamm am Seegrund (a). Optische (b) und rasterelektronenmikroskopische (c) Aufnahmen von Strukturen, die von eisenoxidierenden Bakterien gebildet werden, sowie dem darauf abgeschiedenen Eisenoxid. Abbildung (b) mit freundlicher Genehmigung von Nicolae Dragoş.

ABB. 7 Der Schlamm über der Halokline ist geschichtet. Sein Inneres ist schwarz, was auf das Vorhandensein von reduzierten Eisensulfiden hinweist. Seine Oberfläche ist dagegen gelb (oxidiert).

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

ABB. 8 Wucherung von *Enteromorpha* sp. Anfang Juni.

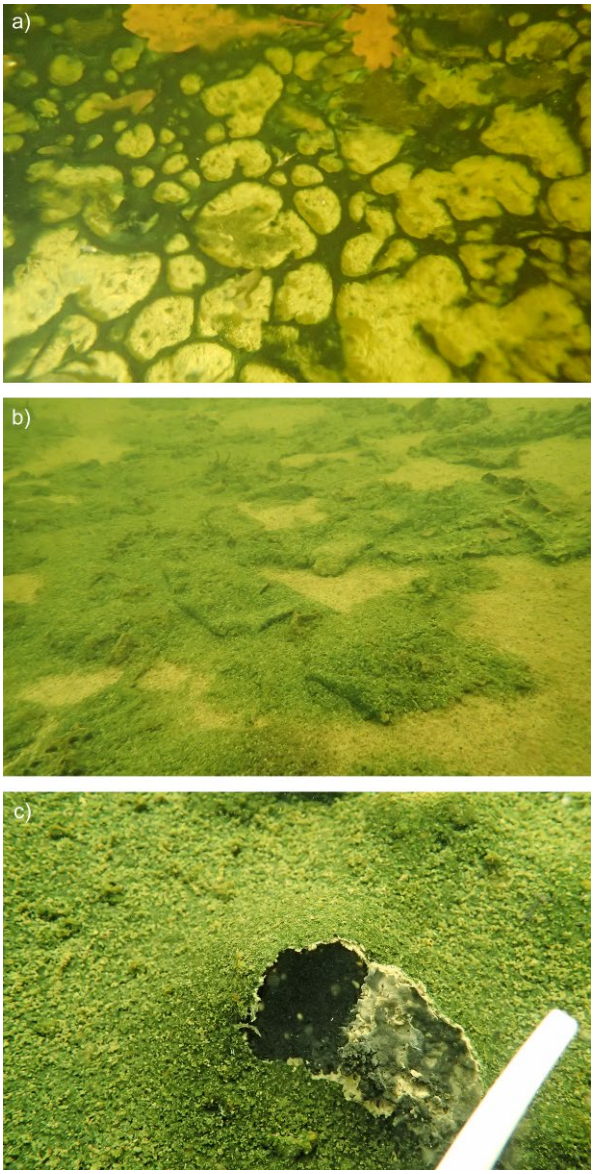


ABB. 9 Muster im photosynthetischen Cyanobakterienteppich auf dem Schlamm mit gelber Oberfläche im Dezember (a) und Anfang Juli (b, c). Das Netzmuster (a) bildet sich spontan im Spätherbst. Im Juni erzeugen die unter dem Biofilm von Cyanobakterien gebildeten Gase eine Art „glockenförmige Erhebung" in der Matte. Zum Größenvergleich ist der Griff eines Plastiklöffels (weißer Teil) abgebildet (c).

gungen im Bärensee gut angepasst sind. Einige dieser Cyanobakterien enthalten das spezialisierte Chlorophyll *d*, das es ihnen ermöglicht, Infrarotlicht (>700 nm) zu nutzen. Wir arbeiten daran, die Veränderungen in der Artenzusammensetzung mit ihrer Funktion im Ökosystem in Verbindung zu bringen wie z. B. in [14].

Cyanobakterien, die dicht über der Halokline leben, müssen mit hohen Salzkonzentrationen und einer Wassertemperatur von 40 bis 45 °C im Sommer zurechtkommen. Diese Cyanobakterien, die in extremen Umgebungen anwachsen, sind sehr widerstandsfähig und deshalb gute Kandidaten, um robuste ▸ Photobioreaktoren zu bauen, möglicherweise auch für Weltraumanwendungen [15–16]. Cyanobakterien, ob thermophil oder halophil, sind aus geothermischen bzw. hypersalinen Umgebungen gut bekannt. Arten, welche die doppelte Belastung durch hohen Salzgehalt und hohe Temperaturen tolerieren können, sind zwar bekannt, wurden aber bisher noch nicht umfassend untersucht [17]. Der Bärensee bietet hierzu eine ideale Möglichkeit.

Zusätzlich wurden einige Kieselalgen beobachtet, die an den Biofilmen anhaften. Zwar sind die Kieselalgengemeinschaften im Vergleich zu denen in typischen Seen recht artenarm, allerdings ist das Vorkommen der eukaryotischen Arten unter den extremen Bedingungen im See und damit das Vorhandensein physiologischer Anpassungen bei ihnen nicht weniger interessant als bei den Cyanobakterien [18]. Neben den von uns beobachteten Kieselalgen wurde in einer früheren molekularen Studie auch eine Art der Grünalgengattung *Picochlorum* gefunden, deren Mitglieder an die unterschiedlichsten Salzkonzentrationen angepasst sind.

In der warmen Wasserschicht direkt über der Halokline sind große Mengen an Salzkrebsen (*Artemia salina*) zu finden (Abbildung 10). Die Salzkrebse stellen eine der

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

ABB. 10 Das Salzkrebschen *Artemia salina* an seinem Lieblingsplatz, in der Nähe der Halokline, deren Umgebung aufgrund des heliothermischen Effekts erwärmt wird.

wenigen mehrzelligen Extremophilen dar, die so hohe Salzkonzentrationen tolerieren bzw. benötigen. Die Krebstiere ernähren sich von Mikroorganismen und Algen. Da sie keine Konkurrenten und Fressfeinde haben, können sie in enormer Zahl auftreten.

Die exotische Umgebung des Sees

Ein benachbarter See mit konzentrierter Salzlösung, dessen Ablauf in den Bärensee mündet, wird wegen seiner roten Farbe im Sommer Purpurner See genannt. Dort stammt die rote Farbe von salztoleranten Archaea, die Bacteriorhodopsin enthalten. Die HPLC-(*high performance liquid chromatography*)-Analyse von photosynthetischen Pigmenten von Mikroorganismen (siehe auch Kasten „Analyse mikrobieller Photopigmente) in rot gefärbten, salzhaltigen Tümpeln in der Nähe des Bärensees (Abbildung 11) ergab einen hohen Gehalt an Scytonemin. Dies wird in Cyanobakterien gefunden, die starkem Sonnenlicht ausgesetzt sind, da Scytonemin als ein Sonnenschutzpigment wirkt, das die schädliche UV-Strahlung der Sonne absorbiert.

Die Erforschung der Mikrobiologie und Ökologie exotischer Umgebungen hat einen hohen Nutzen für die Menschheit gebracht – beispielsweise durch den Einsatz von Extremoenzymen in der PCR-Reaktion oder in Reinigungsmitteln, Mikroben für die Biokraftstoffproduktion oder für die Abwasserreinigung. Ein weiteres Beispiel ist Halorhodopsin, das lichtgesteuerte Transmembranprotein bestimmter halophiler Mikroorganismen, das als erstes Instrument in der Optogenetik (eine biologische Technik zur Kontrolle der Aktivität von Neuronen oder anderen Zelltypen mit Licht) zum Herunterregeln der Aktivität von Neuronen verwendet wurde. Isolierte Umgebungen mit großen physikalisch-chemischen Gradienten wie der Bärensee bieten hervorragende Bedingungen für die Evolution neuer, potenziell für den Menschen nützlichen Mikroorganismen.

Zusammenfassung

Heliotherme Salzwasserseen wie der Bärensee in Siebenbürgen haben eine stabile Dichteschichtung mit einer konzentrierten Salzlösung in der Tiefe und einer weniger salzhaltigen (und deshalb weniger dichten) Oberflächen-

ANALYSE MIKROBIELLER PHOTOPIGMENTE

Für die Analyse und Quantifizierung von Pigmenten photosynthetischer Organismen wie Chlorophyllen und Carotinoiden kann unter anderem die Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) verwendet werden. Die Pigmente werden dafür mit einem organischen Lösungsmittel wie Aceton aus einer Probe extrahiert und auf eine Chromatographiesäule aufgetragen. Die Säule wird kontinuierlich mit einem Lösungsmittel gespült, was zu einer Trennung der Moleküle in der Probe nach Größe und Polarität führt. Der Fotodioden-Array-Detektor, der kontinuierlich das gesamte Absorptionsspektrum (200 bis 1000 nm) des Säulen-Eluats aufzeichnet, erlaubt eine sehr gute Unterscheidung und Quantifizierung der verschiedenen Photopigmente. Die Komponenten der Proben werden anhand ihrer Retentionszeit (die Zeit vom Eintritt in die Säule bis zum Verlassen der Säule) und ihres Absorptionsspektrums identifiziert. Opsin-ähnliche Proteine (wie Bacteriorhodopsin) mit assoziierten Chromophoren, die von Retinal abgeleitet sind, zeigen sich nicht in der HPLC-Analyse, weil die Chromophore kovalent an das Proteinrückgrat gebunden sind. Daher werden sie nicht in die organischen Lösungsmittel extrahiert, sondern fallen mit dem Protein aus.

ABB. 11 Mit Salz bedeckter Boden in der Nähe des Bärensees. Die rote Farbe des kleinen Baches stammt von den Cyanobakterien, die rote lichtschützende Pigmente enthalten.

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

schicht. Durch die Sonneneinstrahlung wird die Übergangsschicht (die Halokline) auf Temperaturen bis 40–45 °C aufgeheizt. Aufgrund der starken physikalisch-chemischen Gradienten existiert eine Reihe von biologischen Nischen. Mithilfe von Forschungstauchgängen wurde dieses einzigartige Ökosystem genauer untersucht. Besonders interessant sind die Biofilme von Cyanobakterien, die einen komplexen Jahreszyklus mit der Bildung von Netzmustern im Spätherbst zeigen sowie das Vorhandensein roter Fe_2O_3-haltigen Flecken auf dem Schlamm, die wahrscheinlich aus dem schwarzen FeS-haltigen Schlamm durch eisenoxidierende Bakterien gebildet werden. In den Biofilmen wurden auch Kieselalgentaxa gefunden, deren Verwandte aus salinen Habitaten bekannt sind.

Summary

The Bear Lake in Sovata – fascinating haloclines, patterned biofilms

Heliothermic lakes, like the Bear Lake in Transylvania, have a stable stratification with a concentrated saline layer at the bottom and a less saline (thus lower density) surface layer. Due to solar radiation, the transition layer (the halocline) is heated up to 40–45 °C. The pronounced physico-chemical gradients result in a series of biological niches. Scientific diving was used to investigate this unique ecosystem. Biofilms of cyanobacteria are especially interesting. They follow a complex annual cycle by forming reticulated patterns in late autumn presenting characteristic red Fe_2O_3 spots on the mud, probably formed from the black FeS-containing mud by iron-oxidizing bacteria. Diatom taxa, whose relatives are known for inhabiting saline habitats, have also been found in the biofilms.

Schlagworte

Heliothermie, Halokline, cyanobakterielle Biofilme, eisenoxidierende Bakterien, Chlorophyll *d*

Danksagung

Wir danken Eörs Szathmáry, András Perczel, András Málnási-Csizmadia, Mária Bálint, Ágnes Szegedi, István Jalsovszky, Nicolae Dragoş, János Fülöp-Nagy, Ha Phuong Le Thi, Péter Somogyi, Adorjan Cristea, István Csíki, László Jeremiás, Attila Ungvári, László Luka, Gergely Balázs, Tamás Felföldi und Lajos Vörös für ihre große Hilfe während unserer Arbeiten. Wir sind Ensana Health Spa Hotels Sowata, Transylvania Dive Center, My Lake Dive Center, ALT Technologies Ltd., Hajósparadicsom Llc., Octogon Llc., Dive Adventures Association, Biomi Llc. und Kolla Llc. für ihre logistische Unterstützung, und Bálint Analitika Kft. für die Durchführung chemisch-analytischer Arbeiten sehr dankbar. Die Probennahme wurde gemäß der Genehmigung ANANP 1988/17.06.2021 durchgeführt.

GLOSSAR

Chemotroph: *Chemotrophe Organismen gewinnen ihre Energie durch die Oxidation organischer oder anorganischer Moleküle, nutzen also chemische Energie, um ihre organischen Moleküle herzustellen.*

Heterotroph: *Heterotrophe Organismen nutzen von anderen Lebewesen erzeugte organische Moleküle als Energie- und Kohlenstoffquelle zum Aufbau ihrer organischen Verbindungen. Im Unterschied dazu können autotrophe Organismen CO_2 als Kohlenstoffquelle nutzen und daraus mithilfe von Lichtenergie (Photoautotrophe) oder aus chemischer Energie (Chemolithoautotrophe) ihre Biomasse aufbauen.*

Holomiktische Seen: *Das Wasser holomiktischer Seen wird saisonal ein- bis zweimal im Jahr vollständig gemischt. Flache Seen in den gemäßigten Breiten gefrieren im Winter an der Oberfläche, während das tiefere Wasser wärmer bleibt (~4 °C). Im Sommer hingegen ist die Oberflächenschicht wärmer, hat eine geringere Dichte und der ganze Seewasserkörper ist stabil geschichtet. Am Anfang und am Ende des Winters kehren sich die beiden Dichteschichtungen um, so dass es zu einer Durchmischung des Wasserkörpers kommt. Die meisten Süßwasserseen sind holomiktisch.*

Meromiktische Seen: *Im Gegensatz zu ▸* holomiktischen *Seen haben meromiktische Seen mindestens zwei Schichten, die sich kaum miteinander vermischen. Die Tiefenschicht mit höherer Dichte enthält normalerweise wasserlösliche Salze in hoher Konzentration. Die tiefere Schicht ist sauerstoffarm, da sie nicht mit Luft in Kontakt kommt. Die obere Schicht verhält sich dagegen wie ein holomiktischer See und wird mindestens ein- oder zweimal im Jahr durchmischt. Zwischen den beiden Schichten befindet sich eine Zone mit abrupter Veränderung der Konzentration gelöster Salze und der Dichte. Diese wird oft als Chemokline oder in Salzseen als Halokline bezeichnet.*

Osmotische Dehydrierung: *Bei der Osmose wandern Wassermoleküle durch eine halbdurchlässige Membran (z. B. die Zellmembran) aus einer verdünnten Lösung (im Inneren einer Zelle) in eine konzentriertere Lösung (das konzentrierte Salzwasser eines Salzsees). Dadurch kann es zur osmotischen Dehydrierung kommen: Ein nicht angepasster Organismus verliert in einer salzhaltigen Umgebung Wasser und stirbt. Das Salzkrebschen* Artemia *kann dagegen die osmotische Dehydrierung verhindern. Sein Darm verfügt über einen Mechanismus für die aktive Aufnahme von Wasser und kann somit den Wasserhaushalt in einer salzhaltigen Umgebung kontrollieren.*

Photobioreaktoren: *Bioreaktor, der eine Lichtquelle nutzt, um Cyanobakterien oder Algen zu kultivieren, welche Photosynthese verwenden, um (für Menschen verwertbare) Biomasse zu erzeugen. Dabei wird Kohlendioxid verbraucht und Sauerstoff produziert.*

Literatur

[1] A. Józsa (2009). Szovátafürdő [Bad Sowata]. Korunk 20, 8. https://epa.oszk.hu/00400/00458/00152/index6e6b.html

[2] J. P. Frink et al. (2013). Floristic surveys in the Lake Ursu Nature Reserve and adjacent areas (Sovata, Transylvania, Romania), Bruckenthal Acta Musei VIII. 3, 531–546.

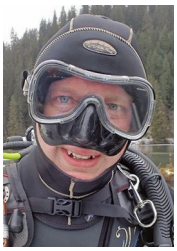
[3] S. Kalecsinszky (1901). [I. Über die warmen und heißen Salzseen in Sovata als natürliche Wärmespeicher II. Über die Herstellung heißer Salzseen und Wärmespeicher], Földtani közlöny XXXI. 10–12, 329–353. http://epa.oszk.hu/01600/01635/00046/pdf/Foldtani_kozlony_EPA01635_1901_10-12_329-353.pdf

[4] M. Alexe, G. Şerban (2014). The evolution of heliotherm phenomenon in the karstosaline Lake Ursu from Sovata, Romania Carp. J. Earth and Env. Sci. 9, 103–111. http://www.cjees.ro/viewTopic.php?topicId=424

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

[5] I. Máthé et al. (2014). Vertical physico-chemical gradients with distinct microbial communities in the hypersaline and heliothermal Lake Ursu (Sovata, Romania). Extremophiles 18, 501–514. https://doi.org/10.1007/s00792-014-0633-1
[6] A. Baricz et al. (2021). Spatio-temporal insights into microbiology of the freshwater-to-hypersaline, oxic-hypoxic-euxinic waters of Ursu Lake. Environ Microbiol. 23, 3523–3540. https://doi.org/10.1111/1462-2920.14909
[7] A. Ş. Andrei et al. (2017). Hypersaline sapropels act as hotspots for microbial dark matter. Sci Rep. 7, 6150. https://doi.org/10.1038/s41598-017-06232-w
[8] A. M. Şuteu et al. (2021). Diversity and distribution of phototrophic primary producers in saline lakes from Transylvania, Romania. Plant Syst. Evol. 307, 12. https://doi.org/10.1007/s00606-020-01733-0
[9] K. Olson and K. Straub (2017), The Role of Hydrogen Sulfide in Evolution and the Evolution of Hydrogen Sulfide in Metabolism and Signaling, Physiology 31, 60–72. https://doi.org/10.1152/physiol.00024.2015
[10] S. Zappa, C. E. Bauer (2013). Iron homeostasis in the *Rhodobacter* genus. Adv. Bot. Res. 66, 289–326. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397923-0.00010-2
[11] C. S. Chan et al. (2016), The Architecture of Iron Microbial Mats Reflects the Adaptation of Chemolithotrophic Iron Oxidation in Freshwater and Marine Environments. Front. Microbiol. 7, 796. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00796
[12] T. Bouchal et al. (2012). Primary research of mine waters from the Chrustenice iron-ore deposit. GeoSci. Eng. LVIII 23–27, https://doi.org/10.2478/gse-2014-0041
[13] R. N. Shepard, D. Y. Sumner (2010). Undirected motility of filamentous cyanobacteria produces reticulate mats. Geobiolog, 8, 179–190. https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2010.00235.x
[14] A. A. Voorhies et al. (2012). Cyanobacterial life at low O_2: community genomics and function reveal metabolic versatility and extremely low diversity in a Great Lakes sinkhole mat. Geobiology 10, 250–67. https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2012.00322.x
[15] C. Lasseur et al. (2010). MELiSSA: The European Project of Closed Life Support System. Gravity Space Biol. 23, 3–12.
[16] T. Li et al. (2017). Biofilm-based photobioreactors: their design and improving productivity through efficient supply of dissolved inorganic carbon, FEMS Microbiol. Lett. 364:fnx218, https://doi.org/10.1093/femsle/fnx218
[17] M. Banerjee et al. (2009). An unusual cyanobacterium from saline thermal waters with relatives from unexpected habitats. Extremophiles 13, 707–716. https://doi.org/10.1007/s00792-009-0258-y
[18] S. Häusler et al. (2014). Spatial distribution of diatom and cyanobacterial mats in the Dead Sea is determined by response to rapid salinity fluctuations. Extremophiles 18, 1085–1094. https://doi.org/10.1007/s00792-014-0686-1

Verfasst von:



Dr. Peter Hantz graduierte als Biophysiker an der Eötvös Universität Budapest, Ungarn. Er promovierte in Theoretischer Physik an der Universität Genf, Schweiz. Danach arbeitete er als Postdoc am Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) Heidelberg und am Friedrich-Miescher-Institut (FMI) in Basel. Derzeit ist er der Eötvos-Universität Budapest, Abt. Organische Chemie angegliedert und leitet ein Startup-Unternehmen, Fibervar Llc. in Siebenbürgen. Er forscht zur Physiologie und Musterbildung bakterieller Gemeinschaften in extremen Umgebungen und arbeitet auf den Bau von neuartigen (Photo)bioreaktoren hin.

Foto: Duan Ionescu

Dr. Mina Bizic studierte Biologie an der Universität Belgrad, Serbien. Im Anschluss arbeitete sie als Forschungsassistentin am Institut für Ozeanographie and Limnologie (IOLR) in Israel und promovierte am Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie in Bremen, Deutschland. Jetzt forscht sie am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB), Berlin und Stechlin, Deutschland, im Bereich der aquatischen mikrobiellen Ökologie. Ihre Forschungsinteressen umfassen den globalen Kohlenstoffkreislauf im Hinblick auf die Methanbildung und die Kohlendioxidbindung durch Phytoplanktonblüten.

Korrespondenz

Dr. Peter Hantz
Fibervar SRL
Str. Bolintineanu Nr. 20
RO-400062 Cluj
Rumänien

oder

Eötvös Loránd Universität
Abt. Organische Chemie
Pázmány sétány 1/A
H-1117 Budapest
Ungarn

Email: hantz@general.elte.hu

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

VBiO

Verband | Biologie, Biowissenschaften & Biomedizin in Deutschland

GEMEINSAM FÜR DIE BIOWISSENSCHAFTEN

Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie

Jetzt beitreten!

www.vbio.de