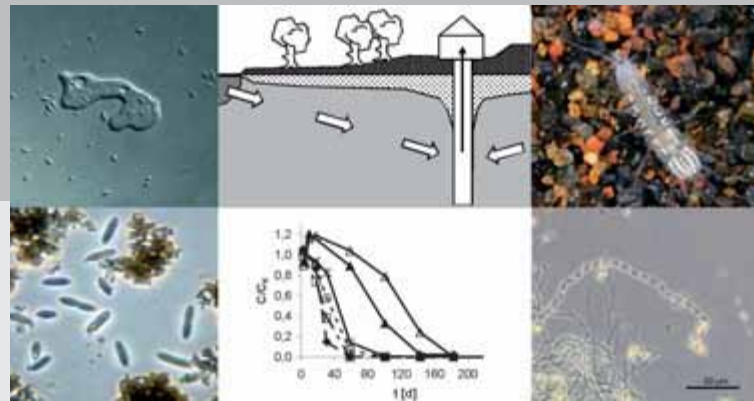


Grundwasserbiologie – Grundlagen und Anwendungen

Oktober 2012



Der DWA-Themenband „Grundwasserbiologie – Grundlagen und Anwendungen“ und die DVGW-Information Nr. 75 sind inhaltlich identisch.

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) setzt sich intensiv für die Entwicklung einer sicheren und nachhaltigen Wasser- und Abfallwirtschaft ein. Als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation arbeitet sie fachlich auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz.

In Europa ist die DWA die mitgliederstärkste Vereinigung auf diesem Gebiet und nimmt durch ihre fachliche Kompetenz bezüglich Regelsetzung, Bildung und Information sowohl der Fachleute als auch der Öffentlichkeit eine besondere Stellung ein. Die rund 14 000 Mitglieder repräsentieren die Fachleute und Führungskräfte aus Kommunen, Hochschulen, Ingenieurbüros, Behörden und Unternehmen.

Impressum

Herausgeber:

DWA Deutsche Vereinigung für
Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
Theodor-Heuss-Allee 17
53773 Hennef, Deutschland
Tel.: +49 2242 872-333
Fax: +49 2242 872-100
E-Mail: info@dwa.de
Internet: www.dwa.de

DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und
Wasserfaches e. V.
Josef-Wirmer-Straße 1-3
D-53123 Bonn

Vertrieb:

DWA Deutsche Vereinigung für
Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
Theodor-Heuss-Allee 17
53773 Hennef, Deutschland
Tel.: +49 2242 872-333
Fax: +49 2242 872-100
E-Mail: info@dwa.de
Internet: www.dwa.de

Satz:

DWA

Druck:

Druckhaus Köthen

ISBN:

978-3-942964-42-5

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

© DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2012
DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. – Technisch-wissenschaftlicher Verein, Bonn 2012

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Digitalisierung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Vorwort

Infolge der zunehmenden stofflichen Belastungen und Nutzungen des Grundwasserraumes gewinnen die natürlichen Reinigungsprozesse und somit das Verständnis der Grundwasserbiologie an Bedeutung. Das Grundwasser ist von biologischen Lebensgemeinschaften besiedelt, die zur Aufrechterhaltung und Verbesserung der Wassergüte beitragen. Die Organismen im Grundwasser umfassen Viren, Bakterien, Pilze, Protozoen und Metazoen, die sich durch unterschiedliche Lebenszyklen und Stoffwechselleistungen auszeichnen. Viele Leistungen der Grundwasserbiozönose werden im Rahmen der Gewinnung von Trinkwasser sowie der Sanierung von kontaminierten Standorten genutzt, oftmals ohne dass diese Funktionen bewusst wahrgenommen oder gesteuert werden.

Der vorliegende DWA-Themenband wurde mit dem Ziel verfasst, den aktuellen Stand des Wissens insbesondere in Hinblick auf die wasserwirtschaftliche Praxis zusammenzufassen. Die einzelnen Abschnitte des Themenbandes sind als eigenständige Einheiten konzipiert und ordnen sich in folgende thematische Bereiche:

- Organismengruppen im Grundwasser
- Stoffwechselleistungen der Mikroorganismen
- Biologische Prozesse im Grundwasser und Anwendungsbeispiele
- Probenahme und Untersuchungsmethoden
- Rechtliche Rahmenbedingungen

Ich danke allen Kollegen und Kolleginnen im Projektkreis „Grundwasserbiologie“ sowie den Co-AutorInnen herzlich für ihre engagierte Mitarbeit. Die einzelnen Abschnitte wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen erstellt, im Projektkreis zum Teil kontrovers diskutiert und in eine Form gebracht, die einen schnellen Einstieg und raschen Überblick ermöglichen soll. Zahlreiche Literaturverweise vereinfachen bei Bedarf die gezielte Auswahl weitergehender Informationen. Ein besonderer Dank gilt auch den Kollegen im Technischen Komitee 1.2 des DVGW bzw. Fachausschuss GB-8 der DWA „Grundwasser und Ressourcenschutz“ für die kritische Durchsicht und konstruktive Verbesserungsvorschläge.

Ausgangspunkt für den aktuellen DWA-Themenband war der Wunsch, die weit verbreitete DVWK-Schrift Nr. 80 „Bedeutung biologischer Vorgänge für die Beschaffenheit des Grundwassers“ von 1988 zu aktualisieren. Wir hoffen, dass unsere Neubearbeitung eine ähnlich positive Resonanz findet.

Andreas Tiehm
Obmann des Projektkreises

Verfasser

Der Themenband wurde von dem DVGW-Projektkreis W-PK-1.2.2 „Grundwasserbiologie“ im Technischen Komitee W-TK-1-2 des DVGW/Fachausschuss GB-8 der DWA „Grundwasser und Ressourcenmanagement“ erarbeitet. Diesem Projektkreis „Grundwasserbiologie“ gehören folgende Mitglieder an:

ARNDT, Hartmut	Prof. Dr., Universität zu Köln, Biowissenschaftliches Zentrum, Zoologisches Institut, Allgemeine Ökologie
BENDINGER, Bernd	Dr., DVGW-Forschungsstelle TUHH
GIERIG, Michael	Dr., Bayerisches Landesamt für Umwelt
GRIEBLER, Christian	Dr., Helmholtz Zentrum München, Institut für Grundwasserökologie
GUDERITZ, Ina	Dr., BGD Boden- und Grundwasserlabor GmbH Dresden
HAHN, Hans Jürgen	PD Dr. habil., Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, Institut für Umweltwissenschaften
MARXSEN, Jürgen	Dr., Justus-Liebig-Universität Gießen, IFZ – Abteilung Tierökologie
PREUß, Gudrun	Dr., Institut für Wasserforschung GmbH Dortmund (IfW)
RICHTER, Simone	Dipl.-Ing., Umweltbundesamt, FG II 2.1
SCHLOSSER, Dietmar	Dr., Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Dep. Umweltmikrobiologie
TIEHM, Andreas (Obmann)	Dr., DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Abteilung Umweltbiotechnologie und Altlasten

Als Gäste haben mitgewirkt:

AUGENSTEIN, Tobias	Dipl.-Ing. (FH), DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Abteilung Umweltbiotechnologie und Altlasten
AVRAMOV, Maria	Dipl.-Biol., Helmholtz Zentrum München, Institut für Grundwasserökologie
BERKHOFF, Sven	Dr., Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, Institut für Umweltwissenschaften
BRIELMANN, Heike	Dr., Umweltbundesamt (UBA), Abteilung Grundwasser
HÄHNLEIN, Stefanie	Dipl.-Geol., Universität Tübingen, Zentrum für angewandte Geowissenschaften
LUEDERS, Tillmann	Dr., Helmholtz Zentrum München, Institut für Grundwasserökologie
SCHMIDT, Kathrin	Dr., DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Abteilung Umweltbiotechnologie und Altlasten
SCHMIDT, Natalie	Dipl.-Biol., DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Abteilung Umweltbiotechnologie und Altlasten
SCHMIDT, Susanne I.	Dr., Universität Birmingham, Zentrum für Systembiologie, School of Biosciences
ZAWADSKY, Claudia	Dipl.-Ing. (FH), DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Abteilung Umweltbiotechnologie und Altlasten

Projektbetreuer in der DWA-Bundesgeschäftsstelle:

BARION, Dirk	Dipl.-Geogr., Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Abteilung Wasser- und Abfallwirtschaft
--------------	---

Inhalt

Vorwort	.....	3
Verfasser	.....	4
Bilderverzeichnis	.....	11
Tabellenverzeichnis	.....	14
1 Einführung	.....	15
2 Lebensbedingungen	.....	17
	Kurzfassung	17
2.1	Grundwasser als Lebensraum	17
2.2	Kennzeichen von Grundwasserlebensräumen	18
2.2.1	Räumliche Strukturen	18
2.2.2	Dunkelheit	20
2.2.3	Nahrungsarmut	21
2.2.4	Konstanz der Lebensbedingungen	22
2.3	Chemische und physikalische Lebensbedingungen	23
2.3.1	Temperatur	23
2.3.2	Molekularer Sauerstoff	24
2.3.3	pH-Wert	24
2.3.4	Spezifische elektrische Leitfähigkeit	24
2.3.5	Redoxpotenzial (Eh-Wert)	25
2.3.6	Gelöste Stoffe	25
	Literatur	28
3 Viren	.....	29
	Kurzfassung	29
3.1	Morphologie und Struktur	29
3.1.1	Strukturelemente, Form und Größe	29
3.2	Einteilung der Viren	30
3.2.1	Bakteriophagen	31
3.2.2	Humanpathogene Viren	31
3.2.3	Klassifizierung	32
3.3	Lebenszyklus von Viren	33
3.4	Viren im Grundwasser	34
3.4.1	Natürliche Viren im Grundwasser	34
3.4.2	Vorkommen und Rolle von pathogenen Viren im Grundwasser	34
3.4.3	Eintrag von pathogenen Viren ins Grundwasser über Oberflächenwasser/Kläranlage	34
3.4.4	Einflussfaktoren auf den natürlichen Rückhalt und die Elimination von Viren	35
3.5	Nachweisverfahren	36
	Literatur	37
4 Bakterien in Grundwasserökosystemen	.....	39
	Kurzfassung	39
4.1	Einleitung	39
4.2	Allgemeine Charakteristika von Bakterien	39
4.3	Vorkommen und Häufigkeit von Bakterien im Grundwasserökosystem	42

4.4	Bakterielle Vielfalt (Diversität).....	46
4.5	Wie aktiv sind Grundwasserbakterien?	47
4.6	Heterogenität als Schlüsselfaktor	48
	Literatur.....	48
5	Pilze	51
	Kurzfassung	51
5.1	Einleitung	51
5.2	Auftreten von Pilzen im Grundwasser	52
5.3	Charakteristische Eigenschaften von Pilzen.....	55
5.3.1	Morphologie.....	55
5.3.2	Reproduktion	55
5.3.3	Ernährung.....	55
5.3.4	Anforderungen an Sauerstoffkonzentrationen, Temperatur, Wasseraktivität und pH-Wert	56
5.4	Einflüsse von Pilzen auf organische Umweltschadstoffe, Metalle und Minerale	56
5.4.1	Abbau und Biotransformation organischer Umweltschadstoffe	56
5.4.2	Einflüsse auf Metalle und Minerale	57
5.5	Mögliche Einflüsse von Pilzen auf die Grundwasserbeschaffenheit, angrenzende Lebensräume und Trinkwasser.....	60
	Literatur	60
6	Protozoen	63
	Kurzfassung	63
6.1	Lebensformtypen	63
6.2	Methodische Ansätze zur Analyse der Protozoen im Grundwasser	64
6.3	Diversität von Protozoengemeinschaften im Grundwasser	65
6.3.1	Heterotrophe Flagellaten und Amöben (Nanofauna)	65
6.3.2	Ciliaten (Mikrofauna)	66
6.4	Stellung der Protozoen im Nahrungsgewebe des Grundwassers.....	67
	Literatur	69
7	Metazoen/Vielzellige Tiere	71
	Kurzfassung	71
7.1	Tierische Biodiversität im Grundwasser	71
7.2	Anpassungen an das Leben im Untergrund	72
7.3	Die Tiere des Grundwassers	73
7.4	Bedeutung der Umwelt für die Grundwasserfauna.....	78
7.5	Bedeutung der Grundwasserfauna für die Wasserwirtschaft	79
7.6	Schutz und Gefährdung der Grundwassertiere.....	80
	Literatur.....	80
8	Pathogene Organismen	83
	Kurzfassung	83
8.1	Einleitung	83
8.2	Indikatorbakterien und die 50-Tage Regel	84
8.3	Wasserbürtige Krankheitserreger	86
8.3.1	Bakterien	86
8.3.2	Viren	86
8.3.3	Protozoen.....	87
8.4	Eintrag, Transport und Rückhaltung	87

8.4.1	Eintragspfade	87
8.4.2	Rückhalte­mechanismen und Transport	88
	Literatur	89
9	Biologische Prozesse und Nahrungsgefüge	92
	Kurzfassung	92
9.1	Grundlagen des Stoffwechsels von Organismen	92
9.1.1	Heterotrophe Prozesse	94
9.1.1.1	Atmungsprozesse	94
9.1.1.2	Gärungen	95
9.1.2	Autotrophe Prozesse	95
9.1.2.1	Photoautotrophie	96
9.1.2.2	Chemoautotrophie	96
9.2	Stoffkreisläufe	96
9.2.1	Kohlenstoffkreislauf	96
9.2.1.1	Aerobe Prozesse und ihre Auswirkungen	97
9.2.1.2	Anaerobe Prozesse	98
9.2.2	Stickstoffkreislauf.....	98
9.2.2.1	Aerobe Prozesse	99
9.2.2.2	Anaerobe Prozesse	100
9.2.3	Schwefelkreislauf	101
9.2.3.1	Aerobe Prozesse	101
9.2.3.2	Anaerobe Prozesse	103
9.2.4	Eisen- und Mangankreislauf.....	104
9.2.4.1	Aerobe Prozesse	104
9.2.4.2	Anaerobe Prozesse	105
9.2.5	Phosphorkreislauf	105
9.3	Nahrungsgefüge	106
	Literatur	110
10	Dienstleistungen der Grundwasserökosysteme	111
	Kurzfassung	111
10.1	Ökosystemdienstleistungen („ecosystem services“)	111
10.2	Grundwasser – eine integrierende Ressource	111
10.3	Das Grundwasserökosystem.....	112
10.4	Ökosystemdienstleistungen im Grundwasser	113
10.4.1	Die Reinigungsleistung.....	114
10.4.1.1	Trinkwasserproduktion	114
10.4.1.2	Schadstoffabbau.....	114
10.4.1.3	Rückhalt von Nährstoffen.....	114
10.4.1.4	Eliminierung von Pathogenen	115
10.4.2	Grundwasserfauna und ein offener Sedimentlückenraum	115
10.4.3	Bioindikation und Biomonitoring.....	115
10.4.3.1	Mikroorganismen als Bioindikatoren.....	116
10.4.3.2	Grundwasserinvertebraten als ökologische Zeiger.....	116
10.4.4	Der Grundwasserleiter – ein kommunizierendes Gefäß.....	116
10.4.5	Biodiversität	117
10.4.6	Heiße Quellen, Mineralwasser und Geothermie	117
10.5	Lebensqualität und persönliche Werte	118

10.6	Schlusswort.....	118
	Literatur.....	119
11	Künstliche Grundwasseranreicherung und Uferfiltration.....	121
	Kurzfassung	121
11.1	Einleitung	121
11.1.1	Künstliche Infiltration	122
11.1.2	Uferfiltration	122
11.2	Abbauprozesse und resultierende Gradienten	123
11.3	Rolle und Verhalten von Mikroorganismen	126
11.3.1	Algen und Cyanobakterien	126
11.3.2	Bakterien	127
11.3.3	Protozoen.....	127
11.3.4	Viren	128
11.3.5	Metazoen	128
11.4	Mechanismen der Elimination von Mikroorganismen.....	130
	Literatur.....	132
12	Bakterieller Abbau von Schadstoffen an kontaminierten Standorten.....	137
	Kurzfassung	137
12.1	Hydrochemische Randbedingungen	137
12.2	Natürlicher Abbau.....	139
12.2.1	Mikrobiologischer Abbau von Teerölschadstoffen	139
12.2.2	Praxisbeispiel Teerölschadstoffe.....	140
12.2.2.1	Standortbeschreibung	140
12.2.2.2	Schadstoffkonzentrationen und -verteilungsprofile	140
12.2.2.3	Redoxzonierung.....	141
12.2.2.4	Mikrobiologische Bestandsaufnahme (Most Probable Number, MPN).....	142
12.2.2.5	Abbauversuche in Mikrokosmen	142
12.2.3	Mikrobiologischer Abbau von chlorierten Kohlenwasserstoffen.....	143
12.2.4	Praxisbeispiel chlorierte Kohlenwasserstoffe	144
12.2.4.1	Standortbeschreibung	144
12.2.4.2	Schadstoffkonzentrationen und -verteilungsprofile	144
12.2.4.3	Redoxzonierung.....	145
12.2.4.4	Mikrobiologische Bestandsaufnahme (Most Probable Number, MPN und Polymerase Chain Reaction, PCR).....	146
12.2.4.5	Abbauversuche in Mikrokosmen	148
12.2.4.6	Isotopenchemie.....	149
12.3	Nutzung des mikrobiologischen Abbaus zur Elimination von Grundwasserverunreinigungen.....	149
12.3.1	Natürlicher Abbau (Monitored Natural Attenuation, MNA)	149
12.3.2	Stimulierter natürlicher Abbau (Enhanced Natural Attenuation, ENA)	150
12.3.3	Biologische Abstrombarrieren	150
12.3.4	In-situ-Sanierung (Schadensherd).....	150
12.4	Ausblick	151
	Literatur.....	151
13	Auswirkungen biologischer Prozesse auf die Rohwasserförderung.....	153
	Kurzfassung	153
13.1	Verockerung – Eisenablagerungen (rotbraune Beläge).....	153
13.1.1	Eisen(II)-Oxidation mit Sauerstoff (chemisch und biologisch)	154

13.1.2	Eisen(II)-Oxidation unter Nitrat reduzierenden Bedingungen.....	155
13.2	Weißer Belag auf schwarzen Ablagerungen	155
13.3	Schleimige Beläge	157
13.3.1	Methan	159
13.3.2	Leicht verwertbarer, gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)	162
13.4	Maßnahmen zur Verminderung von Belagsbildungen.....	166
	Literatur	167
14	Spannungsfeld Geothermie – Ökologie: Mögliche Einflüsse von geothermischen Anlagen auf Grundwasserökosysteme.....	168
	Kurzfassung	168
14.1	Einleitung	168
14.2	Formen der Erdwärmenutzung	169
14.3	Erdwärmenutzung führt zu Veränderungen in der Umwelt.....	169
14.4	Effekte der Temperaturveränderungen auf Biozönosen.....	170
14.5	Das Pilotprojekt Aquitherm	172
14.6	Rechtliche Aspekte.....	174
14.6.1	Deutschland	174
14.6.2	Europa	175
14.7	Schlussfolgerungen und Vorschläge zur Umsetzung.....	176
	Literatur	177
15	Probenahme für mikrobiologische, molekularbiologische und faunistische Untersuchungen.....	179
	Kurzfassung	179
15.1	Allgemeines	179
15.2	Grundwasserprobenahme	180
15.2.1	Mikrobiologische und molekularbiologische Untersuchungen.....	180
15.2.2	Metazoen (vielzellige Tiere).....	183
15.2.2.1	Übersicht.....	183
15.2.2.2	Darstellung der Methoden.....	183
15.2.3	Kolbenhubpumpe mit Doppelpacker	185
15.2.4	Netzsammler	186
15.2.5	Fallen.....	187
15.2.6	Aufbereitung und Fixierung der Tierproben.....	188
15.3	Beprobung von Feststoffen.....	189
15.3.1	Mikrobiologische und molekularbiologische Untersuchungen.....	189
15.3.2	Metazoen, Vielzeller.....	190
	Literatur	190
16	Mikrobiologische Methoden	192
	Kurzfassung	192
16.1	Einführung.....	192
16.2	Bestimmung der bakteriellen Biomasse	193
16.2.1	Mikroskopische Methoden	193
16.2.1.1	Gesamtzellzahlen	193
16.2.1.2	Differenzierter Nachweis toter oder stoffwechselaktiver Zellen.....	194
16.2.1.3	Spezifischer Nachweis mittels Antikörper.....	195
16.2.1.4	Spezifischer Nachweis mittels Gensonden (FISH)	195
16.2.1.5	Flow-Cytometrie	195
16.2.2	Kultivierungsverfahren (Lebendbakterienzahlen)	196

16.2.2.1	Heterotrophe Bakterien.....	196
16.2.2.2	Stoffwechselgruppen und autotrophe Bakterien.....	197
16.2.2.3	Besiedlungsanalysen (basierend auf Kultivierungsverfahren).....	197
16.2.3	Nachweis von Biomolekülen	197
16.2.3.1	Nukleinsäuren.....	197
16.2.3.2	ATP-Gehalt.....	198
16.2.3.3	Membranlipide.....	198
16.3	Messung mikrobieller Aktivitäten.....	198
16.3.1	Enzymaktivitäten	199
16.3.2	Biochemische Merkmale und Verwertungsspektren von Isolaten	200
16.3.3	Umsatz radioaktiv markierter Moleküle	200
16.3.4	In-situ Messungen und Modellökosysteme	201
16.3.5	Messung von chemischen Parametern und Isotopenverhältnissen.....	201
16.4	Analysen der Besiedlungszusammensetzung	202
16.4.1	Molekulargenetische Techniken	204
16.4.2	Genetische Fingerprints (Besiedlungsmuster)	205
16.4.3	Interpretation und Auswertungsmöglichkeiten von Besiedlungsmustern	206
16.4.4	Membranfettsäuren.....	207
16.5	Weiterführende Entwicklungen.....	208
16.5.1	Nachweis metabolischer Gene.....	208
16.5.2	mRNA-Analysen und Genexpression	208
16.5.3	Chip-Technologie	209
	Literatur.....	209
17	Rechtliche Regelungen zum Grundwasserschutz	217
	Kurzfassung	217
17.1	Europarecht	217
17.1.1	EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)	217
17.1.2	EG-Grundwasserrichtlinie	218
17.1.3	Weitere relevante EG-Richtlinien	219
17.2	Nationales Recht/Bundesrecht	220
17.2.1	Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG).....	220
17.2.2	Die Grundwasserverordnung.....	221
17.2.3	Bundesbodenschutzgesetz/Altlastenverordnung	222
17.2.4	Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)	222
17.2.5	Düngeverordnung	223
17.2.6	Wassergefährdende Stoffe.....	223
17.2.7	Trinkwasserverordnung	223
17.3	Wasserrecht der Länder	224
17.4	Ökologische Parameter in Gesetzen und Verordnungen.....	224
Glossar	.....	226

Bilderverzeichnis

Bild 1:	Schematische Einteilung eines Gesteinskörpers nach den Erscheinungsformen des unterirdischen Wassers	18
Bild 2:	Schematische nichtmaßstäbliche Darstellung von Lockergesteins-Porengrundwasserleiter (a), Festgesteins-Kluftgrundwasserleiter (b) und Karstgrundwasserleiter (c).....	19
Bild 3:	Größe von im Grundwasser vorkommenden Organismen und Substanzen im Vergleich mit den Korngrößen der Sedimente von Grundwasserleitern	20
Bild 4:	Abnahme des Gehaltes an gelösten organischen Stoffen auf dem Weg von Oberflächenwasser durch den Boden in das Grundwasser	21
Bild 5:	Mittlere Konzentrationen (Richtwerte) von gelöstem und partikulärem organischen Material, gemessen als Kohlenstoff, in verschiedenen Gewässertypen.....	22
Bild 6:	Die Konstanz der Lebensbedingungen im Lebensraum Grundwasser betrifft als äußerst wichtige Rahmenbedingung für alle Lebewesen auch die Temperatur	23
Bild 7:	Strukturelemente von Viren	29
Bild 8:	Morphologie von Viren	30
Bild 9:	Lebenszyklus eines Virus	33
Bild 10:	Methodischer Überblick zur Virusanalytik. PCR, ELISA	36
Bild 11:	Zellmorphotypen und Aufbau einer ‚typischen‘ Bakterienzelle	40
Bild 12:	Bakterienhäufigkeiten und -größen im Vergleich	41
Bild 13:	Ausgewählte Morphotypen wie sie aus isolierten Kulturen von Prof. Peter Hirsch (Kiel) beschrieben wurden	41
Bild 14:	Stammbaum des Lebens unter besonderer Berücksichtigung der Bakterien und Archaeen.....	42
Bild 15:	Mikroorganismen und Viren in einem Liter Grundwasser. HNF = heterotrophe Nanoflagellaten	43
Bild 16:	Festsitzende Bakterien im sandigen Sediment eines flachen Grundwasserleiters	44
Bild 17:	Schematischer Aufbau einer Pilzhyphe mit Septum und einfach gestaltetem, für viele Ascomyceten und mitospore Pilze charakteristischen Porus	52
Bild 18:	Potenziell grundwasserrelevante Großgruppen echter Pilze (Reich Fungi) und deren Abgrenzung von den nicht zu den Pilzen gehörenden Oomyceten	53
Bild 19:	Formenvielfalt von Pilzen.....	53
Bild 20:	Besiedlung von Blattoberflächen durch aquatische Hyphomyceten in Grundwasserbrunnen	54
Bild 21:	Mögliche Interaktionen zwischen organischen Umweltschadstoffen und Pilzzellen	58
Bild 22:	Phylogenetische Gruppen der Protisten und die darin enthaltenen Gruppen der im Grundwasser bisher nachgewiesenen taxonomischen Gruppen.....	63
Bild 23:	Vertreter wichtiger Protistenstämme im Grundwasser	66
Bild 24:	Prozess der Aufnahme eines Bakteriums durch eine farblose Chrysoomonade, die häufig im Grundwasser vorkommen	67
Bild 25:	Derzeitige Vorstellungen von der Bedeutung der Protozoen im Nahrungsgewebe des Grundwassers als Bakterienkonsumenten von angehefteten und frei suspendierten Bakterien und als Räuber von anderen Protozoen.....	68
Bild 26:	Ein blinder Höhlenflohkrebs der Gattung <i>Niphargus</i> , eines der größten Grundwassertiere Mitteleuropas	73
Bild 27:	Verbreitung von Grundwasserflohkrebsen (Niphargidae) in Europa	73
Bild 28:	Die etwa 1 cm großen Grundwasserasseln findet man in Grundwasserleitern mit großem Spalten- und Lüakensystem, insbesondere in Süddeutschland	74
Bild 29:	Zu den ursprünglichsten und seltensten Grundwassertieren Mitteleuropas gehören die Brunnenkrebse, lebende Fossilien aus der Karbonzeit vor über 300 Millionen Jahren.....	75
Bild 30:	Der stygobionte Raupenhüpferling <i>Nitocrella omega</i> ist eine seltene Art aus dem Grundwasser des Rheintals	75
Bild 31:	Muschelkrebse findet man in allen aquatischen Lebensräumen.....	76
Bild 32:	Vor allem in den Karstgebieten Süddeutschlands findet man die Grundwasserschnecken der Gattung <i>Bythiospeum</i>	76

Bild 33:	Der Urringelwurm <i>Troglochaetus beranecki</i> ist die einzige Art aus dieser Tiergruppe, die das Süßwasser bewohnt	77
Bild 34:	Möglicher Ansatz für die Gliederung von Grundwasserlebensräumen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen	78
Bild 35:	Besiedlungsdichten von Grundwasserproben. Das Auftreten der Tiere spiegelt die Stärke des Oberflächenwassereinflusses, und damit die Nahrungs- und Sauerstoffverfügbarkeit, wider	78
Bild 36:	Fluoreszenzmikroskopie von Cryptosporidienoocysten im Oberflächenwasser.....	87
Bild 37:	Ausgewählte biologische Redoxprozesse: Die Elektronenakzeptoren nehmen im Zuge einer intrazellulären Transportkette Elektronen auf und werden dabei zu Energie ärmeren Produkten umgewandelt	93
Bild 38:	Verknüpfung von Baustoff- und Energiestoffwechsel	93
Bild 39:	Umsetzung von organischen Substraten zu CO ₂ und Reduktionsäquivalenten [H] und Energiegewinn bei der Nutzung unterschiedlicher terminaler Elektronenakzeptoren in der Atmungskette	95
Bild 40:	Kohlenstoffkreislauf	97
Bild 41:	Stickstoffkreislauf.....	99
Bild 42:	Schema der enzymkatalysierten Elektronenübertragung bei den einzelnen Reaktionsschritten der Denitrifikation.....	100
Bild 43:	Schwefelkreislauf	101
Bild 44:	Eisen- und Mangankreislauf.....	104
Bild 45:	Phosphorkreislauf	106
Bild 46:	Schematische Darstellung des Nahrungsgefüges in einem typischen Ökosystem der Erdoberfläche mit Fraß- und Detritusnahrungskette sowie der mikrobiellen Nahrungskette.....	107
Bild 47:	Schematische Darstellung des Nahrungsgefüges in Grundwassersystemen	108
Bild 48:	Die schematische Darstellung autotropher und heterotropher Organismengruppen.....	109
Bild 49:	Die mikrobielle Gemeinschaft in Grundwasserökosystemen.....	112
Bild 50:	Typische Vertreter der deutschen Grundwasserfauna.....	113
Bild 51:	Grundwasser-Ökosystemdienstleistungen	113
Bild 52:	Schema der künstlichen Grundwasseranreicherung und Uferfiltration.....	123
Bild 53:	Wirkungsmechanismen und Redoxmilieuveränderungen bei der Uferfiltration und Untergrundpassage	124
Bild 54:	Elimination organischer Substanzen bei der Uferfiltration	125
Bild 55:	Elimination von Pharmaka in aeroben Laborversuchen mit Bodensäulen.....	125
Bild 56:	Abfolge unterschiedlicher physiologischer Gruppen während der künstlichen Grundwasseranreicherung	127
Bild 57:	(A) Skizze des Untersuchungsstandortes Wasserwerk Düsseldorf-Flehe; (B) Hauptkomponentenanalyse der physikochemischen Parameter für alle Pegel; (C) Multidimensionale Skalierung der faunistischen Daten.....	129
Bild 58:	Prozesse und Faktoren bei der Rückhaltung eingetragener Mikroorganismen.....	131
Bild 59:	Schematische Darstellung der charakteristischen Abfolge von Redoxzonen im Abstrom einer Grundwasserverunreinigung	139
Bild 60:	BTEX, ausgewählte PAK und ausgewählte Heterozyklen.....	140
Bild 61:	Standort Stürmlinger Sandgrube – Abnahme der Konzentrationen an BTEX und ausgewählter PAK im Abstrom als halblogarithmische Darstellung und als Anteile der Einzelschadstoffe an der jeweiligen Schadstoffgruppe; Mittelwerte aus 3 Messkampagnen summiert über 5 Tiefenhorizonte.....	141
Bild 62:	Standort Stürmlinger Sandgrube – Keimzahlen im Grundwasserschwankungsbereich des herdnahen Abstroms	142
Bild 63:	Standort Stürmlinger Sandgrube – Mikrobieller Abbau in Mikrokosmen unter Sulfat-reduzierenden und unter Eisen(III)-reduzierenden Bedingungen im Vergleich zu einer mitgeführten Sterilkontrolle	143
Bild 64:	Standort Stürmlinger Sandgrube – Mikrobieller Abbau im Mikrokosmos bei einer Konzentration von ca. 0,5 mg/l Sauerstoff als Abnahme gegenüber mitgeführter Sterilkontrolle.....	143
Bild 65:	Anaerobe und aerobe Prozesse bei der Dechlorierung von Chlorethenen.....	144
Bild 66:	Standort Frankenthal – Schadstoff-Verteilung auf 3 Tiefenhorizonten	145
Bild 67:	Standort-Frankenthal – MPN-Nachweis in Sedimentproben aus verschiedenen Tiefen	146

Bild 68:	Korrelation zwischen 16S-PCR-Nachweis von <i>Dehalococcoides</i> und Aktivität der reduktiven Dechlorierung in Grundwasser-Mikrokosmen	147
Bild 69:	Standort-Frankenthal – 16S-PCR-Nachweis halorespirierender Mikroorganismen in Grundwasser- und Mikrokosmenproben aus verschiedenen Tiefen	147
Bild 70:	Standort-Frankenthal – Anaerob-reduktive Dechlorierung von TCE mit Grundwasser aus dem TCE- und dem PCE-Schadensherdbereich	148
Bild 71:	Standort-Frankenthal – Aerobe Dechlorierung von cDCE und VC in Mineralmedium, das mit Grundwasser-Organismen inokuliert wurde	148
Bild 72:	Schematische Darstellung der mikrobiellen Isotopenfraktionierung.....	149
Bild 73:	Verockerungen auf einer Unterwasserpumpe zur Förderung von reduziertem Grundwasser (A) und in einer Rohwasserleitung, die bereits zur Verringerung des Rohrquerschnitts führten (B).....	153
Bild 74:	Chemische und biologische Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III) mit Sauerstoff als Elektronenakzeptor	154
Bild 75:	Eisen-Bänder, die von <i>Gallionella</i> -Zellen ausgeschieden wurden, in Eisenablagerungen aus einem Brunnen	154
Bild 76:	Biologische Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III) unter anaeroben Bedingungen mit Nitrat als Elektronenakzeptor.....	155
Bild 77:	Weißer Belag auf schwarzen Ablagerungen in einem Eckwasserzähler in einem Brunnen zur Förderung von stark reduziertem, sulfidhaltigem Grundwasser	156
Bild 78:	Schwarze Ablagerungen mit weißer Oberfläche sind eine Folge von chemischen und biologischen Reaktionen von schwefelhaltigen Verbindungen	157
Bild 79:	Lange Filamente von <i>Thiotrix spec.</i> aus weißen Belägen auf schwarzen Eisensulfidablagerungen	158
Bild 80:	Zellinterne Schwefelgranula in Filamenten des sulfidoxidierenden Bakteriums <i>Thiotrix spec.</i>	158
Bild 81:	Oxidation des Methans zu Kohlendioxid durch Methan oxidierende Bakterien	159
Bild 82:	Unterwasseraufnahmen der Filterstrecke eines Förderbrunnens	160
Bild 83:	Schleimiger Belag auf der Außenseite einer kurz zuvor gezogenen Steigleitung aus 15 m bis 18 m uGOK aus einem Förderbrunnen.....	160
Bild 84:	Phasenkontrastmikroskopische Aufnahmen abgelöster Biofilme von der Außen- und Innenseite der Steigleitung aus einem Förderbrunnen	161
Bild 85:	Nachweis der Methan oxidierenden MOB in den abgelösten Biofilmen von der Außen- und Innenseite einer Steigleitung mittels Fluoreszenz in situ Hybridisierung.....	162
Bild 86:	Braune Flocken im Rohmischwasser bei Parallelbetrieb von drei Brunnen.....	163
Bild 87:	Dicht gepackte Bakterienzellen in den schleimigen Ablagerungen mit Eisenausfällungen.....	164
Bild 88:	DOC-Fraktionierung mittels Gelpermeationschromatographie mit nachgeschalteter organischer Kohlenstoffdetektion.....	165
Bild 89:	Anpassung von Mikroflora an verschiedene Temperaturbereiche.....	171
Bild 90:	Anpassung der Meio- und Makrofauna an verschiedene Temperaturbereiche	172
Bild 91:	Diversität nach Shannon-Wiener [H'] für (A) die bakteriellen Gemeinschaften und (B) die Grundwasserfauna	173
Bild 92:	Temperatur Dosis-Wirkungs-Beziehungen für zwei ausgewählte Grundwasserinvertebraten	174
Bild 93:	Doppelpacker: Pneumatische Kolbenhubpumpe mit Doppelpacker GRUWES der Fa. UWITEC in Mondsee, Österreich	186
Bild 94:	Netzsammler: Bau (A) und Funktionsweise (B) des Netzsammlers	187
Bild 95:	Fallen: Aufbau des Fallensystems und Bau der Einzelfallen (B)	188
Bild 96:	Probenteilung von ungestörten Linern	189
Bild 97:	Methoden zur Quantifizierung der mikrobiellen Biomasse im Grundwasser	193
Bild 98:	Mikroskopische Aufnahmen der mit DAPI gefärbten Bakterienzellen, IfW Schwerte: a) aerobes Grundwasser, b) Oberflächenwasser.....	194
Bild 99:	Methoden zur Bestimmung mikrobieller Aktivitäten im Grundwasser.....	199
Bild 100:	Beispiele für halbtechnische Versuchsanlagen bei der Untersuchung mikrobieller Prozesse in Modellökosystemen	201
Bild 101:	Methodische Ansätze zur Analyse mikrobieller Gemeinschaften im Grundwasser	202

Bild 102:	Die verschiedenen Schritte einer PCR (1) Denaturierung (2) Primerannealing (3) Polymerasekatalysierte Synthese des DNA-Strangs (4) Wiederholung.....	204
Bild 103:	Membranfiltration zur Anreicherung von Bakterien auf einem Filter.....	204
Bild 104:	Schematische Darstellung der Wanderung eines DNA-Fragments durch ein Denaturierendes Gradientengel und Entstehung des „Fingerabdrucks“; DNA-Fingerprint für die eubakteriellen Besiedlungen unterschiedlicher Grundwasserproben.....	206

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Die Eigenschaften von Grundwasserleitern	19
Tabelle 2:	Geologische Formationen der Bundesrepublik Deutschland mit typischen geogenen Hauptbestandteilen des Grundwassers	26
Tabelle 3:	Analysen von Grundwässern aus verschiedenen Gesteinen	27
Tabelle 4:	Humanpathogene enterale (enteropathogene) Viren.....	32
Tabelle 5:	Konzentrationen von Bakteriophagen in verschiedenen Wasserressourcen.....	35
Tabelle 6:	Verhältnis frei lebender (suspendierter) zu festsitzenden Bakterien in unbelasteten und organisch verunreinigten Grundwasserleitern	43
Tabelle 7:	Beziehung zwischen Sedimentkorngröße und besiedelbarer Oberfläche	44
Tabelle 8:	Bestandteile eines fiktiven gram-negativen Grundwasserbakteriums; Feuchtmasse 200 fg, Biovolumen $0,065 \mu\text{m}^3$, entspricht einer kugeligen Zelle von $0,5 \mu\text{m} \varnothing$	45
Tabelle 9:	Beispiele für Umweltschadstoffe, die durch Pilze vollständig abgebaut oder in andere organische Verbindungen umgewandelt werden können	57
Tabelle 10:	Mögliche Interaktionen von Pilzen und mineralischen Verbindungen	59
Tabelle 11:	Überlebenszeiten hygienisch relevanter Mikroorganismen in Oberflächenwasser, Abwasser, Boden und Grundwasser.....	85
Tabelle 12:	Transportdistanzen hygienisch relevanter Mikroorganismen in Aquifermaterial	88
Tabelle 13:	Klassifikation von Organismen nach Energiequellen und Kohlenstoffquellen	94
Tabelle 14:	Aufteilung der Güter und Dienstleistungen, die durch Grundwasserökosysteme erbracht werden in die vier Gruppen des Millennium Ecosystem Assessment.....	119
Tabelle 15:	Elimination verschiedener Mikroorganismen während der künstlichen Grundwasseranreicherung..	130
Tabelle 16:	„Utilization Factor“: Bedarf an Elektronenakzeptoren für die vollständige Mineralisierung verschiedener Schadstoffe ohne Berücksichtigung von Biomassebildung	138
Tabelle 17:	Möglichkeiten zur Stimulierung des mikrobiellen Schadstoffabbaus im Rahmen einer ENA-Maßnahme	150
Tabelle 18:	Elementaranalyse (ICP-OES) von schwarzen Ablagerungen mit weißem Belag aus einem Brunnen.....	156
Tabelle 19:	Beispielhafte Zusammensetzung eines Rohmischwassers aus drei Brunnen mit einer hohen DOC-Konzentration und einem hohen Gehalt an biologisch leicht verwertbarem organischem Kohlenstoff	164
Tabelle 20:	Wichtige Randbedingungen der Probenahme in Abhängigkeit des Untersuchungszieles	182
Tabelle 21:	Vergleich von Sammelmethode für Grundwassertiere	184
Tabelle 22:	Vorschlag zur Anwendung von Kolbenhubpumpe, Netzsammler und Fallensystemen: Interne Standards der Arbeitsgruppe Grundwasserökologie der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau.....	185
Tabelle 23:	Fixierungsmethoden für die verschiedenen Tiergruppen	188
Tabelle 24:	Nährmedien und Inkubationsbedingungen bei dem Nachweis von heterotrophen Bakterien in aquatischen Systemen	196
Tabelle 25:	Molekularbiologische Untersuchung von aquatischen Systemen (Beispiele).....	203
Tabelle 26:	Zeitplan der Wasserrahmenrichtlinie.....	218
Tabelle 27:	Schwellenwerte der Grundwasserverordnung	221

1 Einführung

M. Gierig, S. Richter, A. Tiehm

Grundwasser ist unsere wichtigste Trinkwasserressource – eine Tatsache, die weithin bekannt ist. In Deutschland stammen etwa 70 % des Trinkwassers aus dem Grundwasser. Weniger stark im Bewusstsein ist die Tatsache, dass das Grundwasser eine von Mikroorganismen und kleinen Tieren belebte Zone ist, die durch ihre natürlichen Leistungen und Funktionen erheblich zur Reinheit des Grundwassers beiträgt. Mit anderen Worten: Grundwasser ist nicht nur eine wertvolle Wasserressource, sondern auch ein faszinierendes Ökosystem mit großem volkswirtschaftlichem Nutzen.

Durch intensive Forschungsaktivitäten in den letzten Jahren verstehen wir dieses System und den Wert der Leistungen der Grundwasserorganismen immer besser.

So hat die Entwicklung neuer methodischer Ansätze das Verständnis biologischer Prozesse in den letzten Jahrzehnten enorm vorangebracht. Insbesondere die Anwendung von molekularbiologischen Verfahren hat das Verständnis der mikrobiologischen Prozesse im Grundwasser in einigen Bereichen deutlich erweitert. So wurden z. B. Fortschritte beim Monitoring und der gezielten Stimulation des Schadstoffabbaus erreicht, die in der Folge zur Entwicklung kostengünstigerer Sanierungsverfahren führten.

Wir wissen aber auch, dass das empfindliche Gleichgewicht im Untergrund vor negativen Einflüssen von außen geschützt werden muss, damit die natürlichen Prozesse, die wir uns auf verschiedene Weise zu Nutze machen, ungestört ablaufen können.

Und: wir können den einzelnen Organismengruppen spezifischen Funktionen und Leistungen zuordnen.

Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze sind in der Natur an zahllosen Umsetzungsprozessen beteiligt. Auch im Grundwasser spielen mikrobielle Lebensgemeinschaften eine essenzielle Rolle. Da im Gegensatz zu den Ökosystemen der Erdoberfläche das Licht als Energiequelle ausscheidet, muss alle Energie in diesem System aus Abbauprozessen bereitgestellt werden. Mikroorganismen sind extrem anpassungsfähig, haben ein sehr breites Stoffwechselspektrum und können Verbindungen abbauen, die auf Menschen toxisch wirken. Dieses macht man sich schon seit langem bei naturnahen Verfahren der Trinkwasseraufbereitung wie z. B. der Uferfiltration, der künstlichen Grundwasser-Anreicherung oder der Langsandsfiltration zunutze. Dank der Reinigungsleistung der Mikroorganismen kann in vielen Fällen aus dem Grundwasser ohne größere technische Aufbereitungsmaßnahmen hervorragendes Trinkwasser gewonnen werden.

Ein weiteres Beispiel für die Nutzung der mikrobiologischen Stoffwechselfähigkeiten ist die Sanierung von Altlast-Standorten wie z. B. ehemaligen Gaswerken. Von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) über Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) bis hin zu Lösemitteln wie Tri- und Perchlorethen reicht das Spektrum der Schadstoffe, die mit Hilfe von Mikroorganismen aus Boden und Grundwasser entfernt werden können. Bisher wurden vorwiegend durch technische Maßnahmen unterstützte Abbauprozesse an kontaminierten Standorten eingesetzt. In jüngster Zeit werden zunehmend auch die natürlichen Abbauprozesse in die Konzepte der Altlastenbearbeitung eingebunden.

Neben den Mikroorganismen gibt es eine hoch spezialisierte Grundwasserfauna, Tiere also, die sich über Jahrtausende an die Lebensbedingungen des Grundwassers angepasst haben. Das große Spektrum der Grundwassertiere umfasst zahlreiche verschiedene Arten, in Deutschland allein hat man schon über 200 Arten gefunden. Am häufigsten sind Krebstiere, daneben findet man Asseln, Schnecken, Würmer und Muscheln. Kennzeichnend für die Tiere sind oft nur millimetergroße, langgestreckte, wurmartige Körperformen, die den Tieren Leben und Fortbewegung in der räumlichen Enge ermöglichen. Ohne Augen und Körperpigmente, dafür aber mit hochsensiblen Tastorganen ausgestattet, sind sie perfekt an Dunkelheit und Nahrungsarmut angepasst. Durch einen reduzierten Stoffwechsel und verlangsamte Lebens- und Fortpflanzungszyklen können sie bis zu 15-mal älter werden als artverwandte Organismen im Oberflächenwasser. Mit ihren biologischen Funktionen nehmen sie einen wichtigen Platz im Ökosystem Grundwasser ein. Sie bewahren den bakteriellen Aufwuchs im Untergrund und halten so das Lückensystem im Grundwasserleiter frei und verhindern ein Verstopfen der Poren. Das Wasser kann fließen, Nährstoff- und Energietransport bleiben erhalten.

Grundwasserorganismen stellen uns also ein enormes Reinigungspotenzial als selbstverständliche und kostenlose Ökosystemdienstleistungen zur Verfügung. Diese basieren auf einem effizienten und sensibel abgestimmten Gleichgewicht der biologischen Funktionen der Grundwasserorganismen. Da Besiedlungsdichte und Regenerationsfähigkeit im Grundwasser aufgrund der limitierten Nahrungszufuhr deutlich geringer sind als im Oberflächenwasser, können Einflüsse von außen dieses sensible Ökosystem empfindlich stören. Übermäßige Stoffeinträge aber auch Änderungen der Milieupara-