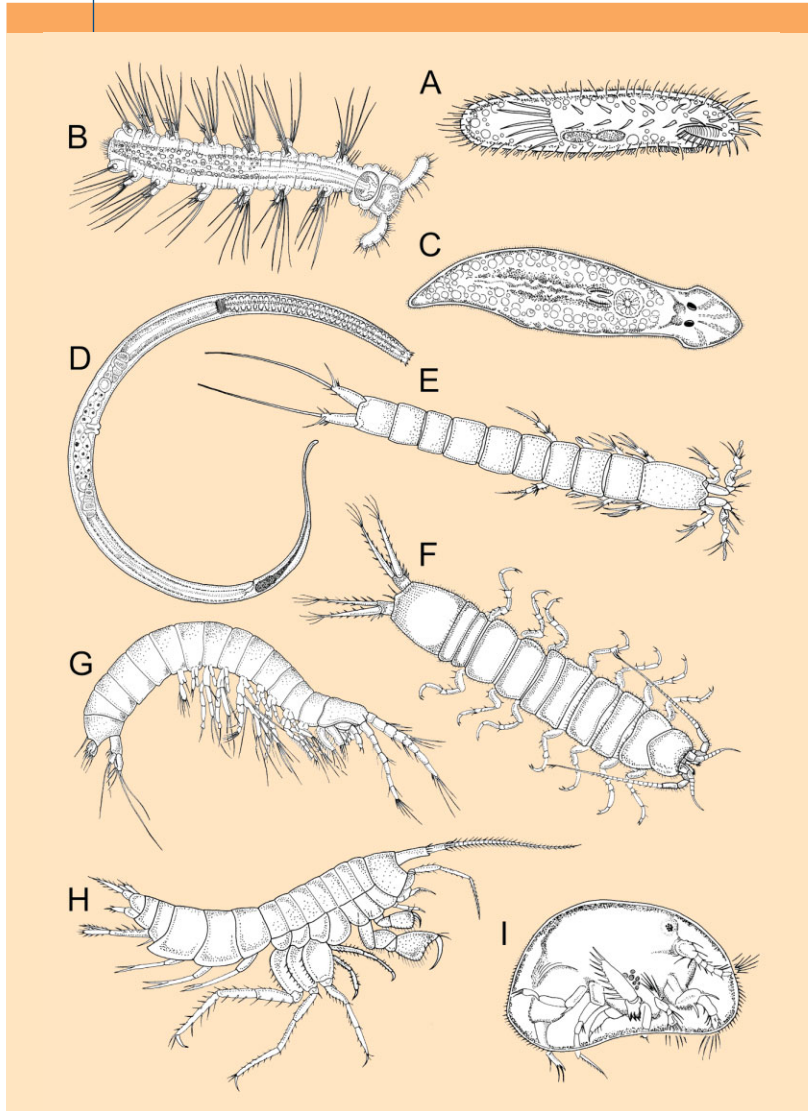


Ein globales Ökosystem Grundwasser lebt!

GUDRUN PREUß | HORST KURT SCHMINKE

Für die Trinkwasserversorgung spielt das Grundwasser eine herausragende Rolle. Seine Qualität wird deshalb regelmäßig überprüft, wobei fast ausschließlich hygienische sowie chemisch-physikalische Faktoren herangezogen werden. Den wenigsten ist bewusst, dass diese Messergebnisse das Resultat biologischer Stoffumsetzungen sind, denn das Grundwasser ist ein Ökosystem globaler Ausdehnung.

ABB. 1 | EINE AUSWAHL VON TIEREN DES GRUNDWASSERS



Lange Zeit ging man davon aus, dass das unterirdische Wasser aufgrund der widrigen Lebensbedingungen unbelebt und seine Beschaffenheit ausschließlich geogen bedingt wäre. Die für einen Lebensraum als schwierig zu bezeichnenden Faktoren sind in erster Linie Dunkelheit (also keine Photosynthese durch „Primärproduzenten“), räumliche Enge, zwar gleichbleibende, aber relativ niedrige Temperaturen und geringe Nährstoffkonzentrationen. Gerade diese geringen Konzentrationen organischer Nährstoffe und die hohe Konstanz der Lebensbedingungen ermöglichen jedoch eine erstaunlich hohe Biodiversität im Grundwasser. Heute weiß man, dass der Grundwasserraum ein eigenes Ökosystem mit unterschiedlichen, in Wechselbeziehungen miteinander stehenden Organismengruppen ist.

Diese Organismengruppen – kleinere Tiere, Bakterien, Einzeller und Pilze – haben großen Einfluss auf die Grundwasserbeschaffenheit und gestalten diese aufgrund ihrer Aktivitäten maßgeblich mit. In welcher Weise die unterschiedlichen Gruppen miteinander agieren und sich gegenseitig beeinflussen und wie sich Grundwasserbelastungen auf diese Lebensgemeinschaften auswirken, ist jedoch noch weitgehend unerforscht.

Grundwasser als Trinkwasserressource

Bei der Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser spielt das Grundwasser eine herausragende Rolle. Zwei Drittel des Trinkwassers in Deutschland wird dem Grundwasser entnommen. Seine Beschaffenheit wird deshalb regelmäßig überprüft, wobei fast ausschließlich hygienische sowie chemisch-physikalische Faktoren herangezogen werden, um seine Qualität zu beurteilen. Den wenigsten, die solche Un-

A – *Holosticha pullaster* Müller, 1773 (0,06 mm lang) als Vertreterin der Protozoa, Ciliata (Wimpertierchen).
B – *Troglochaetus beranecki* Delachaux, 1920 (0,7 mm) als einziger Grundwasservertreter der Polychaeta (Vielborster).
C – *Strongylostoma radiatum* Müller, 1774 (1,5 mm) als Vertreter der Plathelminthes (Plattwürmer). **D** – *Tripyla filicaudata* (De Man, 1880) (1,6 mm) als Vertreterin der Nematoda (Fadenwürmer). **E** – *Parastenocaris diana* Chappuis, 1955 (0,5 mm) als Vertreterin der Copepoda (Ruderfußkrebse). **F** – *Stenasellus virei* Dollfus, 1897 (1 cm) als Vertreter der Isopoda (Asseln). **G** – *Antrobathynella stammeri* Jakobi, 1954 (1,4 mm) als Vertreterin der Bathynellacea (Brunnenkrebse). **H** – *Niphargus kochianus* Bate, 1859 (5 mm) als Vertreter der Amphipoda (Flohkrebse). **I** – *Candona candida* Müller, 1776 (1,2 mm) als Vertreterin der Ostracoda (Muschelkrebse). (Original G. Gad, nach verschiedenen Autoren).

tersuchungen durchführen, ist bewusst, dass das, was sie messen, Resultat biologischer Stoffumsetzungen ist. Dabei gibt es nur wenig auf unserem Planeten, das nicht biologischer Aktivität zu verdanken ist.

Schon vor Millionen von Jahren haben sich Organismen das Grundwasser als Lebensraum erschlossen. Das Grundwasser ist ein gigantisches Ökosystem globaler Ausdehnung. In diametralem Gegensatz zu seinen Dimensionen stehen unsere Kenntnisse über dieses Ökosystem. Das hängt damit zusammen, dass in seinem Fall Leben dort pulsiert, wo kaum einer es vermuten würde, tief unter der Erde, eingeeengt in den Raum zwischen Sandkörnern oder auch größerem Material und fernab vom Licht, mit dessen Hilfe andere Ökosysteme sich ihre Nahrungsgrundlage bereiten.

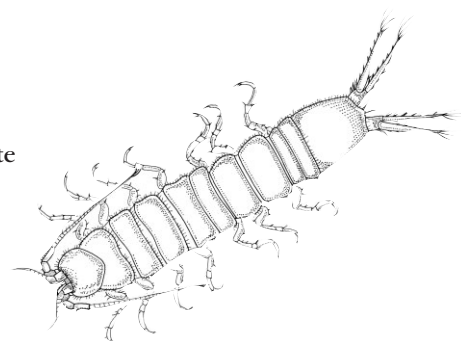
Ein besonderer Lebensraum

Wie bei der Erforschung der übrigen Natur auch waren es die großen Komponenten dieses Ökosystems, die als erste bekannt wurden. Ende des 18. Jahrhunderts begegnete man in Höhlen kleinen Krebsen, die typische Kennzeichen ihres Höhlendaseins aufwiesen: Sie hatten keine Augen und ihr Körper war milchig-weiß in Ermangelung von Körperpigment. Sie galten als genuine Höhlentiere und niemand kam auf die Idee, sie könnten von anders woher stammen. Das änderte sich, als gegen Ende des 19. Jahrhunderts aus Angst vor Mikroben Trinkwasserbrunnen in den Mittelpunkt wissenschaftlichen Interesses rückten. Dabei stieß man auf eine vielfältige Tierwelt unterschiedlicher Herkunft.

Da war zunächst eine Fülle von Tieren, die bisher noch keiner gesehen hatte, wie etwa die später Brunnenkrebse genannten *Bathynellacea* (Abbildung 1-G), von denen wir heute wissen, dass sie fast überall auf der Erde im Grundwasser verbreitet sind. Dann gab es Tiere, die man schon aus oberirdischen Gewässern kannte und von denen man annahm, dass sie von oben in die Brunnen gelangt sein mussten, und schließlich tauchten Tiere auf, die bis dahin nur aus Höhlen bekannt gewesen waren. Das nährte den Verdacht, dass diese Lebewesen eigentlich ins Grundwasser als ihren wahren Lebensraum gehörten und nicht als typische Elemente in Höhlen, in die sie mit einsickerndem Grundwasser gelangt sein mochten. Als man schließlich Mitte des 20. Jahrhunderts in Grabungen in sandig-kiesigen Ufern von Flüssen und Seen mit anschließender Filtration des sich an ihrem Boden sammelnden Wassers denselben Faunenelementen wiederbegegnete, begann man von einer Grundwasserfauna zu sprechen. Ihre Erforschung stand fortan im Vordergrund.

Man wandte sich zunächst in Europa, dann auch im Rest der Welt der Erfassung des Artenbestandes zu [1], die noch lange nicht abgeschlossen ist. Danach rückten die physiologischen und ökologischen Besonderheiten der Grundwasserfauna in den Mittelpunkt des Interesses und kaum einer kümmerte sich um die übrigen Organismen im Grundwasser. Zwar waren bei den faunistischen Untersuchungen nebenher Einzeller aufgefallen, aber sie und die Bakterien mussten warten, bis in den 80er Jahren des letzten Jahr-

hunderts ihre Stunde schlug. Heute denkt man eher an sie als an die Tiere, wenn von Grundwasserorganismen die Rede ist.



Tiere im Grundwasser

Sehen wir uns zunächst die Tiere an.

Die Fülle der Tiergruppen, aus denen sich die Fauna des Grundwassers rekrutiert, ist für jeden eine Überraschung, der sich zum ersten Mal damit beschäftigt. Das Hauptkontingent wird von „Würmern“ und Krebstieren (Crustacea) gestellt. Plattwürmer (Plathelminthes) (Abbildung 1-C), Rädertierchen (Rotatoria), Fadenwürmer (Nematoda) (1-D), Vielborster (Polychaeta) (1-B) und Wenigborster (Oligochaeta) (1-A) gibt es in einer Artenfülle, die nur unzureichend bekannt ist. Wesentlich mehr weiß man über die Krebstiere, die mit folgenden Gruppen im Grundwasser vertreten sind: Wasserflöhe (Cladocera), Ruderfußkrebse (Copepoda) (1-E), Muschelkrebse (Ostracoda) (1-I), Brunnenkrebse (Bathynellacea) (1-G), Flohkrebse (Amphipoda) (1-H) und Asseln (Isopoda) (1-F). Komplettiert wird das Faunenspektrum von Schnecken (Gastropoda), Bärtierchen (Tardigrada) und Milben (Acari).

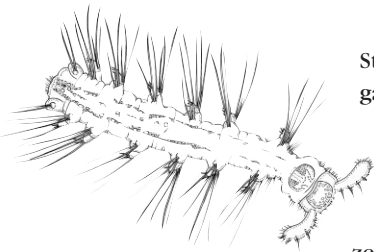
Vorkommen im Grundwasser kann ökologisch dreierlei bedeuten:

Auf der einen Seite stehen die echten Grundwassertiere (Stygobionten), die strikt ans Grundwasser gebunden sind und in ihm ihr gesamtes Leben verbringen. Das andere Extrem bilden die „Grundwasserfremdlinge“ (Stygoxen), die aus oberirdischem Wasser ins Grundwasser verschlagen werden können, wo sie wohl auch weiterleben, sich aber nicht fortpflanzen können. Zwischen beiden stehen die „Grundwasserfreunde“ (Stygophilen), die in der Lage sind, sowohl oberirdisch als auch unterirdisch zu leben und sich zu vermehren. Alle Grundwassertiere, das ist unbestritten, stammen von oberirdischen Vorfahren ab, und die

TAB. 1 | ENTWICKLUNGSZYKLUS VON RUDERFUSSKREBSEN

	<i>Bryocamptus zschokkei</i>	<i>Antrocamptus catherinae</i>	<i>Parastenocaris phyllura</i>
Lebensdauer	8 Monate	24 Monate	30 Monate
Dauer der Entwicklung im Ei	1 Woche	7 Wochen	?
Dauer der Postembryonalentwicklung	4 Wochen	14 Wochen	22 Wochen
Fortpflanzungsrythmus	1 Gelege je Woche	1 Gelege alle 3 Wochen	1 Gelege alle 14 Tage
Eizahl pro Gelege	23	6	2
Postembryonalentwicklung: Phase vom Schlüpfen aus dem Ei bis zum Erwachsenwerden.			

Angaben zum Entwicklungszyklus dreier Ruderfußkrebs-(Copepoden-)Arten. *Bryocamptus zschokkei* (Schmeil, 1893) lebt oberirdisch und ist 0,6 mm lang. *Antrocamptus catherinae* (Chappuis & Rouch, 1960) lebt unterirdisch und ist 0,5 mm lang. *Parastenocaris phyllura* (Kiefer, 1938) lebt unterirdisch und ist 0,5 mm lang. (Nach [13] und [14]).



Stygophilen deuten an, wie sich der Übergang vollzogen haben könnte [2].

Dort wo Grundwasser und Fließgewässer sich begegnen, gibt es im Sand und Kies der Flussufer eine Übergangszone, die als hyporheisches Interstitial bezeichnet wird. Unter Interstitial versteht man den Zwischenraum, das Lückensystem, zwischen Sandkörnern oder größeren Partikeln, in denen das Grundwasser fließt. Eine solche Schnittstelle zwischen zwei benachbarten Ökosystemen wie etwa das hyporheische Interstitial wird heute als Ökoton bezeichnet. Im Oberflächen-Grundwasser-Ökoton tritt eine graduelle Änderung der Milieubedingungen ein und es begegnen sich Grundwassertiere und solche aus dem oberirdischen Fließgewässer. Zu diesen gehören z. B. Insektenlarven, die sich, bevor sie sich als Erwachsene in den Luftraum erheben, in das Lückensystem der sandig-kiesigen Ufer zurückziehen, weil dort die Strömung verlangsamt ist und sie vor Feinden (Fischen) sicher sind. Wie sie verhalten sich viele andere Tiere auch, von denen einige immer weiter Richtung Grundwasser vordringen und sich nach und nach so anpassen, dass sie schließlich zu echten Grundwassertieren werden.

Typische Merkmale von Grundwassertieren

Echte Grundwassertiere erkennt man an einer Reihe von Anpassungen [3]. Die meisten sind mikroskopisch klein (1 mm lang oder noch kleiner), weil die Enge des Lückensystems mehr nicht zulässt. Allerdings kommen in größerem Material (z. B. Schotter) auch größere Tiere vor, die bei

1–3 cm Länge gerade mit bloßem Auge sichtbar sind. Sie alle sind in Ermangelung von Licht augenlos und ohne Körperpigment und erscheinen durchsichtig weißlich. Verglichen mit ihren oberirdischen Verwandten haben sie eine hohe Lebenserwartung. Eine Wasserassel (*Asellus aquaticus* L.) aus oberirdischen Fließgewässern lebt ein Jahr oder etwas länger, während eine Grundwasserassel (*Stenasellus virei* Dollfus, 1897; Abbildung 1-F) 15 Jahre alt wird. Dafür braucht sie auch sehr lange, um nach dem Schlüpfen aus dem Ei erwachsen zu werden: Eine oberirdische Wasserassel benötigt dafür knapp 4 Monate, die Grundwasserassel 6–8 Jahre. Um wachsen zu können, müssen Asseln sich häuten. Wasserasseln tun das einmal alle 2–3 Wochen, die genannte Grundwasserassel einmal im Jahr. Der Häutungsprozess selbst dauert bei der Wasserassel anderthalb Tage, die Grundwasserassel benötigt 14 Tage. Bezogen auf die Lebensdauer produzieren beide Arten etwa die gleiche Menge Eier, bloß ist der Fortpflanzungsrythmus völlig verschieden. Die Wasserassel bringt es auf ein Gelege pro Monat, während die Grundwasserassel je nach Nahrungsangebot nur alle 2–4 Jahre ein Gelege hervorbringt.

Was für die Asseln geschildert wurde, gilt auch für andere Grundwassertiere (Tabelle 1), wenn auch bei einigen ein Anstieg der Temperatur zur Beschleunigung der Lebensvorgänge beitragen kann. Doch bleibt immer ein Unterschied zu den oberirdischen Verwandten. Das Leben im Grundwasser pulsiert in einem völlig anderen Takt. „Leben in Zeitlupe“, so war einmal ein Bericht in der Presse überschrieben. Der Grund dafür ist eine reduzierte Stoffwechselaktivität, die Grundwassertiere physiologisch von ihren oberirdischen Verwandten unterscheidet. Messungen der Atmungsaktivität haben ergeben, dass sie bei oberirdischen Vertretern im Durchschnitt 6–7 mal höher liegt als bei unterirdischen [4].

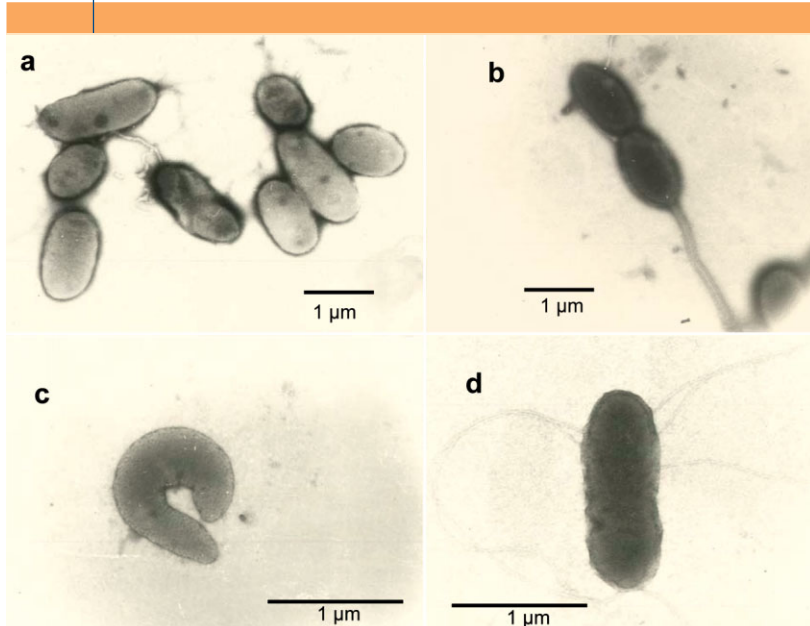
Auf der Suche nach Gründen für diese geringe Stoffwechselaktivität richtet sich der Blick auf das Nahrungsangebot. Aber bevor darauf eingegangen werden kann, ist es an der Zeit, einen Blick auf die anderen Bewohner des Grundwassers zu werfen. Sie alle sind noch viel kleiner und insofern war es schon berechtigt, eingangs von den Tieren als den großen Komponenten der unterirdischen Lebensgemeinschaft zu sprechen.

Die unterirdische Welt der Mikroben

Ohne Mikroskop sind Mikroorganismen nicht zu sehen, und selbst mit diesem Hilfsmittel sind häufig Anfärbungen notwendig, um die Zellen in einer Wasserprobe im mikroskopischen Bild erkennen zu können. Die durchschnittliche Größe von Bakterienzellen beträgt z. B. zwischen 1 µm und 10 µm, also ein Tausendstel bis ein Hundertstel eines Millimeters (Abbildung 2).

Bei den Mikroorganismen unterscheidet man die autochthonen, die natürlicherweise im Grundwasser vorkommen und als grundwassertypisch anzusehen sind, von den allochthonen, den „fremden“ und zufällig eingetragenen [5]. Es ist offen, woher die autochthonen Grund-

ABB. 2 | RASTERELEKTRONISCHE AUFNAHMEN ...



... von Grundwasserbakterien (ca. 20.000-fache Vergrößerung): a = Gruppe von Bakterien, z. T. aneinander geheftet, b = angeheftetes gestieltes Bakterium (*Caulobacter spec.*), c = gekrümmtes Bakterium (evt. *Vibrio spec.*), d = Bakterium mit Geißeln zur Fortbewegung im Wasser.

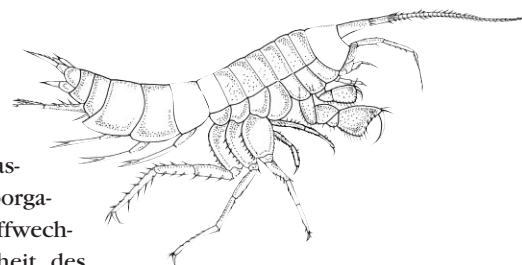
wassermikroben stammen und wann und wie dieser Lebensraum von ihnen besiedelt wurde. In oberflächennahen Bereichen spielen sicherlich der Eintrag und Transport mit dem infiltrierenden Niederschlags-, Oberflächen- oder Sickerwasser sowie die Anpassungsfähigkeit auch standortfremder Organismen und deren Weiterentwicklung eine Rolle. Es wurden jedoch auch in Tiefengrundwässern Bakterien nachgewiesen, die entsprechend des Grundwasseralters vor 3000 bis 4000 Jahren in den Untergrund gelangt sein müssen. Auch diese Mikroorganismen können vertikal im Laufe der Jahrhunderte in die Tiefe transportiert worden sein – oder bereits mit der Sedimentablagerung des Grundwasserleiters vor Tausenden von Jahren. Auf jeden Fall sind die Passagen für Tiefengrundwässer langwierig und ermöglichen eine eigene Selektionsdynamik im Untergrund [6]. Es sind auch in tiefsten Schichten stoffwechselaktive und artenreiche mikrobielle Lebensgemeinschaften zu finden, die sich in ihrer Zusammensetzung von der Besiedlung oberflächennaher Grundwässer grundsätzlich unterscheiden können.

Krankheitserreger sind keine typischen Grundwasserbewohner

Mikrobiologische Untersuchungen zur Besiedlung des Grundwasserraumes befassten sich mit Blick auf die Trinkwasserversorgung in der Vergangenheit – und vielfach auch noch heute – überwiegend mit hygienischen Fragestellungen, d. h. mit der Anzahl, dem Transport und Überleben von möglichen Krankheitserregern. Die meisten der mit dem Wasser übertragbaren Erreger wie *Vibrio cholerae* (Choleraerreger) oder *Salmonella typhi* (Thyphuserreger) erreichen über häusliche Abwässer die aquatische Umwelt. Früher leitete man diese Abwässer direkt in Flüsse oder Seen, heute können diese Bakterien auch über Kläranlagen in die Umwelt eingetragen werden. Coliforme Bakterien und *Escherichia coli* dienen hierbei als Indikatorbakterien für fäkale Verunreinigungen. In Ausnahmefällen (zu dünne Filterschichten, beschleunigte Fließwege durch Baumwurzeln oder Baumaßnahmen) können diese tatsächlich in das Grundwasser gelangen. Sie zeigen an, dass das Wasser ohne weitere Aufarbeitung nicht für die Trinkwasserversorgung geeignet ist.

Diese eingetragenen Mikroorganismen gehören jedoch nicht zur natürlichen Grundwasserbiozönose [5, 6]. Sie können unter Grundwasserbedingungen nur begrenzte Zeit überdauern und sich nicht im Grundwasser vermehren. Für coliforme Bakterien und *E. coli* geht man von einer Überlebensdauer von durchschnittlich 50 Tagen aus – eine Zeitspanne, die bei der Festsetzung von Grundwasserschutzgebieten zu Grunde gelegt wird. Einzeluntersuchungen zeigen, dass je nach hydrogeochemischen Bedingungen und Bakterienart die Überlebensdauer und damit die mögliche Transportstrecke auch höher sein kann: So wurde in der USA nachgewiesen, dass injizierte Bakterien bis zu 920 m mit Geschwindigkeiten von 200 bis 350 m pro Tag transportiert wurden.

Nach dem heutigen Kenntnisstand sind es die autochthonen, also standortspezifischen und im Grundwasser vermehrungsfähigen Mikroorganismen, die aufgrund ihrer Stoffwechselaktivitäten die Beschaffenheit des Grundwassers wesentlich beeinflussen. Die größte Gruppe von Grundwassermikroorganismen stellen dabei die Bakterien dar. Außerdem werden in Grundwasserleitern einige Protozoen, also eukaryontische Einzeller beschrieben. Hierzu gehören vereinzelt auch Fadenpilze oder Hefen, die bis in 10 m Tiefe gefunden wurden. Sie könnten als mögliche Antibiotikaproduzenten eine Rolle für das biologische Gleichgewicht in Hinblick auf eine Bakterienreduzierung spielen. So konnte eine Hemmung des Wachstums von *E. coli* durch Grundwasserpilze nachgewiesen werden.



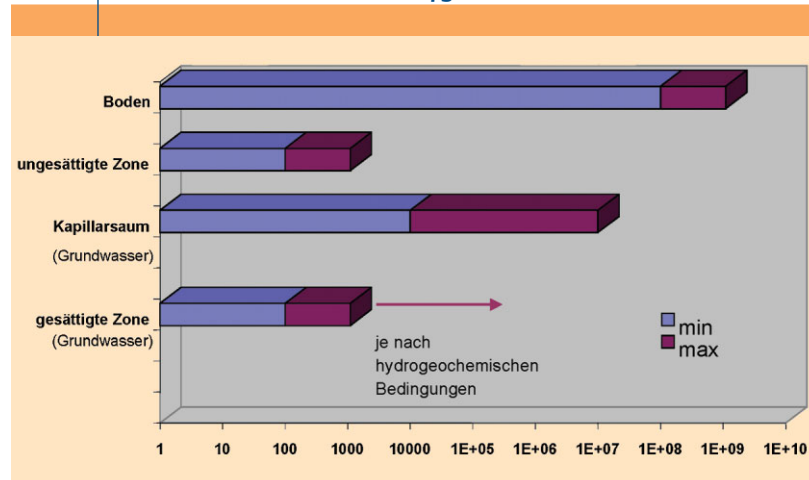
Algen oder Cyanobakterien (früher als Blaualgen bezeichnet) sind als „Primärproduzenten“ auf Photosynthese und damit auf Licht angewiesen. Sie sind im Untergrund nicht als standortspezifisch anzusehen, sondern werden mit dem Oberflächenwasser in den Untergrund infiltriert, wo sie jedoch im allgemeinen keine Lebensgrundlage finden.

Auch Viren werden im Grundwasserraum eher in geringer Anzahl gefunden. Als Verunreinigungen durch den Eintrag belasteter Oberflächenwässer können Enteroviren in oberflächennahen Grundwässern auftreten. Infolge der Stoffwechselleistung standortspezifischer Mikroorganismen wird ihre Persistenz im Untergrund jedoch erheblich verkürzt und sie werden letztendlich abgebaut [5].

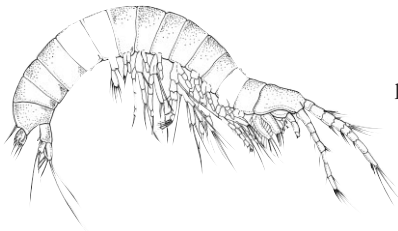
Geringere Anzahl, höhere Diversität

Der Gehalt an Mikroorganismen korreliert im Grundwasser nicht zwangsläufig mit dem Gehalt an organischen Kohlenstoffverbindungen, die als Nahrungsgrundlage dienen

ABB. 3 | LEBENDBAKTERIENZAHLEN/g TG



Bakterienzahlen (KBE/gTG) in Boden und Grundwassersedimenten, Literaturdaten [7].



können. Es wurden mikroskopisch Gesamtbakterienzahlen im Grundwasser je nach Feststoffmatrix, Korngrößen und Tiefe zwischen 10^4 und 10^8 Zellen pro Gramm Trockengewicht nachgewiesen, also ein bis mehrere Zehnerpotenzen weniger als im Boden [7]. Die nachgewiesenen Lebendbakterienzahlen als koloniebildende Einheiten (KBE/ml) liegen üblicherweise aufgrund der Selektivität von Kultivierungsmedien nochmals um 2 bis 3 Zehnerpotenzen niedriger (Abbildung 3). In oberflächennahen Grundwässern hängt die Konzentration zusätzlich eingetragener Bakterien, Algen, Pilze und Viren zudem stark von der Belastung des infiltrierenden Wassers sowie den jeweiligen die Transport- und Eliminierungsprozesse bestimmenden Randbedingungen ab.

Der größte Teil der autochthonen Mikroorganismen ist im Untergrund jedoch nicht im freien Wasser, sondern als Aufwuchs auf der Oberfläche der festen Matrix zu finden. An Kornoberflächen werden 10- bis 100-fach höhere Bakterienzahlen gefunden als im Wasser. Vieles deutet zudem darauf hin, dass sich diese Aufwuchsbesiedlung in ihrer Zusammensetzung und physiologischen Kompetenz von der Besiedlung des freien Grundwassers unterscheidet. Trotz der im Vergleich zum Boden geringeren Besiedlungsdichte ist im Grundwasserraum von einer hohen morphologischen und physiologischen Typenvielfalt auszugehen, wie sie häufig in oligotrophen, also nährstoffarmen Gewässern beobachtet wird [6, 8].

Bedeutung und Zusammensetzung der bakteriellen Besiedlung

In oberflächennahen Grundwässern kommt den Bakterien zweifellos die bedeutendste Rolle beim Abbau gelöster organischer Kohlenstoffverbindungen zu. Mit dem Abbau organischer Inhaltsstoffe gehen durch den gekoppelten Verbrauch anorganischer Wasserinhaltsstoffe wie Sauerstoff, Nitrat und Sulfat eine Reihe von Veränderungen der Wasserbeschaffenheit einher (Abbildung 4). Die meisten der

mikrobiellen Abbauprozesse, die größten Veränderungen der Besiedlungszusammensetzung und die biologisch bedingten Veränderungen der Wasserbeschaffenheit können in den obersten Infiltrationszonen beobachtet werden. Während der Infiltration des Wassers in den Untergrund kommt es parallel zur Abnahme von Nährstoffen und zum Wechsel von Redoxverhältnissen zu einer deutlichen Abnahme der Bakterienkonzentration bei einer gleichzeitigen Zunahme der Diversität und physiologischen Kompetenz der Mikroorganismen.

Häufig lässt sich parallel zu den Milieuveränderungen eine Abfolge ökophysiologischer Bakteriengruppen nachweisen, z. B. Nitrifizierer, Denitrifizierer oder sulfatreduzierende Bakterien bis hin zu methanogenen Bakterien. Dies weist deutlich darauf hin, dass die Stoffwechselaktivitäten dieser Gruppen die Grundwasserbeschaffenheit maßgeblich beeinflussen [5, 9].

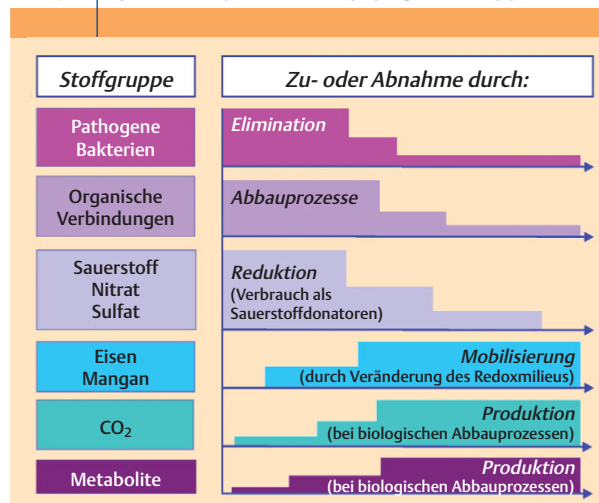
Die taxonomische Einordnung isolierter Grundwasserbakterien ist bisher recht unvollständig. Viele der im Grundwasser lebenden autochthonen Bakterien gelten noch als unbekannt und sind mit den heutigen Mitteln vielfach nicht kultivierbar. Nach allgemeinen Schätzungen werden mit den üblichen Kultivierungsverfahren nur 0,1% bis 10% der Grundwasserbakterien erfasst. Aus diesem Grund sind verstärkt Bemühungen notwendig, zur Identifizierung und Charakterisierung von Grundwasserbakterien kultivierungsunabhängige molekularbiologische Methoden anzuwenden [10]. Hiermit ließ sich bereits eine Reihe von Grundwasserbakterien zusätzlich identifizieren (Abbildung 5).

Untersuchungen isolierter Grundwasserbakterien sowohl mittels klassischer (morphologischer bzw. physiologischer) als auch moderner molekularbiologischer Verfahren (PCR, DNA-Fingerprints, Sequenzierungen) zeigen eine hohe mikrobielle Diversität im Untergrund. Diese ist eine wichtige Voraussetzung für die optimale Nutzung der im Grundwasser nur in geringen Konzentrationen vorhandenen Nährstoffe und für eine Vielzahl möglicher mikrobieller Stoffwechselleistungen.

Physiologische Untersuchungen isolierter Grundwasserbakterien aus unbelasteten Grundwasserleitern zeigten, dass von Grundwasserpopulationen ein ungewöhnlich breites Spektrum organischer und anorganischer Verbindungen genutzt werden kann [6].

Diese hohe biologische Diversität muss als wichtiger Faktor für die Pufferkapazität eines ökologischen Systems bei natürlichen oder anthropogen verursachten Milieuveränderungen (z.B. Schadstoffeinträgen) angesehen werden. Die Auswirkungen solcher Einträge auf das Gesamtökosystem Grundwasser und auf das gesamte im Untergrund vorhandene Nahrungsgefüge sind bisher noch völlig unerforscht. Ein nachhaltiger Grundwasserschutz ist jedoch ohne die Berücksichtigung der vielschichtigen Prozesse und Wechselwirkungen dieses Lebensraumes letztendlich nicht möglich.

ABB. 4 | OBERFLÄCHENNAHES GRUNDWASSER

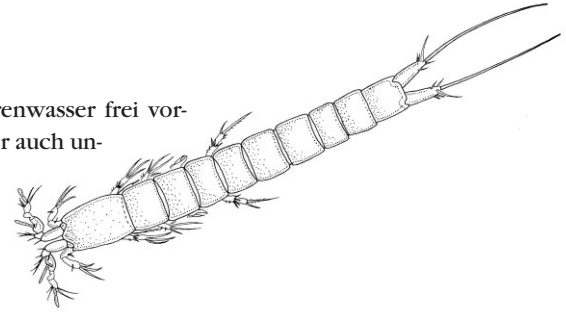


Auswirkungen mikrobieller Aktivitäten auf die Grundwasserbeschaffenheit.

Wechselbeziehungen zwischen den Organismen

Wegen des fehlenden Lichts sind Grundwasserorganismen für ihre Ernährung auf Zufuhr von außen angewiesen. Feines partikuläres und vor allem gelöstes organisches Material gelangen mit dem Sickerwasser in die Tiefe. Der größte Teil davon wird schon im Boden abgebaut, so dass nur ein Bruchteil das Grundwasser erreicht, der von den dort lebenden Bakterien umgesetzt wird. Vom Abbau organischer Stoffe durch Mikroorganismen war bereits die Rede. Dies betrifft in erster Linie gelöste Stoffe. Pilze können daneben auch partikuläre organische Stoffe angreifen. Aus totem organischen und z.T. schwer abbaubaren Material wird also lebende Biomasse gebildet. Überwiegend in tiefen Grundwasserschichten, in denen keine höheren Organismen gefunden werden, sind außerdem autotrophe Bakterien nachweisbar, die Biomasse nur aus anorganischen Wasserinhaltsstoffen und Gasen bilden können, z. B. durch CO₂-Fixierung bei gleichzeitiger H₂-Oxidation. Durch diese heterotrophen (Abbau organischer Substanz) und autotrophen mikrobiellen Prozesse wird mikrobielle Biomasse gebildet, die die Nahrungsgrundlage für die höheren Organismen darstellt. [11]. Unter ihnen sind es vermutlich vornehmlich die Einzeller (Protozoen), spezialisierte Geißeltierchen (Flagellaten), Wimpertierchen (Ciliaten) (Abbildung 1-A) und Wechseltierchen (Amöben), die die festsitzenden Bakterien

abweiden oder die im Porenwasser frei vorkommenden filtrieren. Aber auch unter den Tieren gibt es Bakterienkonsumenten, die zusammen mit den Einzellern durch ihren Fraßdruck die Bakteriendichten regulieren und dafür sorgen, dass ihre Populationen in einer produktiven Phase bleiben.



Ein weiterer positiver Effekt der Fraßtätigkeit der Tiere besteht darin, dass sie mit ihren Mundwerkzeugen größere Partikel, die das Lückensystem im Grundwasserleiter blockieren könnten, zerkleinern und bei der Darmassage zusammen mit feinem Sediment zu festen Kotballen formen, die dem Abbau durch Bakterien leichter zugänglich sind [12]. Dies und ihre Bewegungsaktivität halten das Lückensystem offen und gewährleisten eine ungehinderte Zirkulation des Wassers samt der darin enthaltenen Nährstoffe und des Sauerstoffs, der wiederum die Mikroorganismen bedürfen. Kleinere Tiere können vermutlich Nahrungsspezialisten sein, während die großen omnivor sind und nehmen müssen, was sich ihnen bietet: Einzeller, kleinere Tiere und Pflanzenreste (Detritus), die mit einsickerndem Oberflächenwasser infiltriert werden.

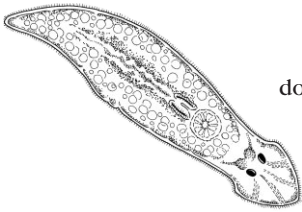
Die Nahrungszufuhr von außen ist begrenzt. Nährstoffarmut ist deshalb ein Kennzeichen der Lebensbedingungen

ABB. 5 | BISHER AUS DEM GRUNDWASSER ISOLIERTE BAKTERIENGATTUNGEN, LITERATURDATEN u.a. [6]

	klassisch	molekularbiologisch		klassisch	molekularbiologisch
Acinetobacter	3, 4, 5	7+	Geothrix		8
Aeromonas	5	8	Gordona		7+
Agrobacterium	2, 6	7-	Hyphomicrobium	2	
Alcaligenes	5 ?		Leptothrix		7+
Allicyclococcus		7-	Methylobacterium		7-
Arthrobacter	4, 5, 6	7+	Micrococcus	1, 4, 5, 6	7+
Aureobacterium		7-	Microcyclus	1, 4, 5, 6	7+
Azospirillum		7-	Microscilla		7-
Bacillus	4, 5, 6	7+	Moraxella	3	
Blastobacter		7-	Mycobacterium	6	7+
Caulobacter	2, 4, 5, 6	7+	Nocardia	1, 2, 6	7+
Chromobacterium	4, 5		Paracoccus	5	
Citrobacter	5		Pelobacter		8
Clavibacter		7+	Planctomyces	2	
Clostridium	2	8	Prosthecomicrobium	2	
Comamonas		7-	Pseudomonas	3, 4, 5, 6	7+
Corynebacterium	4, 5, 6		Rhodobacter		7-, 8
Cytophaga	1, 5		Rhodococcus		7+
Desulfovibrio		8	Rhodocyclus		7-
Desulfuromonas		8	Rothia		7+
Enterobacter	5, 6		Shewanella		8
Erythromicrobium		7+	Sphingomonas		7+
Flavobacterium	1, 3, 4, 5, 6		Staphylococcus	5	7+
Flectobacillus			Streptomyces	5	7+
Flectobacillus			Telluria		7+
Flexibacter	4, 5	7+	Terrabacter		
Frankia		7+	Thiobacillus		8
Gallionella	2		Variovorax		7+
Geobacter		8	Vibrio	4	
			Xantomonas	5	
			Zooglea		7-

1 = Wolters u. Schwartz, 1956
 2 = Hirsch u. Rades-Rohkohl, 1983
 3 = Stetzenbach et al. 1986
 4 = Preuß, 1986
 5 = Kölbel-Boelke et al., 1986
 6 = Preuß, 1991
 7 = Balkwill et al., 1997
 8 = Lovely, 1997

+ = häufig
 - = selten



dort und die betroffenen Organismen haben sich daran angepasst. Ihr Metabolismus ist reduziert und der Rhythmus ihres Lebens einige Takte langsamer als der ihrer oberirdischen Verwandten. Das muss jeder wissen, der störend in das delicate Beziehungsgeflecht dieser Biozönose eingreift, denn bei Veränderungen dauert es lange, bis der ursprüngliche Zustand wieder erreicht ist. Einige Jahre sind dafür nicht genug. Dies gilt nicht nur für die Tiere, sondern auch für die Bakterien, die ihre volle Wirksamkeit nur dann entfalten können, wenn ihre Diversität ungeschmälert ist. Je größer diese Diversität, desto umfangreicher das Spektrum der verfügbaren Stoffwechselltypen. Wem die Qualität des Grundwassers ein Anliegen ist, muss an einer intakten Biozönose interessiert sein, denn das ungestörte Wechselspiel zwischen Bakterien, Einzellern und Tieren ist dafür von größerer Bedeutung als geogene Faktoren. Das kann pauschal schon so gesagt werden, denn Grundwasser lebt, obgleich die Einzelheiten des Zusammenspiels und die Quantifizierung des Beitrags der einzelnen Beteiligten noch weiterer umfangreicher Forschung bedürfen.

Zusammenfassung

Grundwasser ist ein Ökosystem globalen Ausmaßes mit sehr spezifischen Lebensbedingungen. Zu diesen gehören das Fehlen von Sonnenlicht, die Enge des Raumes im Lückensystem grundwasserführender Kiese und Sande, niedrige, aber gleichbleibende Temperaturen sowie ein spärliches Nahrungsangebot. Trotzdem begegnet man im Grundwasser artenreichen Biozönosen, die sich aus Mikroorganismen, Protozoen, Pilzen und Tieren zusammensetzen. Das Zusammenspiel dieser Organismen bestimmt maßgeblich die natürlichen Stoffflüsse und die chemische Beschaffenheit des Grundwassers. Das gelöste und zum Teil auch partikuläre organische Material, das nach der Bodenpassage nur noch in geringen Konzentrationen im Grundwasser ankommt, wird von heterotrophen Bakterien und Pilzen für den Aufbau mikrobieller Biomasse genutzt, die anderen Organismen als Nahrungsgrundlage dient.

Vergleichsweise geringe Biomasse, aber hohe Diversität der Biozönosen sind genauso typisch für das Leben im Grundwasser wie verlangsamte Stoffwechselleistungen und Reproduktionsraten, die ein wichtiger Grund für die Empfindlichkeit dieses Systems gegenüber Störungen von außen sind. Jede Organismengruppe trägt durch vielfältige Funktionen zum Bestand der unterirdischen Lebensgemeinschaften bei. Ein Nachhaltiger Grundwasserschutz erfordert daher vor allem den Schutz dieser Gemeinschaften.

Summary

Groundwater is an ecosystem of global extent with very special living conditions such as lack of sunlight, narrowness of space in the interstices of sand and gravel, low but constant temperatures, and limited nutrient resources. Despite these conditions subterranean biocenoses have a diverse structure and abound in species of bacteria, protozoans, fungi and

metazoans. The activities and interactions of these organisms have a significant effect on the flux of organic and inorganic matter and on groundwater quality. After passing through the soil only rather low concentrations of dissolved and partly also particulate organic matter reach the groundwater. There they are used by heterotrophic bacteria and fungi to produce the biomass supporting other organisms.

Comparatively low biomass but high diversity in species composition and bioactivities are typical for life in the groundwater environment. Slowed-down metabolism and rates of reproduction are also typical and are responsible for the sensitivity of groundwater systems to disturbances from outside. Each group of organisms serves a variety of functions in maintaining the stability of subterranean communities. Sustainable groundwater protection therefore is impossible without the protection of these communities.

Schlagworte

Grundwasser, Grundwasserfauna, Mikroorganismen, Ökosysteme.

Literatur

- [1] L. Botosaneanu, *Stygofauna Mundi*, 1986, E.J. Brill/Dr.W. Backhuys, Leiden.
- [2] H. K. Schminke, Adaptation of Bathynellacea (Crustacea, Syncarida) to life in the interstitial („Zoea-Theory“). *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 1981, 66, 575-637.
- [3] H. K. Schminke, T. Glatzel, Besonderheiten und ökologische Rolle der Grundwassertiere, *Z. dt. geol. Ges.*, 1988, 139, 383-392.
- [4] R. Ginot, V. Decou, *Initiation à la Biologie et à l'Écologie Souterraines*, Jean-Pierre De-large, Paris 1977.
- [5] DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Hrsg.), *Bedeutung biologischer Vorgänge für die Beschaffenheit des Grundwassers*, DVWK-Schriften, Bd. 80, Kommissionsvertrieb Verlag Paul Parey, Berlin 1988.
- [6] G. Preuß und A. Nehrkorn, Mikrobielle Sukzessionen bei der Infiltration von Oberflächenwasser. In: U. Schöttler und U. Schulte-Ebbert (Hrsg.), *Schadstoffe im Grundwasser*, Bd. 3, 1995. Verhalten von Schadstoffen bei der Infiltration von Oberflächenwasser am Beispiel des Untersuchungsgebiets Insel Hengsen im Ruhrtal bei Schwerte, 87-122, DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), Bonn.
- [7] E. L. Madsen und W. C. Ghiorse, Groundwater microbiology: subsurface ecosystem processes. In: T. Ford (ed.), *Aquatic Microbiology*, Blackwell Scientific Publ., Boston, MA 1993, 167-213.
- [8] G. Preuß und A. Nehrkorn, Mikrobielle Sukzessionen im Grundwasser bei der Uferfiltration – Veränderungen in Dichte und Verteilung verschiedener Bakteriengruppen, *Z. dt. geol. Ges.*, 1988, 139, 575-586.
- [9] F. H. Chapelle, *Groundwater microbiology and geochemistry*, John Wiley & Sons, New York 1993.
- [10] B. Kilb; B. Kuhlmann, B. Eschweiler, G. Preuß, E. Ziemann und U. Schöttler, Darstellung der mikrobiellen Besiedlungsstruktur verschiedener Grundwasserhabitate durch Anwendung molekularbiologischer Methoden, *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, 1998, 26, 349-354.
- [11] P. Pospisil, Das Grundwasser – Rohstoff und Lebensraum. In: H. Franz (Hrsg.), *Die ökologische Bedeutung des Wassers*, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien 1992., 33-46.
- [12] D. L. Danielopol, *Der Einfluß organischer Verschmutzung auf das Grundwasser-Öko-system der Donau im Raum Wien und Niederösterreich*. Beiträge Umweltschutz, Lebensmittelangelegenheiten, Veterinärverwaltung 5/83: 5-159, Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz, Wien 1983.

- [13] R. Rouch, Contribution à la connaissance des harpacticides hypogés (Crustacés-Copé-podes), *Annls Spéleol*, **1968**, 23, 5-167.
- [14] T. Glatzel, On the biology of *Parastenocaris phyllura* Kiefer (Copepoda, Harpacticoida), *Stygologia*, **1990**, 5, 131-136.

Die Autoren

Dr. Gudrun Preuß studierte Biologie mit den Schwerpunkten Mikrobiologie, Ökologie und Botanik. 1991 promovierte sie an der Universität Bremen im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes „Schadstoffe im Grundwasser“ über Veränderungen der mikrobiellen Besiedlung im Wasser während unterschiedlicher Infiltrationsprozesse. Seit 1992 arbeitet sie am Institut für Wasserforschung GmbH in Forschungsvorhaben zum biologischen Abbau von organischen Spurenstoffen im Grundwasser sowie über die Erfassung mikrobieller Populationen und deren Aktivitäten im Grund- und Trinkwasser. Als Obfrau leitet sie den Projektkreis „Grundwasserbiologie“ des DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches).

Korrespondenzadresse:

Dr. Gudrun Preuß, Institut für Wasserforschung GmbH,
Zum Kellerbach 46, 58239 Schwerte,
E-Mail: preuss@ifw-dortmund.de

Prof. Dr. H. K. Schminke studierte Biologie und Romanistik in Kiel und Tübingen und legte das erste Staatsexamen für das Lehramt an Höheren Schulen ab. Er promovierte und habilitierte an der Universität Kiel. Seit 1979 ist er Professor für Zoologie (Spezielle Zoologie) an der Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg. Er ist Mitinitiator des „Deutschen Zentrums für Marine Biodiversitätsforschung“ (DZMB) in Wilhelmshaven, Gründungspräsident (1997-2000) der „Gesellschaft für Biologische Systematik“ (GfBS) und seit August 2002 Präsident der „World Association of Copepodologists“ (WAC). Forschungsschwerpunkte: Systematik und Ökologie von Grundwassertieren, Systematik und Phylogenie der Ruderfußkrebse (Copepoda), Biodiversität des Tiefsee-Meiobenthos.

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. H. K. Schminke, Fakultät V, Institut für Biologie und Umweltwissenschaften, Universität Oldenburg, Postfach 2503, 26111 Oldenburg,
E-Mail: schminke@uni-oldenburg.de