

1.2

Lebensraum Grundwasser

Hans Jürgen HAHN

Inhalt

1	Einleitung: Besonderheiten und Schutzwürdigkeit der Grundwasser-ökosysteme	2
2	Gefährdungen der Grundwasser-ökosysteme	4
3	Rechtliche Situation der Grundwasser-ökosysteme	7
4	Schlussfolgerungen und Konsequenzen	9
Literatur		10

1 Einleitung: Besonderheiten und Schutzwürdigkeit der Grundwasserökosysteme

Von allen kontinentalen Lebensräumen ist das Grundwasser neben dem Boden der wohl größte. Von wenigen Ausnahmen abgesehen finden sich überall unter der Erdoberfläche mehr oder weniger ausgedehnte Grundwasservorkommen. Zumindest deren obere Bereiche sind besiedelt (HUNKELER et al. 2006). In nordafrikanischem Karst wurden wirbellose Tiere bis in über 1000m Tiefe gefunden (ESSAFI et al. 1998), auf der Schwäbischen Alb bis in 200m Tiefe (FUCHS 2007), und Mikroorganismen wurden noch in mehreren Kilometern Tiefe festgestellt (KRUMHOLZ 2000).

Metazoen sind überall dort vertreten, wo die Sauerstoffkonzentration größer als 1 mg/l ist und genügend organisches Material und ausreichend Lückenraum verfügbar sind (HAHN 2006). Weltweit geht man von 50 000–100 000 Arten aus, die ausschließlich im Grundwasser oder in Höhlen leben. Darunter finden sich Vertreter fast aller Tiergruppen der oberirdischen Gewässer (CULVER und HOLSINGER 1992), auch Wirbeltiere. Vorherrschendes Taxon sind die Krebstiere (Abb. 1). Unter den bisher erfassten 1805 Tierarten aus dem europäischen Grundwasser (STOCH und GALASSI 2010) sind seit wenigen Jahren auch Fische bekannt (BEHRMANN-GODEL et al. 2017). Für Deutschland gibt HAHN (2015) eine Übersicht über die Fauna des Grundwassers, die sogenannte Stygofauna, mit etwa 400 stygophilen und stygobionten Arten. Typische Grundwassertiere sind Höhlenflohkrebse (z.B. der Gattung *Niphargus*), Brunnenkrebse (z.B. der Gattung *Bathynella*), verschiedene Ruderfußkrebse (Co-

pepoda) oder auch der Urringelwurm (*Trochlochaetus beranecki*).

Grundwasserökosysteme zeichnen sich vor allem durch drei Merkmale aus, die sie interessanterweise mit der Tiefsee gemeinsam haben: das Fehlen von Primärproduktion, eine hohe Stabilität und eine ausgeprägte Fragmentierung, also räumliche Isolation vieler Teilsysteme. Dadurch unterscheiden sich Grundwasserökosysteme grundlegend von den meisten Oberflächenlebensräumen. Für den Charakter der Lebensgemeinschaften, deren Gefährdung und Schutz haben diese Eigenschaften weitreichende Bedeutung:

- **Das Fehlen von Primärproduktion:** Grundwasser ist ein lichtfreier, heterotropher Lebensraum. Der größte Teil des wenigen, verfügbaren organischen Materials stammt aus Photosyntheseprozessen an der Erdoberfläche (HAHN 2006; GRIEBLER und AVRAMOV 2015). Grundwasser entsteht durch die Versickerung von Oberflächenwasser, sei es aus Niederschlägen oder durch die Infiltration von Oberflächengewässern. Bei der Bodenpassage wird das mitgeführte organische Material unter Sauerstoffverbrauch abgebaut. Dabei eliminieren die mikrobiellen Gemeinschaften des Grundwassers auch eingetragene Bakterien und Viren. Je länger die Verweilzeit im Untergrund, desto nahrungärmer ist das Wasser (Abb. 2). Damit reinigen die Grundwasserökosysteme das Wasser, halten Nährstoffe zurück und bauen Schadstoffe ab. Selbstreinigung ist die wohl wichtigste Leistung der Lebensgemeinschaften. Sauberes, d.h. vor allem nahrungsarmes Grundwasser ist in erster Linie das Ergebnis biologischer Vorgänge (HANCOCK et al. 2005; BOULTON et al. 2008; GRIEBLER und AVRAMOV 2015). Mit ca. 70 % Anteil bildet Grundwasser die Grundlage der deutschen Trinkwasserversorgung.
- Grundwasser ist also ein extremer und vor allem nahrungsarmer Lebensraum (SCHMIDT und HAHN 2012). Das bioverfügbare organische Material ist der Schlüsselparameter zum Verständnis der Grundwasserlebensgemeinschaften und erklärt auch das Verhältnis von Oberflächen- und Grundwasserarten: Je mehr organisches Material verfügbar ist, desto höher sind die Besiedlungsdichte und der Anteil grundwasserfremder Arten (HAHN 2006; STEIN et al. 2010). Grundwassertiere sind sehr konkurrenzschwach. Weitere charakteristische Merkmale der Grundwasserfauna sind stark verringerte Stoffwechsel- und Fortpflanzungsraten sowie eine gegenüber Oberflächenarten deutlich verlängerte Lebensdauer (GRIEBLER und MÖSSLACHER 2003). Für Grundwas-



Abb. 1: Grundwasserlebensgemeinschaften. Krebstiere (Crustacea) sind die verbreitetste und artenreichste Tiergruppe im Grundwasser: Muschelkrebse (Ostracoda, unten links und oben rechts), Raupenhüpferling (Harpacticoida, Copepoda, Mitte links) und Brunnenkreb (Bathynellidae, Syncarida, Mitte rechts). Größe der Tiere: 0,5–1 mm. Typisch für Grundwassertiere sind die Pigmentlosigkeit und das Fehlen von Augen.

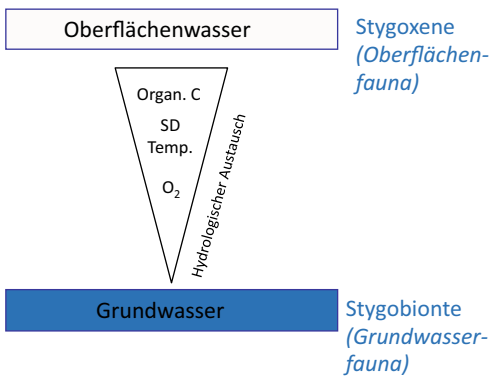


Abb. 2: Oberflächenwasser-Grundwasser-Gradienten bei der Grundwasserneubildung. Mit zunehmender Verweildauer des Wassers im Untergrund bauen die Lebensgemeinschaften organisches Material unter Sauerstoffzehrung ab und die Temperaturschwankungen werden immer geringer. Entlang dieser Gradienten ist eine jeweils typische, sich sukzessiv verändernde Besiedlung zu beobachten. Stygoxene Oberflächenwasserarten im energiereichen jüngeren Wasser, Stygobionten, echte Grundwasserbewohner, im nahrungsarmen älteren Wasser. SD Temp. = Standardabweichung der Temperatur, Organ. C = organisches Material. Gesamtbild: IGÖ GmbH.

serasseln ist ein Lebensalter von 15 Jahren gegenüber 1 Jahr bei der oberflächengewässerbewohnenden Wasserassel *Asellus aquaticus* bekannt (GINET und DECOU 1977). Ihr Vorkommen im Grundwasser ist deshalb wohl in erster Linie Konkurrenzvermeidung. Verbessert sich die Nahrungsversorgung durch Eintrag von der Oberfläche, ermöglicht dies den Oberflächenwasserarten die Einwanderung ins Grundwasser, zumindest solange das Futter reicht (Abb. 2). Für die biologische Bewertung des Grundwassers ist deshalb die Unterscheidung zwischen Grund- und Oberflächenwasserarten wichtig; es gilt strikt zu differenzieren zwischen sogenannten Stygobionten und Stygoxenen (HAHN 2006).

fläche, ein ausgesprochen stabiler Lebensraum. Je besser das Grundwasser vor Oberflächenwassereintrag abgeschirmt ist, desto stabiler sind die Verhältnisse. Dies gilt insbesondere für die Temperatur, die Nahrungsverfügbarkeit und etwaige Vorkommen von Oberflächenarten.

- **Hohe Stabilität:** Grundwasser ist, mit Ausnahme vieler karstiger Systeme und der Grundwasserober-

- Mit zunehmender Verweilzeit im Untergrund stabilisiert sich auch die Wassertemperatur. Grundwasser zeichnet sich deshalb durch weitgehend konstante Temperaturen im Bereich des Jahresmittelwertes der Lufttemperatur aus, der in Mitteleuropa bei etwa 10–12 °C liegt. Gerade die Standardabweichung der Wassertemperatur ist ein deutlicher Hinweis auf die Stärke des Oberflächeneinflusses. Starke Schwankungen der Umweltparameter wirken sich sehr deutlich auf die Grundwasserfauna aus. GÜTJAHR et al.

(2013) sprechen in solchen Fällen von „gestressten“ Gemeinschaften bzw. „gestressten“ Standorten.

- Umgekehrt ist die Stabilität des Grundwassers wohl eine wesentliche Ursache für das häufige Auftreten sogenannter lebender Fossilien und Reliktformen (GIBERT und DEHARVENG 2002). So spiegelt die Verbreitung zahlreicher Arten die alten, tertiären Flussgebiete wider. Die Grundwasserassel *Proasellus slavus* kommt nur im pliozänen Donaueinzugsgebiet vor, während die Verbreitung des Brunnenkrebses *Bathynella freiburgensis* auf das Rheinsystem nördlich der ehemaligen Wasserscheide zwischen Rhein und Donau beschränkt ist (FUCHS 2007).
- **Ausgeprägte Fragmentierung:** Die verschiedenen Grundwasserkörper sind deutlich voneinander getrennt. Ein Austausch über die unterirdischen Wasserscheiden hinweg ist nur ausnahmsweise, wie zwischen der Donauversickerung auf der Schwäbischen Alb und dem Aachquelltopf im Rheineinzugsgebiet, möglich (HAHN 2015). Gemeinsam mit der ausgeprägten kleinräumigen Heterogenität des Grundwassers liegt hier die Ursache für den hohen Anteil endemischer und kryptischer Arten (GIBERT und DEHARVENG 2002). Die starke Fragmentierung, zusammen mit der ausgeprägten Heterogenität des Grundwassers, dürfte auch eine wesentliche Ursache für die Seltenheit vieler Grundwasserarten sein: Etwa die Hälfte aller in Mitteleuropa vorkommenden Arten findet sich in weniger als einem Prozent aller Standorte. Dadurch wird die regionale Artenvielfalt im Grundwasser meist stark unterschätzt (HAHN und FUCHS 2009).

Biogeografisch unterscheidet sich die Grundwasserfauna des ehemals vereisten Nordeuropäischen Tieflandes, zu dem auch die norddeutsche Tiefebene gehört, deutlich von der Stygofauna der Mittelgebirge, der Alpen und weiter Teile des übrigen Europa. Während viele Grundwässer, sofern eine ausreichende Versorgung mit organischem Material und Sauerstoff besteht, gut besiedelt sind, tritt die nordeuropäische Stygofauna wegen der jahrtausendlangen Eisbedeckung, der feinen Sedimente und des sauerstoffarmen Grundwassers arten- und individuenarm auf. Typisch sind sogenannte nacheiszeitliche Wiederbesiedler, während Endemiten und echte Stygobionte im nordeuropäischen Grundwasser sehr selten sind (STEIN et al. 2012). Dort kommen sie offensichtlich vor allem in den vereinzelt auftretenden Festgesteinshorsten vor, die allerdings bislang kaum untersucht sind (SCHEIDHAUER 2018). Für die faunistische Bewertung des Grundwassers sind diese regionalen Unterschiede von erheblicher Bedeutung.

Typisch für die Fauna des Grundwassers sind die Seltenheit und Isolation der Vorkommen sowie ein hoher Anteil an kryptischen Arten, Endemiten und Reliktformen. In Verbindung mit Konkurrenzschwäche, sehr geringen Vermehrungsraten und niedrigem Ausbreitungsvermögen ergibt sich für die Grundwasserfauna eine erhebliche Gefährdung.

2 Gefährdungen der Grundwasserökosysteme

Die größte Gefährdung für Grundwasserökosysteme, so glaubte man bislang, gehe von Grundwasserabsenkungen und Schadstoffeinträgen aus (HAHN und KRÖFGES 2012). Zunehmend wird aber auch der Einfluss von Temperaturveränderungen, insbesondere der Erwärmung (SPENGLER 2017), deutlich. Letztere mag teilweise bereits eine Folge des Klimawandels sein, wird aber aktuell vor allem durch die Nutzung des Grundwassers zu Kühlzwecken oder durch diffuse Wärmeabgaben im urbanen Bereich verursacht (MENBERG et al. 2014; GRIEBLER et al. 2016; SPENGLER 2017).

Grundwasserabsenkungen und Schadstoffeinträge sind eng miteinander verknüpft. Quantitätsprobleme verursachen hier zunehmend auch Qualitätsprobleme. Derzeit vollziehen sich dramatische Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt. Die Grundwasserneubildungsraten sinken und damit auch die Grundwasserstände. Eine Übersicht dazu geben RIEDEL und WEBER (2020).

Der Rückgang der Grundwasserneubildung – in Süddeutschland um ca. 20 % in den letzten 30 Jahren (KOPP et al. 2018) – kann zur Absenkung der Grundwasserdruckoberfläche bzw. zur Umkehr des hydraulischen Gradienten im Bereich von Fließgewässern führen. Die entscheidenden Stellgrößen sind weniger die aktuellen Niederschläge und der Abfluss, sondern vor allem der hydraulische Gradient. Vereinfacht gesagt gibt der hydraulische Gradient den Druckunterschied zwischen Grundwasseroberfläche und Oberflächengewässer an. Je höher der Druck des Grundwassers, desto wahrscheinlicher ist eine die Bäche speisende Exfiltration. Bei einem negativen hydraulischen Gradienten überwiegt die Infiltration aus dem Fließgewässer ins Grundwasser, der Bach verliert also Wasser.

Grundsätzlich sind infiltrierende Verhältnisse zunächst „völlig normal“ und vielfach beschrieben. Allerdings sind im Zusammenhang mit dem Klimawandel überwiegend sinkende Grundwasserstände zu erwarten

(RIEDEL und WEBER 2020). Dadurch, bei sinkenden Grundwasserständen und sinkendem Grundwasserdruck, kann der hydraulische Gradient kippen, und bisher exfiltrierende Gewässerabschnitte werden dann Wasser ins Grundwasser verlieren (infiltrieren). Als Folge des Klimawandels steigt also die Gefahr zunehmend infiltrierender Verhältnisse im Gewässer samt Schadstoffeintrag in das Grundwasser (s. unten).

Hinsichtlich der räumlichen Skala ist zwischen flächigen, linearen und lokalen Belastungen zu unterscheiden. Deren Auswirkungen auf die Grundwasserökosysteme sind bislang allerdings kaum untersucht.

- **Flächige Belastungen** sind vor allem eine Folge der Landnutzung. Im urbanen Bereich kumulieren alle Belastungen: Starke Schwankungen oder Absenkungen der Grundwasserspiegel, Altlasten und thermische Einträge führten z.B. in Berlin dazu, dass das Grundwasser der gesamten Innenstadt weitestgehend frei von Tieren ist. Das Auftreten der Metazoenfauna im Berliner Stadtgebiet korreliert negativ mit der Zahl der Einwohner pro Hektar (HAHN et al. 2013). Generell ist in Städten von erhöhten Grundwassertemperaturen auszugehen (MENBERG et al. 2013).
- Landwirtschaftliche Nutzung bedeutet den Eintrag zahlreicher Substanzen ins Grundwasser, vom Nitrat über Pestizide und Tierarzneimittel bis hin zu organischem Material, Bakterien und Viren. GRIEBLER et al. (2014) und MATZKE et al. (2017) fanden deutliche Zusammenhänge zwischen der Nitratkonzentration und der Grundwasserfauna. In der Studie von MATZKE et al. (2017) erwies sich Nitrat sogar als der scheinbar stärkste Parameter zur Erklärung der faunistischen Varianz. Tatsächlich aber ist Nitrat wohl vor allem als Indikator für die Intensität der Landnutzung zu werten (GRIEBLER et al. 2014; MATZKE et al. 2017). Deutliche Auswirkungen auf die Grundwasserfauna scheint Gülleausbringung, selbst wenn sie der „guten fachlichen Praxis“ entspricht, zu haben. Dies zumindest lassen erste, noch nicht publizierte und ausgewertete Ergebnisse eines entsprechenden Versuchs in Südbaden vermuten.
- **Lineare Belastungen** gehen vor allem von Fließgewässern, aber auch von Straßen und Eisenbahnlinien aus. Dabei handelt es sich überwiegend um stoffliche Einträge, bei Fließgewässern auch um Wärme. Die Effekte der linearen Belastungen auf die Grundwasserqualität werden bislang kaum diskutiert und mit Sicherheit stark unterschätzt. Da es sich um zehntausende Kilometer lange Eintragspfade handelt, ist zukünftig von schwerwiegenden Auswir-

kungen auf das Grundwasser, seine Lebensgemeinschaften und auf die Qualität des daraus gewonnenen Trinkwassers auszugehen.

- Das Grundwasser bei neben Bahngleisen gelegenen Messstellen ist nach Erfahrung des Verfassers oft auffällig schlecht und artenarm besiedelt – möglicherweise als Folge des Herbizideinsatzes zur Freihaltung der Schienen. Für Straßen besteht ein Risikopotenzial durch Einträge vor allem von Streusalz, Reifen- und Bremsenabrieb.
- Als äußerst kritisch einzustufen ist die Infiltration belasteten Oberflächenwassers aus Flüssen und Bächen ins Grundwasser. Grundwasser und Oberflächenwasser stehen in engem Austausch miteinander (Abb. 3). Nach landläufiger Meinung werden Fließgewässer vor allem durch aufsteigendes Grundwasser, das den Basisabfluss liefert, aber auch durch Oberflächenwasser und Zwischenabfluss gespeist. Umgekehrt nimmt auch das Grundwasser infiltrierendes Oberflächenwasser aus Fließgewässern auf.
- Verstärkt wird die Infiltration durch anthropogene und klimabedingte Grundwasserabsenkungen (s. oben). Natürlicherweise hängt die Ausdehnung solcher Infiltrationsstrecken sehr stark vom Naturraum, dem jeweiligen Gewässerabschnitt und der kleinräumigen Morphologie ab (HANCOCK et al. 2005; SCHMIDT und HAHN 2012; BRUNKE et al. 2015). Bezogen auf die Gesamtlänge der Fließgewässer dürfte der Anteil der Infiltrationsstrecken erheblich sein – mit steigender Tendenz.
- Auf diesem Wege gelangen zahlreiche unerwünschte Substanzen ins Grundwasser; siehe dazu beispielsweise die Parameterliste der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL 2000; DREWES et al. 2018). Untersuchungen aus dem Hessischen Ried zeigen, dass Grundwasserleiter bis in große Tiefen mit Substanzen wie Süßstoffen und Arzneimitteln belastet sind, die ausschließlich aus Abwasser bzw. Kläranlagen stammen können (z.B. HLNUG 2016). Eine Studie des Umweltbundesamtes (DREWES et al. 2018) ergab, dass der sogenannte „Klarwasseranteil“, also der Anteil geklärten Abwassers, bei Niedrigwasser in vielen Flüssen 50 % und mehr beträgt. Bei kleineren Bächen dürfte der Anteil des Klarwassers noch deutlich höher liegen. Letztlich wird über die Fließgewässer Klarwasser der Kläranlagen ins Grundwasser verklappt.
- Aktuell besonders im Gespräch sind sogenannte Mikroschadstoffe, Spurenstoffe, deren teilweise erhebliche Auswirkungen auf Oberflächengewässermetazoen erst langsam bekannt werden (BERGER et al. 2016; BRUNKE 2018; BRETTSCHEIDER et al. 2018).

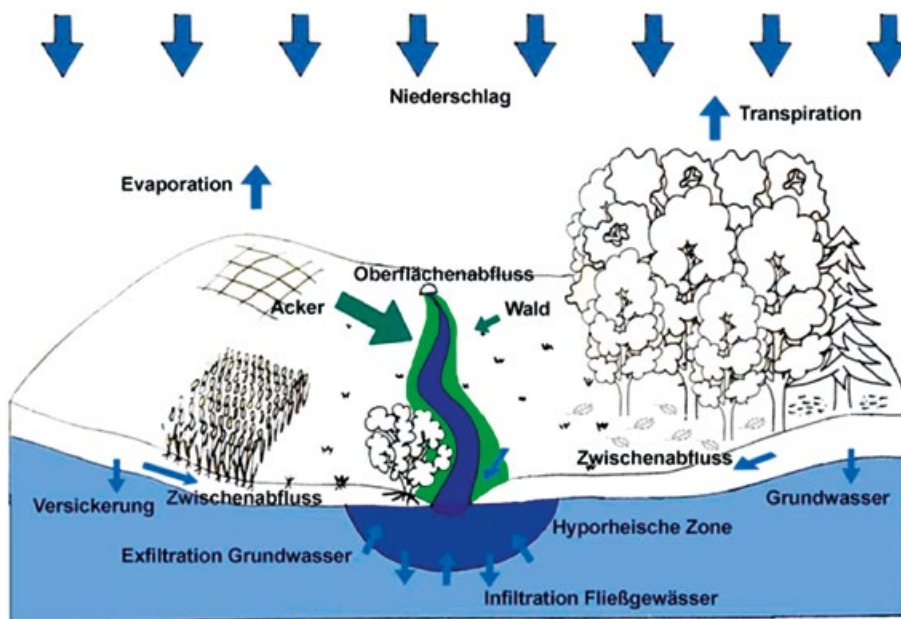


Abb. 3: Wechselwirkungen zwischen Fließgewässern und Grundwasser. Zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser bestehen intensive und höchst komplexe Austauschprozesse in der Fläche und entlang der Gewässer: Fließgewässer werden durch das Grundwasser gespeist und beziehen auf diese Weise ihren Basisabfluss. Umgekehrt infiltriert Oberflächenwasser ins Grundwasser und trägt zur Grundwasserneubildung bei. Diese Vorgänge können kleinräumig, innerhalb weniger Meter, wechseln, aber auch von Gewässerabschnitt zu Gewässerabschnitt. Die Schnittstelle zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser in der Fließgewässersohle wird als hyporheisches Interstitial bezeichnet. Bild: IGÖ GmbH.

Die Effekte auf die Lebensgemeinschaften des Grundwassers sind bislang nicht absehbar, entsprechende Studien nicht verfügbar. Allerdings schätzt die EUROPÄISCHE ARZNEIMITTEL-AGENTUR (2018) Grundwasserlebensgemeinschaften um den Faktor 10 empfindlicher ein als Oberflächenwassergemeinschaften. Die Anstrengungen zur Verbesserung der Oberflächenwasserqualität sind deswegen – ein durchaus neuer Ansatz – nicht zuletzt auch als vorbeugender Grundwasserschutz zu sehen.

- **Lokale Belastungen** umfassen alle oben bereits aufgeführten stofflichen Einträge aus Altlasten, Industrie und landwirtschaftlicher Nutzung, vor allem aber auch Wärme aus Klimaanlagen, sowie örtliche Grundwasserentnahmen und direkte bauliche Eingriffe in das Grundwasser. Angesichts der oft isolierten und kleinräumigen Vorkommen der Grundwasserfauna und der Seltenheit vieler Arten dürften auch räumlich begrenzte Belastungen teilweise erhebliche Folgen haben.
- Die Temperatur ist für Grundwassertiere neben der Nahrungsverfügbarkeit der zentrale, die Gemeinschaften prägende Umweltparameter (SPENGLER 2017). Die meisten echten Grundwassertiere sind kaltstenotherm, das heißt, sie sind auf niedrige Temperaturen angewiesen (GRIEBLER et al. 2015, 2016; SPENGLER 2017; SPENGLER und HAHN 2018). Für den Oberrheingraben konnte SPENGLER (2017) zeigen, dass bereits Temperaturen von mehr als 12,5°C die Grundwasserfauna deutlich schädigen und die Gemeinschaften „kippen“ (Abb. 4). Zunehmend

- wird Grundwasser zu Kühlzwecken, z.B. für Klimaanlagen, aber auch für industrielle Fertigungsprozesse genutzt und wieder zurückgeführt. Dadurch entstehen im Grundwasser in wachsendem Umfang Wärmeinseln in der Landschaft, in denen die Anzahl vor allem stygobionter Arten und Crustaceen signifikant niedriger ist als außerhalb (SPENGLER 2017). Auch auf die mikrobiellen Gemeinschaften sowie auf die Grundwasserqualität insgesamt hat Erwärmung deutliche Auswirkungen. So steigen Keimzahl und mikrobielle Diversität, vor allem wenn genügend organisches Material verfügbar ist (GRIEBLER et al. 2015; RIEDEL 2019). Ökologisch begründete Hinweise zur Handhabung von Wärmeinträgen in das Grundwasser gibt es bisher nicht (WÜRDEMANN und BLUM 2011; HAHN et al. 2018).
- Grundwasserentnahmen verursachen in der Regel sogenannte Absenkungstrichter, wodurch Oberflächenwasser oder oberflächennahes Grundwasser in die Tiefe strömt (HÖLTING und COLDEWEY 2013). Neben den bekannten negativen Effekten auf grundwasserabhängige Feuchtgebiete beeinträchtigt die Grundwasserabsenkung deshalb auch die Lebensgemeinschaften des Grundwassers.
- BORK et al. (2009) konnten nachweisen, dass sich bereits wenige Wochen nach der Inbetriebnahme eines Brunnens starke und dauerhafte Veränderungen der Grundwasserlebensgemeinschaften einstellten. Dabei traten, wohl als Folge des Absenkungstrichters, zunehmend Oberflächenarten in Verbindung mit deutlich gestiegenen Besiedlungsdichten auf. In

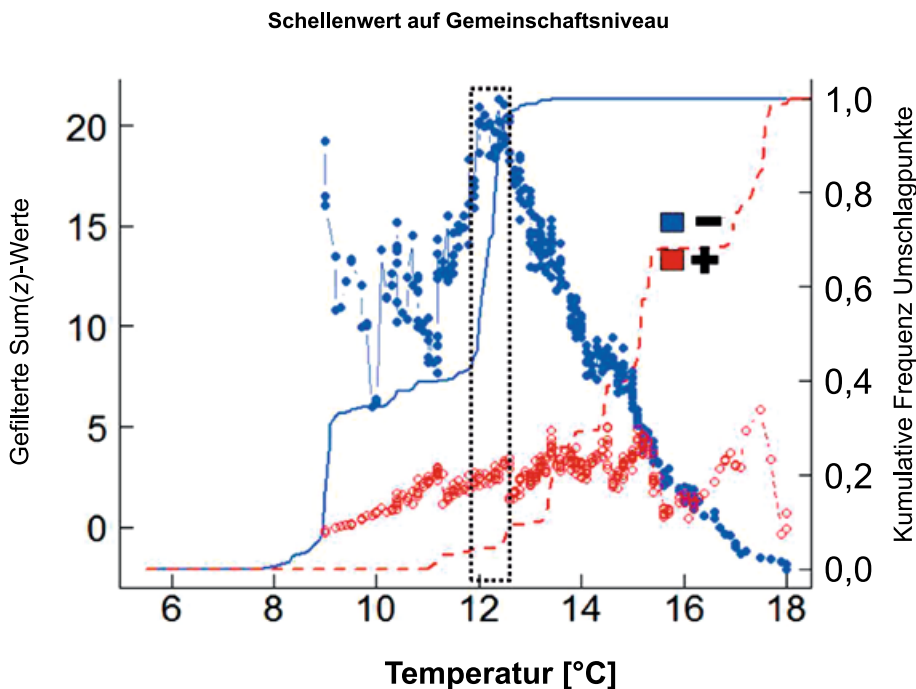


Abb. 4: Auswirkung der Erwärmung auf die Grundwasserfauna. Die Stelle der Grafik, an der die durchgezogene blaue Linie besonders steil verläuft, markiert einen thermischen Schwellenwert von 12,4°C für die Grundwassergemeinschaften am Oberrhein (Statistikprogramm TITAN). Oberhalb dieser Temperatur verändern sich die Gemeinschaften und wärmetolerante Arten dominieren. Ein zweiter, weniger deutlicher Schwellenwert zeigt, dass es im Oberrheingraben auch kühlere Grundwasserlebensräume gibt (Anstieg der blauen, durchgezogenen Kurve bei 9°C) (SPENGLER und HAHN 2018).

den folgenden Jahren wurden dann auch die Feuchtgebiete in der Umgebung des Brunnes zunehmend durch Austrocknung und Eutrophierung geschädigt. Es scheint, dass Grundwasserorganismen sehr rasch auf hydrologische Veränderungen reagieren und damit auch ein hervorragendes Frühwarnsystem darstellen. Untersuchungen zu den Auswirkungen von Entnahmen auf Grundwasserökosysteme liegen allerdings bislang kaum vor.

- Während Grundwasserentnahmen zu Trinkwasserzwecken meist kontrolliert stattfinden, stellen die oft unkontrollierten Entnahmen für die landwirtschaftliche Beregnung ein spezielles Problem dar. Insbesondere in klimatisch begünstigten Regionen, wo viele Sonderkulturen mit hohem Wasserbedarf angebaut werden, machen sich derartige Entnahmen zunehmend durch sinkende Grundwasserspiegel bemerkbar.
- Angesichts der schlechten Datenlage lassen sich diese Effekte allerdings nur schwer von klimawandelbedingt niedrigeren Grundwasserspiegellagen trennen. Der Klimawandel führt zu häufigeren und längeren Trockenperioden und längeren Vegetationszeiten mit verringerter Grundwasserneubildung und verstärkt damit die Effekte von Grundwasserentnahmen. Bei kleineren Grundwasservorkommen, gerade in höheren Lagen der Mittelgebirge, könnte das zur Austrocknung und damit dem vollständigen Verlust des Lebensraums führen.

- Baumaßnahmen für Siedlungen und Gewerbe sind zunächst mechanische Eingriffe, allerdings oft auch verbunden mit Grundwasserabsenkungen, stofflichen und thermischen Einträgen. Dadurch wird der Grundwasserlebensraum örtlich direkt geschädigt bzw. zerstört. Besonders artenreich besiedelt sind sogenannte Ökotone, also Übergangslbensräume, z.B. zwischen Tal- und Klufftgrundwasser an den Talrändern oder in der Aue zwischen Talgrundwasser und Fließgewässer (HAHN und FUCHS 2009). Bebauungen aller Art dürften gerade hier erhebliche Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften des Grundwassers haben. Untersuchungen zu den Auswirkungen von Baumaßnahmen liegen bislang nicht vor.

3 Rechtliche Situation der Grundwasserökosysteme

Viele Arten des Grundwassers sind sehr selten, der Anteil an kryptischen Arten, Endemiten, „lebenden Fossilien“ und Reliktarten ist im Vergleich zu Oberflächenlebensräumen ausgesprochen hoch, und viele Populationen sind stark isoliert – und damit besonders schutzbedürftig. Grundwasserökosysteme sind energiearm und über lange Zeiträume stabil, weswegen sie auf anthropogene Störungen und Stoffeinträge sehr

1.2

empfindlich reagieren. In Verbindung mit der Konkurrenzschwäche der Grundwasserfauna, sehr geringen Vermehrungsraten und niedrigem Ausbreitungsvermögen ergibt sich daraus eine erhebliche Gefährdung. Trotzdem besteht *de facto* kein rechtlicher Schutz, weder für einzelne Arten noch für den Lebensraum Grundwasser als Ganzes (HAHN et al. 2018).

Aus rechtlicher Sicht relevant für die Grundwasser-ökosysteme sind vor allem das Naturschutz- und das Wasserrecht.

- **Naturschutzrechtlich** gilt das Grundwasser nicht als Lebensraum, sondern als Ressource und unterliegt nicht dem Schutz des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG). Besonders schwerwiegend ist, dass für die Grundwasserlebensgemeinschaften auch die Eingriffsregelung nicht greift (BNatSchG 2009, § 14 Eingriffe in Natur und Landschaft). Diese bezieht sich nämlich nicht auf den Lebensraum Grundwasser, sondern auf die ungesättigte Zone und den Grundwasserspiegel, sofern dort Veränderungen und damit Schäden oberirdischer Lebensräume zu befürchten sind. Mit dem Geist und den Zielen des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG, § 1 Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege) ist das vollständige Ignorieren der Grundwasserökosysteme keinesfalls in Einklang zu bringen.
- Die Verordnung zum Schutze wildlebender Tier- und Pflanzenarten (BARTSCHV 2005 – Bundesartenschutzverordnung vom 16.02.2005, in der Fassung vom 1. Januar 2013), in deren Anlage 1 (zu BArtSchV, § 1 Besonders geschützte und streng geschützte Tier- und Pflanzenarten), nennt nicht eine einzige Grundwasserart. Ebenso wenig finden sich konkrete Regelungen zum Biotop- und Artenschutz im Grundwasser im BNatSchG oder in der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-RL 1993) (Anhänge 1 und 2).
- Eindeutig, jedoch nicht umsetzungsrelevant, ist die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt („Biodiversitätsstrategie“, BMU 2007). Sie formuliert klare (Schutz-)Ziele und Visionen für den Lebensraum Grundwasser (s. B 1.2.7 Grundwasserökosysteme). Auffällig ist vor allem der Widerspruch zwischen Biodiversitätsstrategie und Naturschutzrecht, der gleichzeitig auch zeigt, dass dem Gesetzgeber die Problematik durchaus bewusst ist.
- Ein Schutzanspruch lässt sich jedoch aus dem **Wasserrecht** ableiten. Grundwasser gilt als „aquatisches Ökosystem“ (EG-WRRL, Art.1 Ziel) bzw. als „Gewässer“ (Wasserhaushaltsgesetz, WHG 2009, § 2 Anwendungsbereich). Wärme gilt als „Verschmut-

zung“ (EG-WRRL, Art.2 Begriffsbestimmungen, Abs.33), womit in Verbindung mit dem Verschlechterungsverbot (EG-WRRL, Art.17; EG-GWRL 2006, Art.1; WHG, § 6 und § 47; GrwV 2010, § 2 mit Verweis auf WHG, § 47) bereits ein eindeutiger Umsetzungsbezug besteht.

- Das WHG wird hier noch konkreter als die EG-WRRL und legt fest, dass die Gewässereigenschaften u.a. über die „Gewässerökologie“ und die „Wasserbeschaffenheit“ definiert werden, wobei Letztere über die „biologische Beschaffenheit“ des Wassers bestimmt wird (WHG § 3, Abs.7 und 9). Von besonderer Bedeutung ist WHG § 6, Abs.1 (Allgemeine Grundsätze der Gewässerbewirtschaftung): „Die Gewässer sind nachhaltig zu bewirtschaften, insbesondere mit dem Ziel, ihre Funktions- und Leistungsfähigkeit als Bestandteil des Naturhaushalts und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu erhalten und zu verbessern, insbesondere durch Schutz vor nachteiligen Veränderungen von Gewässereigenschaften.“
- Umgesetzt wird der sich daraus ableitende, wasserrechtliche Schutzanspruch für Grundwasserökosysteme allerdings weder auf europäischer noch auf nationaler Ebene. Anders als für Oberflächengewässer sieht die EG-WRRL den „Guten Ökologischen Zustand“ für das Grundwasser nicht vor.
- Über den gesetzlich geforderten guten chemischen Zustand in Grund- und Oberflächengewässern wäre es auch jetzt bereits möglich, Verbesserungen in chemischer Hinsicht umzusetzen. Bei jeder Einleiterlaubnis ist darauf zu achten, dass weder gegen das Verschlechterungsverbot noch gegen das Verbesserungsgebot in § 27 Wasserhaushaltsgesetz verstoßen wird. Ferner ist die gesetzlich geforderte Zielerreichung im Auge zu behalten (BVerwG-Urteil vom 2. November 2017).

Fachlich ist die Ungleichbehandlung von Grund- und Oberflächenwasser nicht nachvollziehbar.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, was der Umsetzung des Schutzanspruches im Wege steht. Argumentiert wird vonseiten der Politik seit Jahrzehnten damit, dass es an Daten und vor allem an Bewertungsverfahren mangle (BUNDESREGIERUNG 2019). Allerdings ist diese Behauptung mittlerweile nachweislich falsch: Die biologische Bewertung und Überwachung des Grundwassers ist möglich (z.B. HAHN und FRIEDRICH 1999; HAHN 2006; STEIN et al. 2012; GRIEBLER et al. 2010; GRIEBLER et al. 2014; KORBEL und HOSE 2011, 2017; GRIEBLER et al. 2018). HAHN et al. (2018) vermuten, dass der eigentliche

Grund für die Ungleichbehandlung der Grundwasser-ökosysteme in den damit verbundenen Kosten und dem zusätzlichen Personalaufwand liegt. Dies gelte insbesondere für die Eingriffsregelung (BNatSchG, § 14) und den „Guten Ökologischen Zustand“ (EG-WRRL 2000). Die Autoren gehen davon aus, dass die Umsetzung des Schutzanspruches, zumindest für das Wasserrecht, einklagbar ist.

4 Schlussfolgerungen und Konsequenzen

Angesichts der Schutzbedürftigkeit vieler Grundwasserarten und der Verletzlichkeit der Grundwasserökosysteme einerseits und dem zunehmenden Nutzungs- und Belastungsdruck auf das Grundwasser andererseits besteht dringender Handlungsbedarf. Immer noch gibt es keine Rote Liste für Grundwasserorganismen, praktisch keine grundwasserökologischen Monitoringprogramme, kaum ein Langzeitmonitoring, und bei keinem anderen limnischen Lebensraum sind die rechtlichen Defizite so groß wie beim Grundwasser (JÄHNIG et al. 2019).

Deshalb ist für die Grundwasserökosysteme die konsequente Umsetzung der bereits bestehenden Schutzansprüche und deren Erweiterung, vor allem im Naturschutzrecht, anzustreben (HAHN et al. 2018; SCHWEER et al. 2019):

- Gleichbehandlung des Grundwassers mit den Oberflächengewässern im Hinblick auf den Schutz der Ökosystemfunktionen, Arten und Lebensräume
- explizite und konsequente Aufnahme der Begriffe „Grundwasserökosysteme“ und „Guter Ökologischer Zustand“ für Grundwasserökosysteme in das nationale und europäische Wasserrecht
- explizite Aufnahme des Lebensraums Grundwasser und seiner Ökosysteme und Arten in das nationale und europäische Naturschutzrecht (BArtSchV, FFH-Richtlinie), v.a. auch Ausdehnung der Eingriffsregelung und der Ausführungsbestimmungen zur FFH-Verträglichkeitsprüfung auf den Lebensraum Grundwasser
- konsequente Aufnahme des Begriffs der „Wärme“ als Verschmutzung in das nationale und europäische Wasserrecht und als Parameter in die GW-WRRL, Anhang IIb; hier wären auch einige einfache, grundwasserökologische Parameter einzuführen

Zur Reduzierung der flächigen und der meisten linearen Belastungen greift das Wasserrecht (Stichwort „flächen-deckender Grundwasserschutz“) mit den Werkzeugen

der EG-WRRL, aber auch das Bundesbodenschutzgesetz (BBODSCHG 1998) mit der Bodenschutzverordnung und Altlastenverordnung (BBODSCHV 1999) sowie die Düng- und Trinkwasserverordnung (DüV 2017; TRINKWV 2018). Ziel ist der Gute Chemische Zustand (und zukünftig vielleicht auch der Gute Ökologische Zustand) des Grundwassers, der erhalten bzw. wiederhergestellt werden soll. Lineare Schadstoffeinträge aus Fließgewässern sind vor allem durch eine Verbesserung der Wasserqualität (Guter Ökologischer und Chemischer Zustand), z.B. durch die vierte Reinigungsstufe bei Kläranlagen, aber auch durch die Anhebung der Grundwasserspiegel (Guter Mengenmäßiger Zustand), zu vermindern. Die Umsetzung könnte u.a. über die Bewirtschaftungspläne nach EG-WRRL erfolgen (SCHWEER et al. 2019).

Lokale Belastungen der Grundwasserökosysteme ließen sich vor allem durch das Naturschutzrecht, speziell die Eingriffsregelung und den Biotop- und Artenschutz, kontrollieren und vermindern. Allerdings bedarf es hierfür noch weitreichender rechtlicher Anpassungen (s. oben). Örtliche thermische und stoffliche Belastungen sind durch das Wasserrecht, speziell das Verschlechterungsverbot sowie das Verbesserungsgebot (s. oben), zu reduzieren.

Voraussetzung für einen ökologisch begründeten Grundwasserschutz und die nachhaltige Grundwasser-nutzung ist eine belastbare Datengrundlage. Benötigt werden spezielle, grundwasserökologische Monitoringprogramme, insbesondere auch Langzeitbeobachtungen, die quantitative Analyse der Gefährdungen und die repräsentative Erfassung der Grundwasserbiodiversität und, darauf aufbauend, Rote Listen der Grundwasserarten und -lebensräume. Zur effizienten Erfassung der Grundwasserbiodiversität werden nicht nur zusätzliche Taxonomen, sondern auch neue genetische Verfahren, wie z.B. Umwelt-DNA (eDNA) benötigt, die standardisiert und im Hochdurchsatz eingesetzt werden können.

Bei den Oberflächengewässern konnten in den vergangenen Jahrzehnten trotz des immer noch bestehenden Verbesserungsbedarfs beeindruckende Erfolge bei der Wiederherstellung der ökologischen Funktionsfähigkeit und der Artenvielfalt erzielt werden. Auch beim Lebensraum Grundwasser ließen sich ähnliche Erfolge erreichen und Schutz und Nutzung miteinander vereinbaren – wenn denn der politische Wille dafür bestünde. Abgesehen von ethischen und gesetzlichen Motiven gibt es dafür ein starkes Argument: Sauberes Grundwasser ist das Ergebnis biologischer Vorgänge, oder, vereinfacht

ausgedrückt, „nur gesunde Grundwasserökosysteme liefern auch sauberes Trinkwasser“.

Danksagung

Frau Dr. Anke Uhl, Arbeitskreis Quellen und Grundwasser der Deutschen Gesellschaft für Limnologie (DGL), hat in vielen fruchtbaren Diskussionen und mit zahlreichen Hinweisen sehr zum Gelingen dieses Aufsatzes beigetragen.

Literatur

- BARTSCHV (2005): Verordnung zum Schutz wild lebender Tier- und Pflanzenarten (Bundesartenschutzverordnung – BArtSchV) Fassung vom 21. Januar 2013 (BGBl. I S. 95).
- BBODSCHG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- BBODSCHV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- BEHRMANN-GODEL, J., NOLTE, A.W., KREISELMAIER, J., R., & FREYHOF, J. (2017): The first European cave fish. *Current Biology* 27, R243–R258.
- BERGER, E., HAASE, P., OETKEN, M. & SUNDERMANN, A. (2016): Field data reveal low critical chemical concentrations for river benthic invertebrates. – *Science of the Total Environment* 544, 864–873.
- BMU (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- BNATSCHG (2009): Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG). Fassung vom 13. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2258).
- BORK, J., BERKHOFF, S. & HAHN, H.J. (2009): Bioindikation im Grundwasser: Metazoen. – In HUPFER, W., WILKEN, R.-D. (Hrsg.): *Handbuch Angewandte Limnologie*, 26 Erg. Lfg., VIII-7.5.2 (Bewertungen), 1–20, Wiley-VCH, Weinheim, ISBN 978-3-527-32131-5.
- BOULTON, A.J., FENWICK, G.D., HANCOCK, P.J., HARVEY, M.S. (2008): Biodiversity, functional roles and ecosystem services of groundwater invertebrates. *Invertebrate Syst.* 22, 103–116.
- BRETTSCHEIDER, D.; HARTH, F.; MISOVIC, A.; OETKEN, M.; SCHULTE-OEHLMANN, U.; OEHLMANN, J. (2018): Einfluss kleiner Kläranlagen auf kleine Fließgewässer am Beispiel des Rambachs in Hessen. – *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 9/2018, 526–533.
- BRUNKE, M. (2018): Heterogenität der stofflichen Belastungen in einem kleinen Fließgewässer im Norddeutschen Tiefland. – *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 5/2018, 265–271.
- BRUNKE, M., MUTZ, M., MARXSEN, J., SCHMIDT, CHR., SCHMIDT, S.I. & FLECKENSTEIN, J. (2015): Das hyporheische Interstitial von Fließgewässern: Strukturen, Prozesse und Funktionen. – In BRENDENBERGER, H., MARTIN, P. BRUNKE, M. & HAHN, H.J. (Hrsg.): *Grundwassergeprägte Lebensräume. Eine Übersicht über Grundwasser, Quellen, das hyporheische Interstitial und weitere grundwassergeprägte Habitate.* – *Limnologie Aktuell* 14, 133–214, Schweizerbart, Stuttgart, ISBN 978-3-510-53012-0.
- BUNDESREGIERUNG (2019): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Steffi Lernke, Harald Ebner, Dr. Bettina Hoffmann, weiterer Abgeordneter und der Fraktion Bündnis 90/DIE GRÜNEN „Biodiversität im Grundwasser“. – Bundestagsdrucksache 19/10203.
- CULVER D.C. & J.R. HOLSINGER (1992): How many species of troglobites are there? – *National Speleological Society Bulletin* 54: 79–80.
- DREWES, J.E., KARAKURT, S., SCHMIDT, L., BACHMAIER, M. & HÜBNER, U. (2018): Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderungen für die Trinkwassergewinnung in Deutschland. – UBA-Texte 59/2018, 117 S., Umweltbundesamt Berlin.
- DÜV (2017): Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305)
- EG-GWRL (2006): Grundwasser Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. *Amtsblatt der Europäischen Union* L 372 (19).
- EG-WRRL (WASSERRAHMENRICHTLINIE) (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. *Official J. European Comm. Brüssel, Belgien.* L 327/1–L 327/72.
- ESSAFI, K., J. MATHIEU, I. BERRADY & H. CHERGUI (1998): Qualité de l'eau et de la faune au niveau de forages artesiens dan la Plaine de Fès et la Plaine des Beni-Sadden. *Premiers resultats.* – *Mémoires de Biospéologie* 25: 157–166.
- EUROPÄISCHEN ARZNEIMITTEL-AGENTUR (2018): 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.
- FFH-RL (1992): RICHTLINIE 92/43/EWG DES RATES vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie, FFH-Richtlinie). (Abl. L 206 vom 22.7.1992, S. 7) in der Fassung vom 20. November 2006.
- FUCHS, A. (2007): Erhebung und Beschreibung der Grundwasserfauna in Baden-Württemberg. – *Promotion der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau*, 109 S.
- GIBERT, J. & DEHARVING, L. (2002): Subterranean ecosystems: a truncated functional biodiversity. *BioScience* 52:473–481.
- GINET, R., DECOU, V. (1977): *Initiation à la Biologie et à l'Écologie Souterraine*, Jean Pierre Delarge, 345 S., Paris.
- GRIEBLER, C. & AVRAMOV, M. (2015): Groundwater ecosystem services – a review. *Freshwater Science*, 34: 355–367.
- GRIEBLER, C., BRIELMANN, H., HABERER, C.M., KASCHUBA, S., KELLERMANN, C., STUMPP, C., HEGLER, F., KUNTZ, D., WALKER-HERTKORN, S., LUEDERS, T. (2016): Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. – *Environ Earth Sci*, 75, (1391), DOI <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6207-z>
- GRIEBLER, C. & MÖSSLACHER, F. (2003): *Grundwasser Ökologie*. 490 S., UTB-Facultas Verlag, Wien.
- GRIEBLER, C., HAHN, H.J., STEIN, H., KELLERMANN, C., FUCHS, A., STEUBE, C., BERKHOFF, S., BRIELMANN, H. (2014): Entwicklung biologischer Bewertungsmethoden und -kriterien für Grundwasserökosysteme. 153 S., UFOPLAN, FKZ 3708 23 200, ISSN: 1862-4804.
- GRIEBLER, C., HUG, K., FILLINGER, L., MEYER, A. & AVRAMOV, A. (2018): Der B-A-E Index – Ein mikrobiologisch-ökologisches Konzept zur Bewertung und Überwachung von Grundwasser. – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62, (6), 378–386; https://doi.org/10.5675/HyWa_2018.6_1.
- GRIEBLER, C., KELLERMANN, C., KUNTZ, D., WALKER-HERTKORN, S., STUMPP, C. & HEGLER, F. (2015): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung. – UFOPLAN, FKZ 3710 23 204, 154.

- GRIEBLER, C., STEIN, H., KELLERMANN, C., BERKHOFF, S., BRIELMANN, H., SCHMIDT, S.I., SELES, D., STEUBE, C., FUCHS, A. & HAHN, H.J. (2010): Ecological assessment of groundwater ecosystems – Vision or illusion? *Ecological Engineering* 36: 1174–1190.
- GRWV (2010): Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung – GrwV). – Fassung vom 4. August 2016 (BGBl. I S. 1972).
- GUTJAHR, S., BORK, J., SCHMIDT, S.I. & HAHN, H.J. (2013): Efficiency of sampling invertebrates in groundwater habitats. – *Limnologica* 43, 43–48, <https://doi.org/10.1016/j.limno.2012.08.001>
- HAHN, H.J. & FRIEDRICH, E. (1999): Brauchen wir ein faunistisch begründetes Grundwassermonitoring und was kann es leisten? – *Grundwasser* 4, 147–154.
- HAHN, H.J. & FUCHS, A. (2009): Distribution patterns of groundwater communities across aquifer types in southwestern Germany. – *Freshwater Biology*, 54, 848–860, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02132.x>.
- HAHN, H.J. & KRÖFGES, P. (2012): Grund- und Trinkwasserschutz. – *Politische Ökologie* 130, 39–44.
- HAHN, H.J. (2006): A first approach to a quantitative ecological assessment of groundwater habitats: The GW-Fauna-Index. *Limnologica* 36, 2, 119–137.
- HAHN, H.J. (2015): Grundwasser – die Tiefsee des Festlandes. – In: DIEHL, P., IMHOFF, A. & MÖLLER, L. (Hrsg.): *Wissenschaftsgesellschaft Pfalz – 90 Jahre Pfälzische Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, Schriftenreihe 1927–2015*, Bd. 116, 119–134, verlag regionalkultur (vr), Ubstadt-Weiher, Heidelberg, Neustadt a. d. W., ISBN 978-3-89735-903-1.
- HAHN, H.J., MATZKE, D., KOLBERG, A. & LIMBERG, A. (2013): Untersuchungen zur Fauna des Berliner Grundwassers – erste Ergebnisse. – *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* 20: 85–92
- HAHN, H.J., SCHWEER, C. & GRIEBLER, C. (2018): Grundwasser-ökosysteme im Recht? – Eine kritische Betrachtung zur rechtlichen Stellung von Grundwasserökosystemen. – *Grundwasser* 23, 3, 209–218, <https://doi.org/10.1007/s00767-018-0394-3>.
- HANCOCK, P.J., BOULTON, A.J. & HUMPHREYS, W.F. (2005): Aquifers and hyporheic zones: Towards an ecological understanding of groundwater. *Hydrogeology Journal* 13, 98–111.
- HLNUG (2016): Kläranlageneinleitungen in oberirdische Gewässer und dadurch bedingte Spurenstoffeinträge in das Grundwasser im Hessischen Ried („Spurenstoffgutachten Hessisches Ried“) – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. (2013): *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. – 8. Aufl., Springer Verlag Heidelberg, 438 S.
- HUNKELER, D., GOLDSCHIEDER, N., ROSSI, P., BURN, C. (2006): Biozönosen im Grundwasser – Grundlagen und Methoden der Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften. Bundesamt für Umwelt, Bern, p. 113.
- JÄHNIG, S.C., ADRIAN, R., ARLINGHAUS, R., BECKS, L., BEHRMANN-GODEL, J., BERENDONK, T., BORCHARDT, D., DUTZ, J., FREYHOE, J., GAEDKE, U., GEIST, J., GESSNER, M., GROSSART, H.-P., HAASE, P., HAHN, H.J., HERING, D., HÖLKER, F., JESCHKE, J., JÜRGENS, K., KREMP, A., KUBE, S., LABRENZ, M., LEESE, F., PÄTZIG, M., PAULS, S., PIONTEK, J., PUSCH, M., SCHÄFER, R.B., SCHNEIDER, J., SOMMERWERK, N., STÖCK, M., STRAILE, D., SUHLING, F., WAGNER, A., WEITERE, M., WEITHOFF, G., WINKELMANN, C., WORISCHKA, S. (2019): Living waters: a research agenda for the biodiversity of inland and coastal waters. *Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin*, 14 S. <https://doi.org/10.4126/FRL01-00641368>.
- KOPP, B., BAUMEISTER, C., GUDERA, T., HERGESELL, M., KAMPE, J., MORHARD, A. & NEUMANN, J. (2018): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951 bis 2015. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62, (2), 62–76; https://doi.org/10.5675/HyWa_2018_2_1.
- KORBEL, K.L. & HOSE, G.C. (2011): A tiered framework for assessing groundwater ecosystem health. *Hydrobiologia* 661, 329–49.
- KORBEL, K.L. & HOSE, G.C. (2017): The weighted groundwater health index: Improving the monitoring and management of groundwater resources. *Ecological Indicators* 75, 164–181.
- KRUMHOLZ, L.R. (2000): Microbial communities in the deep subsurfaces. – *Hydrogeological Journal* 8, 41–46.
- MATZKE, D., FUCHS, A., STEIN, H. & HAHN, H.J. (2017): Monitoring Grundwasserfauna Sachsen-Anhalt 2016 & 2017 – Referenzmonitoring und Biomonitoring Nitrat. – https://lhw.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/Landesbetriebe/LHW/neu_PDF/5.0_GLD/Dokumente_GLD/Berichte_Dokumente_GW/Monitoring-GW-Fauna-2016-2017.pdf (Internet-Abfrage: 10.06.2019).
- MENBERG, K., BAYER, P., ZOSSEDER, K., RUMOHR, S., BLUM, P. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment*, 442, 123–133.
- MENBERG, K., BLUM, P., KURYLYK, B.L. & BAYER, P. (2014): Observed groundwater temperature response to recent climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11), 4453–4466.
- RIEDEL, T. (2019): Temperature-associated changes in groundwater quality. – *Journal of Hydrology* 572, 206–212.
- RIEDEL, T. & WEBER, K.D. (2020): Review: The Influence of global change in Europe’s water cycle and groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 28, 1939–1959, <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02165-3>.
- SCHIEDHAUER, L. (2018): Untersuchung zur Grundwasserfauna Hannovers. – Unveröff. Masterarbeit der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, 152 S.
- SCHMIDT, S.I. & HAHN, H.J. (2012): What is groundwater and what does this mean to fauna? – An opinion. – *Limnologica* 42 (1): 1–6.
- SCHWEER, C., HAHN, H.J., GROMMELT, H.-J., KÖHLER, R., LÖW, H.-J. & SOKOLLEK, V. (2019): Reviewprozess WRRL: Expertenbefragung. Erläuterungen Grundwasserökosysteme und Kolmation. – Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., Bundesarbeitskreis Wasser, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/fluesse/fluesse_wrrl_reviewprozess.pdf (Abfrage 20.06.2019).
- SPENGLER, C. (2017): Die Auswirkungen anthropogener Temperaturerhöhungen auf die Crustaceengemeinschaften im Grundwasser – Versuch einer Prognose zur Klimaerwärmung und zu lokalen Wärmeeinträgen. *Dissertationsschrift der Universität Koblenz-Landau*.
- SPENGLER, C. & HAHN, H.J. (2018): Thermostress: Ökologisch begründete, thermische Schwellenwerte und Bewertungsansätze für das Grundwasser. – *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 11, 9, <https://doi.org/10.3243/kwe2018.09.001>.
- STEIN, H., GRIEBLER, C., BERKHOFF, S.E., MATZKE, D., FUCHS, A. & HAHN, H.J. (2012): Stygoregions – a promising approach to a bioregional classification of groundwater systems. *Scientific Reports* 2, 673, <https://doi.org/10.1038/srep00673>.
- STEIN, H., KELLERMANN, C., SCHMIDT, S.I., BRIELMANN, H., STEUBE, C., BERKHOFF, S.E., FUCHS, A., HAHN, H.J., THULIN, B. & GRIEBLER, C. (2010): The potential use of fauna and bacteria as ecological indicators for the assessment of groundwater quality. – *J. Environ. Monit.*, 12, 242–254, <https://doi.org/10.1039/B913484K>.
- STOCH, F. & GALASSI, D.M.P. (2010): Stygobiotic crustacean species richness: a question of numbers, a matter of scale. *Hydrobiologia*, 653(1), 217–234. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0356-y>.
- TRINKWV (2018): Verordnung zur Neuordnung trinkwasserrechtlicher Vorschriften. *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2018 Teil I Nr. 2*, ausgegeben zu Bonn am 8. Januar 2018. S. 99–114.
- WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) vom 4. August 2016 (BGBl. I S. 1972).
- WÜRDELMANN, H. & BLUM, P. (2011): Oberflächennahe Geothermie: Regelungsbedarf zur Berücksichtigung ökologischer und technischer Aspekte? *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 16, 67–68, DOI <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0167-8>.

Dem Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Förderkennzeichen ZF4658401SB8, danke ich für die Unterstützung.

Der Autor

HANS JÜRGEN HAHN^{1,2}

¹Universität Koblenz Landau, Campus Landau

Institut für Umweltwissenschaften

Fortstr. 7, 76829 Landau

hjhahn@uni-landau.de

²Institut für Grundwasserökologie IGÖ GmbH

Fortstr. 7, 76829 Landau

hjhahn@groundwaterecology.de