



DVGW-Information

Wasser Nr. 75 | Oktober 2012

Grundwasserbiologie – Grundlagen und Anwendungen

ISSN 0176-3504

Preisgruppe: 17

© DVGW, Bonn, Oktober 2012

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1-3

D-53123 Bonn

Telefon: +49 228 9188-5

Telefax: +49 228 9188-990

E-Mail: info@dvgw.de

Internet: www.dvgw.de

Nachdruck und fotomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DVGW e.V., Bonn, gestattet.

Vertrieb: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Josef-Wirmer-Str. 3, 53123 Bonn

Telefon: +49 228 9191-40 · Telefax: +49 228 9191-499

E-Mail: info@wvgw.de · Internet: www.wvgw.de

Art. Nr.: 308723

Die DVGW-Information Wasser Nr. 75 ist inhaltsgleich auch als DWA-Themenband T5 / 2012 veröffentlicht.

Inhalt

Vorwort	.....	9
Verfasser	.....	10
Bilderverzeichnis	.....	11
Tabellenverzeichnis	.....	17
1 Einführung	.....	19
2 Lebensbedingungen	.....	20
2.1 Grundwasser als Lebensraum	.....	21
2.2 Kennzeichen von Grundwasserlebensräumen	.....	22
2.2.1 Räumliche Strukturen	.....	22
2.2.2 Dunkelheit	.....	24
2.2.3 Nahrungsarmut	.....	25
2.2.4 Konstanz der Lebensbedingungen	.....	26
2.3 Chemische und physikalische Lebensbedingungen	.....	27
2.3.1 Temperatur	.....	27
2.3.2 Molekularer Sauerstoff	.....	28
2.3.3 pH-Wert	.....	28
2.3.4 Spezifische elektrische Leitfähigkeit	.....	28
2.3.5 Redoxpotenzial (Eh-Wert)	.....	29
2.3.6 Gelöste Stoffe	.....	29
Literatur	.....	32
3 Viren	.....	33
3.1 Morphologie und Struktur	.....	33
3.1.1 Strukturelemente, Form und Größe	.....	33
3.2 Einteilung der Viren	.....	35
3.2.1 Bakteriophagen	.....	35
3.2.2 Humanpathogene Viren	.....	36
3.2.3 Klassifizierung	.....	37
3.3 Lebenszyklus von Viren	.....	37
3.4 Viren im Grundwasser	.....	38
3.4.1 Natürliche Viren im Grundwasser	.....	38
3.4.2 Vorkommen und Rolle von pathogenen Viren im Grundwasser	.....	39

3.4.3	Eintrag von pathogenen Viren ins Grundwasser über Oberflächenwasser/Kläranlage	39
3.4.4	Einflussfaktoren auf den natürlichen Rückhalt und die Elimination von Viren	40
3.5	Nachweisverfahren	41
Literatur	.....	42
4	Bakterien in Grundwasserökosystemen	44
4.1	Einleitung	44
4.2	Allgemeine Charakteristika von Bakterien	45
4.3	Vorkommen und Häufigkeit von Bakterien im Grundwasserökosystem	47
4.4	Bakterielle Vielfalt (Diversität)	52
4.5	Wie aktiv sind Grundwasserbakterien?	53
4.6	Heterogenität als Schlüsselfaktor	54
Literatur	.....	54
5	Pilze	57
5.1	Einleitung	57
5.2	Auftreten von Pilzen im Grundwasser	58
5.3	Charakteristische Eigenschaften von Pilzen	61
5.3.1	Morphologie	61
5.3.2	Reproduktion	62
5.3.3	Ernährung	62
5.3.4	Anforderungen an Sauerstoffkonzentrationen, Temperatur, Wasseraktivität und pH-Wert	63
5.4	Einflüsse von Pilzen auf organische Umweltschadstoffe, Metalle und Minerale	63
5.4.1	Abbau und Biotransformation organischer Umweltschadstoffe	63
5.4.2	Einflüsse auf Metalle und Minerale	65
5.5	Mögliche Einflüsse von Pilzen auf die Grundwasserbeschaffenheit, angrenzende Lebensräume und Trinkwasser	67
Literatur	.....	68
6	Protozoen.....	70
6.1	Lebensformtypen	70
6.2	Methodische Ansätze zur Analyse der Protozoen im Grundwasser	71
6.3	Diversität von Protozoengemeinschaften im Grundwasser	72
6.3.1	Heterotrophe Flagellaten und Amöben (Nanofauna).....	73
6.3.2	Ciliaten (Mikrofauna).....	73
6.4	Stellung der Protozoen im Nahrungsgewebe des Grundwassers	74
Literatur	.....	77
7	Metazoen/Vielzellige Tiere	78
7.1	Tierische Biodiversität im Grundwasser	78
7.2	Anpassungen an das Leben im Untergrund	79
7.3	Die Tiere des Grundwassers	80
7.4	Bedeutung der Umwelt für die Grundwasserfauna	86
7.5	Bedeutung der Grundwasserfauna für die Wasserwirtschaft	87
7.6	Schutz und Gefährdung der Grundwassertiere	88
Literatur	.....	89
8	Pathogene Organismen	91
8.1	Einleitung	92
8.2	Indikatorbakterien und die 50-Tage Regel	93
8.3	Wasserbürtige Krankheitserreger	95

8.3.1	Bakterien	95
8.3.2	Viren	95
8.3.3	Protozoen	96
8.4	Eintrag, Transport und Rückhaltung	97
8.4.1	Eintragspfade	97
8.4.2	Rückhaltemechanismen und Transport	97
Literatur	.....	98
9	Biologische Prozesse und Nahrungsgefüge	101
9.1	Grundlagen des Stoffwechsels von Organismen	101
9.1.1	Heterotrophe Prozesse	103
9.1.1.1	Atmungsprozesse	103
9.1.1.2	Gärungen	104
9.1.2	Autotrophe Prozesse	104
9.1.2.1	Photoautotrophie	105
9.1.2.2	Chemoautotrophie	105
9.2	Stoffkreisläufe	105
9.2.1	Kohlenstoffkreislauf	105
9.2.1.1	Aerobe Prozesse und ihre Auswirkungen	106
9.2.1.2	Anaerobe Prozesse	107
9.2.2	Stickstoffkreislauf	108
9.2.2.1	Aerobe Prozesse	109
9.2.2.2	Anaerobe Prozesse	109
9.2.3	Schwefelkreislauf	110
9.2.3.1	Aerobe Prozesse	111
9.2.3.2	Anaerobe Prozesse	112
9.2.4	Eisen- und Mangankreislauf	114
9.2.4.1	Aerobe Prozesse	114
9.2.4.2	Anaerobe Prozesse	115
9.2.5	Phosphorkreislauf	115
9.3	Nahrungsgefüge	116
Literatur	.....	120
10	Dienstleistungen der Grundwasserökosysteme	122
10.1	Ökosystemdienstleistungen („ecosystem services“)	122
10.2	Grundwasser – eine integrierende Ressource	122
10.3	Das Grundwasserökosystem	123
10.4	Ökosystemdienstleistungen im Grundwasser	124
10.4.1	Die Reinigungsleistung	125
10.4.1.1	Trinkwasserproduktion	125
10.4.1.2	Schadstoffabbau	126
10.4.1.3	Rückhalt von Nährstoffen	126
10.4.1.4	Eliminierung von Pathogenen	126
10.4.2	Grundwasserfauna und ein offener Sedimentlückenraum	127
10.4.3	Bioindikation und Biomonitoring	127
10.4.3.1	Mikroorganismen als Bioindikatoren	127
10.4.3.2	Grundwasserinvertebraten als ökologische Zeiger	128
10.4.4	Der Grundwasserleiter – ein kommunizierendes Gefäß	128
10.4.5	Biodiversität	129
10.4.6	Heiße Quellen, Mineralwasser und Geothermie	129
10.5	Lebensqualität und persönliche Werte	130

10.6	Schlusswort.....	130
Literatur	.....	131
11	Künstliche Grundwasseranreicherung und Uferfiltration	133
11.1	Einleitung	133
11.1.1	Künstliche Infiltration.....	134
11.1.2	Uferfiltration.....	134
11.2	Abbauprozesse und resultierende Gradienten	135
11.3	Rolle und Verhalten von Mikroorganismen.....	138
11.3.1	Algen und Cyanobakterien	139
11.3.2	Bakterien.....	139
11.3.3	Protozoen.....	140
11.3.4	Viren	141
11.3.5	Metazoen	141
11.4	Mechanismen der Elimination von Mikroorganismen	143
Literatur	.....	145
12	Bakterieller Abbau von Schadstoffen an kontaminierten Standorten	150
12.1	Hydrochemische Randbedingungen	150
12.2	Natürlicher Abbau	152
12.2.1	Mikrobiologischer Abbau von Teerölschadstoffen	152
12.2.2	Praxisbeispiel Teerölschadstoffe	153
12.2.2.1	Standortbeschreibung	153
12.2.2.2	Schadstoffkonzentrationen und -verteilungsprofile	153
12.2.2.3	Redoxzonierung	154
12.2.2.4	Mikrobiologische Bestandsaufnahme (Most Probable Number, MPN)	154
12.2.2.5	Abbauversuche in Mikrokosmen.....	155
12.2.3	Mikrobiologischer Abbau von chlorierten Kohlenwasserstoffen	156
12.2.4	Praxisbeispiel chlorierte Kohlenwasserstoffe	157
12.2.4.1	Standortbeschreibung	157
12.2.4.2	Schadstoffkonzentrationen und -verteilungsprofile	157
12.2.4.3	Redoxzonierung	158
12.2.4.4	Mikrobiologische Bestandsaufnahme (Most Probable Number, MPN und Polymerase Chain Reaction, PCR).....	158
12.2.4.5	Abbauversuche in Mikrokosmen.....	161
12.2.4.6	Isotopenchemie	162
12.3	Nutzung des mikrobiologischen Abbaus zur Elimination von Grundwasserverunreinigungen	162
12.3.1	Natürlicher Abbau (Monitored Natural Attenuation, MNA).....	162
12.3.2	Stimulierter natürlicher Abbau (Enhanced Natural Attenuation, ENA)	163
12.3.3	Biologische Abstrombarrieren	163
12.3.4	In-situ-Sanierung (Schadensherd).....	163
12.4	Ausblick.....	164
Literatur	.....	164
13	Auswirkungen biologischer Prozesse auf die Rohwasserförderung.....	166
13.1	Verockerung – Eisenablagerungen (rotbraune Beläge)	166
13.1.1	Eisen(II)-Oxidation mit Sauerstoff (chemisch und biologisch)	167
13.1.2	Eisen(II)-Oxidation unter Nitrat reduzierenden Bedingungen	168
13.2	Weißer Belag auf schwarzen Ablagerungen.....	169
13.3	Schleimige Beläge	170

13.3.1	Methan	171
13.3.2	Leicht verwertbarer, gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)	175
13.4	Maßnahmen zur Verminderung von Belagsbildungen	178
Literatur	.....	179
14	Spannungsfeld Geothermie – Ökologie: Mögliche Einflüsse von geothermischen Anlagen auf Grundwasserökosysteme	180
14.1	Einleitung	180
14.2	Formen der Erdwärmenutzung	181
14.3	Erdwärmenutzung führt zu Veränderungen in der Umwelt	182
14.4	Effekte der Temperaturveränderungen auf Biozönosen	183
14.5	Das Pilotprojekt Aquitherm	185
14.6	Rechtliche Aspekte	188
14.6.1	Deutschland	188
14.6.2	Europa	189
14.7	Schlussfolgerungen und Vorschläge zur Umsetzung	189
Literatur	.....	190
15	Probenahme für mikrobiologische, molekularbiologische und faunistische Untersuchungen	192
15.1	Allgemeines	193
15.2	Grundwasserprobenahme	193
15.2.1	Mikrobiologische und molekularbiologische Untersuchungen	193
15.2.2	Metazoen (vielzellige Tiere)	197
15.2.2.1	Übersicht	197
15.2.2.2	Darstellung der Methoden	198
15.2.3	Kolbenhubpumpe mit Doppelpacker	200
15.2.4	Netzsammler	201
15.2.5	Fallen	201
15.2.6	Aufbereitung und Fixierung der Tierproben	203
15.3	Beprobung von Feststoffen	203
15.3.1	Mikrobiologische und molekularbiologische Untersuchungen	204
15.3.2	Metazoen, Vielzeller	204
Literatur	.....	205
16	Mikrobiologische Methoden	206
16.1	Einführung	207
16.2	Bestimmung der bakteriellen Biomasse	208
16.2.1	Mikroskopische Methoden	208
16.2.1.1	Gesamtzellzahlen	208
16.2.1.2	Differenzierter Nachweis toter oder stoffwechselaktiver Zellen	209
16.2.1.3	Spezifischer Nachweis mittels Antikörper	210
16.2.1.4	Spezifischer Nachweis mittels Gensonden (FISH)	210
16.2.1.5	Flow-Cytometrie	210
16.2.2	Kultivierungsverfahren (Lebendbakterienzahlen)	211
16.2.2.1	Heterotrophe Bakterien	211
16.2.2.2	Stoffwechselgruppen und autotrophe Bakterien	212
16.2.2.3	Besiedlungsanalysen (basierend auf Kultivierungsverfahren)	212
16.2.3	Nachweis von Biomolekülen	213
16.2.3.1	Nukleinsäuren	213
16.2.3.2	ATP-Gehalt	213

16.2.3.3	Membranlipide	213
16.3	Messung mikrobieller Aktivitäten	213
16.3.1	Enzymaktivitäten	214
16.3.2	Biochemische Merkmale und Verwertungsspektren von Isolaten	215
16.3.3	Umsatz radioaktiv markierter Moleküle	215
16.3.4	In-situ Messungen und Modellökosysteme	216
16.3.5	Messung von chemischen Parametern und Isotopenverhältnissen	217
16.4	Analysen der Besiedlungszusammensetzung	217
16.4.1	Molekulargenetische Techniken	219
16.4.2	Genetische Fingerprints (Besiedlungsmuster)	221
16.4.3	Interpretation und Auswertungsmöglichkeiten von Besiedlungsmustern	222
16.4.4	Membranfettsäuren	223
16.5	Weiterführende Entwicklungen	224
16.5.1	Nachweis metabolischer Gene	224
16.5.2	mRNA-Analysen und Genexpression	224
16.5.3	Chip-Technologie	225
Literatur	.....	225
17	Rechtliche Regelungen zum Grundwasserschutz	233
17.1	Europarecht	234
17.1.1	EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)	234
17.1.2	EG-Grundwasserrichtlinie	235
17.1.3	Weitere relevante EG-Richtlinien	236
17.2	Nationales Recht/Bundesrecht	237
17.2.1	Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	237
17.2.2	Die Grundwasserverordnung	238
17.2.3	Bundesbodenschutzgesetz/Altlastenverordnung	240
17.2.4	Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)	240
17.2.5	Düngeverordnung	240
17.2.6	Wassergefährdende Stoffe	241
17.2.7	Trinkwasserverordnung	241
17.3	Wasserrecht der Länder	241
17.4	Ökologische Parameter in Gesetzen und Verordnungen	242
Glossar	.....	244

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 StoffwechsellLeistungen 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.

Die vorliegende DVGW-Information Wasser Nr. 75, die inhaltsgleich auch als DWA-Themenband T5/2012 veröffentlicht ist, 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
- StoffwechsellLeistungen 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 die aktuelle DVGW-Information Wasser 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

Bilderverzeichnis

Bild 1 – Schematische Einteilung eines Gesteinskörpers nach den Erscheinungsformen des unterirdischen Wassers	22
Bild 2 – Schematische nichtmaßstäbliche Darstellung von Lockergesteins-Porengrundwasserleiter (a), Festgesteins-Kluftgrundwasserleiter (b) und Karstgrundwasserleiter (c).....	23
Bild 3 – Größe von im Grundwasser vorkommenden Organismen und Substanzen im Vergleich mit den Korngrößen der Sedimente von Grundwasserleitern.....	24
Bild 4 – Abnahme des Gehaltes an gelösten organischen Stoffen auf dem Weg von Oberflächenwasser durch den Boden in das Grundwasser	25
Bild 5 – Mittlere Konzentrationen (Richtwerte) von gelöstem und partikulärem organischen Material, gemessen als Kohlenstoff, in verschiedenen Gewässertypen.	26
Bild 6 – Die Konstanz der Lebensbedingungen im Lebensraum Grundwasser betrifft als äußerst wichtige Rahmenbedingung für alle Lebewesen auch die Temperatur.....	27
Bild 7 – Strukturelemente von Viren	34
Bild 8 – Morphologie von Viren	34
Bild 9 – Lebenszyklus eines Virus.....	38
Bild 10 – Methodischer Überblick zur Virusanalytik. PCR (polymerase chain reaction), ELISA	41
Bild 11 – Zellmorphotypen und Aufbau einer ‚typischen‘ Bakterienzelle.....	45
Bild 12 – Bakterienhäufigkeiten und -größen im Vergleich	46
Bild 13 – Ausgewählte Morphotypen wie sie aus isolierten Kulturen von Prof. Peter Hirsch (Kiel)	46
Bild 14 – Stammbaum des Lebens unter besonderer Berücksichtigung der Bakterien und Archaeen ...	47
Bild 15 – Mikroorganismen und Viren in einem Liter Grundwasser; HNF = heterotrophe Nanoflagellaten	48
Bild 16 – Festsitzende Bakterien im sandigen Sediment eines flachen Grundwasserleiters.....	50
Bild 17 – Schematischer Aufbau einer Pilzhyphe mit Septum (S) und einfach gestaltetem, für viele Ascomyceten und mitospore Pilze charakteristischen Porus (P)	58
Bild 18 – Potenziell grundwasserrelevante Großgruppen echter Pilze (Reich Fungi) und deren Abgrenzung von den nicht zu den Pilzen gehörenden Oomyceten	59
Bild 19 – Formenvielfalt von Pilzen.....	60

Bild 20 – Besiedlung von Blattoberflächen durch aquatische Hyphomyceten (Mycelstränge exemplarisch durch Pfeile markiert) in Grundwasserbrunnen	61
Bild 21 – Mögliche Interaktionen zwischen organischen Umweltschadstoffen und Pilzzellen	64
Bild 22 – Phylogenetische Gruppen der Protisten nach Baldauf (2008) und die darin enthaltenen Gruppen der im Grundwasser bisher nachgewiesenen taxonomischen Gruppen	70
Bild 23 – Vertreter wichtiger Protistenstämme im Grundwasser	74
Bild 24 – Prozess der Aufnahme eines Bakteriums durch eine farblose Chrysonade die häufig im Grundwasser vorkommen	75
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	76
Bild 26 – Ein blinder Höhlenflohkrebs der Gattung Niphargus, eines der größten Grundwassertiere Mitteleuropas	81
Bild 27 – Verbreitung von Grundwasserflohkrebsen (Niphargidae) in Europa	81
Bild 28 – Die etwa 1 cm großen Grundwasserasseln findet man in Grundwasserleitern mit großem Spalten- und Lückensystem, insbesondere in Süddeutschland	82
Bild 29 – Zu den ursprünglichsten und seltensten Grundwassertieren Mitteleuropas gehören die Brunnenkrebse, lebende Fossilien aus der Karbonzeit vor über 300 Millionen Jahren	83
Bild 30 – Der stygobionte Raupenhüpferling Nitocrella omega ist eine seltene Art aus dem Grundwasser des Rheintals	83
Bild 31 – Muschelkrebse findet man in allen aquatischen Lebensräumen	84
Bild 32 – Vor allem in den Karstgebieten Süddeutschlands findet man die Grundwasserschnecken der Gattung Bythiospeum	84
Bild 33 – Der Urringelwurm Troglochaetus beranecki ist die einzige Art aus dieser Tiergruppe, die das Süßwasser bewohnt	85
Bild 34 – Möglicher Ansatz für die Gliederung von Grundwasserlebensräumen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen	86
Bild 35 – Besiedlungsdichten von Grundwasserproben. Das Auftreten der Tiere spiegelt die Stärke des Oberflächenwassereinflusses und damit die Nahrungs- und Sauerstoffverfügbarkeit wider	87
Bild 36 – Fluoreszenzmikroskopie von Cryptosporidienocysten im Oberflächenwasser	96
Bild 37 – Ausgewählte biologische Redoxprozesse: Die Elektronenakzeptoren nehmen im Zuge einer intrazellulären Transportkette Elektronen auf und werden dabei zu Energie ärmeren Produkten umgewandelt.....	102

Bild 38 – Verknüpfung von Baustoff- und Energiestoffwechsel	102
Bild 39 – Umsetzung von organischen Substraten zu CO ₂ und Reduktionsäquivalenten [H] und Energiegewinn bei der Nutzung unterschiedlicher terminaler Elektronenakzeptoren in der Atmungskette	104
Bild 40 – Kohlenstoffkreislauf	106
Bild 41 – Stickstoffkreislauf	108
Bild 42 – Schema der enzymkatalysierten Elektronenübertragung bei den einzelnen Reaktionsschritten der Denitrifikation	110
Bild 43 – Schwefelkreislauf	111
Bild 44 – Eisen- und Mangankreislauf	114
Bild 45 – Phosphorkreislauf	116
Bild 46 – Schematische Darstellung des Nahrungsgefüges in einem typischen Ökosystem der Erdoberfläche mit Fraß- und Detritusnahrungskette sowie der mikrobiellen Nahrungskette	117
Bild 47 – Schematische Darstellung des Nahrungsgefüges in Grundwassersystemen	118
Bild 48 – Die schematische Darstellung autotropher und heterotropher Organismengruppen	120
Bild 49 – Die mikrobielle Gemeinschaft in Grundwasserökosystemen	123
Bild 50 – Typische Vertreter der deutschen Grundwasserfauna	124
Bild 51 – Grundwasser-Ökosystemdienstleistungen	125
Bild 52 – Schema der künstlichen Grundwasseranreicherung und Uferfiltration	135
Bild 53 – Wirkungsmechanismen und Redoxmilieuveränderungen bei der Uferfiltration und Untergrundpassage	136
Bild 54 – Elimination organischer Substanzen bei der Uferfiltration	137
Bild 55 – Elimination von Pharmaka in aeroben Laborversuchen mit Bodensäulen	138
Bild 56 – Abfolge unterschiedlicher physiologischer Gruppen während der künstlichen Grundwasseranreicherung	140
Bild 57 – (A) Skizze des Untersuchungsstandortes Wasserwerk Düsseldorf-Flehe; (B) Hauptkomponentenanalyse der physikochemischen Parameter für alle Pegel; (C) Multidimensionale Skalierung (MDS) der faunistischen Daten	142
Bild 58 – Prozesse und Faktoren bei der Rückhaltung eingetragener Mikroorganismen	144
Bild 59 – Schematische Darstellung der charakteristischen Abfolge von Redoxzonen im Abstrom einer Grundwasserverunreinigung	152

Bild 60 – BTEX (oben), ausgewählte PAK und ausgewählte Heterozyklen	152
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	154
Bild 62 – Standort Stürmlinger Sandgrube – Keimzahlen im Grundwasserschwankungsbereich des herdnahen Abstroms	155
Bild 63 – Standort Stürmlinger Sandgrube – Mikrobieller Abbau in Mikrokosmen unter Sulfat-reduzierenden und unter Eisen(III)-reduzierenden Bedingungen im Vergleich zu einer mitgeführten Sterilkontrolle (K)	156
Bild 64 – Standort Stürmlinger Sandgrube – Mikrobieller Abbau im Mikrokosmos bei einer Konzentration von ca. 0,5 mg/l Sauerstoff als Abnahme gegenüber mitgeführter Sterilkontrolle (K)	156
Bild 65 – Anaerobe und aerobe Prozesse bei der Dechlorierung von Chlorethenen	157
Bild 66 – Standort Frankenthal – Schadstoff-Verteilung auf 3 Tiefenhorizonten	158
Bild 67 – Standort-Frankenthal – MPN-Nachweis in Sedimentproben aus verschiedenen Tiefen	159
Bild 68 – Korrelation zwischen 16S-PCR-Nachweis von <i>Dehalococcoides</i> und Aktivität der reduktiven Dechlorierung in Grundwasser-Mikrokosmen.....	160
Bild 69 – Standort-Frankenthal – 16S-PCR-Nachweis halorespirierender Mikroorganismen in Grundwasser- und Mikrokosmenproben aus verschiedenen Tiefen	160
Bild 70 – Standort-Frankenthal – Anaerob-reduktive Dechlorierung von TCE mit Grundwasser aus dem TCE- und dem PCE-Schadensherdbereich	161
Bild 71 – Standort-Frankenthal – Aerobe Dechlorierung von cDCE und VC in Mineralmedium, das mit Grundwasser-Organismen inokuliert wurde	161
Bild 72 – Schematische Darstellung der mikrobiellen Isotopenfraktionierung	162
Bild 73 – Verockerungen auf einer Unterwasserpumpe zur Förderung von reduziertem Grundwasser (A) und in einer Rohwasserleitung, die bereits zur Verringerung des Rohrquerschnitts führten (B).....	167
Bild 74 – Chemische und biologische Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III) mit Sauerstoff als Elektronenakzeptor	167
Bild 75 – Eisen-Bänder, die von Gallionella-Zellen ausgeschieden wurden, in Eisenablagerungen aus einem Brunnen	168
Bild 76 – Biologische Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III) unter anaeroben Bedingungen mit Nitrat als Elektronenakzeptor	168
Bild 77 – Weißer Belag auf schwarzen Ablagerungen in einem Eckwasserzähler in einem Brunnen zur Förderung von stark reduziertem, sulfidhaltigem Grundwasser	169

Bild 78 – Schwarze Ablagerungen mit weißer Oberfläche sind eine Folge von chemischen und biologischen Reaktionen von schwefelhaltigen Verbindungen	170
Bild 79 – Lange Filamente von <i>Thiotrix spec.</i> aus weißen Belägen auf schwarzen Eisensulfidablagerungen	171
Bild 80 – Zellinterne Schwefelgranula in Filamenten des sulfidoxidierenden Bakteriums <i>Thiotrix spec.</i>	171
Bild 81 – Oxidation des Methans zu Kohlendioxid durch Methan oxidierende Bakterien (MOB)	172
Bild 82 – Unterwasseraufnahmen der Filterstrecke eines Förderbrunnens	173
Bild 83 – Schleimiger Belag auf der Außenseite einer kurz zuvor gezogenen Steigleitung aus 15 m bis 18 m uGOK aus einem Förderbrunnen	173
Bild 84 – Phasenkontrastmikroskopische Aufnahmen abgelöster Biofilme von der Außen- und Innenseite der Steigleitung aus einem Förderbrunnen	174
Bild 85 – Nachweis der Methan oxidierenden MOB in den abgelösten Biofilmen von der Außen- und Innenseite einer Steigleitung mittels Fluoreszenz in situ Hybridisierung	174
Bild 86 – Braune Flocken im Rohmischwasser bei Parallelbetrieb von drei Brunnen	176
Bild 87 – Dicht gepackte Bakterienzellen in den schleimigen Ablagerungen mit Eisenausfällungen.....	176
Bild 88 – DOC-Fraktionierung mittels Gelpermeationschromatographie mit nachgeschalteter organischer Kohlenstoffdetektion	178
Bild 89 – Anpassung von Mikroflora an verschiedene Temperaturbereiche	184
Bild 90 – Anpassung der Meio- und Makrofauna an verschiedene Temperaturbereiche	185
Bild 91 – Diversität nach Shannon-Wiener [H'] für (A) die bakteriellen Gemeinschaften und (B) die Grundwasserfauna	186
Bild 92 – Temperatur Dosis-Wirkungs-Beziehungen für zwei ausgewählte Grundwasserinvertebraten.....	187
Bild 93 – Doppelpacker: Pneumatische Kolbenhubpumpe mit Doppelpacker GRUWES der Fa. UWITEC in Mondsee, Österreich	200
Bild 94 – Netzsammler: Bau (A) und Funktionsweise (B) des Netzsammlers.....	201
Bild 95 – Fallen: Aufbau des Fallensystems und Bau der Einzelfallen (B).....	202
Bild 96 – Probenentnahme von ungestörten Linern (Luckner & Schestakow 1991)	204
Bild 97 – Methoden zur Quantifizierung der mikrobiellen Biomasse im Grundwasser	208

Bild 98 – Mikroskopische Aufnahmen der mit DAPI gefärbten Bakterienzellen, IfW Schwerte: a) aerobes Grundwasser, b) Oberflächenwasser	209
Bild 99 – Methoden zur Bestimmung mikrobieller Aktivitäten im Grundwasser	214
Bild 100 – Beispiele für halbtechnische Versuchsanlagen bei der Untersuchung mikrobieller Prozesse in Modellökosystemen	216
Bild 101 – Methodische Ansätze zur Analyse mikrobieller Gemeinschaften im Grundwasser	218
Bild 102 – Die verschiedenen Schritte einer PCR (1) Denaturierung (2) Primerannealing (3) Polymerasekatalysierte Synthese des DNA-Strangs (4) Wiederholung	220
Bild 103 – Membranfiltration zur Anreicherung von Bakterien auf einem Filter	220
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	222

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Die Eigenschaften von Grundwasserleitern	23
Tabelle 2 – Geologische Formationen der Bundesrepublik Deutschland mit typischen geogenen Hauptbestandteilen des Grundwassers	31
Tabelle 3 – Analysen von Grundwässern aus verschiedenen Gesteinen	32
Tabelle 4 – Humanpathogene enterale (enteropathogene) Viren.....	36
Tabelle 5 – Konzentrationen von Bakteriophagen in verschiedenen Wasserressourcen.....	40
Tabelle 6 – Verhältnis frei lebender (suspendierter) zu festsitzenden Bakterien in unbelasteten und organisch verunreinigten Grundwasserleitern	49
Tabelle 7 – Beziehung zwischen Sedimentkorngröße und besiedelbarer Oberfläche	50
Tabelle 8 – Bestandteile eines fiktiven gram-negativen Grundwasserbakteriums; Feuchtmasse 200 fg, Biovolumen 0,065 µm ³ , entspricht einer kugeligen Zelle von 0,5 µm Ø.....	51
Tabelle 9 – Beispiele für Umweltschadstoffe, die durch Pilze vollständig abgebaut oder in andere organische Verbindungen umgewandelt werden können.....	65
Tabelle 10 – Mögliche Interaktionen von Pilzen und mineralischen Verbindungen	66
Tabelle 11 – Überlebenszeiten hygienisch relevanter Mikroorganismen in Oberflächenwasser, Abwasser, Boden und Grundwasser	94
Tabelle 12 – Transportdistanzen hygienisch relevanter Mikroorganismen in Aquifermaterial.....	98
Tabelle 13 – Klassifikation von Organismen nach Energiequellen und Kohlenstoffquellen	103
Tabelle 14 – Aufteilung der Güter und Dienstleistungen, die durch Grundwasserökosysteme erbracht werden, in die vier Gruppen des Millennium Ecosystem Assessment	130
Tabelle 15 – Elimination verschiedener Mikroorganismen während der künstlichen Grundwasseranreicherung.....	143
Tabelle 16 – „Utilization Factor“: Bedarf an Elektronenakzeptoren für die vollständige Mineralisierung verschiedener Schadstoffe ohne Berücksichtigung von Biomassebildung.....	151
Tabelle 17 – Möglichkeiten zur Stimulierung des mikrobiellen Schadstoffabbaus im Rahmen einer ENA-Maßnahme.....	163
Tabelle 18 – Elementanalyse (ICP-OES) von schwarzen Ablagerungen mit weißem Belag aus einem Brunnen.....	169
Tabelle 19 – Beispielhafte Zusammensetzung eines Rohmischwassers aus drei Brunnen mit einer hohen DOC-Konzentration und einem hohen Gehalt an biologisch leicht verwertbarem organischem Kohlenstoff.....	177

Tabelle 20 – Wichtige Randbedingungen der Probenahme in Abhängigkeit des Untersuchungszieles	196
Tabelle 21 – Vergleich von Sammelmethode n für Grundwassertiere	198
Tabelle 22 – Vorschlag zur Anwendung von Kolbenhubpumpe, Netzsammler und Fallensystemen: Interne Standards der Arbeitsgruppe Grundwasserökologie der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau	199
Tabelle 23 – Fixierungsmethoden für die verschiedenen Tiergruppen	203
Tabelle 24 – Nährmedien und Inkubationsbedingungen bei dem Nachweis von heterotrophen Bakterien in aquatischen Systemen	211
Tabelle 25 – Molekularbiologische Untersuchung von aquatischen Systemen (Beispiele)	219
Tabelle 26 – Zeitplan der Wasserrahmenrichtlinie	234
Tabelle 27 – Schwellenwerte der Grundwasserverordnung	239