



Astrid MEYER, Maria AVRAMOV, Lucas FILLINGER, Katrin HUG, Cornelia SPENGLER,
Hans Jürgen HAHN und Christian GRIEBLER

Das Grundwasser unter die Lupe nehmen: Lebensgemeinschaften als Anzeiger der Grundwasserqualität

Grundwasser ist eine lebenswichtige Ressource für den Menschen, aber auch Lebensraum vielfältiger Lebensgemeinschaften aus Mikroorganismen und einzigartigen wirbellosen Tieren. Um dieses kostbare Gut für kommende Generationen zu erhalten, muss Grundwasser nicht nur in ausreichender Menge und guter chemischer Qualität bewahrt werden – es sollten vielmehr Grundwasserleiter in ihrer Gesamtheit als Ökosystem gesetzlich berücksichtigt und überwacht werden. Hierfür fehlt derzeit noch, sowohl in Deutschland als auch in der EU, der erforderliche rechtliche Rahmen. Dies ist zum Teil der Tatsache geschuldet, dass lange Zeit keine geeigneten Kriterien verfügbar waren, um den Zustand von Grundwassersystemen aus ökologischer Sicht zu bewerten. Eine solche ökologische Bewertung birgt jedoch im Vergleich zur rein chemischen Wasseruntersuchung viele Vorteile und ist für den nachhaltigen Schutz des Ökosystems unabdingbar. Wir stellen hier erste biologisch-ökologische Bewertungsansätze vor, welche auch mikrobiologische und faunistische Parameter berücksichtigen und die als Grundlage für eine flächendeckende, routinemäßige Grundwasserbewertung und -überwachung dienen können. Unsere Bewertungskriterien und Verfahren stehen ab sofort als Tool-Box den Behörden und der Wasserwirtschaft zur Verfügung.

Abbildung 1

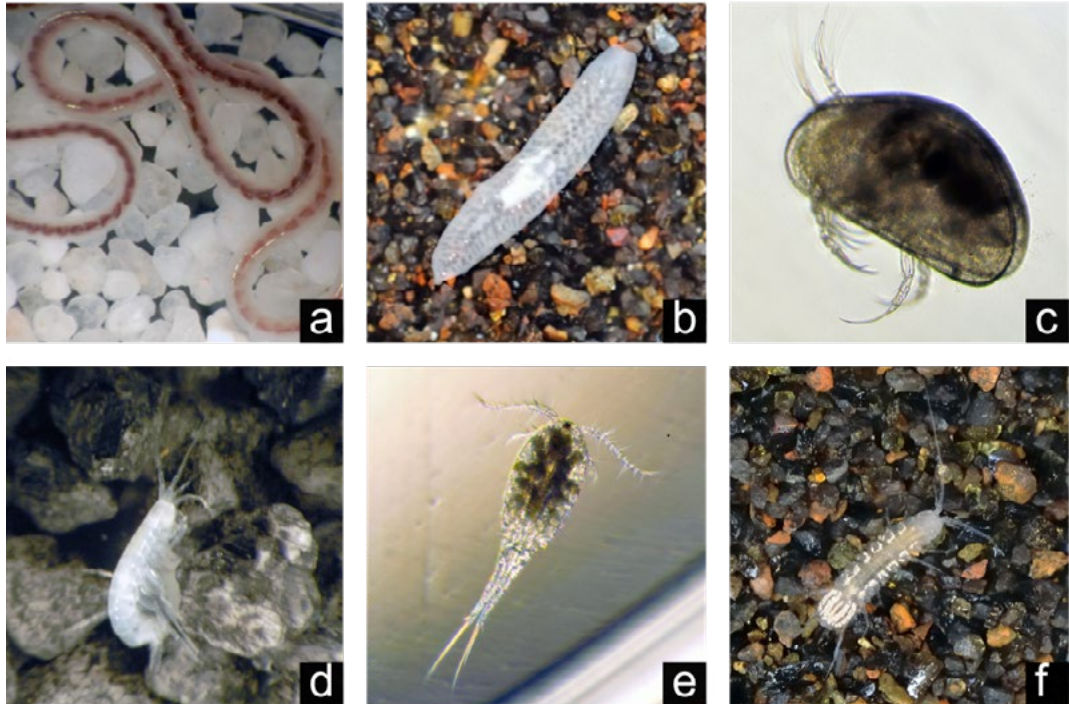
Grundwasserasseln wie diese (*Proasellus slavus*) haben vielfältige Anpassungen an ihren Lebensraum entwickelt – sie haben einen verlangsamt Stoffwechsel und können so über lange Zeiträume mit nur wenig Nahrung auskommen, sie sind langlebig und haben einen empfindlichen Tastsinn. Aufgrund des fehlenden Lichts sind zudem viele Grundwasserarten pigmentlos (Foto: Karsten Grabow).

Abbildung 2

Typische Bewohner
des Grundwassers:

- (a) Gliederwurm
(Oligochaeta, zirka 5 cm),
- (b) Strudelwurm
(Turbellaria, zirka 7 mm),
- (c) Muschelkrebs
(Ostracoda, zirka 0,7 mm),
- (d) Grundwasserflohkrebs
(*Niphargus inopinatus*,
zirka 5 mm),
- (e) Hüpfertling
(Cyclopoida, zirka 0,7 mm),
- (f) Grundwasserassel
(*Proasellus cavaticus*,
zirka 4 mm);

(Fotos: Michael Haggemüller, Augsburg (a, c, e);
Günter Teichmann (b, f)
und Maria Avramov (d),
Helmholtz Zentrum
München).

**Grundwasser: Ressource und Lebensraum**

Grundwasser ist für den Menschen eine lebenswichtige Ressource. In Deutschland entstammen allein 70 % des Trinkwassers dem Untergrund. Daneben ist Grundwasser essenziell für die Bewässerung in der Landwirtschaft und wichtiges Kühl- und Lösemittel für die Industrie. Nicht zuletzt sind Grundwasserleiter aber auch Lebensraum für besondere Lebensgemeinschaften und – anders als lange Zeit angenommen – „weit davon entfernt, biologische Wüsten zu sein“ (BOULTON 2009). Sie sind bis in große Tiefen von unzähligen Mikroorganismen besiedelt (GRIEBLER & LUEDERS 2009) und – sofern ein Minimum an Sauerstoff im Grundwasser vorhanden ist – auch von kleinen Wirbellosen (Invertebraten) wie Krebstieren (Flohkrebsse, Asseln, Hüpfertlinge, Muschel- und Brunnenkrebsse), Würmern, Schnecken, Muscheln und Milben (BERKHOFF et al. 2015; HAHN 2003). Diese sogenannte Stygofauna des Grundwassers, ist in vielerlei Hinsicht außergewöhnlich. Sie zeichnet sich durch einen hohen Anteil an Endemiten aus – an Arten also, die nur in räumlich sehr begrenzten Gebieten vorkommen. Darüber hinaus finden sich darin zahlreiche Reliktformen, deren heutiges Verbreitungsgebiet die alten Flussgebietsverläufe, beispielsweise der Donau oder des Rheins, widerspiegelt. Andere lassen in ihrer Verbreitung die Ausdehnung uralter Meeresgebiete, wie die des Urmitelmeers Tethys, erkennen (HAHN 2015). Typisch für Grundwassertiere ist zudem ihr „hoher Seltenheitsgrad“: 50 %, also die Hälfte aller Arten, kommen an weniger als 1 % der Standorte vor

(HAHN & FUCHS 2009). Allein in Europa, sind zurzeit etwa 2.000 Arten bekannt, weltweit sind es etwa 7.700 (GIBERT & CULVER 2004). Es werden jedoch kontinuierlich neue, bisher unbekannte Arten entdeckt, sodass Schätzungen zufolge weltweit 50.000 bis 100.000 echte Grundwasser-Arten (Stygobionte) existieren (CULVER & HOLSINGER 1992). Die verborgenen Ökosysteme unter unseren Füßen hegen somit einen wertvollen Schatz, den es behutsam zu bewahren gilt.

Darüber hinaus agieren Grundwasser-Organismen als unverzichtbare „Ökosystemdienstleister“ für uns Menschen, da sie viele Schlüsselfunktionen übernehmen, allem voran die Reinigung des Grundwassers. Die vielleicht wichtigsten mikrobiologisch-katalysierten Prozesse sind der Abbau organischer Verbindungen (inklusive Schadstoffen), der Umsatz und die Rückgewinnung von Nährstoffen sowie die antagonistische Wirkung auf pathogene Keime und Viren (KORBEL & HOSE 2011; GRIEBLER et al. 2014; FEICHTMAYER et al. 2017). Zudem halten Grundwassertiere den Porenraum im Aquifer (der Grundwasser führenden Erdschicht) durch sogenannte Bioturbation frei, darunter versteht man das Umlagern von Sediment und das Graben von Gängen. So wird der ungehinderte Fluss des Wassers ermöglicht (STUMPP & HOSE 2017).

Trotz der Vielfalt an Bewohnern wurde das Grundwasser bis vor wenigen Jahren – im Gegensatz zu Oberflächengewässern – ausschließlich als Ressource für Trink- und Brauchwasser wahrgenommen.

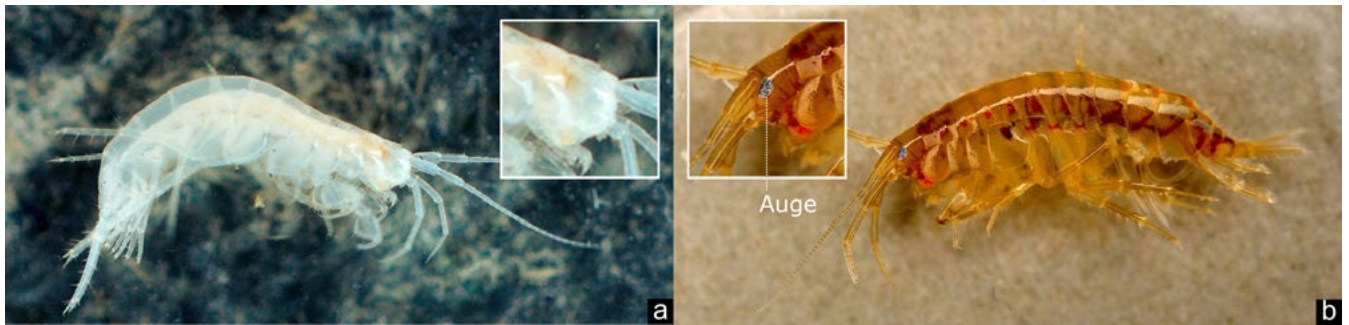


Abbildung 3

Flohkrebse aus dem Grundwasser (a) und Oberflächengewässern (b) im Vergleich: (a) *Niphargus fontanus*, zirka 7 mm lang, ist unpigmentiert und hat keine Augen; (b) *Gammarus pulex*, zirka 2 cm lang, hat einen deutlich pigmentierten Körper und große Augen (siehe vergrößerten Ausschnitt; Fotos: Günter Teichmann (a) und Maria Avramov (b), Helmholtz Zentrum München).

nommen und weniger als Lebensraum (DANIELOPOL & GRIEBLER 2008). Dies hat zur Folge, dass dort weder die Eingriffsregelung, noch entsprechende weitere gesetzliche Regelungen zum Arten- und Biotopschutz, wie beispielsweise die Fauna-Flora-Habitat (FFH)-Richtlinie oder die Bundesartenschutzverordnung, zur Anwendung kommen (HAHN et al. 2018). Dabei sind – aufgrund des hohen Seltenheits- und Endemismusgrades im Grundwasser – die Risiken für einen Verlust seltener Arten im Zuge anthropogener Störungen ausgesprochen hoch. In diesem Zusammenhang hat in den letzten 10 Jahren zwar ein Wandel stattgefunden, weg von der Betrachtung als leblose Ressource hin zum Ökosystem, doch bildet sich dieser Gesinnungswandel bislang nicht in den grundwasserbezogenen Richtlinien und Gesetzen ab. Während für Oberflächengewässer bereits seit beinahe 20 Jahren gesetzlich festgelegte Vorgaben zur Berücksichtigung ökologischer Kriterien auf EU-Ebene (EG-WRRL 2000) existieren, werden Grundwässer gemäß der europäischen Grundwasserrichtlinie (EG-GWRL 2006) derzeit ausschließlich nach ihrem mengenmäßigen und ihrem physikalisch-chemischen Zustand beurteilt (HAHN et al. 2018). Werden ökologische Aspekte bei der Bewertung oder im langfristigen Monitoring berücksichtigt, so geschieht dies auf freiwilliger Basis. Diese gesetzliche Regelungslücke wird häufig dadurch begründet, dass das Wissen um die Grundwasserlebensgemeinschaften und deren Ökosysteme unzureichend und lückenhaft sei und dass somit auch keine geeigneten Kriterien vorhanden seien, um den ökologischen Zustand des Grundwassers zu bewerten. Inzwischen kann dieser Vorbehalt angesichts der vielfältigen und qualitativ hochwertigen, verfügbaren wissenschaftlichen Studien über Grundwasserökosysteme als ausgeräumt gelten.

Einige Länder haben in dieser Hinsicht eine Vorreiterrolle gegenüber der Europäischen Gemeinschaft übernommen – beispielsweise die Schweiz (GSchV 1998) und Australien (EPA 2003). Die grundwassertypischen Arten und Gemein-

schaften müssen dort in der Bewertung der Grundwasserlebensräume seit mehr als einem Jahrzehnt berücksichtigt werden. In Australien unterliegt das Grundwasser mit seinen Lebensgemeinschaften zudem der Eingriffsregelung (HAHN et al. 2018). Jedoch gibt es auch europaweit bereits positive Entwicklungen hin zu einer ökologisch-nachhaltigen Nutzung – so zum Beispiel im aktuellen Leitfaden für Tierarzneimittel im Grundwasser (EMA 2017). Und auch die EU-Grundwasser-Tochtrichtlinie erkennt das Grundwasser erstmals als „Ökosystem“ an und hält fest, dass „Forschungsarbeiten durchgeführt werden sollten, um bessere Kriterien für die Qualität und den Schutz des Grundwasserökosystems zu erhalten“ (EG-GWRL 2006).

Ökologische Bewertung von Grundwasser-ökosystemen

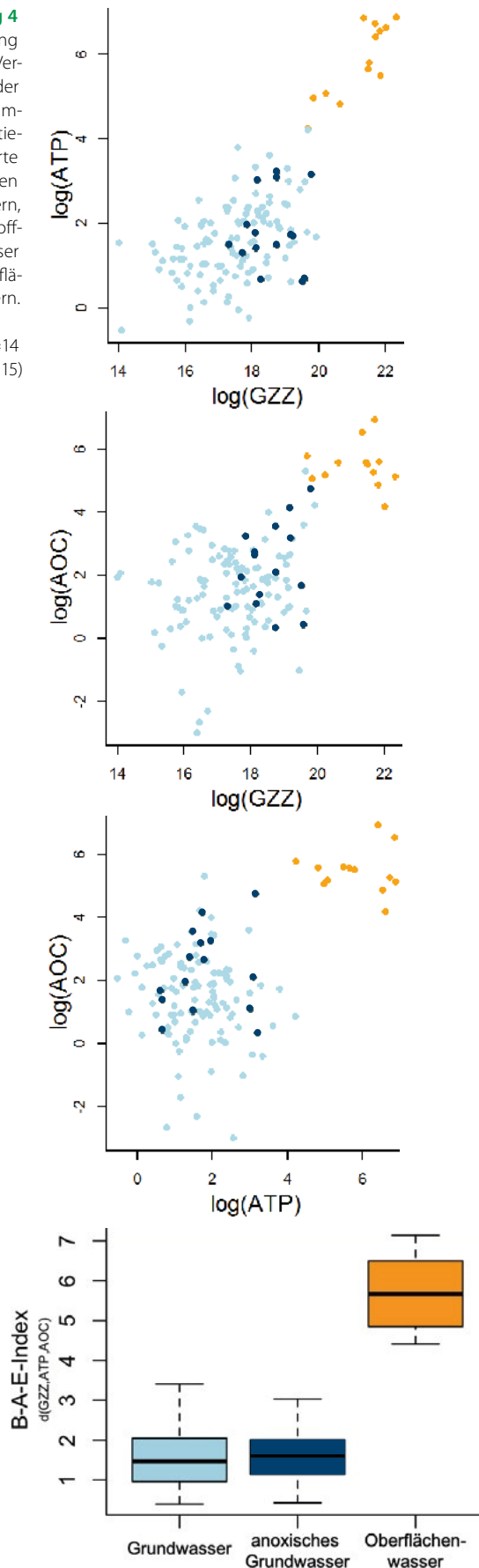
Dem Aufruf der Grundwasser-Tochtrichtlinie folgend, wurden in den vergangenen Jahren in Deutschland – im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte – erste Schritte unternommen, um die bestehende „ökologische“ Lücke in der Grundwasserbewertung zu schließen (HAHN 2006; STEUBE et al. 2009; GRIEBLER et al. 2010, 2014; STEIN et al. 2010). Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „GroundCare“ baut auf diesen Vorarbeiten auf – mit dem Ziel, einen integrativen Bewertungsansatz zu entwickeln, der neben dem chemisch-physikalischen, auch den ökologischen Zustand von Grundwässern berücksichtigt. Dieser erlaubt es zudem, auch die Ökosystem-(Dienst-)Leistungen und die Belastbarkeit des Ökosystems zu bewerten.

Ein solch integrativer, ökologischer Bewertungsansatz, der mehrere biologische Variablen zu einem Index zusammenführt, hat gegenüber einer chemisch-physikalischen Wasseruntersuchung den großen Vorteil, dass er nicht nur eine „Momentaufnahme“ der gegenwärtigen Wasserqualität liefert, sondern ein zeitintegriertes Zustandsbild. Dies liegt darin begründet, dass für das Überleben von Lebewesen (insbesondere der

Abbildung 4

Beispielhafte Anwendung des B-A-E-Indexwertes: Vergleich von Messwerten der GZZ, ATP- und AOC-Bestimmung und daraus resultierende B-A-E-Indexwerte von jeweils naturnahen oxidischen Grundwässern, naturnahem sauerstoffreduziertem Grundwasser und ausgewählten Oberflächengewässern.

- Oberflächenwasser (n=14)
- Anoxisches Wasser (n=15)
- Grundwasser (n=140)



Fauna), eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein müssen, was nur in einem natürlichen, durch Schadstoffe und menschliche Eingriffe ungestörten oder in einem naturnahen Lebensraum möglich ist. Je nach Lebensdauer der Organismen, kann ihr Vorkommen an einem bestimmten Standort somit einen langfristig guten Zustand anzeigen. Eine Veränderung der Lebensgemeinschaft oder gar das Verschwinden von früher vorhandenen Arten, weist dagegen auf Störungsereignisse hin – zum Beispiel auf organische Belastung durch Oberflächenwassereinträge, Verunreinigungen mit giftigen Schadstoffen oder auch Veränderungen des Temperaturhaushalts durch Wärme- oder Kälteeinträge. All diese Störungen könnten durch eine chemische Wasseruntersuchung zeitlich verfehlt oder gar gänzlich unentdeckt bleiben – wie im Falle einer thermischen Belastung oder bei Schadstoffen, welche nicht Teil eines regelmäßigen Monitoring-Programms sind. Und nicht nur das – die Auswirkungen einer Störung auf das Ökosystem, auf die darin lebenden Organismen und die stattfindenden natürlichen Prozesse, könnten anhand einer rein chemisch-physikalischen Untersuchung unmöglich beurteilt werden.

Das im Rahmen von „GroundCare“ entwickelte, ökologische Bewertungskonzept erweitert daher die aktuell durchgeführte chemisch-physikalische und mengenmäßige Bewertung des Grundwassers um drei Module: (1) eine mikrobiologische, (2) eine faunistische und (3) eine ergänzende, ökotoxikologische Bewertung. Im Folgenden werden die Grundideen und Inhalte der mikrobiologischen und der faunistischen Bewertung näher erläutert.

Die Lebensgemeinschaften im Grundwasser

Der Lebensraum Grundwasser zeichnet sich durch niedrige Temperaturen und Dunkelheit aus. Aufgrund der daraus folgenden Abwesenheit photoautotropher Organismen, ist organischer Kohlenstoff, welcher von der Oberfläche eingetragen wird, die wichtigste Energiequelle, (GOLDSCHIEDER et al. 2006; GRIEBLER & LUEDERS 2009). Mikroorganismen, insbesondere Bakterien, kommen bis in große Tiefen vor und sind die mengenmäßig wichtigste Organismengruppe. In ursprünglichen, unbelasteten Aquiferen beträgt die Anzahl der Bakterien nur etwa ein Zehntel bis ein Hundertstel der Bakterienzahl in Oberflächengewässern (GRIEBLER & LUEDERS 2009). Darüber hinaus lebt im Grundwasser eine große Vielfalt an höheren Tieren (Wirbellose beziehungsweise Invertebraten). Dabei handelt es sich in naturnahen Ökosystemen vor allem um Stygobionte (echte

Grundwassertiere), also solche Tiere, die nur im Grundwasser leben können. Diese sind im Gegensatz zu Tieren aus Oberflächengewässern oftmals pigmentlos, weisen eine teilweise oder vollständige Rückbildung der Augen auf (Abbildung 1 bis 3) und sind tolerant gegenüber Sauerstoffmangel und Nahrungsknappheit (MÖSSLACHER & HAHN 2003). Wegen der in Mitteleuropa gleichbleibend niedrigen Temperaturen im Grundwasser sind sie zudem überwiegend kaltstenotherm (das heißt angepasst an eine enge Nische im Niedrigtemperaturbereich, SPENGLER 2017). Bedingt durch ihr Dasein in einer sehr „konstanten“ Umwelt mit vorhersehbaren Lebensbedingungen, reagieren sie ausgesprochen empfindlich auf Veränderungen in ihrer Umgebung, was sie zu guten Zeigern für Störungen macht (DUMAS et al. 2001; MALARD et al. 1996; GRIEBLER et al. 2010; STEIN et al. 2010; GUTJAHR et al. 2013). Zudem haben ihre vielfältigen Anpassungen, welche durch die vergleichsweise unwirtlichen Lebensbedingungen im Grundwasser erforderlich waren, dazu geführt, dass sich eine einzigartige, hoch-diverse Fauna entwickelt hat – zusammengesetzt aus hochspezialisierten, einmaligen Organismen, die nur dort dauerhaft überleben können und nirgends sonst auf der Welt zu finden sind. Bislang existiert keine naturwissenschaftliche Bewertung der Arten und Lebensgemeinschaften im Grundwasser hinsichtlich ihres Gefährdungsgrads und ihrer Bedrohung. Vor dem Hintergrund des starken Nutzungsdruckes auf das Grundwasser und angesichts der großen Bedeutung der Grundwassergemeinschaften für die Qualität des Grundwassers, aber auch für die globale Biodiversität, besteht aus unserer Sicht an dieser Stelle Nachholbedarf. Aus diesem Grund stellt die Untersuchung der Stygofauna einen wichtigen Bestandteil des hier vorgestellten ökologischen Bewertungskonzepts dar.

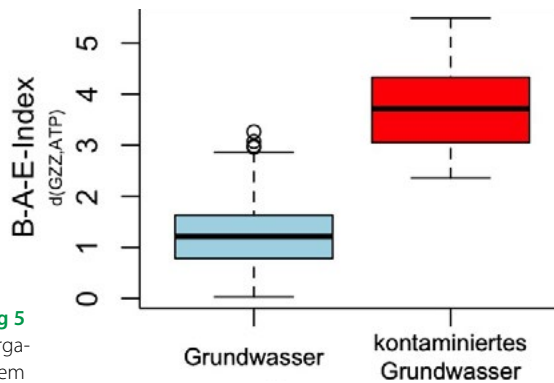
Die Gemeinschaft der Mikroorganismen und mikrobiologisch-ökologische Indizes

Zahlreiche vorangegangene Studien haben die potenzielle Eignung von Mikroorganismen zur Bewertung des ökologischen Zustands von Grundwasserökosystemen bereits untermauert (zum Beispiel BRIELMANN et al. 2009; PRONK et al. 2009; STEUBE et al. 2009; STEIN et al. 2012). Mikroorganismen reagieren aufgrund ihrer geringen Größe und den vergleichbar kurzen Generationszeiten unmittelbar auf Veränderungen in den Umweltbedingungen, allen voran auf Änderungen in der Verfügbarkeit von Energie (in Form von organischem Kohlenstoff und Nährstoffen) und der Temperatur (WANG et al. 2007; BRIELMANN 2009, 2011; STEIN et al. 2010; GRIEBLER et al. 2010, 2014, 2016). Viele der bisherigen Studien bleiben in

ihren Aussagen jedoch deskriptiv und standardisierte Verfahren zur quantitativen Erfassung von Einflüssen und Veränderungen fehlten bislang (GRIEBLER et al. 2014).

Als Antwort darauf wurde im Rahmen des Projekts „GroundCare“ ein erster, integrativer mikrobiologischer Bewertungsansatz entwickelt. Dieser führt mehrere, für das mikrobielle Wachstum im Grundwasser wichtige Kenngrößen in einem Wert – dem sogenannten B-A-E-Index – zusammen (GRIEBLER et al. 2018). Das „B“ steht dabei für die mikrobielle Biomasse und wird über die Gesamtzahl der prokaryotischen Zellen (GZZ) ermittelt. Die Biomasse spiegelt einen mittel- bis langfristigen Ernährungszustand in der mikrobiellen Gemeinschaft wider. Das „A“ steht für Aktivität und wird über die Konzentration des Adenosintri-phosphats (ATP) in den Zellen ermittelt. Diese ist ein Maß für die zum Zeitpunkt der Untersuchung vorherrschende Aktivität der Mikroorganismen und kann somit aktuelle Änderungen von Stoffflüssen, aber auch negative Einflüsse auf das Grundwasser (wie zum Beispiel die toxische Wirkung von Schadstoffen), anzeigen. Ergänzend zur Biomasse und Aktivität, kann auch noch die Energie „E“, die den Mikroorganismen zum Zeitpunkt der Probennahme im Grundwasser zur Verfügung stand, bestimmt werden. Dieses Maß liefert die Konzentration an gelöstem, assimilierbarem organischen Kohlenstoff im Grundwasser (AOC), welche ein direkter Anzeiger für das vorhandene Wachstumspotenzial der Bakterien ist. Mit Hilfe eines statistischen Kennwerts (Mahalanobis-Distanz) werden die drei Größen in den B-A-E-Index verrechnet (GRIEBLER et al. 2018).

Das B-A-E-Konzept wurde bereits an verschiedenen Standorten innerhalb Deutschlands getestet. Wie sich gezeigt hat, lassen sich damit grundsätzlich Grundwasser und Oberflächengewässer voneinander unterscheiden (Abbildung 4). Oberflächengewässer zeichnen sich im Allgemeinen durch höhere AOC-Werte aus, da durch Schwebfracht und eine höhere biologische Aktivität mehr Kohlenstoff vorhanden ist als im Grundwasser. Dadurch enthalten Oberflächengewässer auch eine höhere Anzahl an aktiven Bakterien, angezeigt durch die Messwerte GZZ und ATP (Abbildung 4 oben). Die daraus resultierenden B-A-E-Indexwerte der Oberflächengewässer liegen daher deutlich über denjenigen der Grundwässer, im gezeigten Beispiel im Mittel etwa viermal so hoch (Abbildung 4 unten). Die Konfidenzintervalle überlappen sich nicht, sodass der B-A-E-Index hier eine eindeutige Abgrenzung der Gewässersysteme voneinander erlaubt.

**Abbildung 5**

Der B-A-E-Index von organisch-kontaminiertem Grundwasser aus dem Einflussbereich eines ehemaligen Gaswerks in Düsseldorf (rot). Zum Vergleich sind auch die B-A-E-Indexwerte von unbelastetem Grundwasser dargestellt (blau). Da für den Standort keine AOC-Messwerte zur Verfügung stehen, wurde der B-A-E-Index anhand von GZZ- und ATP-Daten berechnet.

Ebenfalls getestet wurde das (natürlicherweise) sauerstofffreie Grundwasser eines Standortes bei Soltau (Norddeutsche Tiefebene, Lockergesteinsleiter). Die AOC-, ATP- und Gesamtzellzahl-Werte sind an solchen Standorten typischerweise etwas höher als in oxischen Grundwässern, jedoch sind die gemittelten Unterschiede hier gering und die daraus berechneten B-A-E-Indizes nahezu identisch (Abbildung 4 unten).

Eindeutig identifizieren beziehungsweise abtrennen lassen sich mit dem B-A-E-Index dagegen organisch belastete Grundwässer (Abbildung 5). Als Beispiel hierfür wurde das Grundwasser im Bereich eines ehemaligen Gaswerksgeländes in Düsseldorf gewählt, welches sich durch erhöhte GZZ- und ATP-Werte auszeichnet.

Der B-A-E-Index wird zurzeit in seiner Anwendung weiterentwickelt und an weiteren Standorten evaluiert. Es lässt sich jedoch bereits erkennen, dass mit dem B-A-E-Index ein sehr einfaches und leicht in der Praxis umsetzbares Verfahren zur Verfügung steht, mit dem kurzfristig Störungen im Grundwasser, wie sie beispielsweise durch organische Kontaminationen und den daraus resultierenden Veränderungen in den natürlichen Prozessen im Ökosystem verursacht werden, identifiziert werden können.

Die Fauna im Grundwasser und geeignete Indizes

Im Gegensatz zu Mikroorganismen, die als Kosmopoliten alle Lebensräume besiedeln, sind viele Grundwassertiere Endemiten, das heißt sie besitzen ein regional begrenztes Verbreitungsgebiet. Nur wenige Arten sind über ganz Deutschland hinweg im Grundwasser anzutreffen. Neben einzelnen Umweltfaktoren spielen bei der Fauna daher die geografische Lage und die Geologie (sogenannte Georegion) sowie saisonale und räumliche Schwankungen beziehungsweise Gradienten eine wesentliche Rolle für ihre

Verbreitung (BERKHOFF et al. 2015; GRIEBLER et al. 2014). Als Ergebnis vergangener Untersuchungen wurde die Einteilung der Grundwasserlebensräume in sogenannte Stygoregionen – Regionen mit einer typischen Zusammensetzung der Grundwasserfauna – für Deutschland und Zentraleuropa vorgeschlagen (STEIN et al. 2012).

Neben den natürlichen Faktoren, welche die Artenzusammensetzung der Stygofauna an einem bestimmten Standort bestimmen, gibt es eine Reihe von anthropogenen, also menschengemachten. Als primäre Einflussgröße gelten hier die Einträge „von oben“, das heißt aus benachbarten Gewässern, der Landwirtschaft oder anderen Landnutzungsformen. Hierbei sind vor allem Dünger- und Pestizideinträge, aber auch Verunreinigungen mit Schadstoffen aus Depositionen und Altlasten von Bedeutung. Darüber hinaus stellen übermäßige Grundwasserentnahmen zur Bewässerung und für die Industrie sowie Wärmeeinträge im Zuge der Nutzung geothermischer Energie häufig auftretende Beeinträchtigungen dar. Während die Fauna naturnaher und vor direkten Oberflächeneinträgen geschützter Grundwasserkörper zu 100 % von echten Grundwassertieren dominiert wird, ist das Auftreten erhöhter Individuendichten und stygoxener (habitatfremder) Arten ein Zeichen für eine schlechte Abschirmung des Grundwasserökosystems zur Oberfläche hin und weist somit auf eine hohe „Verletzlichkeit“ (Vulnerabilität) hin. Einfache Kennzahlen, wie etwa das Verhältnis von stygobionten zu stygoxenen Arten, aber auch das Verhältnis von Krebstieren (Crustaceen) zu Würmern, geben Auskunft über die Stärke der Oberflächeneinflüsse und die Vulnerabilität des Grundwasserökosystems (MALARD et al. 1996; STEIN et al. 2010; KORBEL & HOSE 2011; GRIEBLER et al. 2014). Hinweise für eine Belastung, zum Beispiel durch organische Kohlenstoffverbindungen oder Stickstoff, geben ein Anteil von weniger als 80 % Stygobionten, ein Crustaceenanteil von weniger als 70 % oder etwa ein Anteil von Würmern von mehr als 20 % (GRIEBLER et al. 2014). Ein neuer Bewertungsindex, der solche Kennzahlen sowie die Abundanz und die Artenzahl integrierend zusammenfasst, befindet sich derzeit in der Entwicklung.

Ein Langzeit-Datensatz für mehr als 40 Messstellen in Baden-Württemberg zeigt, dass sich an manchen „gut abgeschirmten“ und wenig vulnerablen, sogenannten „stabilen“ Standorten, die Grundwassergemeinschaften in ihrer Zusammensetzung über einen Zeitraum von 15 Jahren nur unwesentlich veränderten (ermittelt über eine

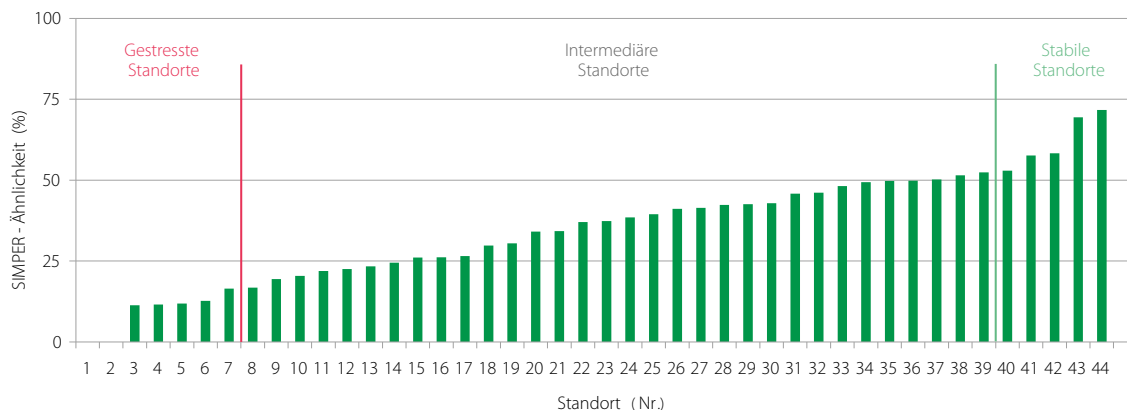


Abbildung 6

Das Bewertungskonzept „Vulnerabilität-Stabilität“ wurde auf Basis der Grundwasserfauna von 44 Standorten in Baden-Württemberg über einen Zeitraum von 15 Jahren getestet. Niedrige SIMPER-Ähnlichkeitswerte zeigen an, dass es im Verlauf der Zeit große Änderungen in der Artenzusammensetzung eines Standorts gegeben hat, die Lebensgemeinschaft also sehr variabel war. Die Schwellenwerte für die drei Standort-Gruppen liegen bei jeweils 20 % und 58 % SIMPER-Ähnlichkeit und wurden iterativ so bestimmt, dass sich die drei Kategorien „gestresst“, „intermediär“ und „stabil“ signifikant voneinander unterscheiden ($p \leq 0,01$, Mann-Whitney-U-Test).

SIMPER-Analyse, siehe Abbildung 6). Das heißt, die Abundanz der vorkommenden Arten war bei wiederholter Beprobung vergleichbar und es wurden nur sehr begrenzt Änderungen in der Artenzusammensetzung vorgefunden. An anderen, „gestressten“ Standorten war die Artenzusammensetzung zu verschiedenen Zeitpunkten großen Schwankungen unterworfen. Daraus kann geschlossen werden, dass die „gestressten“ Standorte eine sehr hohe Vulnerabilität aufwiesen, was dazu führte, dass bei nahezu jeder Beprobung eine andere faunistische Gemeinschaft beobachtet wurde.

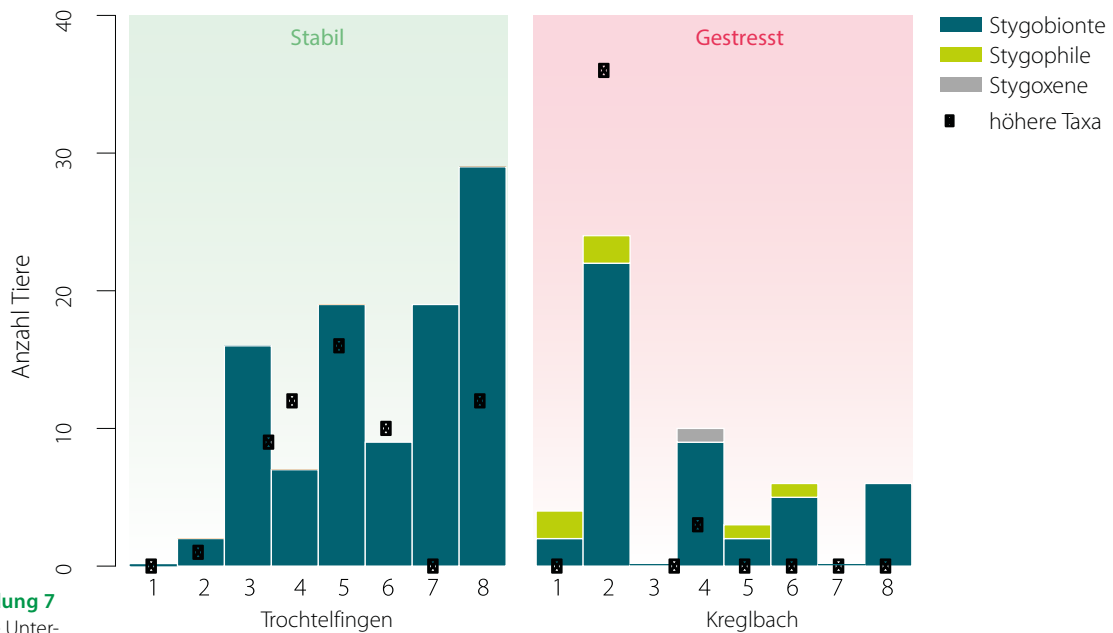
Die Artenzusammensetzung der Grundwasserfauna an jeweils einem „stabilen“ und einem „gestressten“ Standort ist beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt. Die Probenahmen für diese Studie wurden zweimal im Jahr 2002 und jeweils einmal jährlich zwischen 2006 und 2011 durchgeführt, insgesamt also achtmal. Deutlich zu erkennen ist, dass am stabilen Standort Trochletingen bei allen Beprobungen ausschließlich echte Grundwassertiere (stygobionte) angetroffen wurden (2002 konnte keine Grundwasserfauna nachgewiesen werden). Im Gegensatz dazu, schwankten Anzahl und Artenzusammensetzung am gestressten Standort Kreglbach stark – nur zu vereinzelten Zeitpunkten tauchten hier Arten aus höheren Taxa auf. Zusätzlich wurden neben echten Grundwassertieren in fast allen Fällen auch fakultativ im Grundwasser lebende Tiere (stygophile) sowie grundwasserfremde, aus Oberflächengewässern eingewanderte Arten (stygoxene) gefunden.

Neben Stoffeinträgen von der Oberfläche, haben Temperaturveränderungen einen maßgeblichen Einfluss auf die Organismen im Grundwasser. Im Zuge von Wärmeeinträgen, zum Beispiel durch die Einleitung von erwärmtem Prozess- und Kühlwasser, die aktive Einspeicherung von Überschusswärme im Grundwasserleiter oder auch durch große oberflächennahe Wärmetauscher-

anlagen, kommt es verstärkt zu thermischen Belastungen. Wie eingangs schon erwähnt, sind die im Grundwasser lebenden Organismen, insbesondere die Fauna, physiologisch an gleichbleibende, niedrige Temperaturen angepasst. Eine Temperaturerhöhung führt – neben verschiedenen physikalisch-chemischen Veränderungen der Wasserbeschaffenheit (zum Beispiel geringere Löslichkeit von Sauerstoff) – zu einem höheren Stoffwechsel und Stress bei den Tieren. In einem energiearmen Lebensraum ist das allein oft schon ein Grund für das Verschwinden einzelner Arten. Verlässt die Grundwassertemperatur den Toleranzbereich einer Art, führt dies zu einem Kälte- oder Hitzeschock mit häufiger Todesfolge (BRIELMANN et al. 2011; GRIEBLER et al. 2016). So konnte in einer kürzlich veröffentlichten Feldstudie ein direkter Zusammenhang zwischen der Erhöhung der Grundwassertemperatur und der gleichzeitigen Abnahme der Anzahl an echten Grundwassertieren nachgewiesen werden (SPENGLER & HAHN 2018). Die Autoren der Studie schlagen auf Basis vorangegangener Feldstudien definierte Temperatur-Schwellenwerte vor, mit Hilfe derer thermische Belastungen aufgezeigt werden können. Da echte Grundwassertiere meist ein regional begrenztes Verbreitungsgebiet haben und die Temperatur eines Grundwasserkörpers von den regionalen Klimaverhältnissen abhängt, müssen diese Schwellenwerte die Regionalität berücksichtigen. Der für den Oberrheingraben identifizierte Schwellenwert lag bei 12,4 °C – oberhalb dieses Wertes zeigten sich bereits deutliche Veränderungen in der Artenzusammensetzung.

Ausblick

Die hier vorgestellten Konzepte und Indizes demonstrieren, dass bereits einige aussagekräftige und leicht anzuwendende Instrumente zur Bewertung des ökologischen Zustands von Grundwasserökosystemen existieren. Die einzelnen Parameter sind relativ kostengünstig zu bestimmen, sodass die Gesamtkosten der ökologischen Bewertung nur einen Bruchteil der

**Abbildung 7**

Beispiel für die Unterschiede in der faunistischen Artenzusammensetzung zwischen einem stabilen und einem gestressten Standort. Jeweils 8 Probenahmen zwischen 2002 und 2011. Organismen, deren Bestimmung nicht bis zum Artniveau durchgeführt werden konnte, wurden in der Gruppe „höhere Taxa“ zusammengefasst (zum Beispiel bei Vertretern der Fadenwürmer [Nematoda]).

Kosten der physikalisch-chemischen Untersuchungen ausmachen, wie sie zurzeit routinemäßig durchgeführt werden. Jeder der Indizes verfügt über seine eigenen Vorteile und Einsatzbereiche und gemeinsam ergibt eine Untersuchung der Mikroorganismen und der Fauna ein klares Bild darüber, ob das Grundwasser einem schädigenden Einfluss über kurze oder lange Zeiträume ausgesetzt worden ist.

Der B-A-E-Index hat gegenüber faunistischen Indizes den Vorteil, dass er auch an solchen Standorten angewendet werden kann, an denen natürlicherweise keine Grundwasserfauna vorkommt. Darüber hinaus erlaubt er, auch Übergangszonen (zum Beispiel Sandfilter einer Grundwasseranreicherung, Uferfiltration) und Übergangssituationen (Einträge aus pulsartigem Starkregen, Schneeschmelze, Hochwasser) zu erfassen. Zudem kann auch die eindeutige Abgrenzung von Oberflächenwasser zu Grundwasser anhand des B-A-E-Index dazu genutzt werden, kurzfristige Störungen des Grundwassers anzuzeigen, zum Beispiel bei Hochwasserereignissen.

Grundwassertiere wiederum sind wegen ihrer Sensibilität gegenüber Änderungen in der Umgebung und ihres langsamen Wachstums gut dafür geeignet, langfristig ungestörte, stabile und naturbelassene Zustände im Grundwasser anzuzeigen sowie den Erfolg von langfristig angelegten Sanierungsmaßnahmen an ehemals kontaminierten Standorten zu belegen. Wegen ihrer heterogenen Verbreitung und des hohen Grades an Endemismus mussten für sie, wie auch für die Mikroorganismen, integrative Bewertungsansätze

entwickelt werden. Erste Werkzeuge wie das „Vulnerabilitäts-Stabilitäts-Konzept“ oder die Thermo-Schwellenwerte wurden hier kurz vorgestellt, weitere befinden sich zurzeit noch in der Entwicklung. Neben langfristigen Trends, kann Grundwasserfauna auch zum Anzeigen von kurzfristigen Störungen (beispielsweise durch pulsartige Schadstoffeinträge) eingesetzt werden. Dies ist in sogenannten Online-Ökotox-Monitoring-Systemen möglich (hier nicht näher vorgestellt).

Wenngleich die hier vorgestellten Indizes und Konzepte noch recht neu sind, wurden und werden sie bereits an vielen Standorten und Datensätzen getestet und validiert. Zahlreiche Studien der letzten Jahre haben untermauert, dass sich diese Anstrengungen lohnen und Grundwasserlebensgemeinschaften geeignete Anzeiger für die Qualität des Grundwassers sind. Mehr noch – ein ganzheitlicher, nachhaltiger Schutz der Grundwasserökosysteme, welche auch für uns Menschen wichtige Lebensgrundlagen liefern, ist ohne die Betrachtung der Grundwasserlebensgemeinschaften nicht möglich. Eine Nichtberücksichtigung von Grundwasserökosystemen in der Gesetzgebung kann somit, aus Sicht der Autoren, nicht länger durch ein unzureichendes Wissen um die ablaufenden Zusammenhänge und Lebewesen sowie durch fehlende Bewertungskonzepte, begründet werden. Dies macht eine zeitnahe Anpassung der geltenden nationalen und internationalen gesetzlichen Richtlinien erforderlich. Auf dieser Grundlage könnten in Folge Grundwasser-Managementpläne mit entsprechenden (auch über-

regionalen) Schutzmaßnahmen aufgestellt werden, welche beispielsweise den Einsatz von Gülle, Düngemitteln und Pestiziden in der Landwirtschaft einschränken, eine übermäßige Nutzung von Grundwasser zur Bewässerung oder für geothermische Zwecke verhindern oder bei großen Bauprojekten (beispielsweise Tunnelbau, Tiefbau) die unterirdischen Lebensräume auch als solche bei Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) berücksichtigen.

Es besteht jedoch auch an anderer Stelle Nachholbedarf: die Tatsache, dass das Grundwasser von vielfältigen Lebewesen besiedelt ist, ist vielen Menschen gänzlich unbekannt und ruft in ihnen – sofern sie davon erfahren – eher Misstrauen und Unbehagen als Wertschätzung hervor. Um dem entgegenzuwirken und die breite Öffentlichkeit für das Grundwasser und seine einzigartige Tierwelt zu sensibilisieren, aber auch für die Bedrohungen, denen Grundwasserökosysteme ausgesetzt sind, müssen Grundwasserthemen zukünftig stärker in der Umweltbildung, dem Schulunterricht und den Medien vertreten sein.

Literatur

- BERKHOF, S. E., BORK, J., HAHN, H. J., MARXSEN, J., SCHMIDT, S. I. & SPENGLER, C. (2015): Das Grundwasser: Strukturen, Prozesse und Funktionen. – In: Brendelberger, H., Martin, P., Brunke, M. & Hahn, H. J. (Hrsg.): Grundwassergeprägte Lebensräume. – 1. Auflage, Limnologie aktuell Bd. 14, Schweizerbart, Stuttgart: 11–48.
- BOULTON, A. (2009): Recent progress in the conservation of groundwaters and their dependent ecosystems. – *Aquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystems* (19): 731–735.
- BRIELMANN, H., GRIEBLER, C., SCHMIDT, S. I., MICHEL, R. & LUEDERS, T. (2009): Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. – *FEMS Microbiology Ecology* (68): 273–286.
- BRIELMANN, H., LUEDERS, T., SCHREGLMANN, K., FERRARO, F., AVRAMOV, M., HAMMERL, V. et al. (2011): Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. – *Grundwasser* (16): 77–91.
- CULVER, D. C. & HOLSINGER, J. R. (1992): How many species of troglobites are there? – *National Speleological Society Bulletin* (54): 59–80.
- DANIELOPOL, D. L. & GRIEBLER, C. (2008): Changing Paradigms in Groundwater Ecology – from the 'Living Fossils' Tradition to the 'New Groundwater Ecology'. – *International Review of Hydrobiology* (93): 565–577.
- DUMAS, P., BOU, C. & GIBERT, J. (2001): Groundwater Macrocrustaceans as natural indicators of the Ariège Alluvial Aquifer. – *International Review of Hydrobiology* (86): 619–633.
- EG-GWRL (= EUROPÄISCHE GRUNDWASSERRICHTLINIE, 2006): Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union L 372 (19) vom 27.12.2006.
- EG-WRRRL (= EUROPÄISCHE WASSERRAHMENRICHTLINIE, 2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union L327(1) vom 22.12.2000.
- EPA (= ENVIRONMENT PROTECTION AUTHORITY, 2003): Guidance for the assessment of environmental factors: consideration of subterranean fauna in groundwater and caves during environmental impact assessment in Western Australia. – Environmental Protection Authority, Perth, Australia.
- EMA (= EUROPEAN MEDICINES AGENCY, 2017): Guideline on assessing the toxicological risk to human health and groundwater communities from veterinary pharmaceuticals in groundwater. – EMA/CVMP/ERA/103555/2015, Committee for Medicinal Products for Veterinary Use (CVMP) London; www.ema.europa.eu/documents/scientific-guideline/draft-guideline-assessing-toxicological-risk-human-health-groundwater-communities-veterinary_en.pdf (letzter Zugriff: 10.10.2018).
- FEICHTMAYER, J., DENG, L. & GRIEBLER, C. (2017): Antagonistic microbial interactions: Contributions and potential applications for controlling pathogens in the aquatic systems. – *Frontiers in Microbiology* (8): 2192, doi: 10.3389/fmicb.2017.02192.
- GIBERT, J. & CULVER, D. C. (2004): Diversity patterns in Europe. – In: Culver, D. C. & White, W. B. (eds.): *Encyclopedia of caves*. – San Diego.
- GOLDSCHIEDER, N., HUNKELER, D. & ROSSI, P. (2006): Review: Microbial biocenoses in pristine aquifers and an assessment of investigative methods. – *Hydrogeology Journal* (14): 926–941.
- GRIEBLER, C. & LUEDERS, T. (2009): Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. – *Freshwater Biology* (54): 649–677.
- GRIEBLER, C., STEIN, H., KELLERMANN, C., BERKHOF, S., BRIELMANN, H., SCHMIDT, S. I. et al. (2010): Ecological assessment of groundwater ecosystems – Vision or illusion? – *Ecological Engineering* 36(9): 1174–1190.
- GRIEBLER, C., HEIDE, S., HAHN, H.-J., STEUBE, C., KELLERMANN, C., FUCHS, A. et al. (2014): Entwicklung biologischer Bewertungsmethoden und -kriterien für Grundwasserökosysteme. – Umweltbundesamt, FKZ 3708 23 200, ISSN: 1862–4804: 153 S.
- GRIEBLER, C., BRIELMANN, H., HABERER, C. M., KASCHUBA, S., KELLERMANN, C. S., STUMPP, C. et al. (2016): Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. – *Environmental Earth Sciences* (75): 1391–1409.
- GRIEBLER, C., HUG, K., FILLINGER, L., MEYER, A. & AVRAMOV, M. (2018): Der B-A-E-Index – Ein mikrobiologisch-ökologisches Konzept zur Bewertung und Überwachung von Grundwasser. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (62): 378–386.

- GSCHV (= GEWÄSSERSCHUTZVERORDNUNG, 1998): Gewässerschutzverordnung (Swiss Water Ordinance) 814.201. – Der Schweizer Bundesrat, Bern, Schweiz.
- GUTJAHR, S., BORK, J., SCHMIDT, S. I. & HAHN, H. J. (2013): Efficiency of sampling invertebrates in groundwater habitats. – *Limnologica* (43): 43–48.
- HAHN, H. J. (2003): Eignen sich Fallen zur repräsentativen Erfassung aquatischer Meiofauna im hyporheischen Interstitial und im Grundwasser? – *Limnologica* (33): 138–146.
- HAHN, H. J. (2006): The GW-Fauna-Index: A first approach to a quantitative ecological assessment of groundwater habitats. – *Limnologica* (36): 119–137.
- HAHN, H. J. & FUCHS, A. (2009): Distribution patterns of groundwater communities across aquifer types in south-western Germany. – *Freshwater Biology* 54(4): 848–860.
- HAHN, H. J. (2015): Grundwasser – die Tiefsee des Festlandes. – In: DIEHL, P., IMHOFF, A. & MÖLLER, L. (Hrsg.): Wissensgesellschaft Pfalz – 90 Jahre Pfälzische Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften. – Verlag Regionalkultur, Heidelberg, Ubstadt, Weiher: 119–134.
- HAHN, H. J., SCHWEER, C. & GRIEBLER, C. (2018): Grundwasserökosysteme im Recht? Eine kritische Betrachtung zur rechtlichen Stellung von Grundwasserökosystemen. – *Grundwasser* (23): 209–218.
- KORBEL, K. L. & HOSE, G. C. (2011): A tiered framework for assessing groundwater ecosystem health. – *Hydrobiologia* (661): 329–349.
- MALARD, F., PLENET, S. & GIBERT, J. (1996): The use of invertebrates in ground water monitoring: A rising research field. – *Ground Water Monitoring and Remediation* (16): 103–113.
- PRONK, M., GOLDSCHIEDER, N. & ZOPFI, J. (2009): Microbial communities in karst groundwater and their potential use for biomonitoring. – *Hydrogeological Journal* (17): 37–48.
- SPENGLER, C. (2017): Die Auswirkungen von anthropogenen Temperaturerhöhungen auf die Crustaceagemeinschaften im Grundwasser – Versuch einer Prognose zu Klimaerwärmung und lokalen Wärmeinträgen (Doktor der Naturwissenschaften, Dissertation), Universität Koblenz Landau, Landau.
- SPENGLER, C. & HAHN, H. J. (2018): Thermostress: Ökologisch begründete, thermische Schwellenwerte und Bewertungsansätze für das Grundwasser. – *Korrespondenz Wasserwirtschaft* (11): 521–526.
- STEIN, H., KELLERMANN, C., SCHMIDT, S. I., BRIELMANN, H., STEUBE, C., FUCHS, A. et al. (2010): The potential use of fauna and bacteria as ecological indicators for the assessment of groundwater ecosystems. – *Journal of Environmental Monitoring* (12): 242–254.
- STEIN, H., GRIEBLER, C., BERKHOFF, S., MATZKE, D., FUCHS, A. & HAHN, H. J. (2012): Stygoregions – a promising approach to a bioregional classification of groundwater systems. – *Scientific Reports* (2): 673–682.
- STEUBE, C., RICHTER, S. & GRIEBLER, C. (2009): First attempts towards an integrative concept for the ecological assessment of groundwater ecosystems. – *Hydrogeology Journal* (17): 23–35.
- STUMPP, C. & HOSE, G. C. (2017): Groundwater amphipods alter aquifer sediment structure. – *Hydrological Processes* (31): 3452–3454.
- MÖSSLACHER, F. & HAHN, H. J. (2003): Die Fauna. – In: Griebler, C. & Mösslacher, F. (Hrsg.): Grundwasserökologie, UTB-Facultas Verlag, Wien: 159–208.
- WANG, Y., HAMMES, F., BOON, N. & EGLI, T. (2007): Quantification of the filterability of freshwater bacteria through 0.45, 0.22, and 0.1 µm pore size filters and shape-dependent enrichment of filterable bacterial communities. – *Environmental Science & Technology* (41): 7080–7086, doi:10.1021/es0707198.

Autoren

Astrid Meyer¹

astrid.meyer@helmholtz-muenchen.de

Maria Avramov¹

maria.avramov@helmholtz-muenchen.de

Lucas Fillinger¹

lucas.fillinger@helmholtz-muenchen.de

Katrin Hug¹

katrin.hug@helmholtz-muenchen.de

Cornelia Spengler²

spengler@groundwaterecology.de

Hans-Jürgen Hahn²

hjhahn@groundwaterecology.de

Christian Griebler³

christian.griebler@univie.ac.at

1
Institut für Grundwasserökologie
Helmholtz Zentrum München
85716 Neuherberg

2
Institut für Grundwasserökologie GmbH
An der Universität Koblenz-Landau
76829 Landau

3
Department für Limnologie und Bio-Ozeanographie
Universität Wien
1090 Wien
ÖSTERREICH

Zitiervorschlag

MEYER, A., AVRAMOV, M., FILLINGER, L., HUG, K., SPENGLER, C., HAHN, H. J. & GRIEBLER, C. (2020): Das Grundwasser unter die Lupe nehmen: Lebensgemeinschaften als Anzeiger der Grundwasserqualität. – *ANLIEGEN NATUR* 42(1): 173–182, Laufen; www.anl.bayern.de/publikationen.