

LEHRBUCH

Sylke Hilberg

Umweltgeologie

Eine Einführung in Grundlagen und Praxis



Springer Spektrum

Umweltgeologie

Sylke Hilberg

Umweltgeologie

Eine Einführung in Grundlagen und Praxis

 Springer Spektrum

Sylke Hilberg
Salzburg, Österreich

ISBN 978-3-662-46947-7 ISBN 978-3-662-46948-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-46948-4

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Dank

Im Jahr 2008 stand ich erstmals vor der Aufgabe, eine Vorlesung zum Thema „Umweltgeologie“ zu konzipieren. Ich war zu diesem Zeitpunkt seit etwa zehn Jahren im Altlastenbereich tätig und hatte, neben der Bearbeitung vieler hydrogeologischer Projekte, als Fachexpertin für Geologie an zahlreichen Umweltverträglichkeitsprüfungen mitgewirkt. Obwohl ich mich selbst als Umweltgeologin verstand, fiel es mir ausgesprochen schwer, die Inhalte der Umweltgeologie klar zu definieren und eine eindeutige Abgrenzung zu anderen Bereichen der Geologie zu formulieren. Gespräche mit Fachkollegen und Literaturstudien bestätigten mich in dem Eindruck, dass eine derartige Fachabgrenzung noch nicht wirklich vorliegt.

Ich konzipierte also meine Vorlesung auf der Grundlage meiner eigenen Praxiserfahrungen und behandelte das, was – nach meiner Ansicht – Umweltgeologen bei ihrem Eintritt in die Praxis wissen sollten. Die Literaturliste, die ich den Studierenden zur Vertiefung des Stoffes an die Hand gab, war umfangreich und bestand zum Großteil aus Anleihen aus den verschiedensten anderen Teildisziplinen. Die Frage nach einer Literaturempfehlung, die die wesentlichen Aspekte der Umweltgeologie im Überblick darstellt und damit den Einstieg ins Fach erleichtert, wurde mir von Studierenden immer wieder gestellt. Sie gab den Anstoß, dieses Buch zu schreiben. Den Studierenden gilt daher auch mein erster Dank dafür, dass sie ihren Bedarf angemeldet und damit für die notwendige Motivation gesorgt haben.

Die Umweltgeologie ist ein Querschnittsfach, das sich mit vielen Teilaspekten der Allgemeinen und Angewandten Geologie befasst und dabei, wie sich im Buch zeigen wird, auch verschiedenste Nachbardisziplinen berücksichtigen muss. Meine Rolle als Umweltgeologin ist daher ein wenig vergleichbar mit der eines Zehnkämpfers in der Leichtathletik, der zwar jede Disziplin trainiert, aber im Normalfall nie an die Leistungen der Spezialisten heranreichen kann. Aus diesem Grund war es für die Qualität des Buches wichtig, zu jedem Teilaspekt, der hier thematisiert wird, die Meinung von Experten einzuholen. In diesem Sinne danke ich Rafiq Azzam, Rainer Braunstingl, Gertrude Friedl, Edith Haslinger, Christian Hübner, Michael Kühn, Franz Neubauer und Thomas Rüde für die kritische Durchsicht einzelner Kapitel und ihre hilfreichen Verbesserungsvorschläge.

Ulrike Unterbruner danke ich für ihre Hinweise zur Textgestaltung und überhaupt für das, was ich von ihr über Didaktik lernen konnte. Ich habe versucht, vieles davon hier einzubringen. Ich danke Cornelia Steiner für ihre engagierte Mitarbeit bei der Gestaltung der Abbildungen und Claudia Esterbauer für die ausdauernde Korrektur des gesamten Manuskripts. Gertrude Friedl, Matthias Marbach und Hans-Peter Steyrer danke ich für die Erstellung bzw. Freigabe von Fotos, die in diesem Buch abgebildet sind.

Schließlich möchte ich (wieder einmal) meinem Mann Hans Hilberg danken für die stetige Motivation und sein offenbar unerschöpfliches Verständnis für mich und meine Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIV
Exkursverzeichnis	XV
1 Umweltgeologie – Was ist das eigentlich?	1
<i>Sylke Hilberg</i>	
Literatur	4
I Teil A – Grundlagen	
2 Stoffkreisläufe und Schadstoffe	7
<i>Sylke Hilberg</i>	
2.1 Das Systemkonzept	8
2.2 Spezielle Kreislaufsysteme	10
2.2.1 Kohlenstoffkreislauf	10
2.2.2 Stickstoffkreislauf	12
2.2.3 Schwefelkreislauf	13
2.2.4 Ausschließlich anthropogen bedingte Kreisläufe	14
2.3 Stofftransport und Stoffumwandlung	16
2.4 Anorganische Schadstoffe	17
2.4.1 Schwermetalle	17
2.4.2 Arsen	19
2.4.3 Cyanide	19
2.5 Organische Schadstoffe	20
2.5.1 Aliphatische Kohlenwasserstoffe	21
2.5.2 Aromatische Kohlenwasserstoffe	22
2.5.3 Heterozyklen	24
2.5.4 Halogenierte Kohlenwasserstoffe	24
2.5.5 Mobilität einiger organischer Schadstoffe	25
Literatur	29
3 Atmosphäre	31
<i>Sylke Hilberg</i>	
3.1 Die Erdatmosphäre – Zusammensetzung und räumliche Verteilung	32
3.2 Das Klima und sein Wandel	34
3.2.1 Natürliche Klimaschwankungen	34
3.2.2 Anthropogen verursachte Klimaschwankungen	35
3.3 Anthropogene Einflüsse auf die Luftqualität	37
3.3.1 Partikuläre Luftkomponenten	37
3.3.2 Gasförmige Verunreinigungen	38
3.4 Geogene Einflüsse auf die Luftqualität	39
3.4.1 Radon in kristallinem Grundgebirge	39
3.4.2 Asbest im Tunnelbau	40
Literatur	42

4	Hydrosphäre	45
	<i>Sylke Hilberg</i>	
4.1	H₂O – ein sehr spezielles Molekül	46
4.2	Wasserkreislauf	48
4.3	Niederschlag	51
4.4	Bodenwasser	54
4.5	Grundwasser	55
4.5.1	Was ist eigentlich Grundwasser?	55
4.5.2	Hydrochemische Prozesse im Grundwasser	56
	Literatur	60
5	Pedosphäre	63
	<i>Sylke Hilberg</i>	
5.1	Der Boden – ein Begriff, viele Perspektiven	64
5.2	Bodenbestandteile, Bodengefüge und Bodenaufbau	66
5.2.1	Klimaeinfluss auf die Bodenbildung	68
5.3	Bodensystematik	68
5.3.1	Morphogenetische Klassifizierung	69
5.3.2	Funktionale Klassifizierung	70
5.3.3	Regionale Klassifizierung	71
5.4	Bodenchemie	72
5.4.1	Sorption und Ionenaustausch	73
5.4.2	Bodenazidität	75
5.4.3	Redoxvorgänge im Boden	76
5.5	Bodenlösung	77
5.6	Bodenluft	78
5.7	Anthropogene Einflüsse auf den Boden	80
	Literatur	82
6	Sedimente	83
	<i>Sylke Hilberg</i>	
6.1	Sedimente als umweltgeologisch relevanter Teil der Lithosphäre	84
6.2	Anthropogen bedingte Erosion	87
6.2.1	Beispiel Forstwirtschaft	87
6.3	Qualitative Beeinträchtigungen von Flusssedimenten	88
6.3.1	Schwermetalle	89
6.3.2	Organische Schadstoffe	90
	Literatur	93
II	Teil B – Umweltgeologie in der Praxis	
7	Probengewinnung für umweltgeologische Fragestellungen	97
	<i>Sylke Hilberg</i>	
7.1	Repräsentative Probenahme	98

7.2	Bodenluft	100
7.2.1	Wichtige Bodenluftparameter und deren Interpretation	100
7.2.2	Vorrichtungen zur Bodenluftentnahme	100
7.3	Bodenlösung	104
7.3.1	Prozesse und Stoffe	104
7.3.2	Gewinnung von Bodenlösung	104
7.4	Grundwasser	106
7.4.1	Grundwassermessstellen	107
7.4.2	Messstellennetze	108
7.4.3	Grundwassererkundung in der Altlastenpraxis	110
7.5	Feststoffe	112
7.5.1	Aufschlussverfahren für die Bodenprobenahme	114
7.5.2	Abfallprobenahme	115
7.5.3	Beprobung von Flusssedimenten	117
	Literatur	120
8	Abfallmanagement und Altlastenpraxis	121
	<i>Sylke Hilberg</i>	
8.1	Der Abfallbegriff	122
8.2	Verwerten, behandeln oder doch deponieren?	122
8.3	Schadstoffpotenzial von Abfällen	123
8.4	Deponierung von Abfällen	124
8.4.1	Die geordnete Deponie	124
8.4.2	Endlager für gefährliche Abfälle	125
8.5	Erkennen und Bewerten von Altlasten	127
8.5.1	Arten von Altlasten	127
8.5.2	Von der Verdachtsfläche zur Altlast – Die umweltgeologische Erkundung	128
8.6	Sanierung von Altlasten	135
8.6.1	Dekontamination	136
8.6.2	Sicherung	139
8.6.3	Auswahl des Sanierungsverfahrens/Variantenstudium	141
	Literatur	145
9	Rohstoffe	147
	<i>Sylke Hilberg</i>	
9.1	Rohstoffwirtschaft	148
9.2	Flächenverbrauch zur Rohstoffgewinnung	151
9.3	Metalle	153
9.3.1	Eisen und Buntmetalle	153
9.3.2	Edelmetalle	156
9.4	Evaporite	157
9.5	Phosphat	158
9.6	Massenrohstoffe	159
9.7	Energierohstoffe	162
9.8	Umweltbewusste Rohstoffgewinnung und Kreislaufwirtschaft	167
	Literatur	170

10	Rohstoff Wasser	171
	<i>Sylke Hilberg</i>	
10.1	Schutzgut Wasser	172
10.2	Anthropogene Beeinflussung von Niederschlagswässern	174
10.3	Einflüsse durch die Landwirtschaft	175
10.4	Urbane Einflüsse auf Grundwasserkörper	175
10.4.1	Quantitative Auswirkungen	175
10.4.2	Qualitative Auswirkungen	177
10.4.3	Urbane Wärmeinseln	179
10.5	Verkehrsinfrastruktur	179
10.5.1	Straßensalzung	180
10.5.2	Tankstellen und Ölunfälle	181
10.5.3	Tunnelbau	182
10.6	Geogene Hintergrundbelastung	184
10.6.1	Beispiel Arsen im Trinkwasser	184
10.6.2	Beispiel Grundwasserversalzung im Küstenbereich	186
10.7	Wasserversorgung in ariden Gebieten	187
10.7.1	Meerwasserentsalzung	187
10.7.2	Nutzung fossiler Grundwässer	188
10.7.3	Staubauwerke zur Retention saisonaler Niederschläge	188
	Literatur	190
11	Energieversorgung	191
	<i>Sylke Hilberg</i>	
11.1	Erneuerbare Energie – Quellen, Entwicklung, Perspektiven	192
11.2	Wasserkraftnutzung	196
11.2.1	Laufkraftwerke	196
11.2.2	Speicherkraftwerke	199
11.2.3	Pumpspeicherkraftwerke	201
11.3	Geothermie	202
11.3.1	Oberflächennahe Geothermie	203
11.3.2	Tiefe Geothermie	205
11.3.3	Geothermische Nutzung von Hochenthalpiefeldern	209
11.4	Energieverteilung	209
	Literatur	212
12	Geologie in der Umweltverträglichkeitsprüfung	215
	<i>Sylke Hilberg</i>	
12.1	Fläche, eine begrenzte Ressource	216
12.2	Die Umweltverträglichkeitsprüfung	217
12.3	Inhalte der Umweltverträglichkeitserklärung (UVE)	218
12.3.1	Der Fachbeitrag Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren in der UVE	219
	Literatur	226
	Serviceteil	227
	Glossar	228
	Stichwortverzeichnis	238

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Das Systemkonzept dient der Abgrenzung einzelner überschaubarer Bereiche innerhalb des Gesamtsystems Erde, um Fragestellungen einzugrenzen und damit praktisch bearbeitbar zu machen.	9
Abb. 2.2	Kurz- und langfristiger Kohlenstoffkreislauf. Sowohl organische als auch anorganische Kohlenstoffkomponenten durchlaufen beide Teilkreisläufe, wobei Übergänge in beide Richtungen möglich sind	11
Abb. 2.3	Idealform eines nach Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit orientierten anthropogenen Stoffkreislaufs	16
Abb. 2.4	Übersicht über die wichtigsten organischen Schadstoffgruppen	20
Abb. 2.5	Struktur der Einringaromaten der BTEX-Gruppe	22
Abb. 2.6	Ausbreitung von Mineralölkohlenwasserstoffen nach ihrer oberflächennahen Freisetzung	26
Abb. 2.7	PAK-Ausbreitung nach Freisetzung von Teer als Abfallprodukt der Gasproduktion	26
Abb. 2.8	LCKW-Ausbreitung nach Freisetzung aus einer ehemaligen chemischen Reinigung	27
Abb. 3.1	Aufbau der Erdatmosphäre mit einigen charakteristischen Eigenschaften der jeweiligen Schichten (in Anlehnung an Merritts et al. 1998).....	33
Abb. 3.2	Asbestminerale im Rasterelektronenmikroskop (Maßstab 1:10.000) (Foto G. Friedl).....	41
Abb. 4.1	Mengen und Zeitspannen des globalen Wasserumsatzes (Daten zum Wasserumsatz nach Marcinek 2011) * Niederschlag bezogen auf globale Meeresoberfläche von $361,1 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, ** Niederschlag bezogen auf globale Landfläche von $148,9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$	49
Abb. 4.2	Quellaustritt und Tropfsteine als Folge der CO_2 -Entgasung an einem Quellaustritt in einer Karsthöhle.	52
Abb. 4.3	Qualitative Entwicklung des Regenwassers bei Verdunstung, Versickerung sowie in ungesättigter und gesättigter Zone (Datensatz 1, 2 und 6 nach Walther 2005, Datensatz 3 nach Leder et al. 2003, Datensatz 4 Umweltbundesamt 2014, Datensatz 5 eigene Daten).....	53
Abb. 4.4	Gesetz von Darcy, Bahngeschwindigkeit und Abstandsgeschwindigkeit	56
Abb. 4.5	Piper-Diagramm (Piper, 1944) mit Zuordnung verschiedener hydrochemischer Zusammensetzungen zu typischen Grundwasserleitern nach Furtak und Langguth (1967).....	58
Abb. 5.1	Schematischer Bodenaufbau mit den Haupthorizonten, die in einem natürlichen (oder in einem anthropogen überprägten) Bodenkörper auftreten können. Mächtigkeiten der einzelnen Horizonte wie auch die Inhaltsstoffe und das Gefüge können dabei in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein und den Umgebungsbedingungen stark variieren.	67
Abb. 5.2	Schematische Darstellung der verschiedenen Sorptionsprozesse.....	73
Abb. 5.3	Beispiel für Kationenaustauschprozesse. Ein Boden wird durch künstliche Bewässerung mit Wasser gespeist, das aufgrund von Verdunstung eine erhöhte Mineralisation aufweist. Die Belegung der Kornoberflächen richtet sich nach der Kationenkonzentration des Sickerwassers. Die Zusammensetzung des Sickerwassers, nach erfolgter Gleichgewichtseinstellung des Austauschers, lässt Rückschlüsse auf die Prozesse in der Bodenlösung zu	74
Abb. 5.4	Auftreten von Wasser im Untergrund	78
Abb. 5.5	Schematische Darstellung des Bodenlufttransports durch (a) konvektive und (b) diffusive Prozesse	80

Abb. 6.1	Erosions- und Ablagerungsgebiete und anthropogene Einflussfaktoren auf die Beschaffenheit von Sedimenten.	86
Abb. 6.2	Holzbringungsweg in kalkalpinem Gebiet mit geringmächtiger Bodenbildung. Die entstehenden Fahrinnen im Waldboden werden nach der Bearbeitung des Waldstücks häufig sich selbst überlassen und tiefen sich durch den Oberflächenabfluss weiter ein	87
Abb. 6.3	Gehalte der Schwermetalle Blei, Quecksilber, Zink und Cadmium in Sedimenten der Flüsse Elster und Donau mit Bezug zum Geoakkumulationsindex nach Müller (1979). ¹⁾ nach Turekian und Wedepohl (1961), ^{2) 3)} nach Müller et al. (1999), ⁴⁾ nach Kralik und Sager (1986)	91
Abb. 7.1	Aufbau einer stationären Bodenluftmessstelle, bei der die Entnahme im Bohrloch mit Entnahme- und Packervorrichtung erfolgt. Das Probengefäß wird in das Bohrloch eingebracht und von der gepumpten Bodenluft durchströmt. Die Probe wird unter Standortbedingungen gewonnen. Die stabilen Werte der vor Ort kontinuierlich gemessenen Konzentrationen der Hauptparameter geben an, wann tatsächlich Bodenluft gefördert wird und die Probe genommen werden kann	102
Abb. 7.2	Ergebnisse von 24-stündigen Bodenluftabsaugversuchen an drei Messstellen im Bereich einer Hausmülldeponie.	103
Abb. 7.3	Saugkerzen und wägbares Lysimeter zur Gewinnung von Bodenlösung im Verband.	106
Abb. 7.4	Ausbauschema einer Multilevel-Messstelle zur Überwachung zweier Grundwasserhorizonte. Das obere Grundwasserstockwerk wird durch eine vollkommene Messstelle (P1a) erschlossen. Die Filterstrecke reicht über die gesamte Mächtigkeit der gesättigten Zone. Das untere Grundwasserstockwerk wird nur im obersten Bereich durch die Filterstrecke der Messstelle P1 erfasst. Um einen Kurzschluss zwischen den beiden Stockwerken zu vermeiden, muss der Ringraum der Messstelle P1 im Bereich des Stauhorizontes abgedichtet sein	108
Abb. 7.5	Abschluss einer Multilevel-Messstelle, Ausbau als Überflurmessstelle	109
Abb. 7.6	a Multiparametersonde zur Bestimmung von Grundwasserhöhe, Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffgehalt und Redoxpotenzial. Weitere Parameter können über die Ergänzung entsprechender Sensoren ebenfalls vor Ort bestimmt werden; b Datensammler zur kontinuierlichen Erfassung von Grundwasserständen und Wassertemperatur (Fotos H.-P. Steyrer).	110
Abb. 7.7	Kabellichtlot mit angeschlossenem Probenheber zur Entnahme von MKW-kontaminierten Grundwasserproben (Foto H.-P. Steyrer)	112
Abb. 7.8	a Durchführung einer Kleinbohrung; b Bohrstöcke zur Entnahme von Bodenproben aus geringen Tiefen und eher feinkörnigen Böden (Fotos M. Marbach)	115
Abb. 7.9a,b	Heterogenität von Böden entscheidet über die Probenahmestrategie in der Altlastenpraxis. Bei homogenen Böden wie in a erfolgt die Probenahme soweit möglich nach organoleptischem Befund (Geruch, Farbe) wie hier aus Baggerschürfen oder auch aus Bohrkernen; b zeigt eine Greiferbohrung innerhalb einer ehemaligen Hausmülldeponie. Die sehr heterogenen Verhältnisse erfordern die Entnahme großer Abfallmengen, um eine repräsentative Probenahme zu gewährleisten	116
Abb. 8.1	Schematischer Ablauf einer Verdachtsflächenerkundung mit dem Ziel der Altlastenklassifizierung. In der Abbildung werden sowohl die deutsche Betrachtungsweise nach Beweisniveau als auch die österreichische Vorgangsweise zur Erstellung von Standortmodellen dargestellt. Das Diagramm zeigt gut, dass es keine wesentlichen Unterschiede in der prinzipiellen Vorgangsweise gibt, obwohl die beiden Systeme auf unterschiedlichen Regelwerken beruhen. Dies ist nicht verwunderlich, da die naturwissenschaftlichen Grundlagen ja die gleichen sind.	129

Abb. 8.2	Entwicklung des Standortmodells auf Basis des jeweiligen Kenntnisstandes während der Verdachtsflächenerkundung	134
Abb. 8.3	Errichtung einer Schmalwand	140
Abb. 9.1	Einteilung der Rohstoffe nach Aspekten ihrer Herkunft, ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften und ihrer Verwendung	149
Abb. 9.2	Kreislauf der Rohstoffwirtschaft (in Anlehnung an BGR 2014)	150
Abb. 9.3	Der steirische Erzberg, Ansicht von Westen	151
Abb. 9.4	Ausfällungen von Eisenhydroxiden im Bereich einer pyrithaltigen Erzlagerstätte	152
Abb. 9.5	Freisetzung saurer Minenwässer nach der Flutung eines aufgelassenen Erzbergbaus (in Anlehnung an Evans 1997)	153
Abb. 9.6	Profil und Grundriss der Kupferhütte Mitterberghütten mit ihrer Rauchgasableitung zum 100 m oberhalb errichteten Schornstein	155
Abb. 9.7	Grundwasserverhältnisse im Einflussbereich eines Baggersees	161
Abb. 9.8	Linearisierungsdiagramm nach Hubbert (in Anlehnung an Bardi 2013). Auf der Y-Achse ist das Verhältnis zwischen den erfassten jährlichen Förderraten und der kumulierten Gesamtfördermenge eines beliebigen Rohstoffs dargestellt. Dieser Quotient wird der kumulierten Fördermenge auf der x-Achse gegenübergestellt. Es ergibt sich eine Regressionsgerade, die, in die Zukunft extrapoliert, die maximal förderbaren Ressourcen (URR) eines Rohstoffs angibt. Neue Technologien oder Lagerstättentypen, wie die off-shore-Förderung oder die Erschließung von Schiefergas führen zu einer Erhöhung der jährlichen Förderraten, versetzen damit die Regressionsgerade und erhöhen die URR	164
Abb. 10.1	Schema einer Anlage zur Versickerung von Niederschlägen auf versiegelten Flächen im Vergleich mit der natürlichen Sickerstrecke eines nicht versiegelten Bodens. Die erhebliche Reduzierung der Sickerstrecke innerhalb der ungesättigten Zone führt zu qualitativen Veränderungen der Sicker- und damit der Grundwasserqualität. Die reinigende Wirkung der ungesättigten Bodenzone fehlt weitgehend	176
Abb. 10.2	Brunnenstandort, Kontaminationsherd und Sanierungsmaßnahme	178
Abb. 10.3	Ganglinien der Gesamtmineralisation zweier Grundwasserentnahmen ohne (durchgezogene Linie) und mit (punktierte Linie) Einfluss durch Straßensalzung	181
Abb. 10.4	Schematische Darstellung eines Leichtflüssigkeitsabscheiders. Der Dichteunterschied zwischen Wasser und den MKW wird genutzt, um die beiden Phasen voneinander abzutrennen. Während das Wasser abfließt, bleibt die leichtere Phase im Abscheider zurück. Eine Schwimmervorrichtung verhindert, dass bei geringer Wasserführung auch die Leichtphase abfließen kann	182
Abb. 10.5	Schematische Darstellung der quantitativen Auswirkungen von Tunnelbauwerken in einem Gebirgszug (in Anlehnung an Gisbert et al. 2009)	183
Abb. 10.6	Zusammensetzung von Meerwasser (a), Süßwassertaquifer (b) und dem Grundwasser nach der Versalzung durch eine Meerwasserintrusion (c). In diesem Stiff-Diagramm werden die Konzentrationen der wichtigsten Ionen jeweils paarweise aufgetragen, wobei die üblicherweise aufgrund der Wassergenese nebeneinander vorkommenden Ionen auf einer Achse aufgetragen werden. Die Darstellung ermöglicht es, eine „ungewöhnliche“ Wassergenese anhand der Asymmetrie des Diagramms auf den ersten Blick zu erkennen	185
Abb. 10.7	Zusammensetzung von Süßwasser (a), Meerwassertaquifer (b) und dem Grundwasser nach der Auffrischung durch eine Süßwasserintrusion (c)	186

Abb. 11.1	Entwicklung der Primärenergienutzung und deren Verteilung auf die Energieträger zwischen 1973 und 2012 (Daten aus IEA 2014). Das Diagramm zeigt eine deutliche Zunahme der Primärenergiebereitstellung aus allen Energieträgern. Der Anteil an erneuerbaren Energiequellen ist in den vergangenen 40 Jahren zwar angestiegen, deckt insgesamt aber noch immer einen sehr geringen Anteil am Gesamtaufkommen 193	193
Abb. 11.2	Vergleich von Gesamtenergiebedarf und erneuerbarem Energiemix ausgewählter europäischer Länder. Geographische und klimatische Bedingungen führen zu einer ungleichen Verteilung auf die verschiedenen erneuerbaren Quellen. Biomasse stellt in den meisten Ländern den weitaus größten Anteil. Eine Sonderstellung nimmt Island mit einem überproportionalen Anteil an Geothermie ein, der auf die geologische Situation der Region zurückzuführen ist. Norwegen, Österreich und Schweden spiegeln mit einem vergleichsweise hohen Anteil an Wasserkraft die günstige Kombination von Reliefenergie und großen Niederschlagsmengen für diese Art der Energiegewinnung wider. In den Niederlanden ist aufgrund des fehlenden Geländereiefs keinerlei Wasserkraftnutzung möglich. (Daten aus IEA 2011) 195	195
Abb. 11.3	Schematische Darstellung eines Laufkraftwerkes. Das Stauwerk trennt Ober- und Unterwasserbereich. Im Oberwasserabschnitt können die Ablagerung von Feinsedimenten, die Stagnation der tieferen Wasserschichten und der Grundwasseranstieg ökologisch und umweltgeologisch relevante Probleme aufwerfen. Im Unterwasserbereich ergeben sich aus der Eintiefung der Flusssohle und der damit verbundenen Grundwasserabsenkung möglicherweise geotechnische und wasserwirtschaftliche Problemstellungen 197	197
Abb. 11.4	Schematische Darstellung eines hydraulischen Kurzschlusses zwischen zwei Grundwasserstockwerken über den Ringraum zwischen Bohrlochwand und Verrohrung einer Erdwärmesonde 204	204
Abb. 11.5	Darstellung von Förder- und Injektionsbohrung mit zwischengeschalteter energetischer Nutzung. Im Förderbrunnen, im Wärmetauscher und im Injektionsbereich können hydrochemische Reaktionen, die durch Abkühlung, Druckentlastung und Mischung verschiedener Wässer angeregt werden, zu Fällungs- und Lösungsprozessen führen 207	207
Abb. 12.1	Schematische Darstellung der wesentlichen Anlagenteile des UVP-pflichtigen Kraftwerksprojekts 222	222

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Beispiele für Asbestminerale	41
Tab. 4.1	Einige wichtige Eigenschaften des Wassers (Angaben bei Atmosphärendruck und 20 °C)	47
Tab. 5.1	Beispiele für die Klassifizierungen einiger typischer mitteleuropäischer Bodentypen nach morphogenetischen Aspekten (Auswahl aus der Österreichischen Bodensystematik, Nestroy et al. 2011)	70
Tab. 5.2	Beispiele für Bodenklassifizierungen in der Altlastenpraxis (angelehnt an ÖNORM S-2088-2)	70
Tab. 5.3	Einige der wichtigsten Bodenzone und deren Ausprägung und Vorkommen gemäß Weltbodenkarte FAO-UNESCO (1994)	71
Tab. 5.4	Vergleich zwischen den durchschnittlichen Werten der wichtigsten Parameter in Atmosphärenluft und Bodenluft	79
Tab. 6.1	Zuordnung der Schwermetallgehalte von Sedimenten gemäß Geoakkumulations-Index nach Müller (1979)	89
Tab. 7.1	Einige Möglichkeiten zur Gewinnung von Bodenlösung aus der ungesättigten Bodenzone mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen	105
Tab. 8.1	Generelle Unterschiede zwischen Altstandort und Altablagerung (Auswahl) ...	128
Tab. 8.2	Sanierungsziele in verschiedenen Phasen der Sanierungsplanung	142
Tab. 8.3	Beispiel eines Variantenvergleichs zur Optimierung der Sanierungsmaßnahme	144
Tab. 12.1	Beispiele für UVP-pflichtige Projekte nach dem österreichischen UVP-G (2000), Anhang 1 (ähnliche Auflistungen finden sich auch in der deutschen und der schweizer Gesetzgebung)	219
Tab. 12.2	Beispiel für eine geologisch-hydrogeologische Sensibilitätsmatrix.	221

Exkursverzeichnis

Exkurs 3.1	Eine kurze Geschichte der Weltklimakonferenz	36
Exkurs 3.2	Fallbeispiel Umhausen	40
Exkurs 4.1	Isotopenhydrologie	48
Exkurs 4.2	Henry-Gesetz	52
Exkurs 5.1	Schutzgut Boden	72
Exkurs 5.2	Tonmineralogie	75
Exkurs 7.1	Bodenluftabsaugversuch in einer Altablagerung	103
Exkurs 7.2	Fallbeispiel Regionale Dauerbeobachtung	113
Exkurs 8.1	Deponiegasentwicklung in einer Hausmülldeponie.	132
Exkurs 8.2	Beispiel für die Erkundung einer Altablagerung.	133
Exkurs 8.3	Variantenstudie zur Sanierung einer Altablagerung	143
Exkurs 9.1	Pyritverwitterung	152
Exkurs 9.2	Fallbeispiel einer ehemaligen Verhüttungsanlage	155
Exkurs 9.3	Hydraulic fracturing (Fracking)	166
Exkurs 10.1	Europäische Wasserrahmenrichtlinie.	173
Exkurs 10.2	Fallbeispiel Urbane Gefahren für die Trinkwasserversorgung	178
Exkurs 10.3	Kationenaustauschprozesse im künstennahen Aquifer	185
Exkurs 11.1	Fallbeispiel Vajont-Stausee	201
Exkurs 12.1	Gesetzgebung zur Umweltverträglichkeitsprüfung	218
Exkurs 12.2	Fallbeispiele zur Geologie im UVP-Verfahren	222

Umweltgeologie – Was ist das eigentlich?

Sylke Hilberg

1

» Durch das Schürfen nach Erz werden die Felder verwüstet [...] Wälder und Haine werden umgehauen, denn man bedarf zahlloser Hölzer für die Gebäude und das Gezeug sowie um die Erze zu schmelzen [...] Die Erze werden gewaschen; durch dieses Waschen aber werden, weil es die Bäche und Flüsse vergiftet, die Fische entweder aus ihnen vertrieben oder getötet. Da also die Einwohner der betreffenden Landschaften in Folge der Verwüstung der Felder, Wälder, Haine, Bäche und Flüsse in große Verlegenheit kommen, wie sie die Dinge, die sie zum Leben brauchen sich verschaffen sollen, und da sie wegen des Mangels an Holz größere Kosten zum Bau ihrer Häuser aufwenden müssen, so ist es vor aller Augen klar, daß bei dem Schürfen mehr Schaden entsteht als in den Erzen, die durch den Bergbau gewonnen werden, Nutzen liegt (Agricola 2007).

Dies sind einige Argumente von Gegnern des Erzabbaus, die Georg Agricola in seinem im Jahre 1556 posthum erstmals erschienenen Werk „De Re Metallica“ anführt und die sehr treffend beschreiben, womit sich die Umweltgeologie heute beschäftigt. Im Fokus stehen die Wechselwirkungen zwischen den Menschen und ihrer geologischen Umwelt. Um die Rolle des Menschen innerhalb geologischer Vorgänge zu betrachten, lassen sich zwei unterschiedliche Perspektiven einnehmen. Jene des Menschen, der sich fragt: „Welche Einschränkungen und Gefährdungen erfahre ich durch die Geologie?“ (= Immissionsbetrachtung) oder die andere Perspektive desjenigen, der sich die Frage stellt: „Welche Veränderungen bewirken meine Aktivitäten auf der Erde?“ (= Emissionsbetrachtung).

Die Immissionsbetrachtung ist eine, mit der sich die Menschheit seit Beginn ihrer Existenz zu befassen hat – war und ist doch das Verständnis um geogene Naturgefahren wie Steinschlag, Erdbeben, Vulkanismus oder auch natürliche Klimaschwankungen seit prähistorischer Zeit von existenzieller Bedeutung und nachweislicher Grund für viele Entwicklungen der Menschheitsgeschichte.

Die Emissionsbetrachtung ist dagegen eine Perspektive, in die wir uns erst seit wenigen Jahrzehnten bewusst und vielleicht auch etwas widerwillig begeben, thematisiert sie doch menschliche Eingriffe häufig unter einem kritischen Blickwinkel. So

verwundert es auch nicht, dass Agricola die Probleme, die zu seiner Zeit von Gegnern des Erzabbaus vorgetragen wurden, in seinem Werk anführt, um sie anschließend als unangebracht zu bewerten und die genannten Nachteile dem weitaus größeren Nutzen des Erzabbaus entgegenzusetzen.

Während der Geologe Ernst Fischer 1915 in seiner Abhandlung „Der Mensch als geologischer Faktor“ schreibt:

» ... eine prinzipielle Änderung der klimatischen Verhältnisse eines Gebiets durch menschliche Arbeit ist also kaum denkbar

steht heute, genau 100 Jahre, nachdem Fischer zu dieser Erkenntnis kam, der anthropogene Einfluss auf globale Klimaentwicklungen unter Naturwissenschaftlern weltweit außer Zweifel.

Es zeigen sich hier zwei wesentliche Aspekte der Umweltgeologie:

- Die Frage, was das Eingreifen des Menschen in natürliche Kreisläufe aller Art in den Naturräumen bewirkt, stellt sich der Mensch dann, wenn sich nachhaltige Veränderungen zeigen, die sich spürbar auf den Lebensraum und die Lebensweise des Menschen auswirken.
- Feststellungen, Einschätzungen, Erkenntnisse und Interpretationen unterliegen in der Umweltgeologie im Vergleich zu anderen Teildisziplinen der Geologie einer extrem dynamischen Entwicklung, die in fundiertem Wissen getätigte Aussagen innerhalb weniger Jahrzehnte, manchmal sogar nur Jahre ad absurdum führen kann.

Steigende Bevölkerungszahlen, gepaart mit steigenden Ansprüchen des Einzelnen, führen zu einer immer höheren Beanspruchung der begrenzt vorhandenen Ressourcen innerhalb des geschlossenen Systems Erde. Konflikte zwischen Nachfrage und Angebot ergeben sich dabei im Bereich der nutzbaren Flächen gleichermaßen wie bei der Rohstoff- und Energieversorgung. Die in großen Mengen produzierten gasförmigen, flüssigen und festen Abfälle schaffen Probleme infolge der Mobilisierung oder Akkumulation von Schadstoffen. Dies wirkt sich sowohl innerhalb natürlicher als auch neuer, anthropogener Kreisläufe aus.

Alle diese Aspekte beschäftigen Geologen in der Praxis in zunehmendem Maße. So gewinnt die Geologie wegen der knapper werdenden verfügbaren Flächen in der Raumplanung an Bedeutung. Wo befinden sich Bauplätze, die sicher sind vor Massenbewegungen oder Überflutungen? Wo liegt die geotechnisch günstigste Trassenführung für eine Straße oder Bahnstrecke? Welche Sicherungsmaßnahmen sind erforderlich, um potenzielle Massenbewegungen in den Griff zu bekommen? Mit diesen Fragen befassen sich vorwiegend die Ingenieurgeologen.

Hydrogeologen fragen, oft in enger Zusammenarbeit mit der Kulturtechnik: Wie kann in neuen Siedlungsräumen die Wasserversorgung und Entsorgung gewährleistet werden? Wie erfolgt eine schadlose Entwässerung versiegelter Flächen? Wie wirkt sich ein Flusskraftwerk auf die Grundwassersituation im Begleitstrom aus?

Wo finden sich die benötigten Rohstoffe? Wie kann der Abbau wirtschaftlich gestaltet werden? Wie viele Reserven stehen noch für welchen Zeitraum zur Verfügung? Zur Beantwortung dieser Fragen hat sich die Teildisziplin der Rohstoffgeologie entwickelt.

Umweltgeologen werden in all jenen Bereichen aktiv, in denen es um qualitative Auswirkungen von menschlichen Aktivitäten auf die (im weitesten Sinne) geologische Umwelt geht. Welche Schadstoffe werden von bebauten Gebieten oder Straßen über die Regenwässer in den Untergrund eingeleitet? Welche Luftschadstoffe werden bei Produktionsprozessen mobilisiert und dringen über natürliche Kreisläufe in den Untergrund ein? Welche Kontaminationen entstehen bei der Rohstoffgewinnung? Welche werden später aus den Altbergbauen emittiert? Wie wirkt sich ein Gewässeraufstau oberhalb von Wasserkraftwerken auf die Qualität des Wassers aus? Ist für eine Altablagerung aufgrund der Gefährdungsabschätzung eine Sanierung erforderlich oder nicht? Dies sind nur einige beispielhafte Fragestellungen, die ohne geologisches Verständnis der Verhältnisse und ablaufenden Prozesse nur unzureichend beantwortet werden können. Hier setzt die Teildisziplin der Umweltgeologie an.

Um die Grundlagen der Umweltgeologie und um Fragen der umweltgeologischen Praxis geht es in diesem Buch. Es will einen Überblick über die vielfältigen Fragestellungen und Lösungsansätze ge-

ben und damit einen Einstieg in die Umweltgeologie anbieten.

Im Teil A (Grundlagen) werden zunächst die wichtigsten Stoffgruppen im Überblick vorgestellt (► Kap. 2), mit denen Umweltgeologen konfrontiert sind. Dabei wird auch die Rolle dieser Stoffe innerhalb geologischer Kreisläufe diskutiert. Es folgen Betrachtungen zu den einzelnen Sphären, die an den Stoffkreisläufen beteiligt sind. Neben der Atmosphäre (► Kap. 3), die auch den wichtigen Aspekt des Klimas berücksichtigt, werden Hydrosphäre (► Kap. 4), Pedosphäre (► Kap. 5) sowie die Sedimente als Teil der Lithosphäre (► Kap. 6) beschrieben und deren Rolle innerhalb umweltgeologischer Betrachtungen beleuchtet.

Der Teil B (Umweltgeologie in der Praxis) befasst sich mit den Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf ihr geologisches Umfeld und den geologischen Lösungsansätzen in Umweltfragen. Zunächst stehen Techniken der Probenahme in verschiedensten Umweltbereichen im Mittelpunkt und damit die praktische Vorgangsweise bei der quantitativen und qualitativen Erfassung und Ursachenbestimmung von Umweltproblemen (► Kap. 7). Das ► Kap. 8 befasst sich mit Fragen des umweltschonenden Umgangs mit Abfällen sowie der Erkundung, Bewertung und Sanierung von Altablagerungen und Altstandorten. Im ► Kap. 9 werden Auswirkungen betrachtet, die sich durch den Abbau und die Nutzung von Massenrohstoffen, Erzen und fossilen Energierohstoffen ergeben. Dem Wasser, als dem wichtigsten, weil lebensbegründenden Rohstoff, wird ein eigenes Kapitel (► Kap. 10) gewidmet, das sich mit Fragen der qualitativen Beeinträchtigungen von Grundwässern als Folge anthropogener Aktivitäten befasst. Im ► Kap. 11 werden Fragen der Nutzung erneuerbarer Energiequellen aufgeworfen und mögliche Auswirkungen aus Sicht der Umweltgeologie betrachtet. Schließlich zeigt das ► Kap. 12 einen sehr praktischen Aspekt auf, nämlich die Rolle der Geologen bei der umweltgerechten Planung und Bewilligung von Großprojekten aus allen oben behandelten Teilgebieten. Mit der Gesetzgebung zur Umweltverträglichkeitsprüfung wurde europaweit die Möglichkeit geschaffen, Fachexperten bereits bei der Planung intensiv einzubeziehen und damit Auswirkungen auf die (in unserem Fall geologische) Umwelt zu minimieren.

In jedem Kapitel dienen Exkurse dazu, spezielle Fragestellungen zu vertiefen. Dazu werden reale praktische Beispiele vorgestellt oder Zusammenhänge, die am Rande noch interessant sein könnten, ergänzend beschrieben. Am Ende jedes Kapitels werden die zentralen Botschaften in komprimierter Form aufgelistet. Testfragen sollen dazu dienen, den eigenen Erkenntnisgewinn zu überprüfen.

Angesichts des umfangreichen Themenkreises, mit dem die Umweltgeologie befasst ist, können hier natürlich nicht alle Teilgebiete in jeder Detailgenauigkeit beleuchtet werden. So ist z. B. die Nanotechnologie ein Feld, das auch in den Geowissenschaften immer größere Bedeutung bekommt. Auch Fragen rund um die Kernenergienutzung und den Uranbergbau werden ausgespart. Diese und weitere Themen, die die interessierte Leserschaft hier möglicherweise vermissen wird, bilden vielleicht das Potenzial für eine nächste erweiterte Auflage dieses Buches.

Basierend auf meinen langjährigen Erfahrungen in der umweltgeologischen Praxis und im Lehrbetrieb habe ich diese Einführung in die Umweltgeologie für Hauptfachstudierende der Geologie konzipiert. Ich denke aber, dass auch interessierte Studierende aus Nachbardisziplinen wie der Geographie, der Biologie, der Ökologie oder auch Lehramtsstudierende, für die häufig gerade diese anwendungsbezogenen und zivilisationsnahen Fragen der Geologie von besonderem Interesse sein können, hier einen gut verständlichen Einstieg in die Thematik finden. Für Leser, die sich nach dieser Einführung in einzelnen Themengebieten vertiefen möchten, wird bei jedem Kapitel weiterführende Literatur empfohlen.

Ein Glossar soll den Zugang in diese Teildisziplin erleichtern und umfasst daher vor allem jene typischen umweltgeologischen Begriffe, die in der Allgemeinen Geologie vielleicht weniger gebraucht werden.

Mit diesem Buch möchte ich die Emissionsbetrachtung in den Vordergrund stellen und den Lesern dabei behilflich sein, die „andere“ Perspektive einzunehmen, die der Geologe Ernst Fischer bereits 1915 so zutreffend beschrieben hat:

» Kleine Ursachen können so sehr weitgreifende Folgen haben. Darauf beruht auch der große Einfluss, den der Mensch erlangt hat. Hier ist ein

neuer, selbständig wirkender Faktor ins Leben getreten und hat, rasch sich entwickelnd, eine Wirkung erlangt, die zu seinen direkten Leistungen in keinem rechten Verhältnis stand, die vielfach von ihm selbst weder beabsichtigt noch auch nur geahnt worden waren. Der Mensch ist der jüngste der geologischen Faktoren (Fischer 1915).

Literatur

-
- Agricola G (2007) *De Re Metallica Libri XII* – Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen, 2. Aufl. Marix Verlag GmbH, Wiesbaden (unveränderter Nachdruck der Erstausgabe des VDI Verlags, Berlin, 1928)
- Fischer E (1915) Der Mensch als geologischer Faktor. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 67:106–148 (www.schweizerbart.de)

Teil A – Grundlagen

Kapitel 2 **Stoffkreisläufe und Schadstoffe – 7**

Sylke Hilberg

Kapitel 3 **Atmosphäre – 31**

Sylke Hilberg

Kapitel 4 **Hydrosphäre – 45**

Sylke Hilberg

Kapitel 5 **Pedosphäre – 63**

Sylke Hilberg

Kapitel 6 **Sedimente – 83**

Sylke Hilberg

Stoffkreisläufe und Schadstoffe

Sylke Hilberg

- 2.1 Das Systemkonzept – 8
- 2.2 Spezielle Kreislaufsysteme – 10
- 2.3 Stofftransport und Stoffumwandlung – 16
- 2.4 Anorganische Schadstoffe – 17
- 2.5 Organische Schadstoffe – 20
- Literatur – 29

Kurzfassung

Die Erde kann in ihrer Gesamtheit als geschlossenes System betrachtet werden. Das bedeutet, es findet zwar ein Austausch von Energie mit der Umgebung statt, nicht aber von Materie. Aus dieser Tatsache ergibt sich, dass alle Ressourcen der Erde nur in begrenzter Menge verfügbar sind. Alle Prozesse, bei denen Stoffe in irgendeiner Form umgesetzt oder transportiert werden, müssen daher Kreislaufprozesse sein.

Um einzelne Kreisläufe zu verstehen, ist es nicht immer erforderlich und auch nicht möglich, das Gesamtsystem Erde zu berücksichtigen. Stattdessen können einzelne abgrenzbare Systeme betrachtet werden. In erster Ebene teilt das Systemkonzept die Erde in die Sphären Atmo-, Hydro-, Pedo- und Lithosphäre sowie in die Biosphäre ein. Für bestimmte Fragestellungen kann auch eine gesonderte Betrachtung der Anthroposphäre (durch menschlichen Einfluss geprägte Sphäre) sinnvoll sein. Innerhalb jeder Sphäre lassen sich weitere Untergliederungen durchführen, um so zu einem, für die jeweilige Fragestellung passenden Maßstab zu kommen. Erste Vorüberlegungen zu vielen naturwissenschaftlichen Untersuchungen dienen daher der Systemabgrenzung. In diesem Kapitel werden einige bedeutende Stoffkreisläufe, die meist sphärenübergreifend ablaufen, dargestellt. Der Kohlenstoffkreislauf kann in zwei Teilkreisläufen beschrieben werden. In seinem kurzfristigen Teil finden Prozesse zwischen Atmo-, Hydro-, Pedo- und Biosphäre statt. Der langfristige Kohlenstoffkreislauf bezieht auch die Lithosphäre ein. Der Stickstoffkreislauf findet vor allem zwischen Biosphäre und Pedosphäre statt, der Schwefelkreislauf ist einer, der vor allem durch Lithosphärenprozesse angetrieben wird. Auf natürliche Kreisläufe wirkt der Mensch ein, indem er Stoffmengen oder Prozessgeschwindigkeiten beeinflusst. Rein anthropogen bedingte Stoffkreisläufe betreffen Stoffe, die ohne menschliches Zutun nicht existieren würden bzw. in der Lithosphäre langfristig fixiert wären. Da einzelne Stoffkreisläufe interagieren, haben die anthropogenen Kreisläufe auch nachhaltige Auswirkungen auf die natürlichen Systeme.

Der Transport von Stoffen kann nach verschiedenen Mechanismen ablaufen. In Pedo-, Hydro- und Atmo- sphäre werden Stoffe oft in Form fluider Phasen transportiert. Häufig ist Stofftransport oder auch die Fixierung von Stoffen mit Stoffumwandlung infolge physikalischer, chemischer oder biochemischer Prozesse verbunden.

Der Begriff Schadstoff beschreibt Substanzen, die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder ihrer Stoffmenge auf ein System negativ einwirken. Ob eine Substanz als Schadstoff betrachtet wird, hängt damit auch von der Betrachtungsperspektive ab.

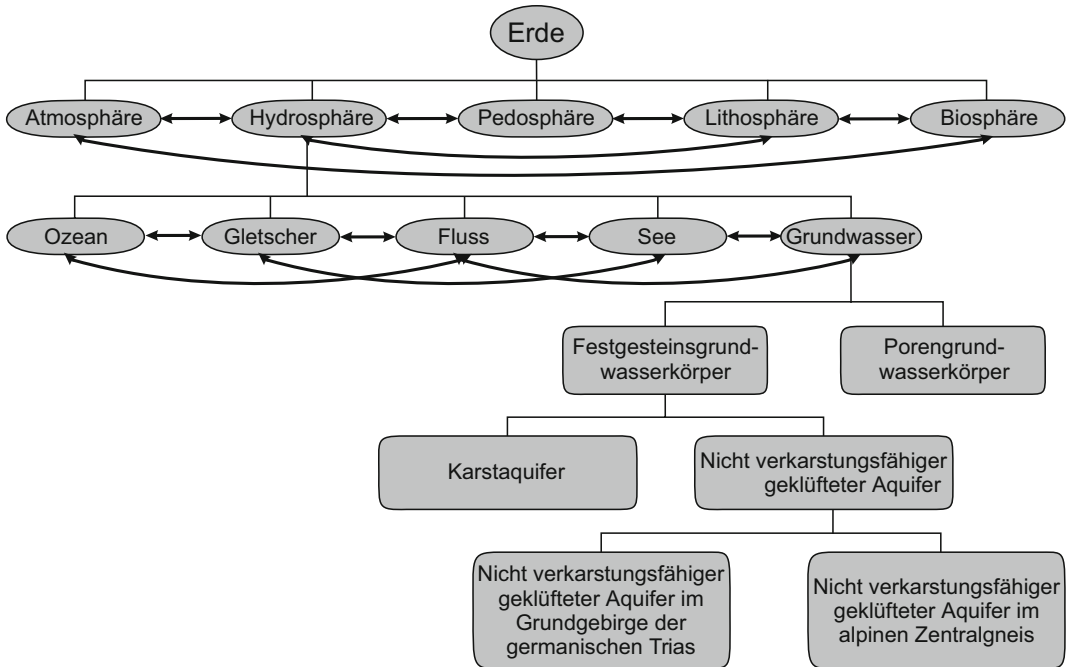
Für Umweltgeologen gibt es einige Schadstoffgruppen, mit denen sie in verschiedenen Fragestellungen immer wieder konfrontiert sind. Neben den wichtigsten Schwermetallen sind dies z. B. Arsen und Cyanide sowie die große Gruppe der Kohlenwasserstoffe, die aufgrund ihrer großen Vielfalt auch vielfältige Schädigungen haben und sich auf verschiedenste Weise auf die Umwelt auswirken.

2.1 Das Systemkonzept

Um natürliche, aber auch anthropogene Prozesse vollständig verstehen und beschreiben zu können, müssen alle Einwirkfaktoren und alle möglicherweise von dem Prozess betroffenen Nachbargebiete mit berücksichtigt werden.

Die große Mehrheit der Prozesse findet in einem abgrenzbaren Umfeld statt. Größtes mögliches Bezugssystem für terrestrische Fragestellungen ist die Erde in ihrer Gesamtheit. Für die meisten Problemstellungen ist aber eine Betrachtung der gesamten Erde als Bezugssystem nicht umsetzbar, nicht erforderlich und auch nicht zielführend. Die Erde wirkt meist nicht in ihrer Gesamtheit auf den Prozess ein oder ist davon betroffen, denn es sind stets nur bestimmte abgrenzbare Teilbereiche des globalen Systems relevant. Die erste Aufgabe bei der Lösung naturwissenschaftlicher Fragestellungen ist daher meist die Systemabgrenzung.

In **Abb. 2.1** wird das Gesamtsystem Erde zunächst in der ersten Ebene in die verschiedenen Sphären eingeteilt. Die Atmo-, Hydro-, Pedo- und Lithosphäre sind, mit ihren umweltgeologisch relevanten Eigenschaften, die Hauptinhalte der folgenden Grundlagenkapitel. Es gibt innerhalb jeder dieser Sphären wiederum zahlreiche Möglichkeiten, diese in kleinere, detailliertere und überschaubare Systeme zu unterteilen. So wird hier beispielsweise die Hydrosphäre in die Welt der Ozeane, der Gletscher, der Flüsse, Seen oder des Grundwassers eingeteilt. Allen Systemen ist gemein, dass ihr wesentlicher Bestandteil das Wasser ist, dennoch sind



■ **Abb. 2.1** Das Systemkonzept dient der Abgrenzung einzelner überschaubarer Bereiche innerhalb des Gesamtsystems Erde, um Fragestellungen einzugrenzen und damit praktisch bearbeitbar zu machen

die Rahmenbedingungen, in denen das Wasser vorkommt, grundsätzlich stark unterschiedlich.

Eine Vertiefung in eines der Systeme der Hydrosphäre zeigt, dass es hier wiederum zahlreiche Möglichkeiten gibt, weitere Differenzierungen vorzunehmen. In ■ [Abb. 2.1](#) lässt sich zum Beispiel im System Grundwasser die Unterscheidung zwischen Poren- und Festgesteins-Grundwasserkörpern (Aquifer) treffen. Bei Letzteren lässt sich unterscheiden zwischen verkarsteten und nicht verkarstungsfähigen Lithologien. Weitere Differenzierungen für konkrete Fragestellungen lassen sich dann auf räumliche Abgrenzungen innerhalb eines definierten Systems beziehen, wenn man z. B. die nicht verkarstungsfähigen Festgesteins-Aquifere einer bestimmten geologischen Formation untersucht.

Die große Herausforderung, für eine Fragestellung die passende Systemabgrenzung zu finden, ist es, mögliche Interaktionen zwischen einzelnen Systemen, wie sie in ■ [Abb. 2.1](#) angedeutet sind, zu erkennen und falls erforderlich, zu berücksichtigen. Die Biosphäre ist zwar inhaltlich nicht Gegenstand dieses Buches, es soll aber an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass alle Sphären, die in den

nächsten Kapiteln intensiv besprochen werden, immer auch Lebensräume darstellen. Ein Umstand, dessen sich Umweltgeologen, die ja vor allem die abiotischen Faktoren betrachten, dennoch bewusst sein sollten.

Entsprechend seinem Austausch mit der Umwelt kann ein System als isoliert, geschlossen oder offen bezeichnet werden.

- Isoliertes System: es kommt weder zum Austausch von Materie noch von Energie. Ein derartiges System ist in der Natur nicht verwirklicht.
- Geschlossenes System: es findet kein Austausch von Materie statt, es kommt jedoch zum energetischen Ausgleich mit der Umgebung. Mit Einschränkungen kann die Erde in ihrer Gesamtheit als ein annähernd geschlossenes System beschrieben werden. Über die Sonneneinstrahlung und Abstrahlung von Wärme kommt es zu intensivem Austausch von Energie. Der Austausch von Materie beschränkt sich auf Meteoriteneinschläge und geringe Mengen an diffus ein- und austretenden Stoffen in die oder aus der Atmosphäre.

- 2
- Offenes System: es ist sowohl der Austausch von Energie als auch von Materie möglich. Dieser Zustand gilt für annähernd jedes terrestrische System außer der Erde selbst. Es besteht die Möglichkeit, dass ein System für eine bestimmte Materie offen, gegenüber anderen Substanzen aber geschlossen ist.

Die Tatsache, dass die Erde in ihrer Gesamtheit als weitgehend geschlossenes System betrachtet werden kann, führt uns zu einem der grundlegenden Fakten in den Umweltwissenschaften. Die auf der Erde verfügbaren Ressourcen sind begrenzt. Sie unterliegen Stoffumwandlungs- und Transportprozessen, die sich in den verschiedensten Raum- und Zeitskalen abspielen und systemübergreifend sein können. Letztendlich handelt es sich bei diesen natürlichen Prozessen aber immer um Kreisläufe. Die Aufgabe der Umweltwissenschaften und damit auch der Umweltgeologie ist es, zunächst diese natürlichen Kreisläufe zu verstehen. Das Prozessverständnis bildet die Grundlage zur Entwicklung von Strategien, um nachhaltige Beeinträchtigungen als Folge anthropogener Aktivitäten zu verringern, im Idealfall zu vermeiden.

Aus der Geologie ist das Kreislaufkonzept als ein sehr langfristiger Prozess bekannt. Der geologische Kreislauf beschreibt den Weg eines Gesteins oder auch eines Teiles der Erdkruste, hier beispielsweise beginnend mit der Sedimentation:

Sedimentation → Diagenese
 → Metamorphose → Aufschmelzung
 → Erstarrung → Hebung (Gebirgsbildung)
 → Freilegung
 → Erosion (Verwitterung und Transport)
 → Sedimentation

Dieser Kreislauf hat endogene und exogene Anteile, das heißt, er spielt sich in tiefen Krusten- und Erdmantelbereichen ab (Metamorphose, Aufschmelzung), findet im Übergang zwischen oberer Kruste und Oberfläche statt (Diagenese, Erstarrung, Hebung) und erfolgt an der Erdoberfläche (Erosion, Sedimentation). Ein vollständiger Kreislauf kann viele Millionen bis Milliarden Jahre dauern.

Die einzelnen Schritte in diesem Kreislauf werden durch verschiedene Teildisziplinen der Geologie (Sedimentologie, Strukturgeologie, Petrologie etc.) untersucht. Ein direkter Bezug zu umweltgeologischen Fragestellungen ergibt sich vor allem bei den exogenen Anteilen des geologischen Kreislaufs, da nach heutigem Wissen – von einigen Ausnahmen abgesehen – nur hier ein signifikanter anthropogener Einfluss denkbar ist. Wir beschränken unsere Betrachtung der Lithosphäre daher im ► [Kap. 6](#) auf die exogenen Prozesse und deren umweltgeologische Aspekte.

Ein deutlich kurzfristigerer, aber für das Gesamtsystem Erde ähnlich wichtiger globaler Kreislauf ist der Wasserkreislauf. Dieser wird im ► [Kap. 4](#) detailliert besprochen.

In den folgenden Abschnitten werden einige weitere wichtige globale Stoffkreisläufe thematisiert. Neben den natürlichen Kreisläufen werden dabei auch anthropogene Einflüsse beschrieben. Anschließend gibt das Kapitel einen Überblick über wichtige Schadstoffe und Stoffgruppen, die in der Umweltgeologie besondere Bedeutung haben und auf die in den späteren praxisbezogenen Kapiteln immer wieder Bezug genommen werden wird.

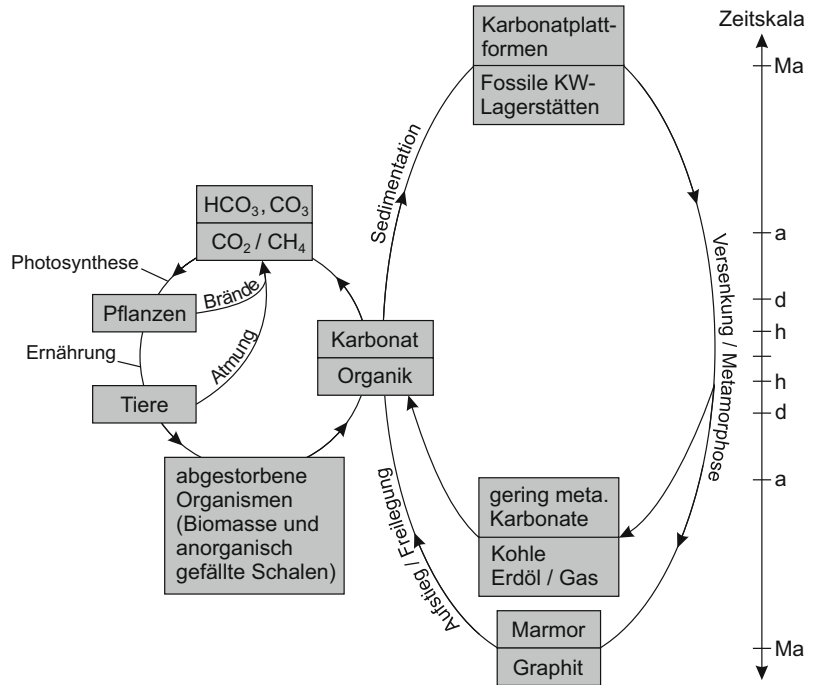
2.2 Spezielle Kreislaufsysteme

2.2.1 Kohlenstoffkreislauf

Der Kohlenstoffkreislauf umfasst alle Umwandlungsprozesse, an denen Kohlenstoff als Substanz beteiligt ist. Kohlenstoff kommt in jeder der bereits angesprochenen Sphären im globalen System vor, wobei jede Sphäre gleichzeitig Kohlenstoffspeicher und auch Kohlenstoffquelle ist.

Die gesamte globale Kohlenstoffmenge auf der Erde wird auf ca. 75 Millionen Gt geschätzt. Diese Menge ist zu 99,95 % in der Lithosphäre gebunden. Der weitaus größte Teil davon liegt als anorganisches Carbonat (vor allem Kalzit und Dolomit) vor. Die Gesamtmenge an organischem Kohlenstoff in der Lithosphäre wird auf 15 Millionen Gt geschätzt. Dabei handelt es sich um die fossilen Brennstoffe Erdöl, Erdgas, Stein- und Braunkohle. Die restlichen 0,05 % des Gesamtkohlenstoffs verteilen sich vor allem auf die Pedosphäre und die Hydrosphäre.

■ **Abb. 2.2** Kurz- und langfristiger Kohlenstoffkreislauf. Sowohl organische als auch anorganische Kohlenstoffkomponenten durchlaufen beide Teilkreisläufe, wobei Übergänge in beide Richtungen möglich sind



Atmosphäre und Biosphäre beinhalten vergleichsweise geringe Mengen an Kohlenstoff.

Im Boden wird Kohlenstoff sowohl in organischer Form in Humus und Torf, als auch in anorganischer Form in manchen Mineralen gespeichert. In der Hydrosphäre bilden die Ozeane die größten Kohlenstoffspeicher. Aber auch die großen Süßwasserspeicher der Erde beinhalten bedeutende Mengen an gelöstem Kohlendioxid (CO_2), Hydrogencarbonat und Carbonat. In der Atmosphäre kommt Kohlenstoff vor allem als anorganisches CO_2 vor. Weitere Spurenstoffe in der Atmosphärenluft sind Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH_4) (siehe auch ► [Kap. 3](#)). Für die Biosphäre spielt Kohlenstoff eine ganz besonders wichtige Rolle. Dennoch ist die Biosphäre in ihrer Gesamtheit mit ca. 700 Gt der kleinste der globalen Kohlenstoffspeicher.

Die Verteilung der Kohlenstoffvorkommen zeigt, dass es einerseits sehr unterschiedliche Speicherplätze gibt, in denen der Kohlenstoff unterschiedlich lange verweilt, dass andererseits die Substanz Kohlenstoff selbst auch sehr variabel in ihrer Erscheinungsform ist (organisch, anorganisch, gasförmig, flüssig und fest, elementar, als Oxid oder als Kohlenwasserstoff). Beide Faktoren, Speicherme-

dium und Erscheinungsform, nehmen bedeutenden Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf.

Da die Prozesse innerhalb der Lithosphäre in sehr viel längeren Zeiträumen stattfinden als die meisten Prozesse in allen anderen Systemen, liegt es nahe, den Kohlenstoffumsatz in zwei Teilkreisläufen zu beschreiben, die in ■ [Abb. 2.2](#) dargestellt sind.

Kurzfristiger Kohlenstoffkreislauf

Der kurzfristige Kohlenstoffkreislauf erfolgt im Übergangsbereich zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und Pedosphäre. Hauptakteur dieses Kreislaufsystems ist aber die pflanzliche und tierische, marine und terrestrische Organismenwelt, also die Biosphäre. Es sind sowohl organische als auch anorganische Kohlenstoffkomponenten beteiligt.

Beim Prozess der Photosynthese wird CO_2 aus der Luft von pflanzlichen Organismen mithilfe von Lichtenergie in organisches Material (= Baustoffe der Pflanzen) und freien Sauerstoff umgewandelt. Das organische Material steht als Energielieferant in der Nahrungskette für tierische Organismen zur Verfügung.

Bei der Atmung, sowohl pflanzlicher als auch tierischer Organismen sowie bei der Verbrennung,

wird Kohlenstoff unter Beteiligung von Sauerstoff wieder zu CO_2 oxidiert und so wieder der Atmosphäre zugeführt.

CO_2 entsteht außerdem aus organischer Substanz bei sauerstofffreiem Abbau (Gärung). Dabei wird zudem auch Methan an die Atmosphäre abgegeben. Werden die unvollständig abgebauten organischen Substanzen durch Sedimente überdeckt, können sie in den langfristigen Kohlenstoffkreislauf überführt werden.

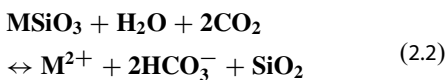
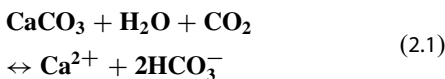
Generell laufen die Prozesse innerhalb von wenigen Stunden, Tagen oder Jahren ab und unterliegen in ihrer Intensität jahreszeitlichen Schwankungen.

Langfristiger Kohlenstoffkreislauf

Nach der Verwitterung (chemisch, mechanisch) von Gestein durchläuft der darin gebundene Kohlenstoff die Abfolge des geologischen Kreislaufs (► Abschn. 2.1) teilweise oder zur Gänze. Der langfristige Kreislauf kann damit Zeiträume von Jahrtausenden bis zu Milliarden von Jahren umfassen.

Im Rahmen der mechanischen Verwitterung (Frostsprengung, Gesteinsabrieb, Wind- und Wassererosion) erfolgt die Zerkleinerung von Karbonaten, die anschließend bzw. bereits während der Zerkleinerung transportiert und an anderer Stelle wieder abgelagert werden.

Bei der chemischen Verwitterung erfolgt eine Lösung des Gesteins unter Mitwirkung von Wasser sowie von Kohlenstoffdioxid aus der Luft nach folgenden generalisierten Gleichungen beispielhaft für Kalzitlösung (► Gl. 2.1) und (in deutlich geringerem Ausmaß) für die Lösung von Silikaten (► Gl. 2.2).



M = zweiwertiges Kation

Bei der chemischen Verwitterung von Kalzit wird Karbonat aus der Lithosphäre und CO_2 aus der At-

mosphäre in die Hydrosphäre überführt. Es kann so über lange Strecken transportiert und unter anderen chemisch-physikalischen Bedingungen durch die Rückreaktion in ► Gl. 2.1 wieder gefällt werden.

Eine Fällung von Karbonaten erfolgt auch unter Mitwirkung der Biosphäre. Muscheln, Schnecken, Korallen und andere, vor allem marin lebende Organismen, bilden Schalen oder Skelette aus, die nach ihrem Absterben am Meeresboden sedimentiert werden. Auf diese Weise wird Kohlenstoff in großen Mengen vom kurzfristigen in den langfristigen Kreislauf überführt.

Für die Bildung langfristiger organischer Kohlenstoffspeicher in der Lithosphäre sind ebenfalls Organismen verantwortlich. Werden abgestorbene Organismen unter Sauerstoffabschluss sedimentiert, erfolgt ein unvollständiger Abbau des organischen Materials. Bei einer weiteren Überlagerung gelangt das Material unter höheren Druck- und Temperatureinfluss. Es bilden sich fossile Kohlenwasserstofflagerstätten, in denen der Kohlenstoff über Millionen von Jahren gebunden sein kann.

In der Lithosphäre gebundener anorganischer und organischer Kohlenstoff kann durch mächtige sedimentäre Überlagerungen oder durch Subduktionsprozesse tief in die Erdkruste versenkt und auf diese Weise langfristig gebunden werden. Dabei kommt es zu einer metamorphen Überprägung der beteiligten Gesteine. Aus Kalk wird z. B. Marmor, aus Steinkohle wird Graphit, unter sehr besonderen Umständen sogar Diamant. Bei entsprechend tiefer Versenkung kann es auch zum Aufschmelzen kommen. Durch Hebungsprozesse oder vulkanische Aktivitäten freigesetzter Kohlenstoff durchläuft den langfristigen Kreislauf erneut oder wird in den kurzfristigen Kreislauf überführt.

2.2.2 Stickstoffkreislauf

Die besondere Bedeutung des Stickstoffs rührt von seinen zahlreichen möglichen Erscheinungsformen her. Er kann in der Natur in verschiedenen Oxidationsstufen von $-III$ bis $+V$ auftreten. Die Atmosphäre besteht zu ca. 78 Vol.-% aus elementarem Stickstoff (N_2). Die beiden Stickstoffatome sind über eine kovalente Dreifachbindung verknüpft.

Diese sehr starke Bindung ist nur mit großem energetischem Aufwand zu lösen. Da das Stickstoffmolekül extrem reaktionsträge ist, kann es auch von der Biosphäre in dieser elementaren Form kaum verwertet werden. Stickstoff wird daher von den meisten Organismen ein- und unverändert wieder ausgeatmet.

Dennoch ist Stickstoff neben Kohlenstoff und Sauerstoff ein für biologische Prozesse bedeutendes Element und wird von allen Organismen als Bestandteil von Aminosäuren benötigt.

Die Umwandlung von elementarem Stickstoff in Stickstoffverbindungen nennt man Stickstofffixierung. Neben der abiotischen Stickstofffixierung unter hohem Energieaufwand, wie z. B. Blitzschlag oder Verbrennungsvorgänge, ist auch eine biotische Form der Stickstofffixierung möglich. Einige wenige Arten von Mikroorganismen sind dazu in der Lage, durch ihre Stoffwechselprozesse elementaren Stickstoff zu N^{3-} zu reduzieren. Als Ausscheidungsprodukt entsteht Ammoniak (NH_3) bzw. in saurem Milieu Ammonium (NH_4^+). Den Prozess der Reduktion von elementarem Stickstoff zu Ammoniak nennt man Ammonifikation. Der so umgewandelte Stickstoff ist nun auch für andere Organismen verfügbar und eine wichtige Nährstoffquelle.

Im angehenden 20. Jahrhundert wurde mit dem Haber-Bosch-Verfahren eine Möglichkeit zur technischen Stickstofffixierung unter hohem Energieaufwand gefunden. Damit konnte Stickstoff nun erstmals in großen Mengen bioverfügbar gemacht und zur Düngemittelherstellung verwendet werden.

Unter Sauerstoffeinfluss wird Ammonium unter Mitwirkung von Mikroorganismen schrittweise oxidiert. Über die Zwischenstufe des Nitrits (NO_2^-) entsteht schließlich Nitrat (NO_3^-), in dem der Stickstoff als N^{5+} auftritt. Dieser Abschnitt des Stickstoffkreislaufs wird als Nitrifikation bezeichnet.

Nitrat wird in sauerstofffreiem Milieu von Mikroorganismen zum oxidativen Abbau von organischem Kohlenstoff verwendet. Das heißt, Nitrat steht, sozusagen als Ersatz für Sauerstoff, als Elektronenakzeptor zur Verfügung und wird schrittweise wieder zu elementarem Stickstoff reduziert. Das nun wieder reaktionsträge Gas wird in die Atmosphäre abgegeben. Diesen Teil des Kreislaufs nennt man Denitrifikation.

Der natürliche Stickstoffkreislauf wird auf verschiedene Weise durch anthropogene Einflüsse gestört. Ein Einflussfaktor ist die oben bereits erwähnte Verwendung von künstlich hergestelltem Ammoniak für die Düngung in der landwirtschaftlichen Lebensmittelproduktion. Während Ammonium im Rahmen des Kationenaustauschs in der Bodenzone adsorptiv gebunden wird, ist Nitrat vergleichsweise mobil und wird mit der Bodenlösung ins Grundwasser transportiert. Erhöhte Nitratbelastungen von Grundwässern in landwirtschaftlich genutzten Gebieten sind die Folge. Zur Quantifizierung des Nitratproblems im Grundwasser wurde in den 1990er Jahren ein europaweites Nitratmessnetz installiert. An 152 als nitratbelastet bekannten Grundwassermessstellen in Deutschland wird seither die Konzentration beobachtet. Im Jahr 2005 waren an 60 % dieser Messstellen Nitratkonzentrationen von über 50 mg l^{-1} (Grenzwert lt. TrinkwV 2001) festgestellt worden (Wisotzky 2011).

Stickstoffoxide (NO_x) entstehen bei der Verbrennung organischer Substanz. Aufgrund der zahlreichen möglichen Oxidationsformen sind auch die möglichen Sauerstoffverbindungen des Stickstoffs überaus vielfältig. Man fasst sie daher meist in der oben dargestellten allgemeinen Form (NO_x) zusammen. Es handelt sich um gasförmige Substanzen, die sich in der Atmosphäre ausbreiten und hier einerseits reaktiv als Säurebildner (HNO_3), andererseits als Treibhausgas wirken. Distickstoffmonoxid (N_2O) wirkt als reaktives Gas auf die Ozonschicht in der Stratosphäre ein.

2.2.3 Schwefelkreislauf

Wie beim Stickstoff sind auch beim Schwefel die zahlreichen möglichen Oxidationsstufen zwischen $-II$ und $+VI$ für die vielfältigen anorganischen Erscheinungsformen verantwortlich.

Schwefel ist ein relativ seltenes Element, kommt aber in großen Mengen angereichert in bestimmten Bereichen der Lithosphäre vor. Er tritt in elementarer Form (S^0), als Schwefelwasserstoff (S^{2-}) (H_2S) oder in Form von Sulfiden (S^{2-}) (z. B. FeS_2) in der Erdkruste auf. Während elementarer Schwefel und Schwefelwasserstoff vor allem im Bereich von Vul-

kanen sowie in großen Evaporitablagerungen auftreten, sind Sulfide häufig Bestandteil von Schwermetallvererzungen.

Elementarer Schwefel ist reaktionsträge. Die reduzierten Formen des anorganischen Schwefels unterliegen dagegen verschiedensten sphärenübergreifenden Prozessen. Schwefelwasserstoff wird z. B. nach seiner Freisetzung aus Vulkanen in der Atmosphäre mit Luftsauerstoff zu Schwefeldioxid (S^{4+}) (SO_2) oxidiert. Unter Mitwirkung des Wasserdampfes der Atmosphäre wird Schwefeldioxid in der Folge weiter zu Sulfat (S^{6+}) (SO_4) oxidiert, das in seiner im Wasserdampf gelösten Form Schwefelsäure bildet. Die Schwefelsäure wird mit den Niederschlägen zur Erdoberfläche zurückgeführt und fließt damit auch in die Hydro- und die Pedosphäre ein.

Neben dem abiotischen Kreislauf ist Schwefel aber auch ein für die Biosphäre wichtiges Element. Aminosäuren enthalten Schwefel in Form von Sulfhydryl-Gruppen (SH^- -Gruppen). Der dafür benötigte Schwefel wird durch die Assimilation von Sulfat gewonnen. Von spezialisierten Mikroorganismen kann Schwefelwasserstoff zu elementarem Schwefel bis hin zum Sulfat oxidiert werden. In Wasser unlösliche Schwermetallsulfide können unter Mitwirkung von Mikroorganismen und Sauerstoff zu Sulfaten umgewandelt werden. Die Schwermetalle gehen dabei als Kationen in Lösung und werden aus der Lithosphäre in die Hydrosphäre verlagert (siehe ► [Exkurs 9.1](#)).

Natürlich können anthropogene Aktivitäten auch im Schwefelkreislauf eine große Rolle spielen. Nachdem das Element Schwefel ein Bestandteil lebender Organismen ist, wird es bei der im ► [Abschn. 2.2.1](#) beschriebenen Bildung organischer Kohlenstoffspeicher mit in tiefere Krustenbereiche verfrachtet. Es ist daher in unterschiedlichen Konzentrationen immer auch Bestandteil fossiler Brennstoffe. Bei der Verbrennung von Kohle oder Erdöl gelangen durch anthropogene Eingriffe bedeutende Mengen an Schwefel in Form von SO_2 aus eigentlich langfristig fixierten Speichern in die Atmosphäre. Maßnahmen zur Reduktion der SO_2 -Emissionen in den vergangenen Jahrzehnten haben aber zu einem deutlichen Rückgang der jährlich freigesetzten Mengen geführt. Während im Jahr 1990 noch ca. 5,3 Millionen Tonnen SO_2 emittiert wurden, wa-

ren es im Jahr 2012 in Deutschland nur noch ca. 0,45 Millionen Tonnen SO_2 (UBA 2013). Dass dies jedoch immer noch eine signifikante Stoffmenge ist, zeigt der Vergleich mit den jährlich emittierten SO_2 - und H_2S -Mengen aus Vulkanen, die global auf zwei bis drei Millionen Tonnen geschätzt werden (Schwedt 1996).

2.2.4 Ausschließlich anthropogen bedingte Kreisläufe

Die bisher beschriebenen Kreisläufe sind natürlichen Ursprungs. Ihr ungestörter Ablauf ist Voraussetzung für funktionierende Ökosysteme. Sie können vom Menschen unter bestimmten Umständen verstärkt, beschleunigt oder auch gebremst werden, was Umweltprobleme hervorrufen kann. Es gibt aber auch Stoffkreisläufe, die nur aufgrund menschlicher Aktivitäten bestehen, also rein anthropogen sind. Unter stratigraphischen Gesichtspunkten könnte man das erste weltweite Auftreten von Stoffen, die durch Menschen in das globale System eingebracht wurden, als Beginn des Anthropozäns bezeichnen. Die Einführung dieses neuen Erdzeitalters wird derzeit von Geologen weltweit diskutiert.

Unter dem Überbegriff Kunststoff, umgangssprachlich auch Plastik, werden organische großmolekulare Feststoffe beschrieben, die synthetisch auf Basis organischer Kohlenwasserstoffverbindungen hergestellt werden. Allgemein bekannte Substanzen sind in diesem Zusammenhang z. B. Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP), die häufig für Verpackungsmaterialien verwendet werden oder auch Polyvinylchlorid (PVC), das für Abwasserrohre, Bodenbeläge, Dachbahnen etc. Verwendung findet. Gemeinsam mit zahlreichen anderen synthetischen Polymerverbindungen werden diese Kunststoffe weltweit hergestellt und verwendet. Nach ihrer Verwendung werden sie häufig zu Abfall, sofern sie nicht nach den Gesichtspunkten der Kreislaufwirtschaft wiederverwertet werden (siehe ► [Kap. 8](#)).

Die wissenschaftlich-technische Entwicklung der Kunststoffindustrie fand vor allem in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts statt. Seither werden Kunststoffe in großen Mengen produziert und in

vielen Lebensbereichen verwendet. Im Vergleich zur Produktionsgeschwindigkeit haben Kunststoffe eine lange Lebensdauer, sind also sehr persistent. Eine Plastikflasche braucht schätzungsweise 450 Jahre bis zu ihrer Zersetzung. Dieses Ungleichgewicht zwischen Produktion und Abbau hat in den vergangenen 100 Jahren zu einer massiven Anreicherung von synthetischen Stoffen in der Umwelt geführt.

Der Hauptverbreitungspfad für Kunststoffe ist, neben Atmosphäre und Pedosphäre, vor allem die Hydrosphäre. Der Eintrag von Kunststoffen in die Hydrosphäre erfolgt in großen Mengen über die Ablagerung von Müll im Einflussbereich von Flüssen oder in Küstengebieten. Eine zweite bedeutende Emissionsquelle für Kunststoffe bilden häusliche Abwässer. Vielen Kosmetikprodukten, wie Zahncreme oder Peelings, werden feinste Kunststoffpartikel beigemischt, die dann als sogenanntes Mikroplastik über das Abwassersystem in die Vorfluter gelangen.

Die in die Hydrosphäre ausgebrachten Kunststoffsubstanzen gelangen in einem kurzfristigen Kreislauf über die Nahrungskette bzw. über Trinkwasserversorgungen wieder zum Menschen. Sie können aber auch in einen vergleichsweise langfristigen Kreislauf eingegliedert werden, in dem es zu einer Anreicherung von Kunststoffen in den großen Süßwasserspeichern der Erde und in den Ozeanen kommt. Mikroplastik gilt inzwischen als ubiquitär, kommt also überall auf der Erde, auch in großer Entfernung vom Emittenten, vor.

Durch Strömung, Wellengang und Sonneneinstrahlung in den Ozeanen werden die Kunststoffe in noch feinere Partikel zerlegt. Diese werden mit den globalen Meeresströmungen transportiert und bilden in manchen Meeresgebieten große, Plastik enthaltende Wasserwirbel, auch Plastikinseln genannt. Die derzeit größte bekannte Plastikansammlung befindet sich im Nordpazifik und wird als „Great Pacific Garbage Patch“ bezeichnet. Sie hat eine Flächenausdehnung, die annähernd der Größe Europas entspricht. Das Problem der globalen Verschmutzung mariner Gebiete mit Mikroplastik wurde z. B. von Derraik (2002) zusammenfassend dargestellt.

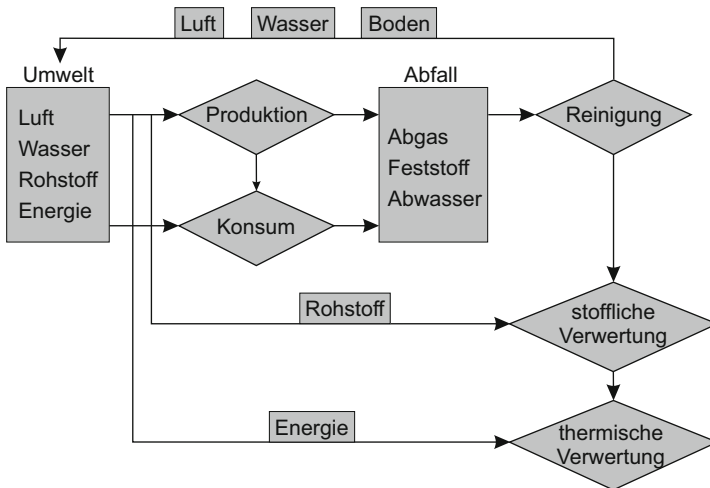
Aus ökologischer Sicht ergeben sich aus den Plastikwirbeln zwei große Probleme. Vor allem Plankton filtrierende Organismen nehmen Plastik

in großen Mengen zu sich, können es nicht verdauen und verhungern schließlich. An die kleinsten Partikel lagern sich Schadstoffe und Krankheitserreger an. Diese werden von Organismen aufgenommen und gelangen so in die Nahrungskette und damit zum Teil auch wieder zurück zum Menschen.

Ähnliche Kreisläufe, wenn auch bisher offenbar kleinräumiger und in geringeren Konzentrationen, lassen sich für viele synthetisch hergestellte Stoffe bereits nachweisen. Pharmazeutische Produkte oder auch Stoffe, die im Zusammenhang mit verschiedensten Anwendungen in der Nanotechnologie freigesetzt werden, reichern sich, zumindest in messbaren Konzentrationen, in Atmo-, Hydro- oder Pedosphäre an. Die möglichen Auswirkungen dieser Stoffe auf Ökosysteme sind bisher nur unzureichend erforscht.

Anthropogene Kreisläufe müssen daher unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit so angelegt werden, dass andere Systeme unbeeinflusst bleiben. Im Idealfall ist es das Ziel einer nachhaltig orientierten Kreislaufwirtschaft, ein geschlossenes System zu bilden, das, einmal in Gang gesetzt, keine Beziehung zu seiner Umwelt hat. Nach diesem Prinzip richten sich die Zielsetzungen der modernen Abfallwirtschaft. Wie im ► [Kap. 8](#) erläutert werden wird, gibt es inzwischen weltweit Bestrebungen, Abfälle zu vermeiden bzw. die Stoffe nach ihrer Verwendung einer Wiederverwertung zuzuführen oder zumindest thermisch zu verwerten und damit eine Freisetzung an die Umwelt soweit wie möglich zu verhindern.

In [Abb. 2.3](#) ist ein beliebiger Produktkreislauf dargestellt. Nach der erstmaligen Zulieferung von Rohstoffen und Energie ist im Idealfall keine weitere Zufuhr von Stoffen mehr notwendig. Die Produktionsgüter werden von Haushalten konsumiert. Dabei entstehende feste, flüssige und gasförmige Abfallprodukte werden durch geeignete Recyclingmaßnahmen wieder zu Rohstoffen verarbeitet, die wiederum in den Produktionsprozess einfließen. Verbrauchte Energie wird durch die thermische Behandlung von Teilen der Abfälle zurückgewonnen. Nur fehlende Stoffmengen werden von außen ergänzt. Zusätzlich notwendige Energie wird aus erneuerbaren Quellen bezogen. Abfälle, die nicht als Rohstoffe verwendet werden können, werden in ihre Ausgangsbeschaffenheit zurückversetzt (Hu-



■ **Abb. 2.3** Idealform eines nach Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit orientierten anthropogenen Stoffkreislaufs

mus, gereinigte Wässer, gereinigte Luft), bevor sie an die Umwelt abgegeben werden.

2.3 Stofftransport und Stoffumwandlung

Der Begriff „Kreislaufsystem“ impliziert eine Dynamik, die sich als Stofftransport oder Stoffumwandlung darstellen kann. Stofftransport setzt generell voraus, dass es sich beim Stoff selbst um eine mobile Phase (flüssig oder gasförmig) handelt oder dass der Stoff in einer fluiden Phase gelöst oder suspendiert ist. Folgende Transportmechanismen können unterschieden werden:

- Konvektion beschreibt eine Bewegung, die von Potenzialdifferenzen (Druck, Temperatur, Dichte, Gravitation) angetrieben wird.
- Advektion bezeichnet die Bewegung von Stoffen mit dem Transportmedium. Während der Grundwasserfluss konvektiv aufgrund des Strömungsgefälles erfolgt, werden die im Wasser gelösten Stoffe mittransportiert.
- Diffusion ist eine Folge von Konzentrationsunterschieden innerhalb des Transportmediums. Die Bewegung von Molekülen oder Ionen erfolgt solange in Richtung der geringeren Konzentration, bis ein Konzentrationsausgleich erreicht ist.
- Dispersion beschreibt Konzentrationsunterschiede infolge unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten innerhalb eines Systems. Dies

lässt sich beispielsweise an einer durchströmten Kapillare sehr gut beschreiben. Hier ergibt sich ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil. Moleküle, die am Rand der Kapillare fließen, werden hier festgehalten und eingebremst, im zentralen Bereich der Kapillare fließt das Fluid schneller. Eine ins Wasser eingebrachte Stofffront wird dadurch aufgeweitet. Im schneller fließenden zentralen Bereich werden die Stoffe bereits weiter in Fließrichtung transportiert als in den randlichen langsameren Fließbereichen. Die Konzentrationsunterschiede an der Stofffront führen in der Folge wiederum zu Diffusion. Dispersion kann sowohl in Fließrichtung als auch senkrecht zur Fließrichtung erfolgen.

Ein Stoffkreislauf kann aber auch eine Stoffumwandlung mit oder ohne Transportkomponente bedeuten. Hierbei werden physikalische, chemische und biochemische Prozesse wirksam. Im Wasserkreislauf spielen z. B. Phasenübergänge zwischen flüssiger Phase und Gas, mithin also physikalische Prozesse, eine wichtige Rolle. Chemische Prozesse, wie Adsorption, Desorption oder Lösung und Fällung tragen wesentlich zur Mobilität von Stoffen bei. Sie betreffen vor allem die Interaktion von fluiden Phasen mit Feststoffen bzw. führen zum Phasenübergang flüssig-fest. Abbau bzw. Zerfall organischer Substanz sind wichtige Prozesse innerhalb des Kohlenstoffkreislaufs. Sie beruhen meist auf einer Kombination von chemischen und biologischen Faktoren.

Die Charakterisierung von Stoffen hinsichtlich ihrer Neigung zur Umwandlung wird mit den Begriffen Reaktivität oder Persistenz beschrieben. Sehr reaktive Stoffe erfahren rasche Umwandlungsprozesse bzw. können schnell abgebaut werden, während persistente Stoffe lange unverändert in einem Kompartiment verharren oder einem Kreislauf zirkulieren können. Reaktivität und Persistenz sind daher wichtige Aspekte bei der Beurteilung der Mobilität eines Schadstoffes.

2.4 Anorganische Schadstoffe

Der Begriff „Schadstoff“ kann aus verschiedenen Perspektiven definiert werden. Generell spricht man dann von einem Schadstoff, wenn ein Stoff auf das System, das man betrachtet, schädigend einwirkt. Dies kann entweder aufgrund seiner Beschaffenheit oder aber auch aufgrund seiner Stoffmengenkonzentration der Fall sein. Viele Stoffe sind in geringen Konzentrationen für einen Organismus oder ein Ökosystem notwendig, in größeren Mengen aber schädlich. Manche Stoffe wirken auf ein System förderlich, auf ein anderes gleichzeitig behindernd. Betrachtet man den Begriff Schadstoff nur aus der Perspektive des Menschen, so sind alle jene Stoffe Schadstoffe, die auf Menschen gesundheitsschädigend wirken. Aus der Perspektive der Biosphäre kann aber ein Pharmazeutikum, das für den Menschen gesundheitsförderlich ist, auf andere Ökosysteme, in die es über Abwässer gelangt, schädlich wirken.

Viele Stoffe, die in den verschiedenen Sphären natürlich vorkommen, werden erst durch ihre Mobilisierung oder künstliche Anreicherung zum Schadstoff für ein Ökosystem. Die schädigende Wirkung tritt dadurch auf, dass ein natürlicher Stoffkreislauf nachhaltig gestört wird. In den folgenden Abschnitten soll der Begriff Schadstoff in seiner Schadwirkung auf die Biosphäre inklusive der Anthroposphäre verstanden werden.

2.4.1 Schwermetalle

Die Gruppe der Schwermetalle umfasst jene Metalle, die eine Dichte von über 5 g cm^{-3} aufweisen.

Zu dieser Gruppe zählen Blei, Cadmium, Chrom, Cobalt, Eisen, Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Platin, Quecksilber, Selen, Vanadium, Zink und Zinn. Die meisten dieser Stoffe wirken auf Pflanzen oder Tiere in ausreichend hoher Konzentration toxisch, sind aber in geringeren Mengen essenziell für Organismen. Blei, Cadmium und Quecksilber wirken auch bereits in geringsten Mengen auf tierische und pflanzliche Organismen schädigend und haben keinerlei positive Wirkung. Informationen über die Verteilung in der Erdkruste und die Wirkungen der Metalle auf die biotische Umwelt werden z. B. von Merian (1984) gegeben.

Schwermetalle kommen in unterschiedlich hohen Konzentrationen in der Lithosphäre vor. Der Bleigehalt in der Erdkruste wird z. B. auf durchschnittlich 16 mg kg^{-1} geschätzt, wobei die Konzentrationen stark von der jeweiligen Lithologie abhängig sind. Infolge hydrothermalen Prozesse in der Erdkruste werden Metalle in Erzlagerstätten angereichert. Wirtschaftlich interessante Anreicherungen an Eisen, Kupfer oder Zink sind dabei oft mit geringeren Mengen an Blei und Cadmium vergesellschaftet. Diese fallen als Nebenprodukt bei der Gewinnung von Eisen oder Buntmetallen an. Sie werden in den Rauchgasen, die bei der Metallverarbeitung auftreten, angereichert und bilden im Einflussgebiet von Verhüttungsanlagen erhebliche Bodenbelastungen (siehe ► Kap. 9).

Ohne menschliche Eingriffe bleiben Schwermetallvererzungen über lange Zeiträume in der Erdkruste fixiert, können aber punktuell durch Erosionsprozesse freigelegt werden und über Atmosphäre, Hydrosphäre und Boden in die Biosphäre gelangen.

Schwermetalle sind in unterschiedlicher Menge Bestandteile fossiler Brennstoffe, z. B. in Kohle oder Erdöl. Über Verbrennungsprozesse im Verkehr oder in der Industrie wurden in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Mengen an Blei und Cadmium freigesetzt. Zusätzlich wurde Benzin bis Anfang der 1990er Jahre mit Blei als Antiklopfmittel versetzt. Die Schwermetalle werden nach ihrer Freisetzung hauptsächlich adsorptiv an Aerosolpartikel gebunden (siehe ► Kap. 3) und werden mit diesen über weite Distanzen verteilt. Über Niederschläge gelangen sie in den Boden, wo sie teilweise adsorbiert werden, und in Gewässersysteme. Auf-

grund ihrer geringen Wasserlöslichkeit werden sie in Gewässern vor allem in den Sedimenten (siehe ► Kap. 6) angereichert und kommen in vergleichsweise geringer Konzentration im Wasser selbst vor.

Als Bestandteile von Rohöl sind Schwermetalle immer auch in Spuren in Kunststoffen aller Art vertreten (siehe ► Abschn. 2.2.4) und werden damit auch zu Komponenten von Produktions- und Abfallstoffen. Blei und Cadmium treten trotz ihrer generell geringen Wasserlöslichkeit z. B. auch in Deponiesickerwässern in nachweisbaren, teilweise auch signifikanten Mengen auf.

Am Beispiel der umweltgeologisch besonders relevanten, weil toxischen Schwermetalle Blei, Cadmium und Quecksilber werden einige typische Eigenschaften und Stoffströme dargestellt.

Blei

Bereits die frühesten metallverarbeitenden Prozesse in der Menschheitsgeschichte haben zu einem messbaren Anstieg der Bleigehalte in der Atmosphäre geführt. Mielke (1997) beschreibt die Entwicklung der weltweiten Bleiproduktion seit der frühen Antike. Ein Anstieg der historischen Bleigehalte in der Atmosphäre wurde anhand von Grönlandeiskernen rekonstruiert und ist bereits seit ca. 2500 Jahren erkennbar.

Blei und Bleiverbindungen sind nur sehr gering löslich und werden, einmal aus der Lithosphäre in einen kurzfristigen Kreislauf überführt, vor allem in Böden und Sedimenten, oft mit dem Zwischenschritt über Aerosolpartikel in der Luft, angereichert. Sie haben Auswirkungen auf die mikrobiologischen Prozesse im Boden und verringern meist spürbar die Bodenproduktivität (Blume et al. 2013).

Blei kann vom Menschen oral, über die Atmung und über die Haut aufgenommen werden. Ein dauerhafter Kontakt mit Bleikontaminationen über Luft, Boden oder Nahrung kann zu nachhaltigen Schädigungen des Nervensystems, des Herzkreislaufsystems, der Lunge und weiterer Organe führen, da Blei im Körper angereichert wird. Mielke (1997) beschreibt die Auswirkungen von Bleiexpositionen auf Kinder in den USA im Zeitraum 1976 bis 1980 bei hoher atmosphärischer Bleibelastung und 1988 bis 1991, nach Reduktion des Bleiausstoßes über die Kraftstoffverbrennung. Er zeigt, dass die Bleikonzentrationen im Blut der Testpersonen in direktem

Zusammenhang mit jener der Aerosolpartikel in der Luft stehen.

Blei wird aktuell noch in Bleiakкумуляtoren, Munition, in Kunststoffen und Elektronikbauteilen verwendet. Wasser- und Abwasserleitungsrohre aus Blei sind inzwischen in Deutschland und Österreich weitgehend aus den öffentlichen Versorgungsnetzen entfernt worden, innerhalb von Gebäuden, vor allem in Altbauten, sind diese aber noch verbreitet.

Cadmium

Cadmium tritt in der Lithosphäre meist als Begleitelement von Zinkvererzungen auf. Es wirkt toxisch auf Pflanzen und Tiere. Eine chronische Belastung mit Cadmium führt beim Menschen z. B. zu Blutarmut und dem Verlust des Geruchssinns. Krankhafte Veränderungen des Skeletts aufgrund einer dauerhaften Cadmiumbelastung wurden in den 1950er Jahren in Japan festgestellt. Die sogenannte „Itai-Itai“-Krankheit („Aua-Aua“-Krankheit) trat dort im Einflussbereich von Kupfer- und Zinkminen auf. Die erhöhte Cadmiumbelastung in den Abwässern der Minen wurde durch die künstliche Bewässerung auf die Reisfelder übertragen. Durch die chronische Exposition wurden verbreitet Nieren- und Knochenschädigung ausgelöst.

Cadmium kommt vor allem als Verunreinigung von Zinkprodukten vor. Es wurde als Additiv in Kunststoffen verwendet und ist als Komponente von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren in vielen elektronischen Geräten zu finden. Über eine unsachgemäße Entsorgung von Batterien und Elektroschrott gelangen Cadmiumbelastungen in die Umwelt. Erhöhte Cadmiumkonzentrationen finden sich häufig in den Sickerwässern von Altablagerungen.

Quecksilber

Quecksilber kommt in der Natur in abbauwürdigen Mengen in Form des Minerals Zinnober (Cinnabarit, HgS) vor, aus dem es unter Freisetzung von Schwefeldioxid in einem Röstverfahren gewonnen wird.

Es wirkt auf Pflanzen und Tiere toxisch. Aufgrund seines hohen Dampfdrucks entstehen bereits bei Zimmertemperatur Dämpfe, die über die Atmung aufgenommen werden und gesundheitsschädigend wirken. Während oral eingenommenes elementares Quecksilber relativ ungefährlich ist, ist

es in organischen Verbindungen besonders gesundheitsschädigend. Eine chronische Exposition führt zu schweren Nervenerkrankungen, die oft tödlich enden.

Quecksilber wird seit langer Zeit bei der Goldwäsche verwendet (siehe auch ► Kap. 9). Dabei wird sein niedriger Schmelzpunkt und die damit verbundene Eigenschaft, leicht Legierungen zu bilden, genutzt. Die Folge dieser Nutzung ist eine nachhaltige Quecksilberbelastung in Goldabbaugebieten, z. B. in vielen Flüssen Südamerikas.

Die Eigenschaft des Quecksilbers, leicht Legierungen zu bilden, wird auch bei der Herstellung von Natronlauge mittels Elektrolyse im industriellen Maßstab genutzt. Eine wichtige Anwendung findet Quecksilber in der Zahnmedizin, wobei es hier die Tendenz gibt, Amalgam als Zahnfüllung durch andere, unbedenkliche Stoffe zu ersetzen. Als Bestandteil von Leuchtstofflampen, Thermometern, Batterien und elektronischen Geräten kommt es in Haushalten vor und findet sich folglich auch in häuslichen Abfällen. Quecksilber ist damit auch in der Altlastenpraxis ein wichtiger Schadstoff.

Reisinger et al. (2009) stellen das Ressourcenpotenzial und die möglichen Umweltbelastungen, die sich aus der Nutzung von Blei, Cadmium und Quecksilber ergeben, am Beispiel der entsprechenden Stoffströme in Österreich dar.

2.4.2 Arsen

Das Halbmetall Arsen kommt in der Lithosphäre vor allem in Gesellschaft von Kupfer- oder Goldvererzungen vor und wird in diesem Zusammenhang als Nebenprodukt gewonnen. Es tritt mit Durchschnittskonzentrationen von 20 bis 30 g t⁻¹ in Kohlen auf und wird über deren Verbrennung an die Atmosphäre abgegeben. Arsen kann in vier Oxidationsstufen (+V, +III, 0 und -III) auftreten. In anionischer Form bildet es Metallarsenid-Verbindungen, in kationischer Form Arsensulfide. Es ist Komponente zahlreicher, vor allem sulfidischer Minerale, wie Realgar (As₄S₄) und Auripigment (As₂S₃). Auch Pyrit kann einige Massenprozent an Arsen enthalten.

In elementarer Form und in Verbindungen ist es in Spuren in vielen kristallinen Gesteinen vorhan-

den. Die Gesamtmasse an Arsen in der Lithosphäre wird auf etwa 40.000 Gt geschätzt (Römpf 2014), bei einer durchschnittlichen Konzentration von 1–2 mg kg⁻¹. In Mitteleuropa tritt es in erhöhten Konzentrationen z. B. im Schwarzwald, Spessart oder auch in Gesteinen der Alpen auf und wird von hier aus über erosive Prozesse mobilisiert.

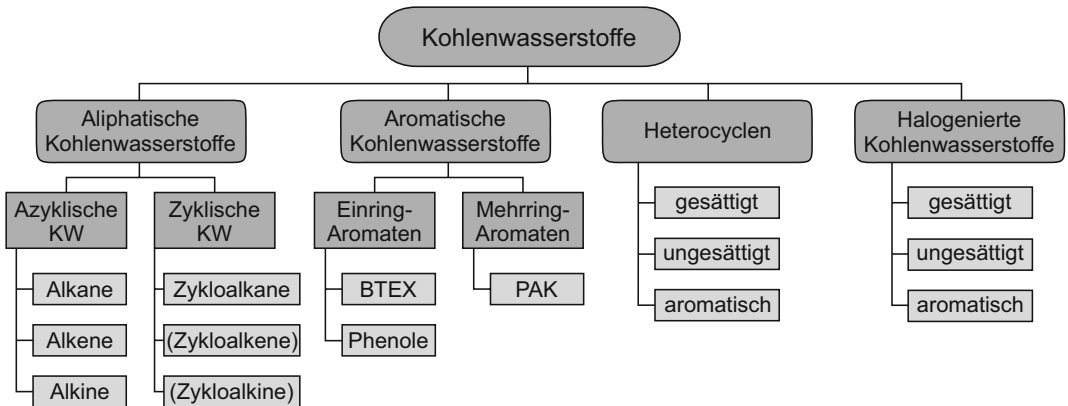
Der Transport erfolgt aber vor allem über die Atmosphäre als partikuläres Arsenik (As₂O₃). Die Aerosolpartikel gelangen über Niederschläge in den Boden. Im Wasser tritt Arsen vor allem als Arsenit (AsO₃) oder Arsenat (AsO₄) auf. In bestimmten arsenreichen Lithologien werden hohe und damit gesundheitsschädigende Arsenkonzentrationen auch im Grundwasser festgestellt. Geogene Arsenbelastungen können vor allem im Bereich der Trinkwasserversorgung erhebliche Probleme verursachen (siehe ► Kap. 10). Beispiele für Arsenbelastungen wurden von Rosenberg und Röhling (1999) zusammengetragen. Eine umfassende Betrachtung der Arsenproblematik im Grundwasser bieten auch Welch und Stollenwerk (2003).

Arsen kommt als Legierungsbestandteil in der Halbleitertechnik zum Einsatz und ist Bestandteil vieler Pestizide und Düngemittel in der Landwirtschaft. Es wird außerdem als Zusatzstoff bei der Imprägnierung von Bauholz verwendet. Aufgrund der inzwischen bekannten gesundheitsschädlichen Wirkungen ist der industrielle Einsatz von Arsen jedoch weltweit rückläufig.

2.4.3 Cyanide

Unter dem Begriff „Cyanide“ werden die Salze der Blausäure (HCN) zusammengefasst. Die Cyanidverbindungen der Alkali- und Erdalkalimetalle, wie Kaliumcyanid (KCN) oder Natriumcyanid (NaCN) sind toxisch. Bei oraler Einnahme reagieren sie im Magen unter Freisetzung von Blausäure. Neben den einfachen Cyanidverbindungen der Alkali-/Erdalkalimetalle bilden Cyanide auch Cyanidkomplexe. Vor allem Eisencyanid-Komplexe sind dabei sehr stabile Verbindungen.

Natriumcyanid wird für die Extraktion von Edelmetallen verwendet. Der als „Cyanidlaugung“ bezeichnete Prozess verläuft nach den im ► Kap. 9 dargestellten Gln 9.3 und 9.4. Die Gewinnung von



■ **Abb. 2.4** Übersicht über die wichtigsten organischen Schadstoffgruppen

Edelmetallen durch Cyanidlaugung wird detailliert von Wippermann et al. (2004) beschrieben. Die beim Separationsprozess zurückbleibenden Schlämme sind toxisch und stellen ein erhebliches Gefährdungspotenzial für die Umwelt im Abstrom der Gewinnungsanlagen dar. Innerhalb der Europäischen Union ist der Einsatz von Cyaniden über die Bergbauabfallrichtlinie (2006) geregelt. Die hierin fixierten Vorgaben zum Umgang mit Abfällen aus Bergbaubetrieben sollen eine Schädigung der Umwelt durch das Verfahren vermeiden (siehe auch ► [Kap. 9](#)).

Eisencyanid-Komplexe werden wegen ihrer Stabilität nicht als gesundheitsschädigend eingestuft. Sie werden in der Lebensmittelindustrie als Rieselhilfe für Kochsalz eingesetzt und sind daher auch in Abwässern und häuslichen Abfällen nachweisbar. Auch eine Freisetzung von Eisencyaniden mit der Salzstreuung im Rahmen der Schneeräumung kann zu Grundwasserbelastungen mit Cyaniden führen.

2.5 Organische Schadstoffe

Unter dem Begriff „organische Schadstoffe“ werden chemische Verbindungen auf Kohlenstoffbasis zusammen gefasst, die entsprechend der in ► [Abschn. 2.4](#) angeführten Definition schädigend auf Bereiche der Biosphäre einwirken können und aufgrund anthropogener Aktivitäten mobilisiert oder in schädigender Konzentration in Umweltsystemen angereichert werden. Generelle Grundlagen zur organischen Chemie beschreiben Breitmaier und Jung (2009).

Die Besonderheit des Kohlenstoffatoms besteht darin, dass es über vier Bindungselektronen unpolare Bindungen zu weiteren Kohlenstoffatomen eingehen kann. Die Bindungen können einfach oder maximal dreifach sein, die Moleküle können sich kettenförmig oder zyklisch verbinden. Neben Wasserstoffatomen werden vor allem Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel in organische Verbindungen eingebaut.

Aufgrund der unzähligen Bindungsmöglichkeiten gibt es eine große Vielfalt an Kohlenwasserstoffverbindungen, die jeweils für sie charakteristische Eigenschaften aufweisen. Organische Verbindungen sind als wichtige Bausteine des Lebens in allen Sphären vertreten. Sie durchlaufen kurzfristige Kreisläufe der Biosphäre, der Atmo-, Hydro- und Pedosphäre und sind, wie in ► [Abschn. 2.2.1](#) beschrieben, langfristig in der Lithosphäre gebunden.

Anthropogene Eingriffe in organische Stoffkreisläufe können auf zwei Arten erfolgen:

- Mobilisierung langfristig gebundener Kohlenwasserstoffe durch die Förderung fossiler Brennstoffe und deren Nutzung (z. B. Verbrennung)
- Entwicklung und Freisetzung neuer, synthetischer organischer Verbindungen (Kunststoffe)

In den kommenden Abschnitten sollen das Vorkommen und die umweltgefährdenden Eigenschaften einiger in der Umweltgeologie relevanter Kohlenwasserstoffverbindungen beispielhaft besprochen werden. Eine Übersicht über die hier behandelten Stoffgruppen gibt ■ [Abb. 2.4](#).

2.5.1 Aliphatische Kohlenwasserstoffe

Aliphatische Kohlenwasserstoffe werden ausschließlich aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen aufgebaut und weisen eine kettenförmige, verzweigte oder ringförmige Molekülstruktur auf. Verzweigte Moleküle bekommen in der Nomenklatur die Vorsilbe „Iso“, zu Ringen verbundene Moleküle, also zyklische, werden durch die Vorsilbe „Cyclo“ gekennzeichnet.

Nach der Bindung der Kohlenstoffatome untereinander werden sie in drei Gruppen eingeteilt. In Alkanen sind die Kohlenstoffatome jeweils einfach miteinander verbunden. Da sie die höchst mögliche Zahl an Bindungspartnern haben, bezeichnet man diese Kohlenwasserstoffe auch als gesättigt. Alkene (Doppelbindungen zwischen den C-Atomen) und Alkine (Dreifachbindungen zwischen den C-Atomen) werden als ungesättigte Kohlenwasserstoffe bezeichnet. Zyklische Verbindungen ungesättigter aliphatischer Kohlenwasserstoffe sind, vor allem im niedermolekularen Bereich, nicht stabil und daher selten.

Rohöl, als komplexes Gemisch verschiedenster Kohlenwasserstoffe, wird zu einem großen Anteil durch aliphatische Kohlenwasserstoffe gebildet. Man fasst jene Gruppe von Kohlenwasserstoff-Verbindungen, die aus Rohöl separiert werden, unter dem Sammelbegriff der Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) zusammen.

Je nach Molekülgröße, also der Anzahl an C-Atomen im Molekül, weisen sie stark unterschiedliche Eigenschaften auf, die sich vor allem auch auf ihre Mobilität in der Umwelt auswirken.

- Gase: permanente und verflüssigte Gase (C_1 – C_4)
- Benzine: Autokraftstoffe (C_5 – C_{12})
- Mitteldestillate: Düsenkraftstoff, Heizöl, Diesel (C_{10} – C_{22})
- Vakuum Gasöle: Motorenöle (C_{19} – C_{90})
- Rückstände: schwere Öle, Bitumen (C_{19} – C_{90})

Je größer die Moleküle sind, umso viskoser ist die Substanz. Allen aliphatischen Kohlenwasserstoffen ist gemein, dass sie hydrophob und damit gering wasserlöslich sind und eine geringere Dichte als Wasser aufweisen.

Stoffe, die als flüssige Phasen nicht in Wasser löslich sind, werden in englischer Sprache als „*non aqueous phase liquids*“, als NAPL bezeichnet. Solche, die wie die aliphatischen Kohlenwasserstoffe außerdem leichter als Wasser sind und daher aufschwimmen, werden mit dem Zusatz „*light*“ versehen und als LNAPL klassifiziert. Im Gegensatz dazu werden nicht wasserlösliche schwere Phasen als DNAPL „*dense non aqueous phase liquids*“ klassifiziert.

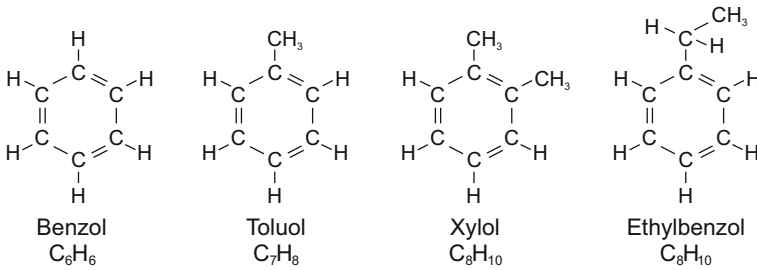
Aus umweltgeologischer Sicht sind Viskosität, geringe Dichte und geringe Wasserlöslichkeit wichtige Eigenschaften zur Beurteilung und Sanierungsplanung von MKW-Schadensfällen, da diese Eigenschaften für die Mobilität des Schadstoffes im Untergrund verantwortlich sind.

In der ungesättigten Bodenzone sinken MKW durch den Porenraum in einer gravitativen Sickerbewegung ab. Dabei werden höher viskose Anteile an den Oberflächen der Bodenkörner zurückgehalten, während die niedermolekularen Anteile der MKW schneller absinken können. Das Rückhaltevermögen ergibt sich aus der Kombination von Viskosität des Schadstoffes einerseits und Porosität des durchflossenen Mediums andererseits.

Jene MKW-Anteile, die nicht adsorptiv an den Bodenkörnern fixiert werden, sinken schließlich bis zum Grundwasserspiegel ab. Ihre Mobilität im Grundwasserbereich wird weiter unten in [Abschn. 2.5.5](#) im Vergleich mit anderen organischen Schadstoffen diskutiert.

MKW können aus zahlreichen Quellen freigesetzt werden. Große und nachhaltige Umweltschäden ereignen sich z. B. immer wieder durch Unfälle mit Tankschiffen, die punktuell große Mengen an MKW ins Meer freisetzen und damit Ökosysteme langfristig beeinträchtigen. Große Schäden und internationale Aufmerksamkeit hat auch die Zerstörung der Bohrplattform „Deep Water Horizon“ im Golf von Mexiko im Jahr 2010 verursacht. Hier sind mehr als eine Million Tonnen Rohöl ausgetreten, bevor eine provisorische Abdichtung der Bohrung gelang.

Freisetzungen von MKW finden an Land meist zwar in weniger katastrophalem Ausmaß, dafür aber sehr viel häufiger statt und führen zu Verunreinigungen von Böden und Grundwasser – Schadensfällen, mit denen Umweltgeologen häufig konfrontiert werden.



■ **Abb. 2.5** Struktur der Einringaromaten der BTEX-Gruppe

Produktionsstandorte wie Raffinerien oder Gaswerke können Emissionen in großem Maßstab verursachen. Umschlagplätze wie Tankstellen und Tanklager sind weitere potenzielle Quellen für MKW-Schadensfälle. Alle Standorte, an denen mit fossilen Brennstoffen manipuliert wird, bergen die Gefahr einer Freisetzung derartiger Stoffe. Kleinräumige, oft über längere Zeiträume unerkannte MKW-Kontaminationen, treten in Siedlungsgebieten z. B. infolge von defekten Heizöltanks auf. Die Schadensfälle werden häufig erst an einer Grundwasserkontamination erkannt. Das Auffinden des Schadensherdes kann in Siedlungsräumen schwierig sein, da zahlreiche potenzielle Emittenten vorhanden sein können.

Aliphatische Kohlenwasserstoffe werden generell als gering toxisch für Pflanzen und Tiere eingestuft. Da Mineralölprodukten stets auch aromatische Anteile (siehe ► [Abschn. 2.5.2](#)) beigemischt sind, haben MKW in ihrer Gesamtheit gesundheitsschädigende Wirkung. Sie werden als stark wassergefährdend eingestuft und beeinträchtigen massiv die Bodenfunktionen.

2.5.2 Aromatische Kohlenwasserstoffe

Die Gruppe der aromatischen Kohlenwasserstoffe umfasst zyklische KW-Verbindungen, deren C-Atome über Doppelbindungen mit ihren Nachbaratomen verbunden sind. Neben den Einringaromaten können sich die Moleküle auch aus mehreren miteinander verbundenen Ringen aufbauen, die dann als Mehrringaromaten oder polyzyklische Aromaten bezeichnet werden. In einem aromatischen Ring ist jedes C-Atom mit drei Bindungsplätzen an benachbarte C-Atome gebunden (Doppelbindung zu je einem Bindungspartner). Der

freie Bindungsplatz kann mit einem H-Atom, einer weiteren CH₃-Gruppe, einer CH-Kette und einer OH-Gruppe bzw. Nitrit besetzt werden.

BTEX

Die einfachste aromatische Substanz ist Benzol (C₆H₆). In dem Einringmolekül wird der vierte Bindungsplatz jedes Ringatoms mit einem Wasserstoffatom besetzt. Wird dieses Wasserstoffatom durch weitere CH-Gruppen oder CH-Ketten ersetzt, entstehen die Substanzen Toluol (C₇H₈), Ethylbenzol (C₈H₁₀) und Xylol (C₈H₁₀). Sie bilden die Gruppe der BTEX. Die Strukturen der vier Substanzen sind in

■ **Abb. 2.5** dargestellt.

BTEX sind gering wasserlöslich und leichter als Wasser. Benzol und Toluol haben einen hohen Dampfdruck. Da sie als leichtflüchtige Substanzen unvermittelt in die Gasphase übergehen, kommen sie, einmal freigesetzt, sowohl im Grundwasser als auch in der Atmosphäre und der Bodenluft vor.

BTEX sind Bestandteile von fossilen Brennstoffen. Sie dienen z. B. im Benzin zur Erhöhung der Oktanzahl. Etwa drei Viertel aller Benzol-emissionen erfolgen durch Abgase bei der Verbrennung von Treibstoffen und sind daher als Luftschadstoffe relevant. Durch den Einsatz von entsprechenden Katalysatoren in Kraftfahrzeugen wurde die Hintergrundbelastung durch Benzol in den vergangenen zwei Jahrzehnten deutlich reduziert. Das Beispiel langjähriger Messungen in der Stadt Salzburg zeigt einen Rückgang zwischen 1995 und 2012 von durchschnittlich 10 bis 15 µg m⁻³ auf weniger als 5 µg m⁻³ (Umweltbundesamt 2013).

Im Zusammenhang mit MKW-Schadensfällen tauchen BTEX hauptsächlich als Gasphase in der Bodenluft im Nahbereich der Kontamination auf. Hier können die Konzentrationen dann Werte von einigen mg m⁻³ annehmen.

Neben den Treibstoffen werden BTEX auch als Lösemittel oder für die Entfettung in der Metallindustrie eingesetzt. Zusätzlich dienen sie als Rohstoffe in der chemischen Industrie. Im Einfluss von Altstandorten dieser Branchen finden sich daher häufig erhöhte BTEX-Gehalte in der Bodenluft. BTEX gelten als toxisch und können Leber- und Nervenschäden hervorrufen. Benzol gilt zudem in hohem Maße als krebserregend.

Phenole

Bei diesen aromatischen Ringverbindungen sitzen OH oder NO₂ an Stelle von Wasserstoff oder CH-Gruppen an den freien Bindungsplätzen der Ringatome. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten, diese beiden Gruppen an das Ringmolekül anzulagern, bilden die Phenole eine große Gruppe verschiedener Substanzen. Die einfachste Form ist das Phenol (C₆H₅OH). Es ist unter Zimmertemperatur fest mit einem Schmelzpunkt bei 41 °C. Es löst sich aufgrund der hydrophilen OH-Gruppen aber relativ gut in Wasser. Es hat einen geringen Dampfdruck und eine Dichte, die geringfügig höher ist als die des Wassers.

Phenole sind wichtige Ausgangssubstanzen bei der Herstellung von Kunstharzen, Farben, Holzschutzmitteln, Pharmazeutika und weiteren synthetischen KW-Produkten. Sie sind damit häufige Kontaminationsparameter im Einflussbereich derartiger Altstandorte. Aufgrund ihrer guten Wasserlöslichkeit treten sie vor allem als Grundwasserkontaminationen auf.

Phenol gilt als toxisch für Menschen und Tiere. Es wird vor allem über die Haut, aber auch oral oder über die Atmung aufgenommen. Bei direktem Kontakt führt der Stoff zu Schädigungen von Haut und Augen. Bei chronischer Exposition können auch Schädigungen von Nieren, Herz-Kreislauf- und Nervensystem auftreten.

PAK

Bestehen die aromatischen Ringverbindungen aus mehr als einem Ring, so werden sie als polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) bezeichnet. Die einfachste Verbindung dieser Gruppe ist das Naphtalin (C₁₀H₈), bei dem zwei Benzolringe in einem kondensierten Ringsystem miteinander verbunden sind. In den Ringverbindungen können

fünf oder sechs C-Atome eingebaut sein. Aufgrund der vielen Möglichkeiten, die Ringmoleküle zu kombinieren, gibt es eine Vielzahl an Substanzen, die der Gruppe der PAK zuzuordnen sind.

PAK sind feste Substanzen, die sehr schlecht bis nicht in Wasser löslich sind. Ihre Dichte variiert stark mit der Molekülgröße. Naphtalin ist mit 1,03 g cm⁻³ nur wenig schwerer als Wasser, während Pyren (C₁₆H₁₀) bereits eine Dichte von 1,27 g cm⁻³ aufweist.

PAK sind Bestandteile von Kohle und Erdöl. Sie entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material, werden daher auch auf natürlichem Wege, z. B. bei Vegetationsbränden freigesetzt. Sie werden in partikulärer Form über die Atmosphäre transportiert und mit Niederschlägen in den Boden und die Hydrosphäre eingebracht. Aus diesem Grund sind sie ubiquitär vorkommend und waren auch bereits in vorindustrieller Zeit weltweit verbreitet.

In Produktionsprozessen treten sie vor allem als Neben- oder Abfallprodukte auf. Sie sind Bestandteile von vielen Insektiziden, Pharmaprodukten, Kosmetika und finden sich auch in Autoreifen und anderen Gummiartikeln. In großen Mengen entstehen PAK im Zusammenhang mit Kokereien und Gaswerken. Teer fällt bei der Gasproduktion als Abfallprodukt an und ist in der Vergangenheit häufig durch unsachgemäße Lagerung in den Untergrund gelangt. Die hochviskose Teerphase migriert im Untergrund sehr langsam und wird in großen Mengen in der ungesättigten Bodenzone zurückgehalten. Sofern sie jedoch in den Grundwasserschwankungsbereich absinkt, kommt es zu erheblichen Beeinträchtigungen der Wasserqualität. Gaswerke stellen daher häufig Altstandorte im Sinne der Altlastenproblematik dar.

Da eine umfassende Analyse von Gewässern und Böden auf PAK-Substanzen aufgrund ihrer großen Vielfalt nicht möglich ist, wurden in den 1980er Jahren von der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) 16 bedeutende PAK definiert, die stellvertretend für die gesamte Gruppe analysiert werden sollten (EPA 1982). Europäische Staaten haben diese Liste unter der Bezeichnung PAK_{EPA} in ihre Regelwerke übernommen. Bezeichnungen und Strukturformeln dieser 16 Substanzen sind z. B. bei Wisotzky (2011) aufgeführt.

Viele PAK gelten als krebserregend. Vor allem die Substanz Benzo(a)pyren ($C_{20}H_{12}$) ist als karzinogen bekannt. Sie wird z. B. im Zigarettenrauch oder bei der Verbrennung von Grillkohle freigesetzt. Sie ist auch in den Abgasen von Kohleheizungen angereichert. So wurden z. B. die bereits im 18. Jahrhundert vermehrt auftretenden Fälle von Hodenkrebs unter Schornsteinfegern auf die verstärkte Exposition mit PAK zurückgeführt.

2.5.3 Heterozyklen

Der Vollständigkeit halber sollen an dieser Stelle auch die unter dem Sammelbegriff der Heterozyklen erfassten Ein- und Mehr-ringverbindungen erwähnt werden. Im Unterschied zu den bisher besprochenen Carbozyklen sind in Heterozyklen im Ring neben C-Atomen andere Elemente eingebaut. Meist handelt es sich dabei um Stickstoff, Schwefel oder Sauerstoff. Zwischen den Ringatomen können Einfach- oder Mehrfachbindungen bestehen, die Ringe können damit gesättigt, ungesättigt oder aromatisch sein.

In der Natur kommen heterozyklische Verbindungen in vielfältiger Form vor, etwa als Bausteine der DNA. Sie haben unzählige Funktionen und verschiedenste Eigenschaften. Unter dieser Vielzahl an Substanzen, die durch verschiedenste natürliche und anthropogene Prozesse freigesetzt werden, sind auch solche zu finden, die toxisch für Tiere und Pflanzen sind. Ihre oft relative gute Wasserlöslichkeit führt zu einer weiten Verbreitung über den Wasserpfad.

2.5.4 Halogenierte Kohlenwasserstoffe

Die Gruppe der halogenierten Kohlenwasserstoffe zeichnet sich dadurch aus, dass eines oder mehrere Wasserstoffatome durch ein Halogen, meist Chlor, ersetzt sind. Auch Fluor, Brom oder Jod können in dieser Form an Kohlenwasserstoffe gebunden sein. Ein solcher Ersatz kann sowohl bei den aliphatischen gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen als auch bei den Aromaten stattfinden.

Die einfachste Form innerhalb dieser Gruppe ist Methylchlorid (CH_3Cl), bei dem im Methan ein

H- gegen ein Cl-Atom ersetzt ist. Da sowohl das organische Ausgangsmolekül als auch die Art und Anzahl der Halogene, die hier angelagert werden können, vielfältig ist, bilden folglich auch die halogenierten Kohlenwasserstoffe eine große Gruppe verschiedener Substanzen.

Halogenierte organische Verbindungen kommen in der Natur sehr selten vor. Die meisten heute nachweisbaren Substanzen dieser Gruppe sind anthropogenen Ursprungs und werden seit etwa den 1930er Jahren synthetisch hergestellt. Sie sind Bestandteile von Kunststoffen (z. B. PVC), Pflanzenschutzmitteln, werden in der metallverarbeitenden Industrie und als Reinigungsmittel in Industrie und Haushalten verwendet. Hier werden die stark lipophilen Eigenschaften (Fettlöslichkeit) dieser Stoffgruppe genutzt.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW), die im Vergleich zu weiteren organischen Halogenverbindungen sehr viel häufiger im Rahmen umweltgeologischer Fragestellungen auftauchen. Bezogen auf eine ihrer, für die Mobilität wesentlichen Eigenschaften, werden die CKW in leichtflüchtige und schwerflüchtige Stoffe unterschieden.

LCKW

Die Grundlage leichtflüchtiger chlorierter Kohlenwasserstoffe (LCKW) sind kettenförmige aliphatische Kohlenwasserstoffe, in denen Wasserstoff gegen Chloratome ersetzt wurde. Das bereits erwähnte Methylchlorid (CH_3Cl) und Chloroform ($CHCl_3$), als zwei der bekannteren Substanzen dieser Gruppe, zählen zu den gesättigten Chloralkanen.

Besondere Bedeutung in der praktischen Anwendung haben die ungesättigten Chloralkene. Hierbei sind vor allem die Chlorethene hervorzuheben, die mit den Substanzen Tetrachlorethen (C_2Cl_4 , Trivialname PER) und Trichlorethen (C_2HCl_3 , Trivialname TRI) als Lösungsmittel in der Textilreinigung und zur Entfettung in der Metallindustrie verwendet werden. Beide Substanzen sind bei Raumtemperatur flüssig, schlecht wasserlöslich und haben eine deutlich höhere Dichte als Wasser. Sie können als unlösliche Schwerphasen auch als DNA-PL-Substanzen klassifiziert werden. Bedeutend für umweltgeologische Fragestellungen ist auch ihre äußerst geringe Viskosität, die dafür verantwortlich

ist, dass diese Stoffe Medien durchdringen können, die für Wasser quasi undurchlässig sind. Aufgrund des hohen Dampfdrucks gehen sie leicht in die Gasphase über und stellen somit in entsprechenden Kontaminationen häufig eine Belastung der Bodenluft dar.

Die Aufnahme in den Organismus kann vor allem über die Atmung erfolgen. Beide Substanzen wirken betäubend und können Haut- und Augenreizungen hervorrufen. Durch chronische Belastungen können Nieren- und Leberschäden und Defekte des Nervensystems hervorgerufen werden.

Eine weitere, in der jüngeren Vergangenheit für Umweltwissenschaftler bedeutende Substanz dieser Gruppe sind die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die über mehrere Jahrzehnte als Treib- und Kühlmittel verwendet wurden und aufgrund ihres hohen Dampfdrucks und ihrer Persistenz in bedeutenden Mengen in die (höhere) Atmosphäre gelangt sind. Details dazu werden in ► [Kap. 3](#) beschrieben.

Halogenaromaten

Diese Stoffgruppe besteht aus aromatischen Ringverbindungen, in denen ein oder mehrere Wasserstoffatome gegen Halogene ersetzt wurden. Sie sind bei Zimmertemperatur flüssig, haben eine höhere Dichte als Wasser und sind in Wasser schwer löslich (DNAPL). Sie haben, verglichen mit den oben genannten leicht flüchtigen Substanzen, einen deutlich geringeren Dampfdruck und sind daher als vergleichsweise schwer flüchtig zu bezeichnen.

Die einfachste Form ist das Chlorbenzol (C_6H_5Cl), bei dem ein Wasserstoffatom im Benzolring durch ein Chloratom ersetzt wurde. Eine weltweit in der Vergangenheit als Insektizid eingesetzte Substanz dieser Stoffgruppe ist das Dichlordiphenyltrichlorethan ($C_{14}H_9Cl_5$), bekannter als DDT. Die feste, praktisch wasserunlösliche Substanz wurde im Zeitraum zwischen 1940 und den 1970er Jahren intensiv eingesetzt. Sie wurde sogar direkt am Menschen z. B. zur Entlausung verwendet. Neben anderen Effekten ist die Substanz bei Tieren und Menschen inzwischen als erbgutschädigend bekannt.

Aufgrund ihrer Persistenz adsorbieren Halogenaromaten leicht an den Oberflächen von Bodenteilchen und Gewässersedimenten, gelangen von dort in den Nahrungskreislauf und reichern sich am Ende der Nahrungsketten in Organismen an.

2.5.5 Mobilität einiger organischer Schadstoffe

Zur Beurteilung des Gefahrenpotenzials eines Schadstoffes interessieren sich Umweltgeologen für zwei Faktoren:

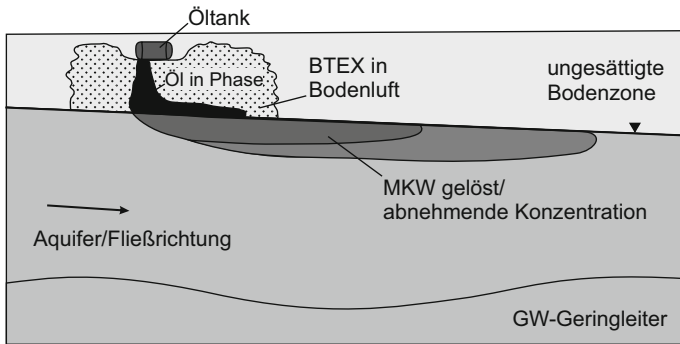
- Mobilität und Art der Ausbreitung eines Stoffes im Untergrund
- natürliche Abbauprozesse und Folgeprodukte des Schadstoffes

Ein wichtiger Faktor zur Abschätzung der Mobilität von Schadstoffen ist die Beschaffenheit des Untergrunds, also des Mediums, in dem sich die Schadstoffe ausbreiten. Die Korngrößenverteilung innerhalb eines Bodenkörpers ist für seine Porosität und damit seine Durchlässigkeit für fluide Phasen verantwortlich. Daneben wirken sich die Oberflächen der Körner auf das Rückhaltevermögen aus. Je kleiner die Körner sind, umso größer ist deren spezifische Oberfläche. Je mehr Oberfläche zur Verfügung steht, umso größer ist die Menge an Schadstoff, die im Boden adsorptiv gebunden werden kann. Böden mit hohen Gehalten an organischer Substanz sind in der Lage, mehr MKW adsorptiv zu binden als rein mineralische Böden. Die Eigenschaft von Böden, organische Schadstoffe zu binden, wird über den Retardationsfaktor quantifiziert. Die Bestimmung des Retardationsfaktors wird z. B. von Wisotzky (2011) ausführlich beschrieben.

Der zweite Faktor zur Einschätzung der Mobilität von Schadstoffen ist die Beschaffenheit des jeweiligen Schadstoffes selbst. Die Prozesse, die die gering bis wasserunlöslichen Stoffgruppen der MKW, PAK und LCKW nach ihrer Freisetzung an die Umwelt durchlaufen, werden nachfolgend im Vergleich beleuchtet.

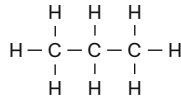
Die Gruppe der MKW weist je nach Molekülgröße unterschiedliche Viskositäten auf. Die kurzkettigen Moleküle können den Boden schneller durchdringen als die langkettigen. Gemeinsam ist der gesamten Gruppe, dass sie nicht ins Grundwasser eindringen, sondern auf der Grundwasseroberfläche schwimmen. Entsprechend der jeweiligen Wasserlöslichkeit werden geringe Mengen an MKW im Grenzbereich Ölphase-Wasser gelöst. Der Rest wird als eigene Phase in Grundwasserfließrichtung transportiert. Je nach Beschaffenheit des Bodens werden dabei vermehrt die längerkettigen Mole-

2

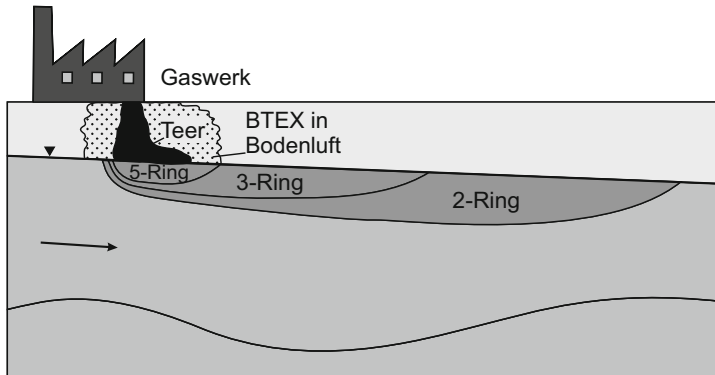


MKW

Hauptbestandteil aliph. KW
Bsp: Propan

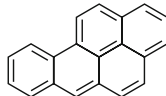


■ **Abb. 2.6** Ausbreitung von Mineralölkohlenwasserstoffen nach ihrer oberflächennahen Freisetzung



PAK

Bsp. Benzo(a)pyren



■ **Abb. 2.7** PAK-Ausbreitung nach Freisetzung von Teer als Abfallprodukt der Gasproduktion

küle an Kornoberflächen adsorbiert, die kleineren Moleküle in der Phase angereichert. Die Länge einer MKW-Schadstofffahne kann stark variieren und hängt von der freigesetzten Menge, der Zusammensetzung der MKW und der Temperatur ab, die wesentlich auf die Viskosität der MKW wirkt. Aufgrund der Abbauprozesse, die während der Schadstoffausbreitung stattfinden, bleibt die Fahnenlänge im Normalfall auf wenige hundert Meter begrenzt. Zusätzlich zu den gelösten und in Phase transportierten MKW werden aus dem Stoffgemisch leichtflüchtige Aromaten aus der Ölphase an die Bodenluft abgegeben.

Die Ausbreitung von MKW im Grundwasser ist in **Abb. 2.6** dargestellt.

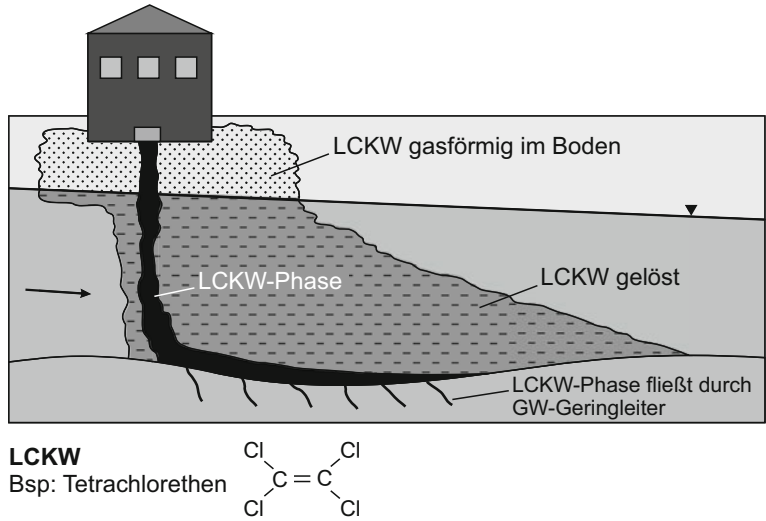
PAK sind schwerer als Wasser und wie MKW gering wasserlöslich. Sie werden z. B. mit Teer, wie

in **Abb. 2.7** dargestellt, aus einem Gaswerk emittiert und im Grundwasserschwankungsbereich aus der Teerphase heraus mobilisiert. Sie sinken in den Grundwasserkörper ab und werden dabei je nach Molekülgröße unterschiedlich rasch adsorptiv gebunden. Größere Ringe werden im Nahbereich des Schadensherdes fixiert, während kleinere Moleküle im Wasser weiter transportiert werden können. Aus der Teerphase können sich auch BTEX als leichtflüchtige Komponenten in die Bodenluft ausbreiten.

LCKW sind schwerer als Wasser, gering wasserlöslich und leicht flüchtig. Sie können sich daher nach ihrer Freisetzung auf drei Arten im Untergrund ausbreiten.

Aber zunächst zur Freisetzung selbst: LCKW zeichnen sich durch eine besonders geringe Viskosität

■ **Abb. 2.8** LCKW-Ausbreitung nach Freisetzung aus einer ehemaligen chemischen Reinigung



tät aus. Diese bedingt, dass die flüssigen Substanzen durchdringen können, die z. B. für Wasser dicht sind. Dieser Umstand und die Tatsache, dass er lange Zeit vielen Nutzern derartiger Substanzen nicht bekannt war, hat zu vielen LCKW-Schadensfällen geführt.

Dringt der Schadstoff als flüssige Phase in den Untergrund ein, geht ein Teil davon rasch in die Gasphase über, was eine Belastung der Bodenluft zur Folge hat. Die flüssige Phase sinkt bis zum Grundwasserbereich ab. Hier werden LCKW bis zu ihrer Sättigungskonzentration gelöst und mit dem Grundwasserstrom abtransportiert. Die verbleibende flüssige Phase sinkt im Grundwasserkörper ab und reichert sich in Senken des Grundwasserstauhorizontes an. Sie bildet hier sozusagen einen Speicher, aus dem langsam und langfristig LCKW in Lösung gehen können. Je nach Beschaffenheit des Stauhizontes können LCKW in ungünstigen Fällen auch durch den Stauer hindurch in ein zweites Grundwasserstockwerk durchschlagen. Aufgrund der geringen Viskosität und hohen Stabilität können eingedrungene LCKW-Verbindungen lange Schadstoffbahnen von mehreren Kilometern bilden (Wisotzky 2011).

In **Abb. 2.8** sind die möglichen Ausbreitungsformen von LCKW anhand des Altstandortes einer chemischen Reinigung dargestellt.

Wie oben erwähnt, ist neben der Mobilität der Schadstoffe auch deren Abbauverhalten ein wichtiger Aspekt zur Beurteilung des Gefährdungspoten-

zials. Generell erfolgt der Abbau organischer Substanz, indem die Moleküle zersetzt, also verkleinert werden. Dies kann mit oder ohne den Einfluss von Sauerstoff, also in aerobem oder anaerobem Milieu und ohne oder unter Mitwirkung von Mikroorganismen erfolgen.

Ein möglicher Abbaupfad von LCKW erfolgt z. B. über den Austausch von Cl-Atomen gegen H-Atome im Molekül. Am Beispiel von Tetrachlorethen zeigt die nachfolgende Reihe folgende Abbauprodukte:

Tetrachlorethen $\text{C}_2\text{Cl}_4 \rightarrow$ Trichlorethen $\text{C}_2\text{HCl}_3 \rightarrow$ Dichlorethen $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2 \rightarrow$ Vinylchlorid $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$

Als weiteres Beispiel wird der Abbau von Glucose in aerobem und anaerobem Milieu einer Hausmülldeponie im **Kap. 8** erläutert.

Stoffkreisläufe und Schadstoffe – Einiges, was man wissen sollte

- Die Erde wird in die Systeme Lithosphäre, Pedosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre (inkl. Anthroposphäre) eingeteilt. Innerhalb und zwischen den Sphären finden Prozesse statt, die mit der Umwandlung von Stoffen und Energie einhergehen. Da die Erde in ihrer Gesamtheit als geschlossenes System anzusehen ist, müssen diese Prozesse Kreisläufe sein.
- Der langfristige Kohlenstoffkreislauf ist in Lithosphärenprozesse eingebunden. Da ca.

99,5% des gesamten Kohlenstoffs auf der Erde in der Lithosphäre gebunden sind, ist der langfristige Kohlenstoffkreislauf ein bedeutender. In Bezug auf viele umweltgeologische Fragestellungen sind jedoch die kurzfristigen Prozesse von größerem Interesse.

- Der kurzfristige Kohlenstoffkreislauf findet in der Atmosphäre, der Hydrosphäre, der Pedosphäre und der Biosphäre statt. Er wird inzwischen auch intensiv vom Menschen beeinflusst, da durch die Nutzung fossiler Brennstoffe langfristig gebundener Kohlenstoff in den kurzfristigen Kreislauf überführt wird.
- Der Stickstoffkreislauf ist von großer Bedeutung für die Biosphäre, da Stickstoff in seiner bioverfügbaren Form als Pflanzennahrung dient. Der natürliche Stickstoffkreislauf erfolgt über Stoffwechselprozesse, die Reduktion und Oxidation des Stickstoffs bewirken.
- Die Entwicklung von Kunststoffen auf Basis der organischen Chemie führt seit etwa einem Jahrhundert zur Freisetzung von Stoffen, die ohne menschliches Zutun in dieser Form nicht im System Erde vorhanden wären. Diese, auch als Plastik bezeichneten Substanzen bauen sich deutlich langsamer ab, als sie hergestellt werden. Sie reichern sich daher in den Sphären an (z. B. als Mikroplastik in den Ozeanen).
- Als Schadstoffe werden Substanzen bezeichnet, die auf ein System in irgendeiner Weise schädigend einwirken. Dies kann aufgrund der Beschaffenheit des Stoffes oder aufgrund der Menge sein, mit der das System konfrontiert wird. Ein Stoff kann auf ein System positiv, auf ein anderes System gleichzeitig negativ einwirken.
- Zur Gruppe der anorganischen Schadstoffe gehören Schwermetalle wie Blei, Cadmium oder Quecksilber. Sie wirken auf Pflanzen, Tiere und Menschen nachteilig. Andere Schwermetalle, wie z. B. Zink oder Eisen, sind in entsprechender Menge für Organismen sogar notwendig und wirken erst bei höherer Dosis schädigend.

- Die Gruppe der organischen Kohlenwasserstoffe, die vor allem durch anthropogene Aktivitäten an die Umwelt abgegeben werden, bietet ein großes Spektrum an verschiedensten Substanzen, die in ihrer Mobilität in den Sphären, wie auch in ihrer schädigenden Wirkung stark variieren können.
- In der Umweltgeologie sind die aliphatischen Kohlenwasserstoffe, Einringaromaten, die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie die leicht flüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffe (LCKW) von großer Bedeutung.
- Als Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) wird jene Gruppe zusammengefasst, die in der Petrochemie relevant ist. Hier spielen die aliphatischen KW die wichtigste Rolle. MKW sind leichter als Wasser und nur sehr gering wasserlöslich. Sie werden im Boden adsorptiv gebunden, schwimmen auf dem Grundwasser auf und werden in Fließrichtung transportiert. Je kürzer die Molekülketten sind, umso weniger viskos und damit mobiler ist der Schadstoff.
- PAK sind etwas schwerer als Wasser und ebenfalls nur gering löslich. Sie sind bei Normaltemperaturen fest und werden als Aerosolpartikel über die Atmosphäre transportiert. Da PAK auch natürlich, z. B. bei Waldbränden, gebildet werden, sind sie weltweit vorhanden. Im Boden werden sie an Bodenteilchen adsorbiert. Im Grundwasser werden die kleineren Moleküle weiter transportiert als die größeren.
- LCKW sind schwerer als Wasser, gering wasserlöslich, sehr gering viskos und gehen sehr leicht in die Dampfphase über. Die Freisetzung der flüssigen Substanz erfolgt z. B. durch die unsachgemäße Lagerung in Behältern, die zwar wasserdicht, aber nicht dicht für LCKW sind. Im Untergrund breiten sie sich als Gasphase in der Bodenluft und in gelöster Form mit dem Grundwasserfluss aus. Die ungelöste Flüssigphase sinkt im Grundwasser auf die Aquifersohle ab und bildet hier LCKW-Speicher, aus denen über lange Zeiträume Schadstoff freigesetzt wird.

? Testfragen zum Kapitel Stoffkreisläufe und Schadstoffe

1. Was versteht man unter dem „Systemkonzept“? In welche großen Systeme wird die Erde unterteilt und was ist die Zielsetzung hinter diesem Ansatz?
2. Beschreiben Sie den Kohlenstoffkreislauf inkl. der Übergänge zwischen kurz- und langfristigem Kreislauf. In welcher Form nimmt der Mensch Einfluss auf die Prozesse und wie wirkt sich diese Einflussnahme aus?
3. Beschreiben Sie den Stickstoffkreislauf. Gehen Sie dabei auch auf die chemischen bzw. biochemischen Prozesse ein. Mit welcher technischen Errungenschaft hat der Mensch in diesen Kreislauf eingegriffen und wie wirkt sich die anthropogene Einflussnahme auf das System Grundwasser aus?
4. Wie nehmen anthropogene Aktivitäten Einfluss auf den Schwefelkreislauf und was sind die Folgen dieser Einflussnahme?
5. Erläutern Sie, wie der Begriff „Schadstoff“ definiert wird und nennen Sie Beispiele für Stoffe, die aus verschiedenen Perspektiven betrachtet, gleichzeitig Schad- und Nutzwirkung haben können.
6. Was unterscheidet die Schwermetalle Blei, Cadmium und Quecksilber von den anderen Elementen der Schwermetallgruppe?
7. Beschreiben Sie, über welche anthropogenen Prozesse Blei vermehrt an die Umwelt freigesetzt wird und auf welche Weise Blei für die Umwelt schädlich wirkt.
8. Wo spielen Arsen und Cyanide als halb- bzw. nichtmetallische anorganische Schadstoffe im Zusammenhang mit geologischen Fragestellungen eine besondere Rolle?
9. In welche großen Gruppen lässt sich die Schadstoffgruppe der organischen Kohlenwasserstoffe unterteilen? Was sind die wesentlichen Unterschiede in den Molekülstrukturen, die die einzelnen Gruppen charakterisieren?
10. Beschreiben Sie die typischen Eigenschaften der Mineralölkohlenwasserstoffe. Was bedeuten diese Eigenschaften für die Mobilität des Schadstoffes in der Umwelt?

11. Welche Stoffgruppe wird unter der Bezeichnung BTEX zusammengefasst? Was sind deren Charakteristika?
12. Was sind LCKW? Welche besonderen Eigenschaften zeichnen sie aus? Wo werden sie verwendet und damit auch potenziell in die Umwelt eingebracht? Wie breiten sich LCKW nach ihrer Freisetzung im Untergrund aus?
13. Was versteht man unter den Abkürzungen LNAPL und DNAPL? Nennen Sie Beispiele für Stoffe, die in eine der beiden Kategorien fallen.

Literatur

- Bergbauabfallrichtlinie (2006). Richtlinie 2006/21/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15.03.2006 über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie. Europäische Union
- Blume HP, Brümmer GW, Schwertmann U, Horn R, Kögel-Knabner I, Stahr K, Auerswald K, Beyer L, Hartmann A, Litz N, Scheinost A, Stanjek H, Welp G, Wilke B-M (2013) Schaffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, München, Wien (Neubearbeitung)
- Breitmaier E, Jung G (2009) Organische Chemie. Thieme Verlag, Stuttgart
- Derraik JGB (2002) The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. Marine Pollution Bulletin 44:842–852
- EPA (Environmental Protection Agency) (1982). Test-method: Polynuclear aromatic hydrocarbons, EPA-Method 610, 07. USA.
- Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (1997) Geochemie und umweltrelevante Prozesse in Atmo-, Podo- und Hydrosphäre. Springer, Heidelberg
- Merian E (Hrsg) (1984) Metalle in der Umwelt. Verlag Chemie, Weinheim
- Mielke HW (1997) Urbane Geochemie: Prozesse, Muster und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. In: Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (Hrsg) Geochemie und umweltrelevante Prozesse in Atmo-, Podo- und Hydrosphäre. Springer, Heidelberg
- Reisinger H, Schöller G, Müller B, Obersteiner E (2009) RUSCH Ressourcenpotential und Umweltbelastung der Schwermetalle Cadmium, Blei und Quecksilber in Österreich, Report REP-0229. Umweltbundesamt und TU Wien, Wien
- Rosenberg F, Röhling H-G (Hrsg) (1999) Arsen in der Geosphäre Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 6. Dt. Ges. für Geowiss., Wiesbaden
- Römpf (2014) (Thieme Verlag, Stuttgart). <https://roempf.thieme.de>. Zugegriffen: 13.08.2014

- Schwedt G (1996) Taschenatlas der Umweltchemie. Thieme Verlag, Stuttgart
- TrinkwV (2001). Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Bundesrepublik Deutschland
- UBA (2013). Umweltbundesamt (Hrsg.) Nationale Trendtabelle für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, 1990–2012, Arbeitsstand: 21/11/2013
- Umweltbundesamt (2013) Letzter Zugriff. <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftschaedstoffe/benzol>. Zugegriffen: 24.08.2014
- Welch AH, Stollenwerk KG (2003) Arsenic in Ground Water. Springer Science and Business Media, New York
- Wippermann T, Hollerbach A, Bosecker K, Atmaca T (2004) Goldgewinnung durch Cyanidlaugung und Maßnahmen zur Vermeidung möglicher Gefahren Geol. Jb., Bd. 5. Schweizerbart (in Komm.), Hannover, S 77–124
- Wisotzky F (2011) Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrochemische Modellierung. Springer, Heidelberg

Atmosphäre

Sylke Hilberg

- 3.1 Die Erdatmosphäre – Zusammensetzung und räumliche Verteilung – 32
- 3.2 Das Klima und sein Wandel – 34
- 3.3 Anthropogene Einflüsse auf die Luftqualität – 37
- 3.4 Geogene Einflüsse auf die Luftqualität – 39
- Literatur – 42

Kurzfassung

Der Begriff der Atmosphäre beschreibt jenen Teil des globalen Systems, der als hauptsächlich gasförmige Hülle die Erde umgibt. Die Prozesse in der Atmosphäre sind jedoch eng mit jenen der Hydrosphäre verknüpft. So bilden Verdunstung, Kondensation und Transport von Wasser in der Atmosphäre einen bedeutenden Teil des Wasserkreislaufs.

In diesem Kapitel werden zunächst einige Grundlagen zu wichtigen Eigenschaften der Atmosphäre und deren erdgeschichtliche Entwicklung erläutert. Die heutige Zusammensetzung der Luft ist das Ergebnis eines Gleichgewichts zwischen sauerstoffproduzierenden und sauerstoffverbrauchenden Prozessen in der Biosphäre, das sich seit der Entwicklung von Landpflanzen im Devon und vor allem im Karbon eingestellt hat. Das Klimageschehen sowie lang- und mittelfristige natürliche Klimaschwankungen und deren Ursachen werden beschrieben. Dazu zählen z. B. die Milanković-Zyklen, aber auch die Verteilung der Landmassen sowie globale Naturkatastrophen, wie Vulkanausbrüche oder Meteoriteneinschläge sind dafür verantwortlich. Der Einfluss anthropogener Aktivitäten auf die aktuell beobachtbaren Klimaveränderungen wird anhand eines der wesentlichen Treibhausgase, dem CO₂, thematisiert. Seit den 1950er Jahren wird ein Anstieg der CO₂-Konzentration von 310 auf ca. 400 ppm beobachtet. Der Gehalt ist damit höher als er in den letzten 800.000 Jahren jemals war. Die Rasanze des Anstiegs ist ein deutlicher Hinweis auf seine anthropogene Ursache.

Ein Seitenblick auf die internationalen Aktivitäten zum Klimaschutz soll die politischen Instrumente aufzeigen, die dazu dienen sollen, die prognostizierten Klimaentwicklungen der kommenden Jahrzehnte und Jahrhunderte einzubremsen. Dabei wird auch kurz die Geschichte rund um internationale Klimaabkommen gestreift.

Neben der globalen Problematik der Treibhausgase spielen weitere anthropogen bedingte Beeinflussungen der Luftqualität, vor allem in industrialisierten Gebieten der Erde, eine große Rolle. Diesbezüglich werden die Eigenschaften sowie das Verhalten von Aerosolen und künstlich emittierten Gasen in der Atmosphäre beleuchtet.

Geogene Luftbelastungen und damit die Zusammenhänge zwischen Atmosphäre und Umweltgeologie werden schließlich anhand einiger konkreter Beispiele

aus der geologischen Praxis diskutiert. Es wird das Element Radon als geogene Atmosphärenbelastung vorgestellt. Ein Fallbeispiel zeigt, wie die Geologie zur Klärung eines medizinischen Problems dienen konnte. Eine Herausforderung für den Arbeitsschutz im Tunnelbau stellen Lithologien dar, die asbestiforme Minerale aufweisen.

3.1 Die Erdatmosphäre – Zusammensetzung und räumliche Verteilung

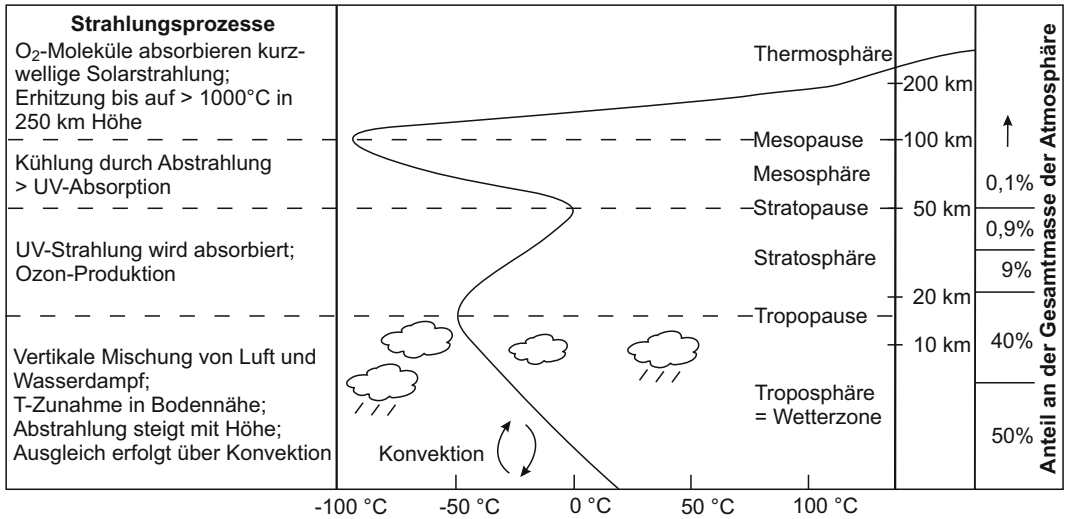
Die atmosphärische Luft im Bereich der unteren Troposphäre (s. u.) ist ein Gasgemisch, das zu etwa 78 Vol.-% aus Stickstoff, zu ca. 21 Vol.-% aus Sauerstoff, zu einem knappen Prozent aus dem Edelgas Argon und in geringen Anteilen (ca. 25 ppm) aus weiteren Edelgasen besteht. Kohlendioxid ist global betrachtet aktuell mit ca. 0,04 Vol.-% (oder 400 ppm) an der Luftzusammensetzung beteiligt. Weitere Spurenstoffe sind Methan (1,7 ppm), Wasserstoff (0,5 ppm), Ozon (bis 10 ppm) und Stickstoffoxide (bis 0,5 ppm). Zusätzlich zu diesen Gasen besteht die Atmosphäre aus einem sehr variablen Anteil an Wasserdampf, in dem verschiedenste Substanzen gelöst sind, sowie aus partikulären Stoffen (Aerosole und Stäube).

Die Zusammensetzung der Atmosphäre war in der Erdgeschichte nicht immer gleich. Erst mit dem Einsetzen der Besiedelung der Landoberfläche im Ordovizium wurde im großen Maßstab Sauerstoff gebildet. Von einer annähernd stabilen Verteilung der Gasgehalte, wie sie heute vorliegt, ist etwa seit dem Karbon vor 350 Millionen Jahren auszugehen.

In ihrer Frühphase war die Erde vermutlich von einer Gashülle umgeben, die vor allem aus Wasserstoff und Helium bestand. Durch Ausgasungen aus dem Erdinneren im Zuge des Vulkanismus wurden Wasserdampf, Schwefelwasserstoff, Methan, Ammoniak und Kohlendioxid in großen Mengen freigesetzt und bildeten in einer nächsten Phase die Hauptbestandteile der Atmosphäre.

Durch die hohe UV-Strahlung und damit verbundene photochemische Prozesse wurden aus diesen Bestandteilen schließlich große Mengen an elementarem Stickstoff gebildet. Durch Cyanobakterien wurde langsam die Sauerstoffproduktion

3.1 • Die Erdatmosphäre – Zusammensetzung und räumliche Verteilung



■ **Abb. 3.1** Aufbau der Erdatmosphäre mit einigen charakteristischen Eigenschaften der jeweiligen Schichten (in Anlehnung an Merritts et al. 1998).

bei gleichzeitigem Verbrauch von Kohlendioxid in Gang gesetzt.

Die heutige, weitgehend stabile Zusammensetzung der unteren Atmosphärenschichten ist das Ergebnis eines Gleichgewichts zwischen Sauerstoffverbrauch und -produktion aufgrund von Biosphärenprozessen.

Neben der zeitlichen Varianz in der Luftzusammensetzung während der Erdgeschichte besteht aber innerhalb der Lufthülle auch eine große räumliche Varianz, die sich aus den stark variierenden Druck- und Temperaturunterschieden zwischen bodennahen und -ferneren Schichten ergibt.

In ■ **Abb. 3.1** ist der Schichtaufbau der Atmosphäre dargestellt.

Mehr als 50 % der Gesamtmasse der Erdatmosphäre befinden sich in einem Bereich zwischen 0 und 10 km über der Erdoberfläche, im Bereich der darüber folgenden 20 km zirkulieren weitere 40 % der Atmosphärenmasse. Wasserdampf befindet sich nur innerhalb der Troposphäre, die daher auch als Wetterzone bezeichnet wird. Hier finden intensive Zirkulationsbewegungen statt, die einen thermischen Ausgleich zwischen den aufgeheizten bodennahen Luftmassen und den kalten Luftmassen der oberen Troposphäre bilden. Oberhalb dieser Durchmischungszone findet nur wenig Konvektion statt. Die Temperatur ergibt sich hier aus dem Verhältnis zwischen Absorption an Teilchen und Wärmeab-

strahlung und bewegt sich zwischen 0 und – 100 °C (Stratosphäre und Mesosphäre). Oberhalb der Mesopause ist die Absorption der UV-Strahlung an Sauerstoffmoleküle so hoch, dass Temperaturen bis über 1000 °C erreicht werden.

Vertiefende Informationen über die Atmosphäre, ihre Zusammensetzung und ihre Schichtung geben z. B. Roedel und Wagner (2011) oder auch Kraus (2004).

Die Luftmassen, die die Atmosphäre aufbauen, sind nicht statisch an einem Ort fixiert, sondern sind rund um die Erde ständig in Bewegung. Vergleichbar mit den Meeresströmungen und den Konvektionsströmen im Erdmantel bewegen sich auch die Luftmassen in thermisch angetriebenen Konvektionsströmen. Energiequelle hierfür ist die Sonne. Da die Sonnenstrahlen am Äquator senkrecht auf die Erde auftreffen und diese Gebiete damit mehr Strahlung aufnehmen als abgeben, während an den Polen die Sonne sehr flach einfällt und (wenn auch mit großen jahreszeitlichen Schwankungen) in der Summe mehr Strahlung abgegeben als aufgenommen wird, kommt es zu einer großen thermischen Potenzialdifferenz. Diese wird durch globale Luftströmungen ausgeglichen. Ohne diesen globalen Ausgleich der Energiezufuhr würde es am Äquator immer heißer und gleichzeitig an den Polen immer kälter werden.

Die am Äquator aufgeheizte feuchte Luft steigt auf. Das bei hohem Druck und hoher Temperatur

verdampfte Wasser kondensiert beim Aufstieg und regnet ab. Die trockene Luft strömt nach Norden und Süden, wobei sie weiter abkühlt und schließlich im Bereich des 30. bis 35. Breitengrades wieder absinkt. Zum Ausgleich strömt in Bodennähe kältere Luft aus höheren Breiten in Richtung Äquator. Diese großräumigen Nord-Süd gerichteten Strömungen beiderseits des Äquators sind auch als Hadley-Zellen bekannt. Durch die gleichzeitige Rotation der Erde werden die Nord-Süd strömenden Luftmassen außerdem einer Ost-West-Komponente ausgesetzt (Einfluss der Coriolis-Kraft). Es entstehen die Passat-Winde, die auf der Nordhalbkugel aus Nordost, auf der Südhalbkugel aus Südost wehen.

Weiter in Richtung der Pole ist die Luftzirkulation weniger einheitlich. Weitere große Zirkulationszellen, wie die Hadley-Zellen, werden in höheren Breiten nicht beobachtet. Es entstehen stattdessen kleinräumigere variable Hoch- und Tiefdruckgebiete. Dies zeigt sich z. B. daran, dass die Wettersituation in unseren Breiten (rund um 50° nördlicher Breite) vergleichsweise instabil ist. In der Summe kommt es aber dennoch zu einer generellen subpolaren Tiefdruckrinne im Bereich des 60. Breitengrades und den polaren Hochdruckgebieten. Details zu globalen Luftströmungen und der Dynamik der Atmosphäre sind bei Roedel und Wagner (2011) nachzulesen.

3.2 Das Klima und sein Wandel

Mit dem Begriff „Klima“ bezeichnet man eine charakteristische meteorologische Langzeitsituation in einem Gebiet. Das Klima wird über Angaben zur langjährigen Jahresmitteltemperatur und über durchschnittliche Jahresniederschläge beschrieben. Das Wetter beschreibt dagegen tägliche und jahreszeitliche Schwankungen von Temperatur, Windsituation und Niederschlag. Von Klimaveränderungen kann daher erst dann die Rede sein, wenn nachhaltige Veränderungen der Temperatur und Niederschlagsmengen über Jahre bis Jahrzehnte festgestellt werden. Einzelne Wetterereignisse oder auch die Häufung von Extremereignissen in einigen aufeinanderfolgenden Jahren deuten noch nicht zwangsläufig auf eine Klimaveränderung hin.

3.2.1 Natürliche Klimaschwankungen

Natürliche Klimaschwankungen sind generell sehr langsam ablaufende Prozesse, die mit globalen geologischen Veränderungen einhergehen. Die Interpretation der Bildungsbedingungen bestimmter sedimentärer Gesteine ermöglicht es, Klimaveränderungen über lange Zeiträume zu rekonstruieren. Kurzfristige Veränderungen von einigen zehntausend bis hunderttausend Jahren lassen sich sehr gut über die Auswertung von Isotopensignaturen (siehe ► Kap. 4) an Eiskernen der Arktis beobachten. Auch Seesedimente und Pollenuntersuchungen geben Aufschluss über Klimaveränderungen.

Zurückgeführt werden die natürlichen Klimaschwankungen zu einem großen Teil auf drei sich überlagernde zyklisch auftretende Veränderungen der räumlichen Beziehung der Erde zur Sonne und damit der Intensität der Sonneneinstrahlung. Diese Prozesse werden nach dem serbischen Mathematiker Milutin Milanković als Milanković-Zyklen bezeichnet.

Der Prozess, welcher dem längsten Zyklus unterliegt, ist jener der Veränderung der Exzentrizität, also der Ellipsenform der Erdumlaufbahn um die Sonne. Je stärker exzentrisch die Umlaufbahn verläuft, umso größer ist die Differenz des Erdabstands zur Sonne zwischen sonnennaher und sonnenferner Hälfte der Umlaufbahn. Die Intensität der Sonneneinstrahlung variiert dadurch insgesamt, vor allem aber variieren die Gegensätze zwischen den Jahreszeiten. Die Exzentrizität unterliegt einem Zyklus von etwa 100.000 Jahren.

Ein weiterer wichtiger und zyklisch ablaufender Prozess ist die Variation der Neigung der Erdachse (Erdschiefe) im Vergleich zur Ebene der Umlaufbahn um die Sonne. Diese Neigung schwankt im Bereich zwischen 22,1 und 24,5° in einem Zyklus von 41.000 Jahren. Je größer die Neigung ist, umso größer ist der klimatische Unterschied zwischen Sommer und Winter.

Die Präzession der Erdrotation ist der dritte und kurzfristigste Zyklus, dem die Erde unterliegt. Das Erdellipsoid rotiert in einer taumelnden Bewegung um die Senkrechtstellung, was dazu führt, dass die Neigung der Erdachse zur Sonne nicht immer im gleichen Bahnpunkt der Umlaufbahn liegt. Wenn

der sonnennächste Punkt der Erdumlaufbahn mit dem Punkt der stärksten Neigung der Erde zur Sonne (Sommersonnenwende) zusammenfällt, sind die Jahreszeiten stärker ausgeprägt, als wenn, wie derzeit, der sonnennächste Punkt im Winter der Nordhalbkugel durchlaufen wird. Die Präzession unterliegt einem ca. 26.000 Jahre langen Zyklus. Der Einfluss dieser periodischen Variationen der Erdbahnparameter auf das Klima wurde bereits in den 1970er Jahren anhand von Isotopenanalysen an Tiefseesedimenten nachgewiesen.

Einen großen Einfluss auf die globale Temperaturverteilung und damit die Klimaentwicklung haben die Meeresströmungen. Unterschiedlich temperierte Wässer werden in Form von Konvektionsströmen, ähnlich jenen in der Atmosphäre, transportiert. Neben der Temperaturdifferenz spielen bei Meeresströmungen aber auch Dichteunterschiede durch unterschiedliche Salzgehalte eine Rolle. Man spricht daher von thermohalinen Strömungen. In den Äquatorgebieten aufgeheizte Wässer strömen oberflächennah in Richtung höherer Breiten, kühlen dabei ab, sinken zum Ozeanboden und strömen in der Tiefsee zurück zum Äquator. Bei dieser, hier stark vereinfacht beschriebenen Konvektion wird nicht nur Wasser, sondern auch Energie in Form von Wärme transportiert. Diese wird beim Abkühlen des Wassers auch an die Atmosphäre über den Landmassen abgegeben. Da der Verlauf der Meeresströmungen naturgemäß auch davon abhängt, wo die Kontinente liegen, ist die Verteilung der Landmassen ein bedeutender Klimafaktor in der Erdgeschichte.

Wie oben beschrieben, ist die Zusammensetzung der Luft etwa seit dem Karbon bezüglich der Hauptparameter im Wesentlichen gleich geblieben. Veränderungen im Bereich bestimmter Spurenparameter waren jedoch in der Erdgeschichte immer wieder massiv klimawirksam. Treibhauseffekte, von denen wir heute vor allem im Zusammenhang mit anthropogenen Klimaeinflüssen sprechen, sind auch in der Erdgeschichte mehrfach der Grund für deutlich höhere globale Temperaturen gewesen bzw. werden für das Ende von Eiszeiten verantwortlich gemacht. Große Mengen an Methan und CO_2 , freigesetzt in Zeiten starker vulkanischer Aktivität, haben dazu geführt, dass sich die Reflexion der eingestrahnten Sonnenenergie verringerte

und die Energie in der Atmosphäre zurückgehalten wurde.

Die Freisetzung großer Mengen an Asche und Rußpartikeln infolge von Vulkanausbrüchen oder Meteoriteneinschlägen waren andererseits aber auch immer wieder für längere Perioden irdischer Abschattung verantwortlich. Durch die mangelnde Sonneneinstrahlung haben sich häufig in der Erdgeschichte Jahrtausende dauernde Abkühlungszeiten eingestellt.

3.2.2 Anthropogen verursachte Klimaschwankungen

Die vermehrte Freisetzung bestimmter Gase wird heute für eine global beobachtete Veränderung des Klimas verantwortlich gemacht. Zum Unterschied zu den oben beschriebenen natürlichen Klimaschwankungen laufen die derzeit beobachtbaren Prozesse in einer erheblich höheren Geschwindigkeit ab. Dies verstärkt den Verdacht eines nicht natürlichen Antriebs dieser Prozesse.

Ein Anstieg der Konzentration an Kohlendioxid, als eines der klimawirksamen Treibhausgase, wird seit den 1950er Jahren an ausgewählten Messstellen beobachtet. Die globalen Messwerte entstammen einem Messprogramm an einigen nicht von direkten CO_2 -Quellen beeinflussten Messstellen auf Hawaii sowie in der Antarktis. Nach dem Initiator und ersten Leiter des Messprogramms, Charles David Keeling, wird die seither beobachtbare Entwicklung des globalen CO_2 -Anstiegs als Keeling-Kurve bezeichnet. Sie zeigt einen weltweiten Anstieg des CO_2 -Gehaltes von ca. 310 ppm auf aktuell knapp unter 400 ppm in einem Zeitraum von gut 60 Jahren. Bei jahreszeitlichen Schwankungen in der Größenordnung von 10 ppm wird derzeit ein jährlicher durchschnittlicher Anstieg von etwa 1,3 bis 1,5 ppm beobachtet. Da dieser Anstieg in keinerlei Zusammenhang mit natürlichen Prozessen (Vulkanausbrüche in großem Maßstab) zu bringen ist, liegt der anthropogene Einfluss auf der Hand. Die Mobilisierung großer Mengen an Kohlenstoff durch die Nutzung fossiler Energiequellen, bei gleichzeitiger Reduktion von CO_2 -Verbrauchern, führt zu einer Anreicherung des Spurenparameters in der Atmosphäre.

Exkurs 3.1 Eine kurze Geschichte der Weltklimakonferenz

Das Kyoto-Protokoll wurde im Jahre 1997 als Zusatzprotokoll der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen verabschiedet. Es war das Ergebnis eines viele Jahre dauernden Verhandlungsprozesses, der mit der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 1992 in Rio erstmals schriftlich fixiert wurde. Ziel war ein multilaterales Abkommen zu „mehr Nachhaltigkeit im Klimaschutz“. Mit dem „Berliner Mandat“ wurde 1995 eine Arbeitsgruppe implementiert, die zwischen den jährlichen Klimagipfeln verbindliche Instrumentarien ausarbeiten sollte, über deren Umsetzung dann im Rahmen des Gipfels zu entscheiden wäre. In der „Genfer Deklaration“ wurden 1996 wissenschaftliche Beurteilungsgrundlagen festgelegt und der Wille zu und die Notwendigkeit für Maßnahmen bekräftigt.

Vom 01. bis 10. Dezember 1997 fand dann der Weltklimagipfel in Kyoto statt, an dem 158 Vertragsstaaten, 6 Beobachterstaaten und 3900 Vertreter von Nicht-Regierungsorganisationen (NGOs) teilnahmen. Die wesentlichen Inhalte des Protokolls beziehen sich auf die Verpflichtung der Vertragsstaaten zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen in einem individuell fixierten Ausmaß:

- Industrialisierte Vertragsstaaten senken Treibhausgasemissio-

nen um durchschnittlich 5,2 % unter das Niveau von 1990 im Zeitraum 2008 bis 2012.

- Die Mitgliedsländer der Europäischen Union reduzieren im Durchschnitt um 8 %, Deutschland um 21 %, Frankreich um 0 %, Spanien darf um 15 % steigern.
- Osteuropa hat sich zunächst für 8 % verpflichtet, nach dem wirtschaftlichen Umbruch fühlen sich die Staaten jedoch nicht mehr an diese Verpflichtungen gebunden.
- Schwellenländern wie China, Indien und Brasilien sowie Entwicklungsländern wurden keine Reduktionen vorgeschrieben.

Im Jahr 2001 stiegen die USA aus den Vertragsverhandlungen aus und brachten das Konzept damit beinahe zum Scheitern. Eine wesentliche Voraussetzung war die Teilnahme von mindestens 55 Staaten, die wiederum mindestens 55 % des weltweiten CO₂-Ausstoßes zu verantworten haben. Der Beitritt von Russland im Jahre 2004 führte dazu, dass diese Voraussetzung wieder erfüllt war. 2005 ist das Abkommen schließlich in Kraft getreten, wobei zunächst 128 Staaten unterschrieben haben. In den folgenden Jahren haben noch weitere 60 Staaten das Abkommen ratifiziert.

Bereits in den Jahren 2006 und 2007 begannen bei den Weltklimagipfeln in Nairobi und auf Bali die Verhandlungen für das Nachfolgeprotokoll, das ab 2013 Gültigkeit haben sollte. In den Folgejahren konnte darüber jedoch keinerlei Einigung erzielt werden. Die jährlichen Klimagipfel endeten jeweils mit unverbindlichen Empfehlungen und dem Auftrag, bis zum nächsten Jahr einen beschlussfähigen Vorschlag auszuarbeiten. In Doha wurde 2012 die Gültigkeit des Kyoto-Abkommens für den Zeitraum von 2013 bis 2020 verlängert, da eine Einigung über ein neues und verbindlicheres Abkommen nicht zu erzielen war.

Beim Klimagipfel 2013 in Warschau wurde festgelegt, dass die globale Erwärmung maximal 2 °C betragen darf. Auf konkrete Ansätze zur Zielerreichung konnten sich die Delegierten jedoch auch hier nicht einigen.

Naturwissenschaftliche, ökonomische und politische Hintergründe zum Kyoto-Protokoll wurden von Oberthür und Ott (2000) beschrieben. Laurency (2013) beleuchtet die Aktivitäten der Vereinten Nationen zum Klimaschutz als „wirkungsschwaches Klimaschutzabkommen“ unter politischen Aspekten.

Methan, als eine weitere als Treibhausgas klassifizierte Substanz, weist ähnliche Anstiegstendenzen auf, die jedoch bisher weniger gut dokumentiert sind. Zudem werden die Prozesse der Freisetzung und der Einfluss von Methan auf Klimaentwicklungen noch weniger gut verstanden.

Die Messwerte und deren offensichtlicher Zusammenhang mit der Klimaerwärmung haben die internationale Gemeinschaft dazu bewogen, über Maßnahmen zum Schutz des Klimas nachzudenken und einzelne erste Gegenmaßnahmen zu initiieren. Ein konkreter Versuch, durch ein international verbindliches Paket an Maßnahmen den CO₂-Ausstoß zu verringern, ist unter der Bezeichnung Kyotopro-

tokoll (siehe ► Exkurs 3.1) von 128 Vertragsstaaten im Jahre 2005 verabschiedet worden.

Um eine wissenschaftliche Betrachtung der Klimaentwicklung unter Berücksichtigung klimawirksamer Gaskonzentrationen in der Atmosphäre auf internationaler Ebene zu ermöglichen, wurde bereits im Jahr 1988 das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gegründet. Es wurde von der World Meteorological Organisation (WMO) im Rahmen des United Nations Environment Programme (UNEP) ins Leben gerufen. Drei Arbeitsgruppen haben das Ziel, unabhängig von wirtschaftlichen und politischen Interessen, folgende Fragen zu beantworten:

3.3 • Anthropogene Einflüsse auf die Luftqualität

1. Wissenschaftliche Aspekte von Klimasystemen und des Klimawandels
2. Einflüsse auf den Klimawandel
3. Möglichkeiten, den Klimawandel einzudämmen

Die Organisation IPCC liefert seither alle Daten, wissenschaftlichen Erkenntnisse und Anregungen, die erforderlich sind, um ein international abgestimmtes Programm zur Eindämmung des Klimawandels zu starten (IPCC 2014).

3.3 Anthropogene Einflüsse auf die Luftqualität

3.3.1 Partikuläre Luftkomponenten

Partikelförmige Luftverunreinigungen werden nach ihrer Korngröße in Grobstaub (10 bis 200 μm) und Feinstaub (< 10 μm) unterteilt. Als Aerosole werden Partikel bezeichnet, die im Größenbereich von 5 nm bis 100 μm liegen. Die Hauptmasse der Aerosolpartikel in der Erdatmosphäre bewegt sich in einem Korngrößenbereich von 1 μm bis 10 μm . Vor allem diese sehr kleinen Partikel weisen eine erhebliche Gefährdung für das Schutzgut „menschliche Gesundheit“ auf, da sie in die Atemwege, ab einer Größe < 2,5 μm auch bis in die Lunge eindringen und sich hier festsetzen können.

Aerosolpartikel können geogener, organischer oder anthropogener Herkunft sein. Geogene Stäube entwickeln sich unter anderem aus Gesteinsabrieb und bestehen aus Mineralen, aber auch Meersalz kommt in partikulärer Form in der Luft vor (Pleßow und Heinrichs 2000). Eine mengenmäßig sehr bedeutsame Aerosolquelle ist die Sahara. Saharastaub wird durch starke aufgeheizte Winde in große Höhen verfrachtet und über weite Distanzen bis nach Südamerika oder Europa transportiert. Aschen aus Vulkanaktivitäten oder Vegetationsbränden bilden eine weitere Gruppe von geogenen Luftpartikeln. Sie bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff in Form von Ruß sowie unverbrannten Kohlenstoffverbindungen.

Organische Stäube bilden sich aus Bodenpartikeln und beim Laubfall. Auch Pollen und Sporen sind dieser Gruppe zuzurechnen.

Natürliche Aerosolpartikel weisen meist Korngrößen im Bereich > 1 μm auf, da sie, mit Ausnahme

der Vegetationsbrände, vorwiegend durch mechanische Prozesse (Abrieb, Erosion) entstehen. Sie bilden damit Grobstaub sowie gröbere Feinstäube aus, die bevorzugt gravitativ abgelagert werden. Das heißt, sie werden vorzugsweise im Nahbereich ihres Emittenten in Form einer trockenen Deposition zur Erdoberfläche zurückgeführt. Auch von dieser Regel gibt es Ausnahmen, wie das Beispiel des Saharastaubs zeigt. Natürliche Luftpartikel bilden, global betrachtet, den weitaus größten Teil der Aerosole. Roedel und Wagner (2011) schätzen die Produktion auf weltweit 1 bis 2 Gt a^{-1} .

Anthropogene Aerosole sind vor allem Verbrennungsprodukte, die vom Verkehr, von der Industrie aber auch in großem Maße durch Heizungsanlagen der Haushalte („Hausbrand“) emittiert werden. Aktuelle Schätzungen gehen von einer Jahresproduktion von ca. 0,2 Gt aus, also etwa 10 % der natürlichen Aerosolproduktion. Der durchschnittliche Durchmesser von anthropogen gebildeten Partikeln liegt bei 0,5 μm , ist also deutlich kleiner als natürlicher Feinstaub. Die kleinsten Partikelgrößen liegen im Nanometerbereich mit fließendem Übergang zur Gasphase.

Aerosole, vor allem jene anthropogener Herkunft, unterliegen in großem Ausmaß dem Ferntransport. Sie werden innerhalb der Troposphäre weltweit verteilt und vor allem in Form der nassen Deposition, also mit den Niederschlägen, wieder zur Erde zurückgeführt. Die Transportweiten können bis zu 10.000 km betragen. Anthropogene Feinstäube sind daher ubiquitär, also allgegenwärtig. Sie werden nicht nur in belasteten Industriegebieten, sondern in geringerer Konzentration auch in weit von Emissionsquellen entfernten Reinluftgebieten festgestellt. Mit der Deposition von anthropogenen Luftschadstoffen in Reinluftgebieten beschäftigen sich z. B. Matschullat und Kritzer (1997). Die Verweilzeit der Partikel in der Atmosphäre liegt im Normalfall zwischen 10 und 60 Tagen und hängt von der Partikelgröße und den klimatischen Bedingungen ab.

Die Aerosolpartikel werden jedoch nicht einfach nur transportiert. Während ihres Aufenthalts in der Atmosphäre laufen verschiedene chemisch-physikalische Prozesse ab. An der festen Oberfläche des Partikels kann sich durch Aufnahme von Wasserdampf eine Hydrathülle bilden, an der sich andere

Partikel oder Moleküle aus der Gasphase anlagern oder lösen können. Diese anderen Substanzen können z. B. Schwermetallionen oder organische Kohlenwasserstoffe sein, die dann mit dem Partikel transportiert werden (Schwedt 1996). Aufgrund des durch Anlagerung „gewachsenen“ Partikels kann es auch zu einer rascheren Deponierung kommen.

Heinrichs und Brumsack (1997) beschreiben anhand von Feinstaubproben aus Ballungszentren, wie sich umweltrelevante Metalle an Feinstäuben anlagern und welche Anreicherungsfaktoren im Vergleich zur natürlichen Verteilung in der Erdkruste dabei beobachtet werden. Kralik (2000) stellt ähnliche Studien anhand von Filterrückständen aus Klimalanlagen in Wien sowie einem weit von anthropogenen Einflüssen entfernten alpinen Standort vor. Hier zeigt sich, dass die Partikel selbst zwar in großer Mehrheit geogener Herkunft sind, aber sowohl im urbanen als auch im alpinen Gebiet gegenüber dem Hintergrundwert erhöhte Schwermetallgehalte aufweisen. In der Regel weichen die Schwermetallgehalte in Feinstäuben jedoch nicht signifikant von den jeweiligen geogenen Hintergrundwerten ab. Ihre Konzentrationen werden also vor allem durch die Zusammensetzung des Liefergesteins gesteuert.

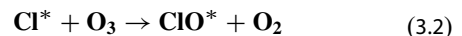
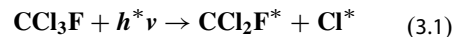
3.3.2 Gasförmige Verunreinigungen

Neben dem Ausstoß von Kohlendioxid, der im ► Abschn. 3.2.2 bereits thematisiert wurde, gibt es ein weites Spektrum an gasförmigen Substanzen, die in Spurenkonzentrationen durch anthropogene Aktivitäten an die Erdatmosphäre abgegeben werden. Nach ihrer Schadwirkung können sie als reaktiv, klimawirksam oder toxisch charakterisiert werden.

Durch die Nutzung fossiler Brennstoffe werden z. B. auch Stickstoffoxide (NO_x) und Schwefeldioxid (SO_2) an die Atmosphäre abgegeben. Diese Gase sind im Zusammenwirken mit dem Wasserdampf der Luft sowie unter dem Einfluss von Ozon und Sauerstoffradikalen Säurebildner. Es entstehen Schwefelsäure (H_2SO_4) und Salpetersäure (HNO_3), die in wässriger Phase zu H^+ -Ionen und Sulfat bzw. Nitrat dissoziieren. Auf diese Weise können Niederschlagswasser mit pH-Werten entstehen,

die deutlich unter den für Regenwasser üblichen Werten von etwa pH 5,5 liegen. Stickstoffoxide und Schwefeldioxid können aufgrund der Reaktionen, die in der Atmosphäre nach ihrer Freisetzung ablaufen, als reaktive Luftschadstoffe bezeichnet werden.

Ein prominentes Beispiel einer Gruppe klimawirksamer Gase, die durch anthropogene Aktivitäten in die Atmosphäre gebracht wurden, sind die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Sie sind eine Gruppe von Kohlenwasserstoffen, bei denen die Wasserstoffatome teilweise oder zur Gänze durch die Halogene Chlor und Fluor ersetzt sind. Sie wurden seit den 1930er Jahren technisch hergestellt und als Treibgas, Kältemittel oder Lösungsmittel eingesetzt. Sie sind extrem reaktionsträge und damit für lange Zeiträume in der Atmosphäre stabil. Durch die lange Verweilzeit gelangen sie, einmal freigesetzt, auch in große Höhen. In der Stratosphäre werden ihre Moleküle durch die erhöhte UV-Strahlung gespalten. Es werden Chlor- und Fluor-Radikale frei, die mit dem Ozon der Ozonschicht nach den Gl. 3.1 und 3.2 (hier beispielhaft für die Substanz Trichlorfluormethan) reagieren.



mit
 CCl_3F Trichlorfluormethan
 Cl^* , ClO^* , CCl_2F^* frei werdende Radikale
 O_3 Ozon
 $h^*\nu$ Photon (UV-Strahlung)

In den 1990er Jahren wurde der Zusammenhang zwischen der vermehrten Freisetzung von FCKW und dem entstandenen „Ozonloch“ nachgewiesen und der Einsatz dieser Substanzen daraufhin weltweit zunächst eingeschränkt und schließlich ab etwa dem Jahr 2000 verboten.

Aufgrund der Persistenz dieser Stoffe werden auch nach Einstellung der Produktion noch über viele Jahre bis Jahrzehnte FCKW in der Atmosphäre nachweisbar sein. Ihr Einfluss auf die Ozonschicht nimmt jedoch inzwischen bereits messbar ab.

3.4 Geogene Einflüsse auf die Luftqualität

Die Atmosphäre als eines der globalen Systeme kann, wie auch die im Folgenden noch intensiv besprochene Hydrosphäre und die Lithosphäre, nicht isoliert betrachtet werden. An zahlreichen Stellen gibt es Übergänge und Berührungspunkte zu den anderen Sphären. In vielen Bereichen wirken sich Veränderungen in einer Sphäre auf die anderen Systeme nachhaltig aus. Aus diesem Grund sind Atmosphärenprozesse, die zwar generell oberhalb der Erdoberfläche stattfinden, dennoch häufig im Fokus von Umweltgeologen. So befasst sich das ► [Kap. 10](#) unter anderem mit Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität durch Luftschadstoffe.

Umgekehrt führen bestimmte geologische Situationen zu einer Beeinflussung der Atmosphäre. Ein eindrucksvolles Beispiel dafür sind Vulkanausbrüche und die damit verbundenen, oft sogar globalen Veränderungen der Luftqualität und des Klimas.

Die beiden folgenden Beispiele sollen die Beziehung der Geologie zur Atmosphäre im praktischen umweltgeologischen Kontext aufzeigen.

3.4.1 Radon in kristallinem Grundgebirge

In den verschiedensten Lithologien treten radioaktive Isotope bestimmter Elemente als natürliche Bestandteile von Mineralen auf. Generell ist eine erhöhte natürliche Radioaktivität vor allem in kaliumreichen Mineralphasen wie Feldspäten und Glimmern festzustellen, weshalb Gesteine mit hohem Kalifeldspatanteil, wie z. B. Granit, eine höhere natürliche Strahlung aufweisen. Kalkstein, dessen Mineralphasen über sehr wenig potenziell radioaktives Kalium verfügen, ist dagegen arm an radioaktiver Strahlung.

In Mitteleuropa gibt es mehrere ausgedehnte und mächtige Granitkörper, etwa im Erzgebirge, im Schwarzwald und in den Vogesen, im Bereich der Böhmisches Masse sowie im zentralen Alpenraum. Während der Intrusion dieser Granitkörper und der damit einhergehenden hydrothermalen Vorgänge kam es zur Anlage von Vererzungen, bei denen unter anderem radioaktive Stoffe wie Uran mit den ra-

dioaktiven Isotopen ^{238}U , ^{235}U und ^{232}U angereichert wurden. Über die natürliche Zerfallsreihe bilden sich daraus nach einer Reihe von Tochterisotopen mit sehr unterschiedlichen Halbwertszeiten schlussendlich die stabilen Endglieder ^{206}Pb , ^{207}Pb bzw. ^{208}Pb .

Beispielhaft wird hier die Zerfallsreihe von ^{238}U dargestellt: $^{238}\text{U} - ^{234}\text{Th} - ^{234}\text{Pa} - ^{234}\text{U} - ^{230}\text{Th} - ^{226}\text{Ra} - ^{222}\text{Rn} (\text{g}) (3,823 \text{ d}) - ^{218}\text{Po} - ^{214}\text{Pb} - ^{214}\text{Bi} - ^{214}\text{Po} - ^{210}\text{Pb} - ^{210}\text{Bi} - ^{210}\text{Po} - ^{206}\text{Pb}$

Nach einem der Zwischenglieder wird diese Zerfallsreihe auch als Uran–Radium-Reihe bezeichnet.

Eines der umweltgeologisch besonders relevanten Tochterisotope innerhalb dieser Zerfallsreihe ist das Isotop Radon (^{222}Rn), das einerseits wegen seiner hohen Mobilität als Edelgas und andererseits wegen seiner Halbwertszeit von 3,8 Tagen ein besonderes Gefährdungspotenzial beinhaltet.

Die radioaktiven Stoffe und ihre radiogenen Zerfallsprodukte sind meist tief in der Erdkruste gebunden, damit immobil und für die Biosphäre nicht relevant. Kommen diese magmatischen Gesteinskörper aber durch tektonische Prozesse an die Oberfläche oder in oberflächennahe Lithosphärenbereiche, werden die radioaktiven Stoffe durch Grundwassertransport oder auch anthropogene Eingriffe (z. B. bergmännischer Abbau) in Kontakt mit der Biosphäre und möglicherweise auch mit Siedlungsgebieten. Häufig wurden und werden Gesteine mit radioaktiven Bestandteilen auch als Baumaterial verwendet. Flächenhafte Messungen von Radonkonzentrationen in Wohngebäuden wurden z. B. in den 1990er Jahren in Österreich durchgeführt (z. B. Friedmann et al. 1999). Dabei wurde ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Radonkonzentration und dem geologischen Umfeld sowie den verwendeten Baumaterialien festgestellt.

Radon als schweres Edelgas kann sich in der Raumluft von Kellern oder schlecht durchlüfteten Wohnräumen anreichern. Da beim Menschen kein Sinnesorgan für radioaktive Strahlung ausgebildet ist, können derartige Belastungen nicht ohne messtechnische Verfahren erfasst werden. Die Aufnahme radioaktiver Partikel erfolgt in solchen Räumen unbemerkt über die Atmung. Oft zeigt sich eine erhöhte Belastung erst an ihren Folgen, nämlich einer signifikant erhöhten Erkrankungs- oder sogar Todesrate in besonders betroffenen Gebieten, wie das Beispiel im ► [Exkurs 3.2](#) zeigt.

Exkurs 3.2 Fallbeispiel Umhausen

Ein eindrucksvolles Beispiel für eine geogen bedingte Atmosphärenbeeinflussung wurde vor ca. 20 Jahren in der österreichischen Ortschaft Umhausen entdeckt. In diesem Dorf im Tiroler Ötztal wurde in den 1990er Jahren eine im Vergleich zum restlichen Österreich signifikant höhere Lungenkrebs-Mortalität festgestellt. Daraufhin durchgeführte Messungen der radioaktiven Strahlung erbrachten Strahlungswerte, die im Extremfall die gesetzlichen Grenzwerte um den Faktor Zehntausend

überstiegen. Eine geologische Kartierung des betroffenen Gebietes zeigte, dass die am stärksten von Radioaktivität betroffenen Gebäude auf grobem Bergsturzmaterial des Bergsturzes von Köfels erbaut worden waren.

Durch dieses größte Bergsturzereignis im Zentralalpenraum, das auf ein Alter von 8710 +/- 150 Jahre datiert ist, wurden bis dahin immobil in der Erdkruste lagernde radioaktive Stoffe schlagartig an die Oberfläche verfrachtet. Durch die nunmehr lockere Lagerung des groben

Bergsturzmaterials war eine permanente Durchlüftung der Bergsturzmasse gegeben.

Radioaktive Stoffe, vor allem das Edelgas Radon, wurden mobilisiert und in den Kellerräumen der Wohnhäuser akkumuliert. Die Folge war eine permanente Exposition der Bewohner mit den genannten Folgen.

Details zur Radonanomalie in Umhausen (Tirol) werden von Purtscheller et al. (1999) beschrieben.

3.4.2 Asbest im Tunnelbau

Der Begriff „Asbest“ beschreibt eine Gruppe von Silikatmineralen mit typischer Faserstruktur. Die Fasern können bis zu Zentimetern lang werden, weisen dabei aber extrem geringe Faserdurchmesser von wenigen Mikrometern auf. Sie sind mineralogisch der Serpentin- oder der Amphibolgruppe zuzuordnen. Die häufigsten Asbestminerale sind Aktinolith, Tremolith und Chrysotil (siehe ■ Tab. 3.1). Sie finden sich bevorzugt in grünschiefer- bis amphibolitfaziliell überprägten basischen Gesteinen.

Sehr kurze Fasern mit einer Länge von maximal 5 µm und einem Durchmesser von weniger als 2,5 µm gelten als lungengängig. Das heißt, sie können über die Atmung aufgenommen werden und setzen sich in den Lungenbläschen (Alveolen) fest. Sie verursachen die chronische Lungenerkrankung Asbestose.

Asbest wurde in der Bauwirtschaft über Jahrzehnte vor allem als Dämmstoff eingesetzt. Die inzwischen erkannte gesundheitsschädliche Wirkung führte in den 1970er Jahren zum Verbot von Asbest in Baumaterialien.

Da Asbestminerale in natürlichen Gesteinen vorkommen, können sie im Zuge von Abbautätigkeiten oder bei Tunnelbauten durch die Zerkleinerung des Gesteins aus dem Verband herausgebrochen und damit mobilisiert werden. Durch die Bearbeitung asbestmineralhaltiger Gesteine durch Fräsen, Schrämen oder Sprengen werden Stäube

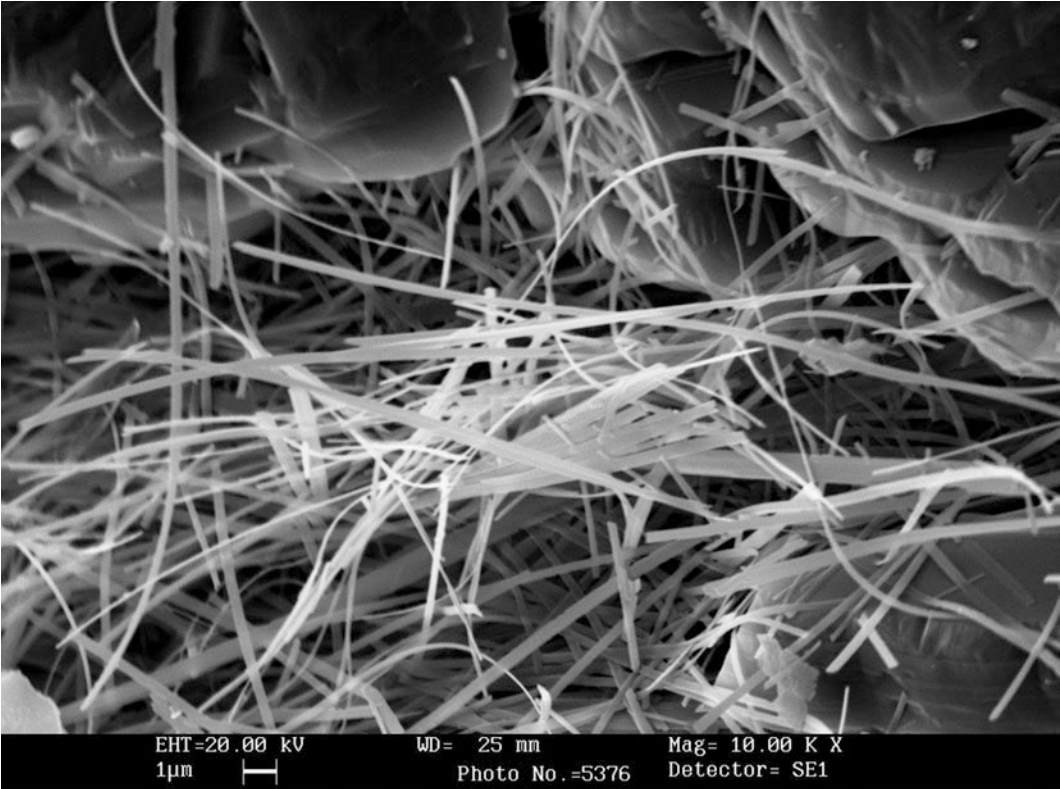
freigesetzt, die in der Feinstaubfraktion (< 10 µm) auch lungengängige (< 2,5 µm) Anteile enthalten. Bei einem Stollenvortrieb oder auch dem obertägigen Abbau von Grungesteinen müssen daher entsprechende Schutzmaßnahmen für die Arbeitnehmer auf der Baustelle gewährleistet werden.

Die Planung von Tunnelbauprojekten umfasst, neben umfangreichen geotechnischen und geologischen Erkundungen, auch die Durchführung von petrologischen und mineralogischen Untersuchungen. Diese müssen klären, ob ein potenziell asbesthaltiges Gestein durchörtet werden wird und ob es im Zuge des Stollenvortriebs zur Freisetzung lungengängiger Asbestminerale kommen kann. Dazu wird das Gesteinsmaterial im Labor so aufbereitet, wie es im Zuge des Tunnelvortriebs erfolgt und das aufgearbeitete Material im Rasterelektronenmikroskop auf die entstehenden Korngrößen untersucht. Ergeben sich Hinweise auf ein Auftreten lungengängiger Korngrößen, können die Arbeiten im Stollen nur unter besonderen Schutzmaßnahmen ausgeführt werden. Eine Maßnahme ist z. B. die permanente Berieselung mit Wasser zur Bindung des Feinstaubes in der Luft. Meist wird auch der Einsatz von Atemmasken mit entsprechend feinen Filtern vorgeschrieben.

In ■ Abb. 3.2 sind lungengängige Asbestminerale unter dem Rasterelektronenmikroskop nach der Aufbereitung im Labor dargestellt.

■ Tab. 3.1 Beispiele für Asbestminerale

Mineralbezeichnung	Formel	Mineralgruppe	Gesteine
Aktinolith	$\text{Ca}_2(\text{MgFe})_5[(\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$	Amphibol	Grünschiefer, Prasinit, Aktinolithschiefer
Tremolith	$\text{Ca}_2\text{Mg}_3[(\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$	Amphibol	Grünschiefer, Prasinit, Aktinolithschiefer
Chrysotil	$\text{Mg}_3[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	Serpentin	Serpentin



■ Abb. 3.2 Asbestminerale im Rasterelektronenmikroskop (Maßstab 1:10.000) (Foto G. Friedl)

Atmosphäre – Einiges, was man wissen sollte

- Die atmosphärische Luft der unteren Troposphäre besteht zu ca. 78 Vol.-% aus Stickstoff, zu ca. 21 Vol.-% aus Sauerstoff und zu knapp 1 Vol.-% aus dem Edelgas Argon. Wichtige Spurenstoffe sind Kohlendioxid (ca. 400 ppm), sonstige Edelgase (ca. 25 ppm), Methan (ca. 1,7 ppm), Wasserstoff (0,5 ppm) und Ozon (bis 100 ppb) sowie wechselnde

Gehalte an Stickstoffoxiden (0,5 ppm, vorwiegend N_2O).

- Die Konzentrationen der Hauptkomponenten unterliegen etwa seit der Besiedelung der Landoberflächen durch Pflanzen ab dem Karbon nur mehr geringen Änderungen. Dagegen schwanken die Gehalte an Spurenstoffen im Verlauf der Erdgeschichte immer wieder deutlich.

- Natürliche Klimaschwankungen sind auf periodische Variationen einiger Erdbahnparameter (Milanković-Zyklen) zurückzuführen. Thermohaline Meeresströmungen und die Lage der kontinentalen Landmassen haben ebenfalls großen Einfluss auf das Klimageschehen.
- Seit den 1950er Jahren werden die CO₂-Gehalte der Atmosphäre kontinuierlich erfasst. Seither ist ein Anstieg der CO₂-Konzentration von ca. 310 auf knapp unter 400 ppm festgestellt worden. Derzeit steigen die CO₂-Gehalte jährlich um durchschnittlich 1,3 bis 1,5 ppm. Die Freisetzung dieses und weiterer klimawirksamer Gase durch menschliche Aktivitäten wird für aktuell beobachtbare Klimaschwankungen verantwortlich gemacht.
- Anthropogen freigesetzte Luftschadstoffe können in partikulärer Form (Aerosolpartikel) oder gasförmig auftreten. Sie können in ihrer Wirkung reaktiv, klimawirksam oder toxisch sein. Anthropogen emittierte Aerosole machen ca. 10 % der jährlichen Aerosolproduktion in der unteren Troposphäre aus. Gasförmige Schadstoffe wie SO₂ oder NO_x sind Säurebildner. Ihre Freisetzung wirkt sich auf die Beschaffenheit der Niederschlagswässer aus.
- Bestimmte petrologisch-mineralogische Eigenschaften von Gesteinen führen zu geogenen Luftbelastungen mit einem erheblichen Gefährdungspotenzial für das Schutzgut „menschliche Gesundheit“. So kann die Freisetzung des Radonisotops ²²²Rn aus kristallinen Gesteinen zu Erkrankungen durch radioaktive Strahlung führen. Die Freisetzung lungengängiger Asbestminerale ist ein erhebliches Problem für den Arbeitnehmerschutz im Tunnelbau.

2. Erläutern Sie den Schichtaufbau der Atmosphäre und die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Schichten.
3. Was versteht man unter den Milanković-Zyklen? Beschreiben Sie einen der drei periodisch auftretenden Effekte und seine Wirkung auf das Klima.
4. Warum geht die Wissenschaft davon aus, dass heute beobachtbare Klimaveränderungen auch anthropogen bedingt sind? Welche anthropogenen Prozesse wurden als klimawirksam erkannt?
5. Beschreiben Sie anhand eines Beispiels, wie sich anthropogene Emissionen auf die Luftqualität auswirken können. Was versteht man in diesem Zusammenhang unter dem Begriff „ubiquitäre Schadstoffe“?
6. In den 1980er und 1990er Jahren waren „saurer Regen“ und das daraus resultierende „Waldsterben“ ein großes umweltpolitisches Thema. Erläutern Sie, welche Prozesse zur Versauerung des Regens beitragen und wie diesen seither begegnet wird.
7. Erläutern Sie die Problematik, die sich aus der jahrzehntelangen Freisetzung synthetischer Substanzen ergeben hat, die man unter dem Sammelbegriff FCKW zusammenfasst. Wie sind diese Stoffe in Bezug auf ihre Schadwirkung in der Atmosphäre zu klassifizieren?
8. Beschreiben Sie anhand von Beispielen, wie sich die geologischen Verhältnisse auf die Luftqualität auswirken können und wie in diesem Fall die geologische Expertise dazu beitragen kann, Beeinträchtigungen für die menschliche Gesundheit zu vermeiden.

Testfragen zum Kapitel Atmosphäre

1. Beschreiben Sie die Entwicklung der Erdatmosphäre von der Frühzeit der Erde bis heute. Welche Faktoren haben bei der Entwicklung der Lufthülle eine Rolle gespielt?

Literatur

- Friedmann H, Breitenhuber L, Hamernik E, Hofmann W, Kaineder H, Karg V, Kindl P, Lettner H, Seiberl W, Sperker S, Stadtmann H, Steger F, Steinhäusler F, Tschurlovits M (1999) Das österreichische Radonprojekt. Mitt Österr Geol Ges 88:15–24
- Heinrichs H, Brumsack H-J (1997) Anreicherung von umweltrelevanten Metallen in atmosphärisch transportierten Schwebstäuben aus Ballungszentren. In: Matschullat J,

Literatur

- Tobschall HJ, Voigt H-J (Hrsg) Geochemie und Umwelt – Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre. Springer, Heidelberg
- Huch M, Geldmacher H (Hrsg) (2001) Umweltgeochemie in Wasser, Boden und Luft – geogener Hintergrund und anthropogene Einflüsse. Gesellschaft für UmweltGeowissenschaften. Springer Verlag, Heidelberg
- IPCC (2014) Intergovernmental Panel on Climate Change – Fifth Assessment report (AR5). <http://www.ipcc.ch/index.htm>. Zugegriffen: 13.08.2014
- Kralik M (2000) Environmental Geology in Austria. Mitt Österr Geol Ges 92:331–335
- Kraus H (2004) Die Atmosphäre der Erde – eine Einführung in die Meteorologie. Springer, Berlin
- Laurency P (2013) Funktionen wirkungsschwacher Klimaschutzabkommen – Ursachen und Strategien der kontrafaktischen Stabilisierung politischer Zielerwartungen am Beispiel des UN-Klimaschutzregimes. Springer VS, Wiesbaden
- Matschullat J, Kritzer P (1997) Atmosphärische Deposition von Spurenelementen in Reinluftgebieten. In: Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (Hrsg) Geochemie und Umwelt – Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre. Springer Verlag, Heidelberg
- Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (Hrsg) (1997) Geochemie und Umwelt – Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre. Springer Verlag, Heidelberg
- Merritts D, De Wet A, Menking K (1998) Environmental Geology, An Earth System Science Approach. W. H. Freeman and Company, New York
- Oberthür S, Ott HE (2000) Das Kyoto-Protokoll. Springer VS, Wiesbaden
- Pleßow K, Heinrichs H (2000) Anthropogene Spurenelemente in Aerosolen industrie- und verkehrsferner Gebiete. In: Huch M, Geldmacher H (Hrsg) Umweltgeochemie in Wasser, Boden und Luft. Springer Verlag, Heidelberg
- Purtscheller F, Stingl V, Tessadri R, Mair V, Pirchl T, Sieder G, Brunner P, Schneider P, Ennemoser O (1999) Geologisch-petrographische Ursachen der Radonanomalie in Umhausen (Tirol). Mitt Österr Geol Ges 88:7–14
- Roedel W, Wagner Th (2011) Physik unserer Umwelt: die Atmosphäre. Springer, Heidelberg
- Schwedt G (1996) Taschenatlas der Umweltchemie. Thieme Verlag, Stuttgart

Hydrosphäre

Sylke Hilberg

- 4.1 **H₂O – ein sehr spezielles Molekül – 46**
- 4.2 **Wasserkreislauf – 48**
- 4.3 **Niederschlag – 51**
- 4.4 **Bodenwasser – 54**
- 4.5 **Grundwasser – 55**
- Literatur – 60**

Kurzfassung

Mit dem Begriff Hydrosphäre wird jener Bereich des Gesamtsystems Erde beschrieben, in dem Wasser zirkuliert bzw. der vom Wasser maßgebend geprägt wird. 70,8% der Erdoberfläche sind von Wasser in Form von Ozeanen bedeckt. Das Salzwasser der Weltmeere bildet jedoch aufgrund seiner vergleichsweise großen Mächtigkeit von durchschnittlich gut 3700 m 96,5% der globalen Wasserreservoirs. Ca. 3% der Erdoberfläche sind von Eis bedeckt, wobei die im Eis gebundene Wassermenge ca. 1,76% des gesamten Wassers der Erde ausmacht. Ein Anteil von 3,8% der global zirkulierenden Wassermenge befindet sich unter der Erdoberfläche als Grundwasser. Nur geringe Anteile von etwa 0,013% liegen als fließende oder stehende Süßwasservorkommen an der Oberfläche vor. Zudem zirkulieren Wasser oberhalb der Erdoberfläche fest, flüssig oder gasförmig in der Atmosphäre und als Bodenlösung in den obersten Schichten des Untergrundes oder sind in lebende Organismen – in der Biosphäre – eingebaut. Wasser weist im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten einzigartige chemisch-physikalische Eigenschaften auf, die seine außerordentliche Bedeutung innerhalb des globalen Systems ausmachen.

Zwischen Atmosphäre, Oberflächengewässern und Grundwasser finden Übergänge statt, die von den speziellen Eigenschaften des Wassers sowie von der Gravitation gesteuert werden. Dieses Kapitel beschreibt die Prozesse innerhalb des globalen Wasserkreislaufs und in typischen regionalen Wasserkreisläufen vor allem unter dem Aspekt der Wasserbeschaffenheit. Im Einzelnen werden folgende Fragen diskutiert: Was passiert mit dem Wasser bei der Verdunstung über einer Wasserfläche? Was passiert beim Transport der Luftfeuchtigkeit von den Küsten ins Landesinnere? Welche Fraktionierungsprozesse finden beim Ausregnen statt und welche beim Übergang von der Erdoberfläche in die ungesättigte Zone? Schließlich werden die natürlichen Prozesse innerhalb von ungesättigter Zone und Grundwasserkörpern beleuchtet.

4.1 H₂O – ein sehr spezielles Molekül

Das Wassermolekül besteht aus nur zwei Elementen: Wasserstoff und Sauerstoff. Es sind hier zwei Wasserstoffatome mit einem Sauerstoffatom über

kovalente Bindungen verknüpft. Die Besonderheit des Wassermoleküls, vor allem im Vergleich zu anderen ähnlichen Substanzen, ergibt sich jedoch nicht vornehmlich aus seiner Zusammensetzung sondern aus der Geometrie des Moleküls. Hier sind die Atome nicht kettenförmig aneinander gereiht, sondern bilden ein Dreieck mit einem Winkel von 104,5°. Es entsteht damit ein Dipolmolekül mit einer negativen Ladung beim Sauerstoff und einer positiv geladenen Seite beim Wasserstoff. Dieser Dipolcharakter des Wassermoleküls führt dazu, dass sich Wassermoleküle immer wieder zu kurzlebigen Clustern zusammenfinden und damit Eigenschaften ausbilden, die eigentlich für wesentlich größere Moleküle charakteristisch wären.

Zu diesen besonderen Eigenschaften (siehe **Tab. 4.1**) gehört die große Oberflächenspannung, die sich z. B. in der Ausbildung von Tropfen zeigt oder auch der hohe Schmelz- und Siedepunkt des Wassers. Die Phasenübergänge finden damit bei wesentlich höheren Temperaturen statt als dies bei anderen Flüssigkeiten vergleichbaren Molekulargewichts der Fall ist. So weist z. B. Ammoniak mit der Zusammensetzung NH₃ und einem Molekulargewicht von 17 g mol⁻¹ einen Siedepunkt von -33 °C und einen Schmelzpunkt von -78 °C auf. Die etwas schwerere Fluorwasserstoffsäure (HF) mit einem Gewicht von 20 g mol⁻¹ hat ihren Siedepunkt bei +20 °C und den Schmelzpunkt bei -83 °C.

Der Dipolcharakter des Wassers ist zudem für seine Fähigkeit zur Lösung anderer Molekülstrukturen durch Hydrolyse verantwortlich. Durch die Anlagerung der geladenen Wasserteilchen an Moleküle werden diese in ihre ionischen Bestandteile, also in Kationen und Anionen aufgelöst, also hydrolysiert. Wasser stellt damit eines der besten und gleichzeitig das häufigste Lösungsmittel in der Natur dar.

Die Eigenschaft des Wassers als Dipol führt außerdem dazu, dass sich Wassermoleküle an geladenen Oberflächen anlagern können. Substanzen, die eine Oberflächenladung aufweisen, werden auch als hydrophil, also wasserliebend bezeichnet. Böden und die meisten Gesteine weisen aufgrund der geladenen Oberflächen der Minerale hydrophile Eigenschaften auf. Hier können Wassermoleküle in Poren an den Oberflächen von Mineralkörnern angelagert (adsorbiert) und entgegen ihrer gravitativen bedingten Abwärtsbewegung festgehalten werden.

■ Tab. 4.1 Einige wichtige Eigenschaften des Wassers (Angaben bei Atmosphärendruck und 20 °C)

Eigenschaft	Einheit	Wert
Molmasse	[g mol ⁻¹]	18,0153
Dichte	[g cm ⁻³]	0,998203
Siedepunkt	[°C]	99,97
Schmelzpunkt	[°C]	0,00
Oberflächenspannung	[N m ⁻¹]	0,07
Dynamische Viskosität	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]	0,95 · 10 ⁻³
Wärmekapazität	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	4184
Kompressibilität	[m ² N ⁻¹]	4,8 · 10 ⁻¹⁰
Löslichkeit		Gut in polaren Lösungsmitteln

Bis zu einem gewissen Grad kann Wasser sich auch selbst in Wasser lösen. Man spricht bei diesem Vorgang von der Eigendissoziation des Wassers. Es entstehen H₃O⁺ (vereinfacht H⁺) und OH⁻ Ionen. Wasser kann dadurch sowohl als Säure (Protonendonator H₃O⁺) als auch als Base (Protonenakzeptor OH⁻) reagieren. Die Eigendissoziation des Wassers erfolgt nach thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Vertiefende Betrachtungen hierzu finden sich z. B. in Appelo und Postma (2006) oder Merkel und Planer-Friedrich (2008).

In reinem Wasser liegt eine definierte Menge an dissoziierten Wasserteilchen im Vergleich zur Gesamtwassermenge vor. Bezogen auf eine definierte Wassermenge von einem Liter liegen in der neutralen Lösung 10⁻⁷ mol H⁺- und die gleiche Menge OH⁻-Ionen vor. Die Konzentration an H⁺ und OH⁻ wird vereinfacht als pH-Wert angegeben, dargestellt als der negative Logarithmus der H⁺-Ionenkonzentration. Der pH-Wert einer neutralen Lösung beträgt damit 7. Wird durch andere gelöste Inhaltsstoffe des Wassers das Verhältnis zwischen H₃O⁺- und OH⁻-Ionen zugunsten der H₃O⁺-Ionen verschoben, erhöht sich deren Konzentration und der pH-Wert sinkt. Gleichzeitig nimmt der Anteil an OH⁻-Ionen ab. Die thermodynamisch bedingte Dissoziationskonstante beträgt bei 20 °C und Atmosphärendruck 10⁻¹⁴ mol l⁻¹.

Eine weitere besondere Eigenschaft des Wassers ist jene der Dichteanomalie. Wasser besitzt seine

größte Dichte bei einer Temperatur von 4 °C. Bei weiterer Abkühlung und schließlich dem Übergang in die Festphase nimmt die Dichte aufgrund des im Eis festgelegten Gitters wieder ab, sein Volumen nimmt um knapp 9 % zu. Dieser Umstand führt dazu, dass eingefrorene Wasserleitungen bersten und Eis immer auf der Oberfläche schwimmt bzw. Gewässer von oben nach unten zufrieren. Dies ist eine Tatsache, die uns aus dem täglichen Leben bekannt ist und selbstverständlich erscheint. Nach physikalischen Gesichtspunkten ist diese Eigenschaft jedoch außergewöhnlich und wäre ohne die besondere Geometrie des Wassermoleküls nicht der Fall.

Als letzte besondere Eigenschaft des Wassers ist seine hohe Wärmekapazität und damit verbunden die hohe Schmelz- und Verdampfungswärme zu nennen. Um einen Liter Wasser um ein Grad Kelvin zu erwärmen, ist mehr Energie erforderlich als bei allen anderen Flüssigkeiten. Umgekehrt eignet sich Wasser daher sehr gut als Wärme- bzw. Energiespeicher. Diesem Umstand kommt beispielsweise bei der energetischen Nutzung des Grundwassers zu Kühl- oder Heizzwecken (siehe ► Kap. 11) immer größere praktische Bedeutung zu.

Im Wassermolekül können verschiedene Isotope der beteiligten Elemente auftreten wie im ► Exkurs 4.1 näher erläutert wird.

Exkurs 4.1 Isotopenhydrologie

Die am Wassermolekül beteiligten Atome Wasserstoff und Sauerstoff kommen zu 99,99% bzw. 99,76% in Form des ^1H -Isotops und des ^{16}O -Isotops vor. Das heißt, die große Mehrheit aller Wasserstoffatome hat nur ein Proton und kein Neutron in seinem Kern, im Sauerstoffatom stehen den 8 Protonen auch 8 Neutronen im Kern gegenüber. Neben diesen häufigsten Isotopen der beiden Elemente des Wassers gibt es jedoch auch andere weitaus seltenere Isotope, wie das ^2H -Isotop (Deuterium mit einem Neutron) des Wasserstoffs oder das ^{18}O -Isotop des Sauerstoffs, das neben 8 Protonen 10 Neutronen im Kern aufweist. Diese Isotope verhalten sich chemisch gleich wie ihre weitaus häufiger auftretenden Verwandten,

unterscheiden sich jedoch in ihren physikalischen Eigenschaften. So verdunstet das leichtere ^{16}O -Isotop schneller als das schwerere ^{18}O -Isotop, was dazu führt, dass bei der Verdunstung in der verbleibenden flüssigen Wasserphase ^{18}O im Vergleich zur natürlichen Verteilung angereichert wird, in der verdunsteten Gasphase dagegen in geringerer Konzentration vorliegt. Im Isotopenverhältnis von Niederschlägen oder auch von Oberflächen- und Grundwässern spiegeln sich damit die Temperaturverhältnisse bei der Verdunstung bzw. die Vorgeschichte dieser Wässer wider. Verdunstung bei kälteren Temperaturen führt zu isotopisch leichteren Niederschlagswässern, bei wärmeren zu einem vergleichsweise größeren Anteil an

schweren Isotopen. Daraus ergeben sich Effekte, die auf die Höhe, die Jahreszeit oder das Klima bei der Bildung von Niederschlägen schließen lassen und damit Rückschlüsse auf die Bildungsbedingungen bzw. die Einzugsgebiete von Brunnen und Quellwässern ermöglichen. Aufgrund der immer geringer werdenden Konzentrationen von schweren Isotopen beim Transport von Luftfeuchtigkeit von Ozeanen über die Kontinente lassen sich zudem globale Luftströmungen rekonstruieren. Vertiefende Informationen zur Isotopenhydrologie liefern z. B. Moser und Rauert (1980), Clark und Fritz (1997), Mook (2006), Etcheverry und Vennemann (2009) oder Ferronsky und Polyakov (2012).

4.2 Wasserkreislauf

Das Wasser in der Atmosphäre, auf der Erdoberfläche und in den oberflächennahen Schichten der Erdkruste unterliegt einer ständigen Bewegung in Form eines Kreislaufs von Verdunstung, Transport, Kondensation, Niederschlag, neuerlichem Transport, Versickerung, Wiederaustritt und wiederum Transport und Verdunstung. Die Prozesse der Phasenübergänge werden durch Sonneneinstrahlung und Temperaturunterschiede, jene des Transports von atmosphärischen Potenzialdifferenzen (Luftströmungen) und der Schwerkraft bzw. in den Ozeanen durch thermosalinare bedingte Potenzialunterschiede gesteuert. Sie laufen in verschiedensten räumlichen und zeitlichen Skalen ab. Der globale Wasserkreislauf, der die Ozeane, die Kontinente und die weltumspannende Atmosphäre betrifft, kann als geschlossenes System ohne bedeutende Zu- oder Abnahme der absoluten Wassermenge gesehen werden. Dieses System wird quantitativ über die hydrologische Grundgleichung (Gl. 4.1) beschrieben:

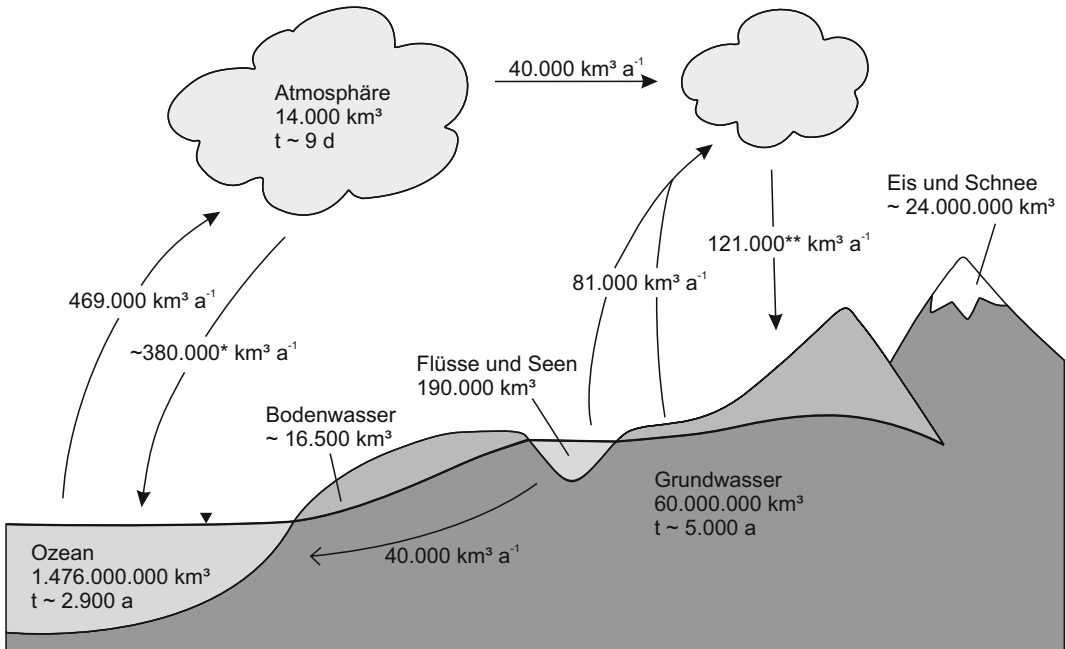
$$N = V + A \quad (4.1)$$

N = Niederschlag
 V = Verdunstung
 A = Abfluss

Geringe Mengen an sogenanntem juvenilem Wasser, das im Zuge vulkanischer Ereignisse aus tieferen Bereichen der Erdkruste auch heute noch in den oberflächennahen Wasserkreislauf eindringt, kann aufgrund seiner vergleichsweise geringen Mengen vernachlässigt werden. Wassermengen, die in den obersten Atmosphärenschichten zirkulieren und aus dem Atmosphärenbereich austreten, werden durch solche, die durch kosmische Ereignisse auf die Erdoberfläche gebracht werden, in etwa gleichem Ausmaß ersetzt, wirken sich daher quantitativ nicht aus.

Neben dem globalen geschlossenen Kreislauf (Abb. 4.1), finden regionale und lokale und damit meist auch wesentlich kurzfristigere Prozesse statt, die vom globalen Einfluss überlagert werden. Zum Verständnis des Gesamtsystems müssen daher je nach Fragestellung immer sowohl die globalen, langfristigen als auch die regionalen oder lokalen kurzfristigen Einflüsse berücksichtigt werden.

Die zeitlichen Skalen, in denen der Wasserumsatz stattfindet, liegen in Abhängigkeit von der räumlichen Ausdehnung und dem Ausbreitungsmedium im Bereich von Stunden bis zu Jahrtausenden. Grundwässer in tieferen Bereichen der Erdkruste verbleiben hier über lange geologische Zeiträume. So wurde z. B. im Jahr 2013 in einer kanadischen Kupfer- und Zinkmine in 2,4 km Tiefe Grundwasser



■ **Abb. 4.1** Mengen und Zeitspannen des globalen Wasserumsatzes (Daten zum Wasserumsatz nach Marcinek 2011) * Niederschlag bezogen auf globale Meeresoberfläche von $361,1 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, ** Niederschlag bezogen auf globale Landfläche von $148,9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$

erbohrt, welches mit Hilfe von Isotopen- und Edelgasanalytik auf ein Alter von mindestens eineinhalb Milliarden Jahren datiert wurde (Holland et al. 2013). Das heißt, dass sich dieses Wasser seit mindestens eineinhalb Milliarden Jahren im Untergrund aufhält und keinen Kontakt mehr zur Atmosphäre hatte.

Abschätzungen zur globalen Wasserhaushaltsbilanz in den Systemen werden seit ca. 100 Jahren von zahlreichen Autoren angestrengt (z. B. Brückner 1905, Korzun 1978, Baumgartner und Reichel 1975, Baumgartner und Liebscher 1990, Klige 2000). Die Wasservorkommen, deren Verteilung auf die verschiedenen Kompartimente sowie die durchschnittliche globale Verweilzeit der Wasser lässt sich zumindest in ihrer Größenordnung abschätzen. So weiß man heute, dass die Wasser in der Atmosphäre durchschnittlich alle neun Tage vollständig erneuert werden, während jene der Ozeane eine Verweilzeit von durchschnittlich ca. 3000 Jahren aufweisen. Die teilweise signifikant voneinander abweichenden Zahlenwerte der verschiedensten aktuellen Abschätzungen zeigen jedoch die noch immer bedeutende Unsicherheit in der Erfassung des globalen Wasserumsatzes. In ■ **Abb. 4.1** sind

aktuelle Daten zum globalen Wasserumsatz dargestellt. Im Hinblick auf den Klimawandel und der damit prognostizierten Intensivierung des Wasserkreislaufs sind die hier angegebenen Zahlen nur als Momentaufnahme zu betrachten. Bisher zeigen jedoch auch neuere Klimamodelle keine signifikanten Unterschiede zu den Berechnungen für das Ende des 20. Jahrhunderts (Jäger et al. 2006).

Dem Wesen eines Kreises entsprechend, kann auch der Wasserkreislauf generell nicht von einem Anfang bis zu einem Ende beschrieben werden. Wir lassen die Abläufe daher willkürlich mit der Evaporation (Verdunstung) über freien Wasseroberflächen beginnen.

Je nach räumlicher Skala kann dies die Oberfläche eines Ozeans, eines Sees, eines Flusses oder auch einer Wasserpfütze sein. Das als Wasserdampf in die Atmosphäre aufsteigende Wasser wird mit der vorherrschenden Luftströmung abtransportiert, bis es Temperatur- und Druckzonen erreicht, in denen es kondensiert oder sogar gefriert. Die flüssige oder feste Wasserphase fällt als Niederschlag auf die Erde (Regen, Tau, Reif, Hagel oder Schnee). Das Wasser verdunstet teilweise bereits im freien Fall des Regen-

tropfens oder nachdem es auf der Erde aufgetroffen ist. Dabei kann es direkt von einer Wasseroberfläche, der freien oder bewachsenen Erdoberfläche oder von der Oberfläche von Pflanzen verdunsten.

Derjenige Niederschlagsanteil, der nicht verdunstet, wird als oberirdischer Abfluss zum nächsten Gewässer transportiert oder versickert im Untergrund. Während der verdunstete Anteil des Niederschlags direkt wieder an weiteren Niederschlagsereignissen teilnehmen kann, werden oberirdisch abfließende Wässer über die Vorflut letztendlich wieder zum Meer transportiert. Vergleichsweise länger dauert der Transport der unterirdisch abfließenden Wässer, die sich zunächst in der ungesättigten (als Sickerwasser) dann in der gesättigten (als Grundwasser) Zone aufhalten, weiter zu Oberflächengewässern transportiert werden und schließlich ebenfalls wieder im Hauptvorfluter Meer landen. Auf diesem Weg können mehrfache Übergänge zwischen Oberflächen- und Grundwasserregimen erfolgen. Es kann zu Quellaustritten und Versickerungen kommen. Schließlich gelangen sowohl Grund- als auch Oberflächenwässer zum Meer und der Kreislauf beginnt erneut.

Diese sehr grobe und kurze Beschreibung möglicher Prozesse innerhalb des Wasserkreislaufs zeigt bereits, dass es sich um einen vielschichtigen und komplexen Ablauf handelt, der an zahlreichen Stellen unterbrochen, abgekürzt oder auch verlängert werden kann. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, kann die hydrologische Grundgleichung um den zeitlichen Aspekt erweitert werden, indem der Abfluss in unter- und oberirdischen Abfluss unterteilt wird und beim unterirdischen Abfluss die Größen Rücklage und Verbrauch in einem definierten Zeitraum, wie zum Beispiel einem Jahr, berücksichtigt werden.

Die modifizierte Gleichung lautet dann:

$$\mathbf{N} = \mathbf{V} + \mathbf{A_o} + \mathbf{A_u} \quad (4.2)$$

A_o = oberirdischer Abfluss

A_u = unterirdischer Abfluss

Wobei:

$$\mathbf{A_u} = \mathbf{R} - \mathbf{B} \quad (4.3)$$

R = Rücklage

B = Verbrauch

Treten Wässer von einem kürzeren in ein längerfristiges System ein, sinken z. B. in tiefere Grundwasserhorizonte ab, werden sie dem kurzfristigen Kreislauf entzogen (Verbrauch) und einem längerfristigen zugeführt (Rücklage). Nur auf sehr lange Zeiträume und globale Beobachtungsgebiete bezogen, handelt es sich nun um ein geschlossenes System und die hier dargestellten Mengen- und Zeitangaben (■ Abb. 4.1) sind zutreffend. Für regionale oder lokale Fragestellungen muss jeweils das betroffene Einzugsgebiet in Form einer regionalen oder lokalen Wasserhaushaltsbilanz erfasst und bewertet werden.

Am Beispiel des Alpenraums haben Linger et al. (1998) im Vergleich mit Europäischen Flachlandgebieten gezeigt, welchen Einfluss die Topographie einer Region auf die Prozesse des Wasserkreislaufs hat. So fallen im Alpenraum z. B. durchschnittlich 1460 mm Niederschlag pro Jahr (zum Vergleich: globaler Niederschlag über Landflächen 817 mm a⁻¹, ■ Abb. 4.1), der sich zu etwa zwei Dritteln (980 mm a⁻¹) auf Oberflächenabfluss und einem Drittel (460 mm a⁻¹) auf Verdunstung aufteilt. Im Vergleich fallen im Europäischen Flachland nur durchschnittlich 780 mm Niederschlag pro Jahr, die zu etwa zwei Dritteln (510 mm a⁻¹) als Verdunstung wieder in die Atmosphäre aufsteigen und nur zu etwa einem Drittel (270 mm a⁻¹) den Oberflächenabfluss speisen.

Zur Ermittlung von Informationen über Niederschlag und Verdunstung innerhalb einer Region stehen Klimastationen zur Verfügung, die neben den Niederschlagsmengen auch die Lufttemperatur und Windsituation kontinuierlich aufzeichnen. Zur Ermittlung des Oberflächenabflusses aus einem Gebiet wurde für wasserwirtschaftliche Fragen eine Vielzahl von Methoden zur Bestimmung von Durchflussmengen in Oberflächengerinnen entwickelt. Einen detaillierten Überblick über die gebräuchlichsten Methoden gibt z. B. Morgenschweis (2010).

4.3 Niederschlag

Nach Berechnungen verschiedenster Autoren zirkulieren in der Atmosphäre etwa 14.000 km^3 Wasser. Die Wassermengen, die der Atmosphäre durch Niederschläge in flüssiger (Regen, Tau) und fester (Schnee, Hagel) Form entzogen werden, kommen an anderer Stelle im gleichen Zeitraum durch Verdunstung wieder dazu. Auf diese Weise erfolgt ein Umsatz des gesamten Atmosphärenwassers auf der Erde innerhalb von ca. neun Tagen (Marcinek 2011).

Bei der Verdunstung gehen Wassermoleküle mit einem geringen Anteil an Aerosolteilchen, also feinst verteilten Schwebeteilchen, in die Dampfphase über. Im Ausgangswasser gelöste Stoffe, wie Minerale, Salze oder organische Stoffe bleiben zum größten Teil im Restwasser zurück, das durch die Verdunstungsprozesse entsprechend aufkonzentriert wird. Die Feuchtigkeit in der Atmosphäre besteht also zunächst als gasförmiges, sehr gering mineralisiertes Wasser, das entsprechend den lokalen oder auch globalen Luftströmungen transportiert wird. Im Zuge der Transportprozesse werden in der Luftfeuchtigkeit weitere Stoffe gelöst, die sich ebenfalls in der Atmosphäre befinden. Hierbei kann es sich um Gase oder Stäube handeln, die dann mit dem Atmosphärenwasser transportiert werden. Entsprechend der Temperaturentwicklung in den verschiedenen Luftschichten der Atmosphäre kommt es zur Kondensation des Atmosphärenwassers und schließlich zum Niederschlag in Form von Regen, Schnee oder in selteneren Fällen Hagel. Die im Wasser gelösten Stoffe fallen als nasse Deposition aus.

Die Zusammensetzung natürlicher Niederschlagswässer wird dabei ganz wesentlich von der Aufnahme von CO_2 aus der Luft geprägt. Nach aktuellen Messungen liegt die durchschnittliche globale CO_2 -Konzentration der Atmosphäre bei etwa 400 ppm oder 0,04 Vol.-% (NOAA Research 2013). Im Wasser, das in der Atmosphäre zirkuliert, stellt sich entsprechend den Gesetzmäßigkeiten nach Henry (siehe ► [Exkurs 4.2](#)) ein Gleichgewicht mit den Atmosphärenkonzentrationen ein.

Durch die CO_2 -Lösung in der Atmosphäre verringert sich der pH-Wert des Wassers. Regenwasser weist im natürlichen Umfeld meist einen pH-Wert von etwa 5,5 auf und ist als schwach sauer zu be-

zeichnen. Die Gesamtmineralisation natürlicher Niederschlagswässer ist im Vergleich zu Grund- oder Oberflächengewässern gering und wird im Wesentlichen durch die in der Atmosphärenluft vorhandenen Stoffe beeinflusst. Sie wird über den Summenparameter der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit beschrieben. Je mehr Substanzen in Form von Anionen und Kationen im Wasser gelöst sind, umso größer ist die elektrische Leitfähigkeit des Wassers. Natürliche Wässer können elektrische Leitfähigkeiten von mehreren mScm^{-1} (Meerwasser, saline Wässer) aufweisen. In Niederschlagswässern werden üblicherweise elektrische Leitfähigkeiten gemessen, die bei Werten zwischen 5 und $20 \mu\text{Scm}^{-1}$ liegen.

In anthropogen beeinflussten Gebieten, die Luftemissionen aus Verkehr und Industrie aufweisen, kann die Zusammensetzung des Niederschlages, wenn auch auf geringem Konzentrationsniveau, deutlich verändert sein. Sehr häufig kommt es hier zu einer weiteren Absenkung des pH-Wertes z. B. durch Schwefelemissionen, die in Verbindung mit der Luftfeuchtigkeit schweflige Säure oder Schwefelsäure ergeben. Weitere Substanzen werden in größerer Menge gelöst und damit in die Niederschlagswässer eingebracht. Neben Hauptparametern wie Kalzium, Magnesium, Natrium, Kohlendioxid (CO_2) und den Schwefelverbindungen Sulfat (SO_4) oder Schwefeldioxid (SO_2) werden auch Spurenstoffe aus Industrieanlagen und Siedlungsräumen emittiert. Als Beispiel ist die Gruppe der leicht flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffe (LCKW, siehe ► [Kap. 2](#)) zu nennen, die ebenfalls im Niederschlag gelöst werden. Sie werden aufgrund bereits langjährig dokumentierter globaler Anstiege von Hydrogeologen bereits zur Bestimmung von Wasseraltern herangezogen.

Einer großen Öffentlichkeit wurde der weltweite Anstieg der Konzentrationen an Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) bekannt, die in den 1980er und 1990er Jahren als Auslöser einer bedrohlichen Vergrößerung des stratosphärischen Ozonloches ausgemacht wurden (siehe auch ► [Kap. 3](#)). Seit einem daraufhin erlassenen Produktionsverbot (international umgesetzt seit ca. 2000) stagnieren oder nehmen die Konzentrationen dieser Stoffe in der Luft und damit auch in den Niederschlägen wieder ab.

Exkurs 4.2 Henry-Gesetz

Das Gesetz von Henry besagt, dass bei konstanter Temperatur die Menge eines im Wasser gelösten Gases im Sättigungszustand in direktem Verhältnis zum Druck des über der Flüssigkeit stehenden Gases steht.

$$M_i = K_{hi} \cdot P_i \quad (4.4)$$

M_i = Menge des Gases i in der Lösung [mol \cdot kg $^{-1}$]

K_{hi} = Henry-Koeffizient des Gases i (bei definierter Temperatur)

P_i = Partialdruck des Gases i [kPa]

Das heißt, es wird an der Wasseroberfläche so viel Gas aus der Atmosphäre gelöst, bis die Sättigungskonzentration für dieses Gas im Wasser erreicht ist. Bei einer Veränderung der Umgebungsbedingungen (Druck, Temperatur) gerät das System ins Ungleichgewicht

und es kann entsprechend mehr Gas (bei Druckerhöhung) gelöst werden bzw. es kommt bei Verringerung des Drucks zu einer Entgasung – gelöstes Gas geht unter Blasenbildung wieder in die Gasphase über und entweicht.

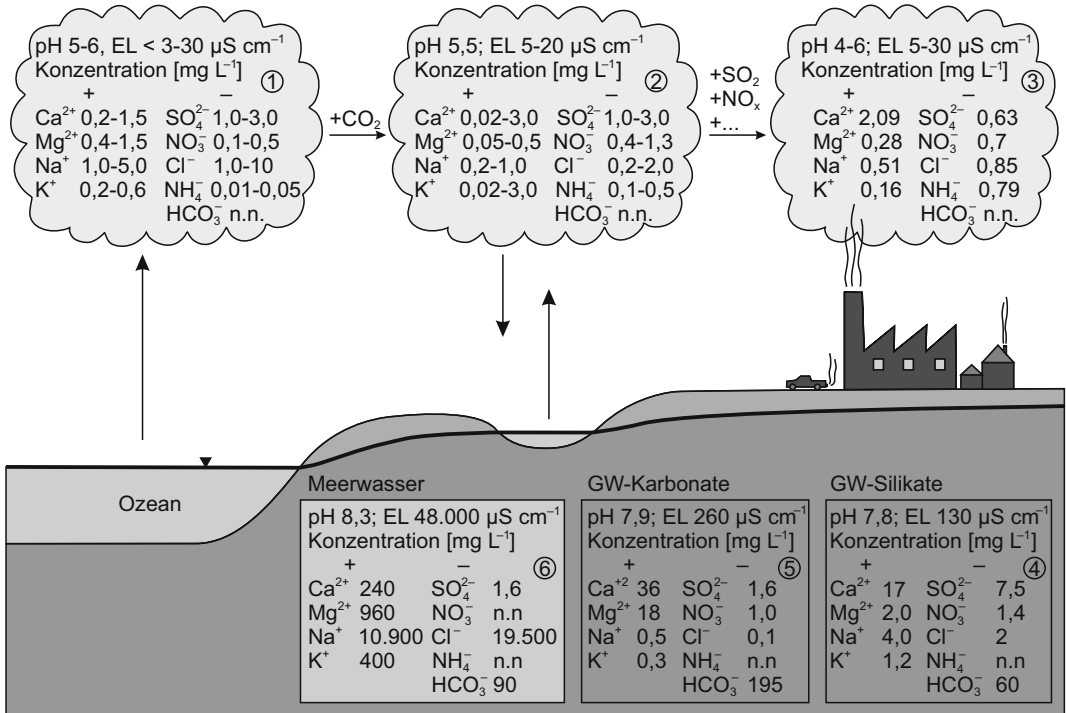
Dieser Effekt lässt sich sehr gut beim Öffnen einer Mineralwasserflasche beobachten. Die unter erhöhtem Druck im Wasser gelöste Kohlensäure ($H_2CO_3 \sim CO_2$) entspricht bei Atmosphärendruck einer Übersättigung. Bei einer Druckentlastung durch das Öffnen der Flasche stellen sich über der Flüssigkeit atmosphärische Druckbedingungen ein. Es bilden sich Gasblasen, die nach oben aus der Flüssigkeit entweichen. Dieser Vorgang setzt sich fort, bis der Gehalt an gelöster Kohlensäure in der Flasche den Partialdruckbedingungen der Atmosphäre entspricht. Das Mineralwasser wird in diesem

Zustand von vielen als abgestanden oder fade schmeckend empfunden. Vergleichbare Vorgänge finden auch in der Natur innerhalb von Grundwasserleitern statt. Druckveränderungen am Quellaustritt (entspricht physikalisch betrachtet dem Öffnen der Flasche) sind auf diese Weise für das Wachsen von Quelltuffen oder Tropfsteinen (Kalkausfällungen als Folge der CO_2 -Entgasung, **Abb. 4.2**) verantwortlich. Mehr zum Thema Kalklösung und -fällung ist im **Kap. 2** (CO_2 -Kreislauf) zu erfahren.

Wie viel einer gasförmigen Substanz im Wasser gelöst werden kann, wird durch den Henry-Koeffizienten beschrieben, der die Luft–Wasser-Verteilung (Verhältnis Partialdruck des Gases zu Konzentration im Wasser) für verschiedene Gase angibt.



Abb. 4.2 Quelltuffe und Tropfsteine als Folge der CO_2 -Entgasung an einem Quellaustritt in einer Karsthöhle.



■ **Abb. 4.3** Qualitative Entwicklung des Regenwassers bei Verdunstung, Versickerung sowie in ungesättigter und gesättigter Zone (Datensatz 1, 2 und 6 nach Walther 2005, Datensatz 3 nach Leder et al. 2003, Datensatz 4 Umweltbundesamt 2014, Datensatz 5 eigene Daten)

Trifft das Niederschlagswasser auf die Erdoberfläche auf, bestehen je nach Umgebungsbedingungen verschiedene Möglichkeiten der Weiterentwicklung. Wenn der Regen auf ebene Flächen auftrifft, die von Vegetation bedeckt sind, wird das Wasser teilweise von Pflanzen aufgenommen, verarbeitet und über die Pflanzenoberflächen wieder abgegeben (Evapotranspiration). Ein weiterer Teil des Niederschlagswassers verdunstet direkt von Pflanzenoberflächen (Interzeption) oder auch von freien Wasseroberflächen (Evaporation) wieder. Ein Teil des Wassers versickert im Untergrund (Perkolation) und wird zu Bodenwasser. In Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Untergrundes versickert Niederschlagswasser schnell oder langsam. Je schneller die Versickerung stattfinden kann, umso höher ist der Anteil des Sickerwassers am gesamten Wasserumsatz. Wenn der Regen auf natürlich oder künstlich versiegelte Oberflächen bzw. auf stark geneigte Flächen auftrifft, wird der größte Teil des Wassers oberflächlich in Richtung des nächsten Oberflächengewässers abgeleitet und verdunstet dabei

teilweise. Ein Übergang ins Bodenwasser findet in derartigen Umgebungen nur in sehr geringem Maße bis gar nicht statt.

Bei Verdunstungsprozessen geht ausschließlich das Wassermolekül in die Gasphase über, während die im Niederschlag gelösten Stoffe in der flüssigen Phase zurückbleiben. Die Konzentrationen an gelösten Stoffen nehmen entsprechend der Verdunstungsrate zu. Gehen beispielsweise 80 % des Niederschlags durch Verdunstung wieder in die Atmosphäre zurück, so steigen die Konzentrationen der gelösten Stoffe in der verbleibenden Lösung um das Fünffache an. Werden dabei Sättigungskonzentrationen einzelner Mineralphasen überschritten, so kommt es zu Ausfällungen von Mineralen. Das im Untergrund versickernde Regenwasser ist in Abhängigkeit von der Verdunstungsrate generell höher mineralisiert als das zuvor abgeregnete Niederschlagswasser.

Die qualitativen Prozesse, die zwischen Verdunstung und Versickerung stattfinden, sind in ■ **Abb. 4.3** dargestellt. Daraus geht auch eine bei-

spielhafte Entwicklung der Wasserzusammensetzung zwischen der Verdunstung über einer freien Wasseroberfläche und der Versickerung im Untergrund mit anschließender Grundwasserneubildung hervor. Die Zusammensetzung des anthropogen beeinflussten Regenwassers entspricht langjährigen Messungen von Regenwässern im Ballungsraum um Wien.

4.4 Bodenwasser

Unter Bodenwasser versteht man jene Wässer, die von der Oberfläche aus in den Untergrund versickern und innerhalb der ungesättigten Bodenzone im Wesentlichen vertikal fließen. In diesem Bereich der ungesättigten Bodenzone besteht kein zusammenhängender Wasserkörper.

Die durch Verdunstungsprozesse an der Oberfläche chemisch angereicherten Niederschlagswässer sinken zwischen den Körnern des Bodens in den Untergrund ab. Sie bewegen sich dabei im ungesättigten Porenraum, der sich zwischen den einzelnen Bodenkörnern befindet. Die Fließbewegung erfolgt entsprechend der Schwerkraft abwärts, wobei die geladenen Wassermoleküle mit den Oberflächenladungen der Körner interagieren und teilweise an diesen haften bleiben. Dieser Teil des Bodenwassers, der nicht gravitativ abwärts fließt, sondern an Oberflächen haftet, wird daher auch als Haftwasser bezeichnet und kann je nach Korngrößenzusammensetzung des Bodens einen erheblichen Anteil des Bodenwassers ausmachen. In sehr feinkörnigen Bodenarten (Ton, Schluff) kann der Haftwasseranteil bis zu 50 % des Porenvolumens ausfüllen, in grobkörnigeren Sand- oder Kiesböden beträgt er meist weniger als 5 % (Höfting und Coldewey 2013).

In der ungesättigten Bodenzone kann das Sickerwasser einerseits mit der Bodenluft, andererseits mit den Bodenkörnern hydrochemisch reagieren. Aufgrund der Bioaktivität im Boden und der damit verbundenen Wurzelatmung ist die Bodenluft gegenüber der Atmosphärenluft deutlich verändert. Neben einer Verringerung des Sauerstoffgehalts und einem Anstieg des Kohlendioxid-Gehalts (CO_2) können durch mikrobiologische Vorgänge auch Methan, Ammoniak, Stickoxide, Schwefelwasser-

stoff und Kohlenmonoxid in der Bodenluft auftreten.

Der CO_2 -Gehalt in natürlicher Bodenluft steigt in Abhängigkeit von der Vegetationsdecke und Temperatursituation und damit von der Bioaktivität im Boden auf das 10- bis 100-fache des Atmosphärengehaltes an, der sich in der Folge auf das Sickerwasser überträgt (Gesetz von Henry). Wie in ► Abschn. 4.3 für die chemischen Vorgänge der Gaslösung in der Atmosphäre beschrieben, werden im Boden bei höherem Partialdruck weitere Mengen an Gasen und dabei vornehmlich CO_2 gelöst. Diese Anreicherung mit CO_2 ist mit einer Verringerung des pH-Wertes verbunden. Die Folge ist ein größeres Lösungspotenzial der Bodenlösung hinsichtlich der verfügbaren Mineralphasen. Karbonatisch geprägte Böden bieten Kalzit (CaCO_3) als Lösungspartner, silikatisch geprägte Böden stellen Aluminiumsilikate als Lösungspartner zur Verfügung. Diese werden jedoch aufgrund ihrer geringeren Wasserlöslichkeit auch in geringerem Ausmaß im Grundwasser gelöst.

Das Wasser erhält folglich eine hydrochemische Prägung, die sich aus der Zusammensetzung des Bodens und den unterschiedlichen Löslichkeiten der bodenbildenden Minerale ergibt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass neben Bodenluft, Vegetationsdecke und Mineralzusammensetzung des Bodens auch die Faktoren Temperatur und Bodenfeuchte eine große Rolle bei der Entwicklung der Bodenlösung spielen. Auch mikrobielle Prozesse sowie anthropogene Einflüsse, wie die jeweilige Nutzung des Bodens, z. B. als Ackerboden, Weidefläche oder Waldboden, müssen bei der Charakterisierung von Böden zusätzlich Berücksichtigung finden.

Auswirkungen von Vegetation, anthropogenen Einträgen (z. B. aus der Düngung), der klimatischen Situation am Bodenstandort sowie der verschiedenen Bodentypen lassen sich durch Laboruntersuchungen, aber auch in situ (an Ort und Stelle) durch die Einrichtung von Saugkerzen (► Abb. 7.3) oder Lysimeteranlagen direkt im Feld untersuchen. Im Labor wird die Bodenlösung durch Verdrängungsverfahren oder Zentrifugieren aus der Bodenmatrix gelöst. In Feldanlagen, in denen die Situation im ungestörten Boden unter Einbeziehung klimatischer Einflüsse etc. untersucht werden kann, wird die

Bodenlösung nach einer definierten Sickerstrecke gesammelt und mengenmäßig wie auch qualitativ erfasst. Zur Methodik der Gewinnung von Bodenlösung wird auf das ► [Kap. 7](#) verwiesen.

Weiterführende Informationen zur Bodenlösung sind z. B. in Blume et al. (2013) zu finden.

4.5 Grundwasser

4.5.1 Was ist eigentlich Grundwasser?

Wie verschiedenste Studien zeigen, die an Schülern und Studierenden zum Wissen über Grundwasser durchgeführt worden sind (z. B. Reinfried et al. 2012), ist die Vorstellung von einem „See im Boden“ oder von „Wasseradern“ weit verbreitet. Nur in sehr speziellen Fällen, wie z. B. in verkarsteten Gebirgen, kann sich tatsächlich ein See im Gebirge bilden. Generell sind diese Vorstellungen aber sehr weit von der Realität entfernt. Die Teildisziplin innerhalb der Geowissenschaften, die sich mit dem Grundwasser und den grundwasserführenden Systemen beschäftigt, ist die Hydrogeologie.

Wenn das Bodenwasser die gesättigte Zone, also die Oberfläche eines zusammenhängenden Wasserkörpers erreicht, wird es zu Grundwasser. Unterhalb dieser Grundwasseroberfläche sind alle im Untergrund vorhandenen Hohlräume (Poren oder Klüfte) mit Wasser gefüllt, Bodenluft ist hier nahezu nicht mehr vorhanden.

Das Wasser folgt fortan einer generellen Grundwasserfließrichtung, entsprechend dem Gefälle der Grundwasseroberfläche, mit einer vertikalen und einer lateralen Komponente in Richtung eines Vorfluters, also des in Fließrichtung nächst gelegenen Oberflächengewässers. Dabei kommt es in Kontakt mit dem grundwasserführenden Gestein, das als Grundwasserleiter oder Aquifer bezeichnet wird. Schichten, die zu feinkörnig sind, um wasserführende Porenräume aufzuweisen oder Festgesteine, die keine offenen Klufthohlräume besitzen, können Grundwasser nur in sehr geringem Ausmaß bis gar nicht leiten. Sie werden daher als Grundwassergeringleiter, Grundwasserhemmer oder Aquitarde bezeichnet.

Wie viel und wie schnell Wasser im Untergrund zirkuliert, hängt vor allem von der Durchlässigkeit

des Grundwasserleiters ab. Für das Fließen von Fluiden in porösen Medien, also z. B. Wasser in einer Lockergesteinsschicht, wird diese Durchlässigkeit mit dem Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert, angegeben in m s^{-1}) quantitativ beschrieben. Das Gesetz von Darcy stellt den Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit eines porösen Mediums, Fließgefälle und Wassermenge, die durch einen definierten Querschnitt in einer definierten Zeit fließen kann, her (► [Abb. 4.4](#)).

$$Q = A \cdot k_f \cdot I \quad (4.5)$$

Q = Wassermenge [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]

A = durchflossener Querschnitt eines porösen Mediums [m^2]

k_f = Durchlässigkeit des porösen Mediums für fluide Phasen [m s^{-1}]

I = Fließgefälle

$I = h/l$ (h = Höhendifferenz [m], l = Fließstrecke [m])

Wobei:

$$k_f = k_0 \cdot (\rho \cdot g) / \eta \quad (4.6)$$

k_0 = Permeabilität, spezifische Durchlässigkeit des Aquifers [m^2] → Gesteinseigenschaft

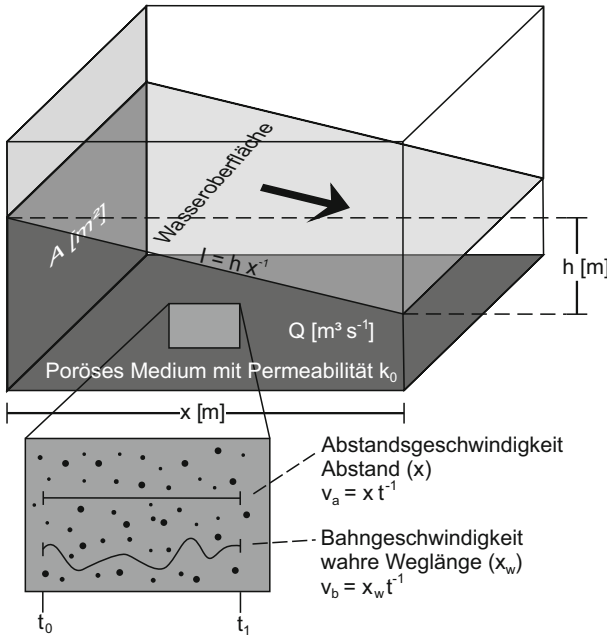
ρ = Dichte der Flüssigkeit [kg m^{-3}] → Fluideigenschaft

g = Erdbeschleunigung [$9,81 \text{ m s}^{-2}$]

η = dynamische Viskosität der Flüssigkeit [kg m^{-2}] → Fluideigenschaft

Die Gesteinseigenschaft „Permeabilität“ eines Grundwasserleiters wird von seiner Porosität bestimmt, die sich aus den vorhandenen Korngrößen und der Ungleichförmigkeit, mithin der Korngrößenverteilung, ergibt. Die Fluideigenschaften Dichte und dynamische Viskosität variieren im Grundwasser nur unwesentlich, so dass die Durchlässigkeit für Grundwasser vor allem durch die Permeabilität des Aquifers gesteuert wird.

Für die Beschreibung von Fließprozessen in geklüfteten Gesteinen sind das Darcy-Gesetz und damit das Konzept des k_f -Wertes nur eingeschränkt anwendbar, wenn es auch in der Praxis häufig zur Quantifizierung des Fließgeschehens in Festgesteinen herangezogen wird.



■ **Abb. 4.4** Gesetz von Darcy, Bahngeschwindigkeit und Abstandsgeschwindigkeit

Zur Beschreibung der Fließbewegung im Grundwasserkörper werden die Bahngeschwindigkeit, die Abstandsgeschwindigkeit (■ **Abb. 4.4**) und die Filtergeschwindigkeit unterschieden. Die Filtergeschwindigkeit ist eine rechnerische Größe und keine wirkliche Geschwindigkeitsangabe. Sie sollte daher besser als spezifischer Durchfluss bezeichnet werden. Sie ergibt sich aus der Porosität des Mediums, den Fluideigenschaften und dem hydraulischen Gefälle.

Bahngeschwindigkeit und Abstandsgeschwindigkeit beschreiben dagegen tatsächliche Geschwindigkeiten von Wasserteilchen innerhalb des Aquifers. Als Bahngeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit einzelner Wasserteilchen auf ihrem tatsächlichen Weg zwischen den Körnern bezeichnet. Im Allgemeinen ist es nicht möglich, diese Geschwindigkeit zu erfassen, zumal sie für jedes einzelne Wasserteilchen innerhalb des Grundwasserkörpers variieren kann. Vergleichsweise leicht zu bestimmen und von großer praktischer Relevanz in der Hydrogeologie ist dagegen die Abstandsgeschwindigkeit. Sie wird definiert über die Zeitspanne, die das Wasser für die einfache Distanz zwischen zwei in Fließrichtung untereinander angeordneten Punkten im Aquifer benötigt. Diese Geschwindigkeit ist vor allem im Zusammenhang

mit der Festlegung von Brunnen- oder Quellschutzgebieten von besonderer Relevanz. Übliche Abstandsgeschwindigkeiten in Porengrundwasserleitern liegen im Bereich von einigen Zentimetern bis wenigen Metern pro Tag.

Zur Vertiefung in den Themenbereich der Grundwasserhydraulik wird Mull und Holländer (2002) empfohlen.

4.5.2 Hydrochemische Prozesse im Grundwasser

Wir kommen nun zurück auf die durch die ungesättigte Zone bereits beeinflussten Bodenwässer aus ► **Abschn. 4.4**. Diese gehen nach dem Übergang ins Grundwasser auf ihrem Weg zum Vorfluter weitere Reaktionen mit den Gesteinen des Aquifers ein. Eine ausreichende Verweilzeit im Aquifer vorausgesetzt, laufen die folgenden Lösungsprozesse solange ab, bis die Sättigungskonzentration für die jeweils verfügbaren Mineralphasen erreicht ist. Diese, durch thermodynamische Rahmenbedingungen gesteuerte Maximalkonzentration begrenzt die Mineralisierung von Grundwässern.

Je nach Löslichkeit und Sättigungskonzentration der zur Lösung im Aquifer verfügbaren Minerale

variiert die Mineralisation von Grundwässern stark in Abhängigkeit von den Lithologien der Grundwasserleiter. Die vergleichsweise gute Löslichkeit von Kalzit unter Anwesenheit von CO_2 (z. B. aus der Bodenluft) führt deshalb in karbonatischen Grundwasserleitern zu höheren Mineralisationen als in den weniger gut löslichen silikatischen Grundwasserleitern (vgl. auch die Analysen in **Abb. 4.3**). Minerale, die besonders gut wasserlöslich sind, z. B. Gips oder Halit, bewirken eine stark erhöhte Mineralisation der Grundwässer.

Stark variierende Lithologien innerhalb eines Aquifers tragen ebenfalls zu einer höheren Konzentration der Wässer bei, da verschiedene Mineralphasen zur Lösung zur Verfügung stehen und für jedes Mineral theoretisch die Sättigungskonzentration erreicht werden könnte, auch wenn der Sättigungszustand in oberflächennahen Grundwässern in der Realität meist nicht erreicht wird. Porengrundwasserleiter, die in ihrer Sedimentationsgeschichte oft mehrere verschiedene Liefergebiete hatten, zeigen oft auch mineralogisch sehr gemischte Komponenten (z. B. sowohl kristallines als auch karbonatisches Einzugsgebiet). Grundwässer in derart vielfältigen Aquiferen weisen daher häufig deutlich höhere Gesamtkonzentrationen auf als beispielsweise Kluftgrundwässer, deren Einzugsgebiet von nur einer Lithologie und damit einem eingeschränkten Spektrum an Mineralphasen gebildet wird.

Details zur Beschaffenheit des Grundwassers werden z. B. bei Matthess (1990) oder Wisotzky (2011) beschrieben.

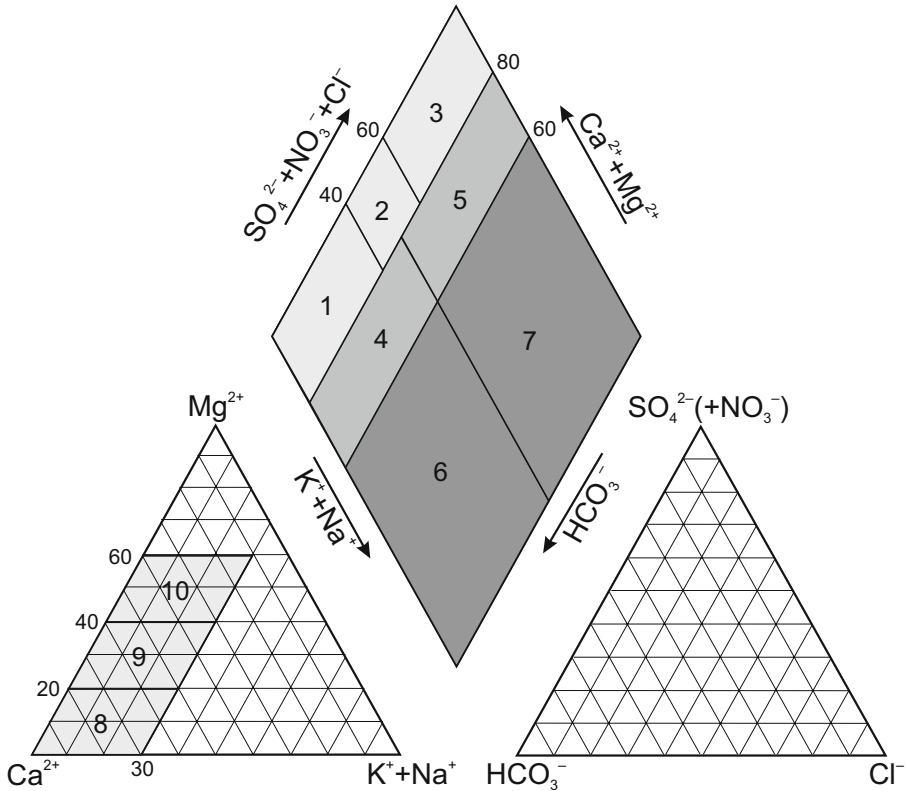
Wesentliche Parameter der Wasseranalyse

Die Gesamtkonzentration der im Grundwasser gelösten Stoffe wird durch den Summenparameter der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (EC für electrical conductivity) in der Einheit Siemens pro Zentimeter (Scm^{-1}) angegeben. Je mehr Anionen und Kationen im Wasser gelöst sind, umso besser leitet das Wasser den elektrischen Strom. In hochreinem mehrfach destilliertem Wasser wird aufgrund der Eigendissoziation des Wassers zu H_3O^+ und OH^- (siehe **Abschn. 4.1**) bereits eine geringe elektrische Leitfähigkeit $< 0,1 \mu\text{Scm}^{-1}$ gemessen. Durch Lösungsprozesse in der Atmosphäre steigt die elektrische Leitfähigkeit im Regenwasser auf

Werte im Bereich von 5 bis $30 \mu\text{Scm}^{-1}$ an. Prozesse in der ungesättigten und der gesättigten Bodenzone können anschließend zu einem Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit in natürlichen, also durch den Menschen (anthropogen) unbeeinflussten Grundwässern auf bis zu $2000 \mu\text{Scm}^{-1}$ führen. Noch weit höhere elektrische Leitfähigkeiten werden in evaporitischen Aquiferen (z. B. Gips, Halit) gemessen, da diese sehr gut löslichen Minerale auch sehr hohe Sättigungskonzentrationen generieren. Die Leitfähigkeiten können in ihnen im Bereich von einigen mScm^{-1} liegen. Abgesehen von diesen Ausnahmefällen natürlicher Aquifere deuten stark erhöhte elektrische Leitfähigkeiten meist auf anthropogene Einflüsse und damit möglicherweise ein umweltgeologisch relevantes Problem hin.

Die Temperatur des Grundwassers richtet sich zunächst nach der Temperatur der versickernden Niederschlagswässer, die ihrerseits von der Atmosphärentemperatur zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses geprägt sind. Eine Vermischung von Niederschlagswässern aus verschiedenen Jahreszeiten führt zur Glättung von saisonal bedingten Extremwerten und der Einstellung einer mittleren Wassertemperatur, die der Jahresmitteltemperatur im Einzugsgebiet des Grundwasserkörpers entspricht. Diese Aussage gilt innerhalb des Grundwasserkörpers streng genommen nur für die neutrale Zone, in der die Temperatur weder von jahreszeitlichen Schwankungen der Bodentemperatur noch von geothermischen Effekten aus tieferen Gebieten beeinflusst wird. Die neutrale Zone liegt je nach Beschaffenheit der ungesättigten Zone zwischen 5 bis maximal 15 m (kein direkter Einfluss mehr von der Oberfläche) und 30 m (noch kein messbarer geothermischer Einfluss). Übliche oberflächennahe Grundwassertemperaturen in gemäßigten Klimazonen wie in Mitteleuropa liegen damit in Bereichen von 5 bis 15°C . Höhere Temperaturen können sich im Einflussbereich von Siedlungsgebieten, z. B. durch Wärmeabgabe aus unterirdischen Leitungen ergeben. Oft sind erhöhte Grundwassertemperaturen auch Hinweise auf die Nähe einer Deponie mit hohem organischem Anteil, in der exotherme biochemische Abbaureaktionen stattfinden.

Der pH-Wert sowie die Konzentrationen der Hauptparameter Kalzium, Magnesium, Natrium,



Erdalkalische Wässer ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+} > 60\%$, $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+} < 20\%$)		
Gruppe 1	erdalkalisch-karbonatisch	$\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 > 60\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} < 40\%$
Gruppe 2	erdalkalisch-karbonatisch-sulfatisch	$40\% < \text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 < 60\%$, $40\% < \text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} < 60\%$
Gruppe 3	erdalkalisch-sulfatisch	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-}$, $\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 < 40\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} > 60\%$
Erdalkalisch-alkalische Wässer ($50\% < \text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+} < 60\%$, $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+} < 50\%$)		
Gruppe 4	erdalkalisch-alkalisch-karbonatisch	$\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 > 50\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} < 50\%$
Gruppe 5	erdalkalisch-alkalisch-sulfatisch	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-}$, $\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 < 50\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} > 50\%$
Alkalische Wässer ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+} < 60\%$, $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+} > 50\%$)		
Gruppe 6	alkalisch-karbonatisch	$\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 > 50\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} < 50\%$
Gruppe 7	alkalisch-sulfatisch	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-}$, $\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 < 50\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} > 50\%$
Unterteilung Gruppe 1		
Gruppe 8	überwiegend Ca-Karbonat	$\text{Mg}^{2+} < 20\%$, $\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 > 60\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} < 40\%$
Gruppe 9	überwiegend Ca-Mg-Karbonat	$20\% < \text{Mg}^{2+} < 40\%$, $\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 > 60\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} < 40\%$
Gruppe 10	überwiegend Dolomit	$\text{Mg}^{2+} > 40\%$, $\text{HCO}_3^{-}+\text{CO}_2 < 60\%$, $\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}+\text{NO}_3^{-} < 40\%$

■ **Abb. 4.5** Piper-Diagramm (Piper, 1944) mit Zuordnung verschiedener hydrochemischer Zusammensetzungen zu typischen Grundwasserleitern nach Furtak und Langguth (1967)

Kalium, Hydrogenkarbonat, Sulfat, Chlorid, Nitrat sind stark abhängig von der Lithologie des jeweiligen Grundwasserkörpers und damit von der Frage,

welche Kationen und Anionen in welchem Ausmaß für Lösungsvorgänge zur Verfügung gestellt werden. Der pH-Wert gibt Auskunft darüber, wie sich

diese Lösungsprozesse auf die Konzentration an freien Wasserstoffionen in der Lösung auswirken. Mögliche Grundwasserzusammensetzungen sind in der **Abb. 4.3** für die Beispiele eines karbonatisch und eines silikatisch geprägten Aquifers dargestellt.

Über diese Hauptparameter lassen sich natürliche Grundwässer klassifizieren und in Kenntnis der geologischen Situation im Idealfall einem bestimmten hydrogeologischen Einzugsgebiet zuordnen. Zur Zuordnung von Wässern zu hydrochemischen Gruppen gemäß der Konzentration der Hauptparameter hat sich die Darstellung im Piper-Diagramm (**Abb. 4.5**) etabliert (Piper 1944). Hierbei werden zunächst in zwei Dreiecksdiagrammen die Hauptparameter, die dem Grundwasser aus verschiedenen Aquiferen zugeführt werden können (Kationen und Anionen), nach ihrer prozentualen Verteilung aufgetragen.

Im Kationendiagramm sind Kalzium, Magnesium sowie die Summe aus Natrium und Kalium dargestellt. Im Anionendiagramm werden Hydrogencarbonat, Chlorid und Sulfat aufgetragen. Eine Ergänzung um Nitrat, das dann gemeinsam mit Sulfat dargestellt wird, ist in der ursprünglichen Klassifikation nach Furtak und Langguth (1967) nicht vorgesehen. Beim Nitrat handelt es sich um einen vorwiegend anthropogen eingebrachten Parameter. In natürlichen Systemen tritt Nitrat nicht als Hauptparameter auf. Bei der Zuordnung von Wässern zu Aquifertypen spielt Nitrat daher keine Rolle. Für viele umweltgeologische Fragestellungen macht es aber dennoch Sinn, den Parameter Nitrat bei der Klassifikation der Wässer zu berücksichtigen.

Kombiniert ergeben Kationen- und Anionenverteilung die bekannte Raute des Piper-Diagramms. Die Klassifizierung innerhalb des Diagramms erfolgt nach Furtak und Langguth (1967) nach ihrem Gehalt an Alkalien, Erdalkalien, Hydrogencarbonat, Sulfat und Chlorid in insgesamt 10 Gruppen.

Die Zugehörigkeit von Brunnen- und Quellwässern eines Gebietes zu verschiedenen hydrochemischen Klassen des Piper-Diagramms deutet darauf hin, dass die untersuchten Wässer aus unterschiedlichen Einzugsgebieten stammen, denn die Wasserinhaltsstoffe liefern wichtige Hinweise

auf Herkunft und Geschichte von Grundwässern. Die Klassifizierung kann, wie oben bereits angedeutet, auch bei der Identifizierung von anthropogen beeinträchtigten Grundwässern helfen und im Idealfall auch mögliche Schadensherde (siehe **Kap. 8**) identifizieren, wenn der Parameter Nitrat mitberücksichtigt wird.

Hydrosphäre – Einiges, was man wissen sollte

- Wasser unterliegt einem stetigen Kreislauf aus Verdunstung, Kondensation, Niederschlag, Versickerung und Wiederaustritt, der sowohl global und langfristig, aber auch regional und lokal und dann deutlich kurzfristiger ablaufen kann.
- Wasser ist aufgrund der Geometrie des Wassermoleküls eine einzigartige Substanz mit ganz speziellen Eigenschaften. Diese Eigenschaften steuern die chemischen und physikalischen Prozesse innerhalb des Wasserkreislaufs.
- In der Atmosphäre nehmen Niederschlagswässer Stoffe aus der Luft auf. Niederschläge werden dadurch leicht sauer und reichern sich mit verschiedenen Substanzen an. Luftschadstoffe wirken sich ebenfalls auf die Beschaffenheit der Niederschlagswässer aus und werden mit dem Wasserkreislauf in Grundwasserreservoirs eingetragen.
- Bei der Verdunstung an der Erdoberfläche werden die im Regenwasser gelösten Substanzen im verbleibenden Wasser angereichert und gehen in die Oberflächenwässer oder ins Bodenwasser über.
- In der Bodenzone löst das Sickerwasser weitere Stoffe aus Bodenluft und Bodensubstanz. Je nachdem, welche Mineralphasen im Boden zur Verfügung stehen, kann das Sickerwasser unterschiedlich hoch mineralisiert werden.
- Bodenwasser wird aufgrund der Polarität des Wassermoleküls teilweise an den geladenen Kornoberflächen im Boden angelagert. Dieses sogenannte Haftwasser sinkt dann nicht weiter in Richtung Grundwasser Oberfläche ab.

- Grundwasser stellt einen zusammenhängenden Wasserkörper im Untergrund dar. Es fließt in den allermeisten Fällen jedoch nicht in großen Hohlräumen, sondern innerhalb der Porenräume zwischen den einzelnen Körnern.
- Das Grundwasser löst die Minerale, mit denen es in Kontakt steht. Je nach Löslichkeit der verschiedenen Mineralphasen im Grundwasserkörper erfolgt dies in großem Ausmaß (z. B. in Evaporiten) oder nur in sehr geringem (z. B. in Silikaten). Da die gelösten Stoffe in Form von Ionen im Wasser auftreten, kann die Gesamtmineralisation des Wassers durch den Summenparameter der spezifischen elektrische Leitfähigkeit beschrieben werden.

❓ Testfragen zum Kapitel Hydrosphäre

1. Geben Sie einen Überblick über die Abläufe innerhalb des globalen Wasserkreislaufs unter Einbeziehung der hydrologischen Grundgleichung.
2. Welche qualitativen Prozesse finden zwischen der Verdunstung über freien Wasseroberflächen und der Versickerung des Regens im Boden statt?
3. Von welchen Faktoren ist die Verteilung zwischen Versickerung, Oberflächenabfluss und Verdunstung nach dem Auftreffen des Niederschlags auf der Erdoberfläche abhängig?
4. Erläutern Sie die Besonderheiten des Wassermoleküls im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten ähnlicher Molekülgröße.
5. Wie wirken sich die Prozesse im Wasserkreislauf auf die Isotopenzusammensetzung des Wassers aus?
6. Beschreiben Sie zwei der wesentlichen Parameter der Wasseranalyse und erläutern Sie, welche Hinweise diese Parameter auf die Vorgeschichte des untersuchten Wassers geben können.
7. Erstellen Sie ein Piper-Diagramm. Tragen Sie drei Grundwasserproben ein, die eine für ihr jeweiliges Entnahme- und Einzugsgebiet typische natürliche Wasserzusammensetzung

aufweisen. (a) Porengrundwasser, die Liefergebiete des Grundwasserkörpers liegen sowohl in Karbonat- als auch in Kristallin-gebieten, (b) Quelle in einem verkarsteten Kalkgebirge, (c) Grubenwasser aus einem Salzbergbau.

Literatur

- Appelo CAJ, Postma D (2006) *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A. A. Balkema Publishers, Leiden/London/New York/Philadelphia/Singapore
- Baumgartner A, Liebscher H-J (1990) *Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie Lehrbuch der Hydrologie*, Bd. 1. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart
- Baumgartner A, Reichel E (1975) *Die Weltwasserbilanz*. Oldenbourg, München, Wien
- Brückner E (1905) Die Bilanz des Kreislaufes des Wassers auf der Erde. *Geografische Zeitschriften* 11:436–445
- Blume HP, Brümmer GW, Schwertmann U, Horn R, Kögel-Knabner I, Stahr K, Auerswald K, Beyer L, Hartmann A, Litz N, Scheinost A, Stanjek H, Welp G, Wilke B-M (2013) *Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, München, Wien (Neubearbeitung)
- Clark I, Fritz P (1997) *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York
- Etcheverry D, Vennemann T (2009) *Isotope im Grundwasser: Methoden zur Anwendung in der hydrogeologischen Praxis Umweltwissen*, Bd. 0930. Bundesamt für Umwelt, Bern
- Ferronsky VI, Polyakov VA (2012) *Isotopes of the Earth's Hydrosphere*. Springer-Verlag, Heidelberg
- Furtak H, Langguth HR (1967) Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen Mem. IAH-Congress, 1965., S 86–96
- Holland G, Sherwood Lollar B, Li L, Lacrampe-Couloume G, Slater GF, Ballentine CJ (2013) Deep fracture fluids isolated in the crust since the Precambrian era. *Nature* 497:357–360
- Hölting B, Coldewey WG (2013) *Hydrogeologie*, 8. Aufl. Springer Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, Stuttgart
- Jäger L, Hupfer P, Kessler A (2006) 100 Jahre globale Wasserbilanz von Eduard Brückner. Eine Würdigung aus heutiger Sicht. *Erdkunde/Archive für wissenschaftliche Geographie* 60(3):273–286
- Klige RK (2000) Global variations of the environment (climate and water regime). *Scientific world*, Moscow
- Korzun VI (Hrsg) (1978) *World water balance and water resources of the earth Studies and Reports in Hydrology*, Bd. 75. UNESCO, Paris
- Leder K, Puxbaum H, Kreiner P, Tarmann V (2003) *Nasse Deposition im Land Wien*. Magistrat der Stadt Wien, Wien
- Liniger H, Weingartner R, Grosjean M (1998) *Mountains of the world: Water towers for the 21st century*. Haupt Verlag, Bern

Literatur

- Marcinek J (2011) Wasserkreislauf und Wasserbilanz – globale Übersicht. In: Lozan JL, Graßl P, Hupfer P, Karbe L, Schönwiese C-D (Hrsg) Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?, 3. Aufl. Climate Service Center, Germany, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Heidelberg
- Matthess G (1990) Die Beschaffenheit des Grundwassers Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 2. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart
- Merkel B, Planer-Friedrich B (2008) Grundwasserchemie. Springer-Verlag, Heidelberg
- Mook WG (2006) Introduction to Isotope Hydrology. Stable and Radioactive Isotopes of Hydrogen, Oxygen and Carbon. Taylor and Francis, London
- Morgenschweis G (2010) Hydrometrie – Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. Springer Verlag, Heidelberg
- Moser H, Rauert W (1980) Isotopenmethoden in der Hydrogeologie, Reihe Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 8. Gebr. Bornträger, Berlin
- Mull R, Holländer H (2002) Grundwasserhydraulik und -hydrologie – Eine Einführung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- NOAA Research (National Oceanic & Atmospheric Administration), U.S. Department of Commerce (2013) Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Piper AM (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Trans Amer Geophys Union 25:914–928
- Reinfried S, Tempelmann S, Aeschbacher U (2012) Addressing secondary school students' every day ideas about freshwater springs in order to develop an institutional tool to promote conceptual reconstruction. Hydrology and Earth System Sciences 16:1365–1377
- Walther JV (2005) Essentials of Geochemistry. Jones and Bartlett Publishers, Sudbury
- Wisotzky F (2011) Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrochemische Modellierung. Springer, Heidelberg
- Umweltbundesamt (2014) H2O-Fachdatenbank, WISA Wasserinformationssystem Austria. <https://secure.umweltbundesamt.at/h2odb/fivestep/fivestepPublic.xhtml>, Zugriffen: 21.11.2014

Pedosphäre

Sylke Hilberg

- 5.1 Der Boden – ein Begriff, viele Perspektiven – 64
- 5.2 Bodenbestandteile, Bodengefüge und Bodenaufbau – 66
- 5.3 Bodensystematik – 68
- 5.4 Bodenchemie – 72
- 5.5 Bodenlösung – 77
- 5.6 Bodenluft – 78
- 5.7 Anthropogene Einflüsse auf den Boden – 80
- Literatur – 82

Kurzfassung

Der Begriff „Pedosphäre“ beschreibt die Gesamtheit der obersten Schichten der nicht von Ozeanen oder permanenten Wasserflächen bedeckten Erdkruste, die sich vor allem dadurch auszeichnet, dass sie von lebenden Organismen besiedelt ist und damit ein Ökosystem darstellt.

Diese, auch als Boden bezeichnete, oberste Krustenschicht wird je nach Wissenschaftsdisziplin und Fragestellung unter verschiedensten Aspekten betrachtet. Bodenkundler unterscheiden sehr differenziert nach der Genese der Böden und ihrem organischen Anteil. In der Landwirtschaft und Biologie spielen Eigenschaften der Wasserspeicherkapazität sowie des Speichervermögens für Nährstoffe oder auch die chemischen Eigenschaften und das Gefüge eine große Rolle. Geowissenschaftler verschiedener Teildisziplinen interessieren sich z. B. für die Korngrößenverteilung und die damit verbundenen Eigenschaften, wie Stabilität oder Wasserdurchlässigkeit. Dementsprechend gibt es zahlreiche Klassifizierungen für Böden, die in diesem Kapitel überblicksmäßig beschrieben werden.

Wichtige Eigenschaften von Böden im Hinblick auf umweltgeologische Fragestellungen betreffen das Bindungsvermögen und die Mobilisierung von Schadstoffen. Dazu sind Sorptions- und Kationenaustauschkapazität, also die Fähigkeit eines Bodenkörpers, an seinen Kornoberflächen Stoffe anzulagern und damit zu demobilisieren, von Interesse. Unter diesem Aspekt werden auch die im Boden enthaltenen Tonminerale beschrieben. Auch die Bodenchemie und damit Eigenschaften wie der Säuregehalt oder das Redoxpotenzial eines Bodens, spielen eine große Rolle.

Da Wasser und Luft die wesentlichen Transportmedien für Schadstoffe im Boden darstellen, werden die Eigenschaften und Zusammensetzung von Bodenlösung und Bodenluft in diesem Kapitel thematisiert.

Letztendlich zeigen die Betrachtungen von Bodeneigenschaften und den Prozessen, die im Boden ablaufen, dass es sich um ein hochdynamisches und offenes System handelt, das zahlreiche Schnittstellen mit Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre aufweist. Der Boden verdient es daher, als eigenes Schutzgut betrachtet zu werden. Diese Erkenntnis hat auch in die Europäische Umweltpolitik bereits mit der 1972 ratifizierten Boden-Charta Eingang gefunden, die die Grundlage für nationale Bodenschutzgesetze in Europa darstellt.

5.1 Der Boden – ein Begriff, viele Perspektiven

Der Boden als oberste Schicht der Erdkruste kann unter verschiedensten Aspekten betrachtet werden und wird von den mit ihm befassten Wissenschaftsdisziplinen unterschiedlich definiert. Die Bodenkunde oder Pedologie als diejenige Disziplin, die sich explizit mit den Böden beschäftigt, bedient sich vor allem bei den Naturwissenschaften Physik und Chemie, versteht sich aber auch als interdisziplinär, etwa hinsichtlich der Biologie und den Geowissenschaften.

In der Bodenkunde wird Boden definiert als Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen, das mit Wasser, Luft und Lebewesen durchwirkt ist. Der Boden ist unter dem Einfluss der Umweltfaktoren an der Erdoberfläche entstanden und hat sich im Lauf der Zeit zu einem eigenen morphologischen Gebilde entwickelt. Er ist in der Lage, höheren Pflanzen als Standort zu dienen und bildet darüber hinaus die Lebensgrundlage für Tiere und Menschen. Als Raum-Zeit-Struktur ist der Boden ein vierdimensionales System. Diese Definition nach Schröder (1992) (überarbeitet und erweitert durch Blum 2012) umfasst die Bestandteile des Bodens, seine Genese in Abhängigkeit von der Zeit und seine Funktionen. Sie bildet damit die allgemeine und umfassendste Betrachtungsweise. Dementsprechend befasst sich die Bodenkunde mit der Bodengenetik, also den Entwicklungsprozessen von Böden, mit der Bodeninventur, also der Bestandsaufnahme der Eigenschaften von Böden, sowie mit der Systematik, also der Klassifizierung von Böden nach ihren Inhaltsstoffen oder auch nach funktionalen oder regionalen Aspekten.

Die Biologie befasst sich mit der Betrachtung des Bodens als Lebensraum und den darin lebenden Organismen (z. B. Topp 1981, Benckiser 1997). Die Gesamtheit der im Boden lebenden Organismen nennt man Edaphon. Es kann tierisch oder pflanzlich sein, permanent, temporär oder periodisch im Boden leben und von sehr kleinen Spezies (Mikrofauna und -flora) bis zu Dezimeter großen Säugetierarten reichen. Das Edaphon trägt zur Bodenbildung (Pedogenese) bei und beeinflusst den Boden mechanisch durch Zerkleinerung (Graben und Wühlen) und biochemisch durch seine Stoffwechselprozesse.

Es nimmt damit wesentlichen Einfluss auf wichtige Eigenschaften des Bodens, wie seine Speicherkapazität und Durchlässigkeit für Wasser oder auch seine Bedeutung als Schadstoffspeicher oder -filter.

Die technische Geologie betrachtet den Boden vor allem unter dem Aspekt seiner Stabilität und fokussiert auf die unterhalb der obersten belebten Bodenzone anschließenden Lockergesteinsschichten. Es kann sich dabei um abgelagerte Sedimente oder auch um den verwitterten und bis zum Zersatz aufgelockerten obersten Bereich des Festgesteins handeln. Die wichtigste Einflussgröße im Zusammenhang mit den geotechnischen Eigenschaften eines Bodens ist die Korngrößenverteilung und damit einhergehende Eigenschaften wie Porosität und Plastizität eines Bodenkörpers. Daneben werden Kornform, Mineralogie und der Wassergehalt im Boden von den Ingenieurgeologen betrachtet, um Kennwerte zur Standfestigkeit zu bestimmen. Nach EN ISO 14688-1 (2002) wird der Boden unter geotechnischen Aspekten als „Gemisch mineralischer Bestandteile in Form einer Ablagerung, aber fallweise organischen Ursprungs, das mit geringem mechanischem Aufwand separiert werden kann, und das unterschiedliche Anteile von Wasser und Luft (fallweise anderen Gasen) enthält [...]“ definiert. Diese Definition zeigt, dass die obersten, stark organisch geprägten Bodenhorizonte, die für Pedologen und Biologen von größtem Interesse sind, in der Ingenieurgeologie kaum eine Bedeutung haben.

Die Hydrogeologie interessiert sich für Böden in ihrer Eigenschaft als Grundwasserleiter (Aquifer), Grundwasserspeicher oder auch Grundwasserstauer (Aquifuge). Auch hier spielen vor allem die Korngrößenverteilung und der durchflusswirksame (effektive) Porenraum die wesentliche Rolle. Der Boden im Sinne eines Lockergesteinskörpers mit auflagernder Humusschicht teilt sich in eine ungesättigte und eine gesättigte Zone auf. In der ungesättigten Zone oberhalb des Grundwasserspiegels sind die Porenräume nur teilweise mit Sicker- und Haftwasser gefüllt. Bodenluft füllt große Teile des Porenraumes aus. Es liegt kein zusammenhängender Wasserkörper vor. Die von der Oberfläche eindringenden Sickerwässer fließen vertikal zum Grundwasserspiegel hin ab bzw. werden an den Kornoberflächen als Haftwasser fixiert. In der darunter liegenden gesättigten Zone sind alle Poren mit Was-

ser gefüllt und der Porenraum wird von einem zusammenhängenden Wasserkörper durchflossen.

Die Umweltgeologie betrachtet Bodeneigenschaften unter dem Aspekt des Schadstofftransports bzw. der Fähigkeit von Böden, Schadstoffe zu binden. Ungesättigte und gesättigte Bodenzone reagieren in dieser Hinsicht sehr unterschiedlich. Neben der Durchlässigkeit des Bodens für Wasser und Bodenluft als wichtige Schadstofftransportmedien treten bodenchemische Eigenschaften in den Vordergrund. Dazu gehört der Mineralbestand, der z. B. die Bodenazidität, also den Säuregehalt von Böden beeinflusst, aber auch die Korngrößenzusammensetzung, die wesentlich auf das Adsorptionsvermögen Einfluss nimmt. Je kleiner die einzelnen Bodenkörner sind, umso größer ist die spezifische Oberfläche und damit die Möglichkeit, Kationen an die meist negativ geladenen Oberflächen anzulagern. Im Detail werden diese Prozesse im ► [Abschn. 5.4.1](#) beschrieben.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in der Umweltgeologie ist der Mensch als Faktor der Bodenbildung. Spätestens seit Beginn der Agrarwirtschaft vor ca. 5000 Jahren spielt der Mensch sowohl durch die mechanische Bearbeitung der Böden als auch durch die Einbringung von Stoffen (z. B. Dünger, später Pestizide) eine wesentliche Rolle bei der Pedogenese in Kulturlandschaften. Seit dem Einsetzen des Industriezeitalters kommen großflächige Bodenversiegelungen und verstärkte Einträge von Schadstoffen mit Niederschlägen bzw. Stäuben hinzu. Anthropogene Beeinflussungen des Bodens und deren Auswirkungen auf Hydrosphäre und Lithosphäre sind Gegenstand umweltgeologischer Betrachtungen. Eine Bodendefinition aus dem Blickwinkel der Umweltgeologie findet sich z. B. in den österreichischen Normenwerken für die Altlastenpraxis, z. B. der ÖNORM S 2088-2 (2000). Demgemäß ist Boden definiert als „oberster Bereich des Untergrundes, der durch Verwitterung, Um- und Neubildung (natürlich oder anthropogen verändert) entstanden ist und aufgrund der jeweiligen aktuellen Nutzung weiter verändert wird. Boden besteht aus festen anorganischen (Mineralanteil) und organischen Teilen (Humus und Lebewesen) sowie aus mit Wasser und darin gelösten Stoffen oder mit Luft gefüllten Hohlräumen. Er steht in Wechselwirkung mit der belebten Umwelt.“

5.2 Bodenbestandteile, Bodengefüge und Bodenaufbau

Generell bestehen Böden aus mineralischen und organischen Komponenten. Die zwischen diesen festen Bestandteilen entstehenden Hohlräume (Poren) sind mit Wasser und/oder Luft gefüllt. Die mengenmäßige Verteilung zwischen fester Materie, Wasser und Luft sowie auch die Verteilung zwischen mineralischen und organischen Komponenten kann sehr stark variieren und hängt vom Ausgangsgestein und den Bildungsbedingungen (Klima, Vegetationseinfluss, Einfluss von Bodenorganismen, Grundwassersituation, Reliefbedingungen und Zeit) ab. Der Volumenanteil der festen Materie bewegt sich meist im Bereich zwischen 50 und 70 %, jener des Porenhohlraumes zwischen 30 und 50 %.

Mit dem Begriff Bodengefüge wird die räumliche Anordnung der einzelnen Bodenkomponenten innerhalb eines Bodenhorizonts beschrieben. Das Gefüge wird ganz wesentlich von der Korngrößenverteilung und der Kornform der festen Bestandteile bestimmt. Je einheitlicher die Korngrößen in einem Boden sind, umso größer ist das luft- oder wassergefüllte Porenvolumen. Gleichzeitig gilt jedoch auch, dass größere Körner zwar auch zu größeren Poren, dabei aber zu einem geringeren Gesamtporenvolumen innerhalb des Bodenkörpers führen. Je nachdem, wie die mineralischen oder organischen Bodenkörner zusammengefügt sind, lassen sich drei Hauptgruppen von Bodengefügen unterteilen:

- Einzelkorngefüge: Die Komponenten sind nicht miteinander verklebt, sondern lagern lose aneinander. Die Anordnung wird von der Kornform bestimmt. Diese Art des Gefüges kommt vor allem in sand- oder kiesdominierten Böden wie z. B. Podsolen (vgl. [Tab. 5.1](#)) vor.
- Kohärentgefüge: Die einzelnen Körner bilden eine zusammenhängende verkittete Masse. Die Partikel werden durch Kohäsionskräfte zusammengehalten. Derartige Gefüge zeichnen feinkörnige Böden aus. Zu diesen Schluff- oder Tonböden zählen beispielsweise die Gleye (vgl. [Tab. 5.1](#)). Sie können sich jedoch auch in größeren Böden ausbilden, wenn die Körner von Hüllen organischen Materials oder chemischer Umwandlungsprodukte wie Eisenoxide

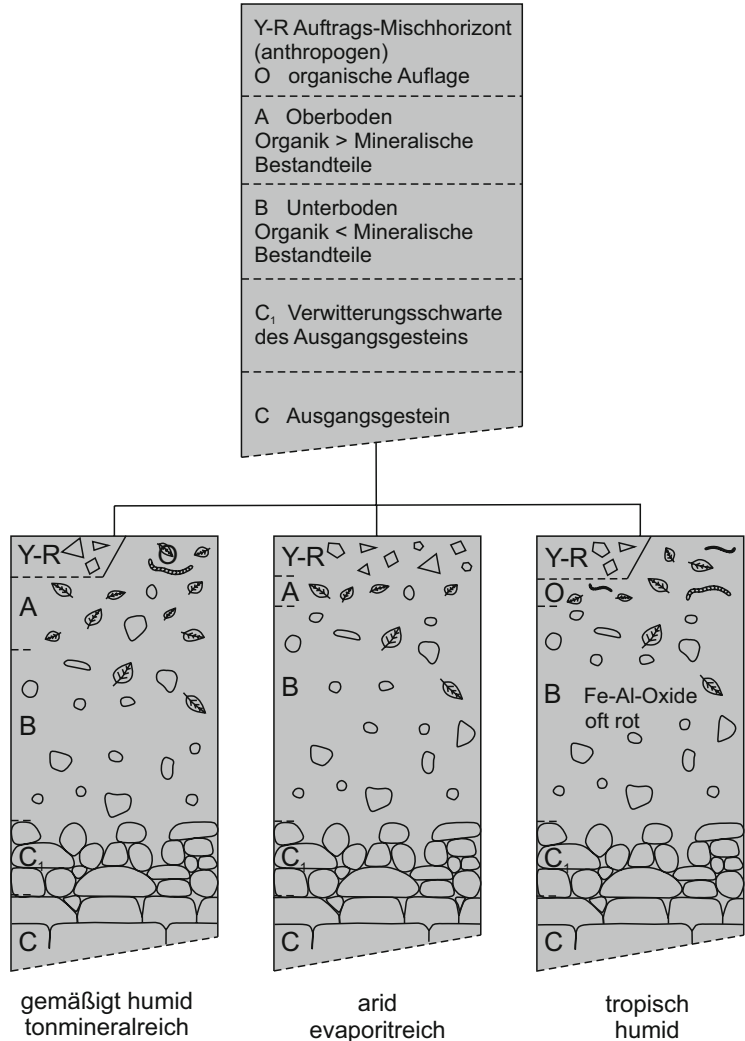
oder Karbonate umschlossen sind und diese Hüllen miteinander verkitten.

- Aggregatgefüge: Teile der Bodenmatrix sind von ihrer Umgebung abgesetzt und bilden separate Körper aus, die dann als eigene Körner innerhalb der Matrix betrachtet werden können. Die Ausgestaltung dieser Aggregate kann vielfältig sein und ist von den Bildungsbedingungen, hier besonders von den biologischen Vorgängen innerhalb des Bodenhorizonts, abhängig.

Ein Bodenkörper (Peton) kann unabhängig von bodenbildenden Faktoren in Horizonte mit unterschiedlichen Inhaltsstoffen, unterschiedlichem Gefüge und verschiedenen physikalischen und chemischen Eigenschaften unterteilt werden (Nestroy et al. 2011). Die Klassifizierung der Horizonte, wie sie im deutschsprachigen Raum üblich ist, richtet sich im Wesentlichen nach ihrem Anteil an organischer Substanz im Verhältnis zum mineralischen Anteil aus dem Substrat. Zudem können anthropogene Einflüsse und die Einflüsse des Wassers bei dieser Systematik bereits unterschieden werden. Eine schematische Darstellung des Bodenaufbaus in diesem Sinne ist [Abb. 5.1](#) zu entnehmen.

- O-Horizont: Überbegriff für verschiedene organische Auflagen. Es kann sich um mehr oder weniger stark zersetztes Laub und Nadelstreu oder auch um organische Feinsubstanz (Humus oder Torf) handeln. Der Anteil organischer Substanz beträgt mindestens 35 %. Die Zusammensetzung und Mächtigkeit ist stark vom Bewuchs und von den klimatischen Verhältnissen abhängig.
- A-Horizont: Oberster mineralischer Horizont (*Oberboden*), der noch bedeutende Anteile an organischer Substanz bis maximal 35 % beinhalten kann. Die Mineralphasen des Ausgangsgesteins sind zu Tonmineralen umgewandelt, so dass dieser Horizont oft sehr feinkörnig ausgebildet ist. Je nach Inhaltsstoffen ist er braun bis rötlich bei Dominanz von Eisenoxiden oder schwarz bei Dominanz von Huminstoffen.
- B-Horizont: Mineralischer Horizont mit geringem Anteil an organischen Komponenten

■ **Abb. 5.1** Schematischer Bodenaufbau mit den Haupthorizonten, die in einem natürlichen (oder in einem anthropogen überprägten) Bodenkörper auftreten können. Mächtigkeiten der einzelnen Horizonte wie auch die Inhaltsstoffe und das Gefüge können dabei in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein und den Umgebungsbedingungen stark variieren



ten (*Unterboden*). Wie der A-Horizont stark von der Umwandlung des mineralischen Ausgangsmaterials zu Tonmineralen geprägt und daher ebenfalls oft feinkörnig, lehmig ausgebildet. Einzelne grobe Komponenten des Ausgangsgesteins können enthalten sein.

- C-Horizont: Ausgangsgestein, aus dem der Boden entstanden ist. Dieser Horizont kann im oberen Bereich stark aufgelockert und angewittert bis stark verwittert sein (C₁ in ■ [Abb. 5.1](#)). Die Mächtigkeit des aufgelockerten Bereichs ist abhängig von der Lithologie, vom oberflächennahen Trennflächengefüge des Gesteins sowie von der Wasserzirkulation

im Bereich der Felslinie. Der Horizont umfasst auch das unverwitterte Sediment oder Festgestein.

- Y- und R-Horizont: Bezeichnung für anthropogen überprägte Oberböden. Es kann sich um künstlich geschaffene Auftrags- oder Mischhorizonte handeln. Wesentlich ist, dass sie durch menschliche Tätigkeiten, wie Kultivierung von Ackerböden mit tiefgreifender Bearbeitung, Bodenverbesserung durch Kompostaufbringung, Anschüttung von künstlichem Material wie Trümmerschutt oder Frostkoffer, stark anthropogen beeinflusst sind. Sie bilden in Siedlungs- und

Agrargebieten meist flächig den obersten Bodenhorizont.

Die Mächtigkeit, wie auch die Anteile der einzelnen Horizonte in einem Bodenkörper, kann stark variieren und ist abhängig von der Gesamtheit der bodenbildenden Faktoren: Klima, Relief, Lithologie des Ausgangsgesteins, auf und im Boden lebende Organismen inklusive des Menschen und die Zeitdauer, in der diese Faktoren auf den Boden einwirken können.

5.2.1 Klimaeinfluss auf die Bodenbildung

Den Einfluss der klimatischen Bedingungen auf die Bodenbildung zu diskutieren, bedeutet vor allem, die Bedeutung des Wassers als Reagens und Transportmittel und der Temperatur als reaktionsbeeinflussenden Faktor zu betrachten (Merritts et al. 1998). Ergänzend und nicht weniger maßgeblich sind außerdem klimagesteuerte Variationen in der Vegetation und der Ausprägung des Edaphons.

In gemäßigt feuchten Klimaten ist der A-Horizont oft stark ausgeprägt, dunkelbraun bis schwarz und reich an organischem Material. Der B-Horizont weist dagegen viel mineralisches Material auf und ist aufgrund der vom Wasser induzierten Verwitterungsprozesse vor allem tonmineralreich und feinkörnig, siehe ► [Exkurs 5.2](#).

In ariden Klimazonen mit wenig Vegetation ist dagegen nur ein geringmächtiger A-Horizont ausgebildet, der vergleichsweise wenig organische Substanz enthält. Der B-Horizont ist durch Lösungs- und Fällungsprozesse im Bodenwasser angereichert an evaporitischen Bildungen wie Salz, Gips, aber auch an Karbonaten.

In tropisch feuchten Klimaten ist kein klassischer A-Horizont ausgebildet, da die organische Substanz aufgrund des hohen Wasserumsatzes in Kombination mit hohen Temperaturen schnell abgebaut bzw. in tiefere Bodenhorizonte verfrachtet wird. Als Verwitterungsprodukte der mineralischen Bodenbestandteile reichern sich in mächtigen B-Horizonten schwer lösliche Eisen- und Aluminiumoxide an. Für die typische Rotfärbung der

tropischen Böden sind vor allem die Eisenoxide verantwortlich.

Die [Abb. 5.1](#) zeigt eine schematische Darstellung des Bodenaufbaus sowie drei aufgrund der Klimabedingungen stark unterschiedliche Bodenkörper.

5.3 Bodensystematik

Wie die Ausführungen im ► [Abschn. 5.2](#) zeigen, gibt es eine große Bandbreite an Bodenbestandteilen, Bodengefüge und Bodenaufbau. Um Böden dennoch systematisch zu beschreiben und zuzuordnen, wurden in der Vergangenheit vielfältige Systeme entwickelt, die sich meist an regionalen Gegebenheiten orientierten und daher nicht global anwendbar waren. Dies gilt auch für die in Deutschland oder Österreich verwendete Bodensystematik. Im Jahr 1998 wurde das Weltreferenzsystem für Böden (World Reference Base for Soil Resources, WRB) beschlossen (aktuelle Fassung IUSS 2014), das eine international gültige Grundlage zur systematischen Beschreibung von Böden darstellt. Die WRB beschreibt sogenannte diagnostische Horizonte, die im Gelände bestimmbar sein sollten und Materialien, Prozesse und Eigenschaften der jeweiligen Böden berücksichtigen. Dazu wurden zunächst 32 Referenzbodengruppen definiert, innerhalb derer dann mit Hilfe von sogenannten Qualifiern weiter differenziert wird. Der in dieser Form kombinierte Ansatz kann als morphogenetische Klassifizierung bezeichnet werden.

Als Folge der Eigenschaften von Böden ergeben sich deutliche Unterschiede in ihrer Wirkung und auch in ihrer Funktion. In der Biologie und in den angewandten geowissenschaftlichen Teildisziplinen ist daher eine Klassifizierung von Böden nach ihrer Wirkung und Funktion in natürlichen oder anthropogen geprägten Systemen von Interesse (funktionale Klassifizierung).

Eine Zuordnung von Böden zu bestimmten Klima- und Vegetationszonen führt zu einer regionalen Gliederung, wie sie z. B. in der Weltbodenkarte der FAO-UNESCO (1994) verwirklicht wurde, die damit erstmals einen Ansatz einer weltweit einheitlichen Bodensystematik bietet.

5.3.1 Morphogenetische Klassifizierung

Im Zuge der Entwicklung der systematischen Bodenkunde wurden, beginnend mit dem russischen Bodenkundler Doukachaev (1883), zahlreiche Ansätze gewählt bzw. weiterentwickelt, die auf unterschiedliche Weise die Entwicklungsbedingungen und die daraus resultierenden Merkmale des Bodens berücksichtigen. So unterscheidet z. B. die Grobgliederung nach Schröder (1992) vier generelle Gruppen nach ihrem Hauptmerkmal:

- Lithomorphe Böden, in denen der Einfluss des Ausgangsgesteins das prägende Element ist. Organische Komponenten spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die mineralischen Komponenten sind direkt vom Ausgangsgestein ableitbar und bilden die Grundlage für die biologischen und chemischen Eigenschaften des Bodens.
- Klimatomorphe Böden, die vor allem durch den Klimaeinfluss sowie die daraus resultierende Vegetation charakterisiert werden. Dies können Böden sein, die besonders durch große Wärmeeinstrahlung und damit hohe Evapotranspirationsraten beeinflusst werden.
- Hydromorphe Böden, deren Charakter vorwiegend durch den Einfluss von Stau- oder Grundwasser geprägt wurde. Das Wasser wirkt als Reagens und Transportmittel und ist daher in derartigen Böden für intensivierende Prozesse wie Lösung und Fällung von Salzen, aber auch biotische Abbauprozesse verantwortlich.
- Anthropomorphe Böden, die durch den Menschen stark verändert wurden und daher besondere, nicht natürliche Merkmale aufweisen. Dies kann durch die direkte Einwirkung auf den Boden in Form von Graben, Tieflockern oder Verdichten, Einbringen von Düngern oder Aufbringen von künstlich veränderten Materialien oder Abfällen erfolgen. Einflüsse auf das Ausgangsgestein, auf die Vegetation sowie großflächig auf das Klima bedingen ebenfalls künstliche Veränderungen des Bodens. Diese sind jedoch meist weniger offensichtlich als die erstgenannten.

Die Entwicklung der oben beschriebenen Hauptmerkmale richtet sich vor allem nach den Be-

dingungen am Bodenstandort, wobei sich diese Standortbetrachtung auf die Lithologie des Ausgangsgesteins, auf die Temperaturbedingungen oder auf den Einfluss von Wasser beziehen kann. Eine detaillierte Beschreibung von Bodeneigenschaften in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften findet sich zum Beispiel bei Stahr et al. (2008).

Die derzeit verwendete Klassifizierung im deutschsprachigen Raum (Blume et al. 2013) richtet sich in erster Linie nach der Bedeutung des Wassers bei der Bodenbildung und unterscheidet zunächst in vier Abteilungen terrestrische (Landböden) von semiterrestrischen (Grundwasserböden) Böden. Dazu werden subhydrische Böden, also solche, die immer oder zeitweise unter Wasser stehen und Moore unterschieden.

Eine weitere Differenzierung innerhalb der Abteilungen erfolgt in Bodenklassen. Die Landböden werden darin u. a. nach der Differenzierungsmöglichkeit in Horizonte untergliedert. Die Grundwasserböden werden nach dem Einfluss und der Art des sie beeinflussenden Wassers (Grundwasser, Oberflächenwasser, Salzwasser) unterschieden. Innerhalb der Bodenklassen erfolgt eine weitere Differenzierung in Bodentypen, Subtypen und Varietäten, die sich z. B. nach dem Entwicklungsgrad, der Intensität von Veränderungen und dem Mineralbestand richten. Die Nomenklatur der Bodentypen ist dabei eine Mischung aus international bekannten traditionellen Bezeichnungen, Begriffen aus der in den 1970er Jahren in den USA entwickelten und 1999 überarbeiteten Soil Taxonomy (USDA 1999) und Neuprägungen.

Gebräuchlich ist es außerdem, dem Bodennamen die Angabe des Ausgangsgesteins nachzustellen und damit noch die Substrattypen zu untergliedern. Neben dem Mineralbestand spielt auch die Korngrößenverteilung eine große Rolle. Diese um Substrattypen erweiterte Bodenklassifizierung ist gleichermaßen für Fragestellungen der Hydro- und Umweltgeologie von großem Nutzen.

■ **Tabelle 5.1** zeigt Beispiele einiger wichtiger Bodentypen innerhalb ihrer Klassen und Abteilungen. Aufgrund der Fülle an Bodentypen wird hier nur eine kleine Auswahl von Böden dargestellt, die im mitteleuropäischen Raum häufig auftreten und deshalb im deutschsprachigen Raum für die Praxis des Umweltgeologen von Bedeutung sind. Neben

■ **Tab. 5.1** Beispiele für die Klassifizierungen einiger typischer mitteleuropäischer Bodentypen nach morphogenetischen Aspekten (Auswahl aus der Österreichischen Bodensystematik, Nestroy et al. 2011)

Abteilung	Terrestrische Böden		Hydromorphe Böden			
Bodenklasse	Rohböden	Podsole	Gleye	Auenböden	Moore	Unterwasserböden
Bodentyp	Rendzina Ranker	Humuspodsol Braunerdepodsol	Gley Humusgley	Auboden Schwemmbo-den	Niedermoor Hochmoor	Gyttja Sapropel

■ **Tab. 5.2** Beispiele für Bodenklassifizierungen in der Altlastenpraxis (angelehnt an ÖNORM S-2088-2)

Skelettgehalt Grobkornanteil	Bodenart (Korn-größenverteilung)	Humusanteil	Bezeichnung	Schadstoff-Bindungsvermögen
< 10 %	Ton	> 30 %	T	Sehr stark
10–20 %	Schluff, sandig	10–30 %	U, s	Mittel
20–40 %	Sand, kiesig	< 2 %	S, g	Gering bis mittel
> 80 %	Kies, sandig	< 2 %	G, s	Sehr gering

der World Reference Base for Soil Resources (IUSS 2014) finden sich vertiefende Erläuterungen zur Bodensystematik, ein Überblick über die wichtigsten Klassifikationssysteme sowie Beschreibungen einer Vielzahl wichtiger Böden Mitteleuropas in Blume et al. (2013) oder Haslinger et al. (2014).

5.3.2 Funktionale Klassifizierung

Böden, als wesentlicher Teil des Gesamtsystems Erde, haben innerhalb der Ökosphäre zahlreiche Funktionen und Wirkungen, die es rechtfertigen, Boden generell als Schutzgut zu betrachten (► Exkurs 5.1). Eine funktionale Systematik muss sich jeweils nach den Nutzungsanforderungen richten und ergibt sich aus den nutzungsbezogenen Fragestellungen.

■ **Regelungsfunktion:** Bezeichnet die Speicher-, Filter- und Transformatorfunktionen des Bodens. Besonders bedeutend ist z. B. die Rolle des Bodens im Wasserkreislauf. Unter diesem Aspekt lassen sich Böden nach ihrer Durchlässigkeit bzw. ihrer Speicherkapazität unterscheiden. Gleiches gilt für die Durchlässigkeit eines Bodens für Schadstoffe oder auch für Energie (relevant z. B. im Bereich der oberflächennahen thermischen Nutzung, siehe ► Kap. 11). Eine

Klassifizierung von Böden gemäß ihrer Regelungsfunktion ist daher vor allem von umwelt- und hydrogeologischem Interesse. In ■ Tab. 5.2 ist beispielhaft eine Bodenklassifikation dargestellt, wie sie in der Altlastenpraxis zur Beurteilung des Schadstoffbindungsvermögens eines Bodens herangezogen werden kann. Bei der Beurteilung des Schadstoffbindungsvermögens spielt jedoch nicht nur die Beschaffenheit des Bodens, sondern auch die Eigenschaften des jeweiligen Schadstoffes eine Rolle. So ist das Bindungsvermögen für Schwermetalle stark von der Bodenazidität abhängig, während organische Schadstoffe umso besser gebunden werden, je höher der Humusgehalt ist.

■ **Lebensraumfunktion:** Bezeichnet die Eignung des Bodens als Lebensgrundlage sowie auch als Lebensraum für Fauna und Flora. Eigenschaften wie Bodenchemie, Körnung, Lagerungsdichte etc. beeinflussen diese Bodenfunktionen und wirken sich auf die Besiedlung eines Bodens aus. Eine Unterscheidung nach sauren und alkalischen Böden, grobkörnigen gut durchlüfteten und daher sauerstoffreichen Böden und feinkörnigen, schlecht durchlüfteten und sauerstoffarmen Böden ist unter anderem für Fragen der Biologie von Interesse.

■ **Tab. 5.3** Einige der wichtigsten Bodenzonen und deren Ausprägung und Vorkommen gemäß Weltbodenkarte FAO-UNESCO (1994)

Bodenzone	Beispiele, Kurzbeschreibung, Charakteristik	Geographisches Vorkommen
Tundraböden, Frostmusterböden, Permafrostböden	Humusfreie Rohböden der Kälte-wüsten, Cryosole, Gleye in humiden Kaltzonen, Moore im Staubereich über der Permafrostzone	Nordamerika, Eurasien, Antarktis, vegetationsfreie Gebiete und Tundren
Böden der Nadelwaldzone (Taiga)	Podsole, Gleye und Moore in Abhängigkeit vom Wassereinfluss, hoher Anteil an organischer Substanz (Torf)	Westsibirien, Nordosteuropa, Kanada
Böden der Laubwaldzone feucht gemäßigten Zonen	Je nach Ausgangsgestein und Wasserdargebot Braunerden, Pseudogleye, Rendzina, Ranker	Mitteleuropa, Nordosten der USA
Steppenböden, semiaride Graslandschaften	Meist dunkle, humusreiche, durch intensive Bioturbation geprägte Böden semiarider bis semihumider, Steppenklimate mit Grasvegetation, Schwarzerden, Tschernoseme, Phaeozeme	Zentralasien, mittlerer Westen der USA, Pampa Südamerikas
Böden arider Zonen, Wüsten, Halbwüsten	Ergs und Hamadas, Rohböden wie Ranker, Rendzina je nach Ausgangsgestein, Sandböden, Salz- und Gipsböden	Nordafrika, Arabien, südliches Zentralasien, westliches Nord- und Südamerika, Australien
Böden feuchter tropischer und subtropischer Zonen	Tiefgreifend verwitterte feinkörnige, oft nährstoffverarmte Böden, mit Fe- und Al-Oxiden (auch als Krusten) angereichert	Südamerika, Zentralafrika, Indien und Südostasien
Böden der Niederungen	Von Salzwasser geprägte Marschen, Auböden, Fluvisole, Gleye, Moore	Große Flusslandschaften und Deltas in China, Afrika und Südamerika, Küstengebiete
Gebirgsböden	Rohböden, Ranker, Rendzina	Gebirgszüge wie Himalaya, Anden, Rocky Mountains, Alpen

- **Nutzungsfunktion:** Mit der Nutzung von Böden durch den Menschen beschäftigen sich in erster Linie Land- und Forstwirtschaft. Aber auch die Entnahme von Boden als Massenrohstoff (Ton, Sand, Kies etc.) und die Umwidmung für Siedlung, Produktion, Verkehr ist eine wichtige Nutzungsfunktion und erfordert eine systematische Betrachtung von Böden hinsichtlich ihrer Eignung. So sind z. B. für die Land- und Forstwirtschaft die Nährstoffparameter, die Mächtigkeit oder auch die Korngrößenverteilung und damit die Durchlässigkeit und Speicherkapazität für Wasser bedeutend für eine Klassifizierung nach der Bodenfruchtbarkeit.

5.3.3 Regionale Klassifizierung

Da die Bodenbildung maßgeblich durch das Klima, die Vegetation und das Ausgangsgestein gesteuert wird, lassen sich bestimmte Böden bzw. Bodengesellschaften typischerweise in bestimmten Regionen der Erde finden (■ Tab. 5.3). Die Weltbodenkarte der FAO-UNESCO (1994) stellt diese Bodengesellschaften in stark generalisierter Form dar.

Diese global-geographische, sehr grobe und stark generalisierte Klassifizierung nach Regionen und deren klimatischen Eigenschaften wird je nach Maßstab und Fragestellung für kleinräumige Betrachtungen wesentlich detaillierter ausgearbeitet

Exkurs 5.1 Schutzgut Boden

Aufgrund seiner Eigenschaft als offenes System und damit der maßgebenden Beteiligung an unzähligen natürlichen und anthropogenen Stoffkreisläufen ist der Boden von großer ökologischer und wirtschaftlicher Bedeutung, die sich auch in den in ► **Abschn. 5.3.2** dargestellten vielfältigen Bodenfunktionen widerspiegelt. Der Schutz des Bodens ist von großem gesellschaftlichem Interesse und findet daher in Europa seit den 1970er Jahren Eingang in die nationale und internationale Gesetzgebung.

Basis für viele europäische Regelwerke, wie z. B. das deutsche Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG 1998) oder das Bodenschutzprotokoll (2002) der Alpenkonvention bildet die im Jahr 1972 vom Europarat verabschiedete Europäische Bodencharta (Europarat 1972), die in 12 Punkten die lebenswichtige Bedeutung des Bodens für die Menschheit definiert und Richtlinien für den Bodenschutz vorgibt:

1. Der Boden ist eines der kostbarsten Güter der Menschheit. Er ist ein fundamentaler Teil der Biosphäre und, zusammen mit der Vegetation und dem Klima, trägt er zur Regelung der Zirkulation bei und bestimmt die Qualität des Wassers.
2. Der Boden ist ein nur begrenzt vorhandenes Gut und leicht zerstörbar. Er bildet sich langsam durch physikalische, physikalisch-chemische und biologische Prozesse. Seine Produktionskapazität lässt sich durch sorgfältiges Vorgehen verbessern.
3. Jede regionale Planung muss von den Eigenschaften des Bodens und von den heutigen

und morgigen Bedürfnissen der Gesellschaft ausgehen. Böden geringerer Ertragsleistung und nicht bewirtschaftbare Flächen stellen ein großes Potenzial als Naturreserven, Wiederaufforstungsgebiete, Schutzzonen gegen Bodenerosion und Lawinen, Regulatoren für Wassersysteme und als Erholungsgebiete dar.

4. Land- und Forstwirte müssen Verfahren anwenden, bei denen die Qualität des Bodens erhalten bleibt. Die zum Ackerbau und zum Ernten verwendeten Verfahren sollten die Eigenschaften des Bodens erhalten und verbessern.
5. Der Boden muss gegen Erosion geschützt werden.
6. Der Boden muss gegen Verunreinigungen geschützt werden.
7. Die Entwicklung von Städten muss konzipiert und so geplant werden, dass guter Boden weitmöglichst davon verschont bleibt und eine Beeinträchtigung von landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Böden, des Naturhaushaltes und von Erholungsgebieten vermieden wird.
8. Die Kosten für den Schutz umliegender Gebiete müssen bei der Planung bereits mit einkalkuliert werden und, falls es sich nur um ein vorübergehendes Vorhaben handelt, müssen auch die Kosten für die Wiederherstellung im Budget berücksichtigt werden.
9. Eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Bodenreserven ist unerlässlich. Zu diesem Zweck sind Bodenkarten, ergänzt durch angemessene Spezialkarten über die Bodennutzung,

Geologie, die wirkliche und potenzielle Hydrogeologie der Böden und dergleichen erforderlich. Diese Karten sollen so angefertigt werden, dass sie auf internationaler Ebene miteinander verglichen werden können.

10. Weitere Forschungsarbeit und eine Zusammenarbeit der einzelnen Fachgruppen sind erforderlich. Von ihr hängt die Perfektionierung der Erhaltungstechniken in Landwirtschaft und Forsten ab, außerdem die Aufstellung der Normen für die Verwendung chemischer Düngemittel, die Entwicklung von Ersatzstoffen für giftige Schädlingsbekämpfungsmittel und der Verfahren zur Verringerung einer Verunreinigung.
11. Bodenerhaltung muss auf allen Stufen gelehrt werden und immer stärker in den Blickpunkt der Öffentlichkeit treten. Die Behörden sollten danach streben, dass die der Öffentlichkeit über die Massenmedien gegebenen Informationen korrekt sind.
12. Der Boden ist ein wesentliches, aber nur begrenzt vorhandenes Gut. Deshalb muss seine Nutzung rationell geplant werden, was bedeutet, dass die zuständigen Planungsbehörden nicht nur die unmittelbaren Bedürfnisse ins Auge fassen dürfen, sondern auf eine langfristige Erhaltung des Bodens hinarbeiten müssen, und dabei die Produktionskapazität des Bodens möglichst steigern oder aber zumindest erhalten sollen.

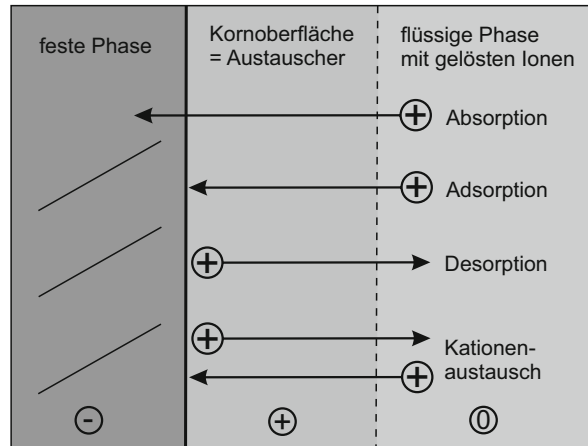
Europarat (1972) – Europäische Bodencharta

und ist regionalen Bodenkarten zu entnehmen. Eine Beschreibung der Vorgangsweise zur Erstellung von Bodenkarten findet sich beispielsweise bei Blume et al. (2011).

5.4 Bodenchemie

Neben Sorption und Ionenaustausch als wichtigen Prozessen bei Fragen der Schadstoffbindung spielen

■ **Abb. 5.2** Schematische Darstellung der verschiedenen Sorptionsprozesse



Protonenübergänge und damit die Entwicklung des pH-Werts eines Bodens sowie Elektronenübergänge im Rahmen von Redoxreaktionen eine wichtige Rolle bei der Pedogenese und auch bei der Beurteilung von Funktion und Wirkung eines Bodens. Die chemische Situation beeinflusst einerseits die Lebensbedingungen für das Edaphon, ist aber auch verantwortlich für Eigenschaften wie das Schadstoffbindungsvermögen eines Bodenkörpers.

5.4.1 Sorption und Ionenaustausch

Unter Sorption versteht man die Anlagerung (Adsorption) bzw. die Abgabe (Desorption) von gasförmigen und gelösten Stoffen an bzw. von Oberflächen. Von diesen oberflächenbezogenen Prozessen unterscheidet man die Absorption, bei der Stoffe in die Struktur einer festen Phase eingelagert werden. In Böden spielen vor allem die oberflächenbezogenen Vorgänge eine große Rolle. Statt der reinen Anlagerung oder Abgabe von Stoffen finden an den Oberflächen meist Ionenaustauschprozesse statt, d. h. Ad- und Desorption von verschiedenen Stoffen erfolgen gleichzeitig. In **Abb. 5.2** sind die Prozesse, die unter dem Sammelbegriff der Sorption im Boden stattfinden können, dargestellt.

Stoffe, die in der Lage sind, andere Stoffe an ihren Oberflächen anzulagern bzw. auszutauschen, nennt man Sorbenten, die angelagerten Substanzen werden als Sorbate bezeichnet. Sorbate können geladene Atome oder Moleküle sein, die durch elektrostatische Bindungen an entgegengesetzt geladene

nen Oberflächen anhaften. Es kann aber auch das neutrale Wassermolekül angelagert werden. Aufgrund seines Dipolcharakters wird es über kovalente Bindungen an Oberflächen gebunden. Dieser Effekt kommt z. B. bei der Bildung von Haftwasser (vgl. **Abschn. 5.5**) zum Tragen.

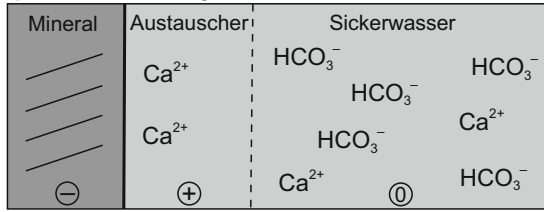
Die Eigenschaften einer festen Phase als Sorbent hängen von der Größe der verfügbaren Oberflächen und von deren Ladungsverhältnissen ab und werden als Ionenaustauschkapazität bezeichnet. Da in Böden meist negative Ladungen vorherrschen, spielt hier besonders die Kationenaustauschkapazität (KAK) eine wichtige Rolle.

Als Oberfläche bezeichnet man die Summe aller Grenzflächen zwischen der festen Phase und der flüssigen oder gasförmigen Phase, aus welcher Sorbate zur Verfügung gestellt werden. Bezogen auf einen Bodenkörper mit einer definierten Masse wird die Gesamtoberfläche des Sorbenten von den Oberflächen der einzelnen Bodenkörner gebildet. Diese spezifische Oberfläche (angegeben in $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) ist umso größer, je kleiner die Korngrößen des Bodenkörpers sind. Für kugelförmige Körner ist die spezifische Oberfläche eine Funktion des Kornradius und beträgt in sandigen Böden meist weniger als $0,1 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$, kann aber in tonigen Böden bis zu $500 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$ betragen.

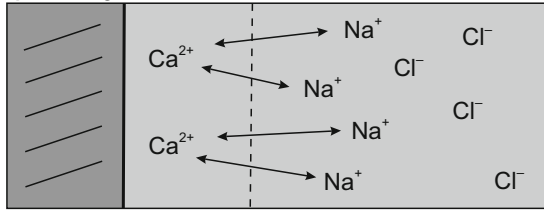
Die Korngrößenverteilung eines Bodens ist ein wesentlicher Faktor für die Adsorption von Stoffen und damit für das Bindungsvermögen in Bezug auf Schadstoffe, das in **Abschn. 5.3.2** bereits thematisiert wurde und das eine wichtige Bodeneigenschaft bei umweltgeologischen Fragestellungen darstellt.

Versalzung durch Bewässerung

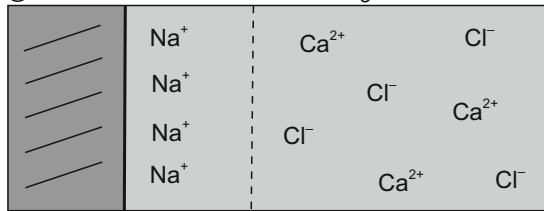
① versickerndes Regenwasser im Süßwasserboden



② Eindringen von salinarem Wasser



③ Sickerwasser nach Kontakt mit Regenwasserboden



■ **Abb. 5.3** Beispiel für Kationenaustauschprozesse. Ein Boden wird durch künstliche Bewässerung mit Wasser gespeist, das aufgrund von Verdunstung eine erhöhte Mineralisation aufweist. Die Belegung der Kornoberflächen richtet sich nach der Kationenkonzentration des Sickerwassers. Die Zusammensetzung des Sickerwassers, nach erfolgter Gleichgewichtseinstellung des Austauschers, lässt Rückschlüsse auf die Prozesse in der Bodenlösung zu

Neben der spezifischen Oberfläche ist die Oberflächenladung der zweite wichtige Faktor, der Sorptionsprozesse in Böden beeinflusst. Generell können zwei verschiedene Arten von Oberflächenladungen beobachtet werden.

- Die permanente Ladung ist unabhängig von den Umgebungsbedingungen und ergibt sich durch den isomorphen Ersatz von höherwertigen durch niederwertige Kationen im Kristallgitter von Mineralen. Sie beschränkt sich fast ausschließlich auf Schichtsilikate, in denen die Zentralatome durch weniger positiv geladene Ionen (z. B. Al³⁺ gegen Si⁴⁺ oder Mg²⁺ gegen Al³⁺) ausgetauscht werden. Das Kristallgitter ist durch diesen Ersatz dauerhaft negativ geladen, positiv geladene Ionen bzw. Dipolmoleküle können an den Oberflächen angelagert werden.
- Die variable Ladung entsteht durch die Abdissoziation von Protonen funktioneller Gruppen. Es bleiben negativ geladene OH-Gruppen zurück, an die sich andere Kationen anlagern können. Da die Abspaltung von Protonen

umso leichter geht, je höher der pH-Wert der Bodenlösung ist, richtet sich diese Art der Ladung stark nach den Umgebungsbedingungen und wird daher als variabel oder auch als pH-abhängige Ladung bezeichnet.

Ionenaustauschprozesse sind reversible Vorgänge, d. h. ein Austausch zwischen adsorbierten Kationen und solchen in der Bodenlösung findet solange statt, bis sich Gleichgewichtsverhältnisse einstellen. Eine Änderung der Konzentration einer bestimmten Ionenspezies in der Lösung führt zur Einstellung eines neuen veränderten Gleichgewichts.


Sehr gut lässt sich der Prozess des Kationenaustauschs am Beispiel der Bodenversalzung durch künstliche Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen zeigen. Künstliche Bewässerung findet vor allem in semiariden bis ariden Klimazonen statt. Wasser wird zunächst aus Grundwasserreservoirs oder aus Oberflächengewässern entnommen und weist dadurch eine deutlich höhere Mineralisierung auf als das natürlich versickernde Regenwasser. Wäh-

Exkurs 5.2 Tonmineralogie

Wie bereits an mehreren Stellen dieses Kapitels erläutert, ist die Korngrößenverteilung der mineralischen Bestandteile eines Bodens für seine morphogenetischen Eigenschaften, aber auch für seine Funktionen und Wirkungen von großer Bedeutung. Eine besondere Rolle bei der Charakterisierung von Böden spielen die kleinsten Körner, nämlich jene der Tonfraktion, die eine Teilchengröße von maximal 2 μm aufweisen. Bei diesen kleinsten Teilchen handelt es sich meist um Tonminerale, die bei der Pedogenese als Verwitterungsprodukt aus primären Silikaten wie Glimmern, Feldspäten, Amphibolen oder Olivin gebildet werden. Aufgrund der geringen Korngrößen und der damit verbundenen großen spezifischen Oberfläche sind sie maßgebend für das Adsorptionsvermögen und für Funktionen wie den Rückhalt von Haftwasser oder auch die Schadstoffbindung von Böden

verantwortlich. Daneben verleihen sie den Böden ihre Plastizität und ihre Quellfähigkeit, ebenfalls sehr wichtige Eigenschaften bei vielen umweltgeologischen wie auch geotechnischen Fragestellungen. Nach dem Aufbau ihrer Kristallstruktur werden Tonminerale in zwei Gruppen eingeteilt, die Zweischicht- und die Dreischicht-Tonminerale. Bei den Zweischichtmineralen besteht die Grundstruktur aus einer Silizium-Sauerstoff-Tetraeder-Schicht und einer Aluminium-Hydroxid-Oktaederschicht, die miteinander über Sauerstoffbrücken verbunden sind. Häufigster Vertreter der Zweischicht-Tonminerale ist Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Isomorpher Ersatz ist bei Zweischicht-Tonmineralen selten, sodass es meist nicht zu einem negativen Ladungsüberschuss kommt. Kaolinit weist deshalb nur ein vergleichsweise geringes Adsorptionsvermögen auf.

Dreischicht-Tonminerale weisen eine Struktur auf, die jener der Glimmer entspricht und aus zwei Tetraederschichten und einer dazwischenliegenden Oktaederschicht besteht. Sowohl in den Tetraedern als auch in den Oktaedern kann durch isomorphen Ersatz ein negativer Ladungsüberschuss entstehen, der für ein gutes bis sehr gutes Adsorptionsvermögen verantwortlich ist. Wichtige Vertreter der Dreischicht-Tonminerale sind z. B. Illit, Vermiculit und Montmorillonit. Einige dieser Minerale neigen zur Einlagerung von Wasser zwischen den Schichten. Wechselnde Wassergehalte führen daher zur Schrumpfung oder zum Aufquellen toniger Böden. Vertiefende Informationen über die Eigenschaften der bodenbildenden Tonminerale finden sich z. B. in Velde & Barré (2010) oder Velde & Meunier (2008).

rend der Bewässerung erfolgt eine Aufkonzentration durch Verdunstung. Die höher mineralisierten Wasser versickern in den Untergrund und transportieren Kationen in die ungesättigte Bodenzone, die im natürlichen Regime nicht oder nur untergeordnet auftreten. Es kommt es, wie in  Abb. 5.3 dargestellt, z. B. zum Austausch von Natrium- gegen Kalzium-Ionen an den Bodenkörnern, während die Kalzium-Ionen verstärkt in die Bodenlösung übergehen.

5.4.2 Bodenazidität

Mit dem Begriff „Bodenazidität“ wird der Gehalt an gelösten Säuren im Boden beschrieben, von denen Wasserstoffionen (H^+) dissoziieren. Da die H^+ -Ionenkonzentration um mehrere Zehnerpotenzen variieren kann, wird sie über den pH-Wert quantitativ beschrieben. Dieser stellt den negativen Logarithmus der Konzentration dar ($\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$). Eine saure Bodenlösung, in der $10^{-3} \text{ mol l}^{-1} \text{ H}^+$ vorliegen, weist folglich einen pH-Wert von 3 auf. In einer neutralen Bodenlösung (pH 7) liegen $10^{-7} \text{ mol l}^{-1}$ freie H^+ -Ionen vor, in einer basischen Lösung bzw.

einem alkalischen Boden dominieren OH^- -Ionen zu Lasten von H^+ , die eine deutliche geringere Konzentration von z. B. $10^{-9} \text{ mol l}^{-1}$ (pH 9) aufweisen.

Verantwortlich für die Einstellung des pH-Werts im Boden ist zunächst das Ausgangsgestein und damit die für die Hydrolyse verfügbaren Bodenaustauscher. In einem stark kalkhaltigen, also von Kalzium dominierten Boden, können aufgrund der Zweiwertigkeit des Kalziums (Ca^{2+}) pro Feststoffmolekül zwei Wassermoleküle dissoziiert werden. Es stellt sich hier ein pH-Wert von etwa 8 ein. Primär bereits saure Böden werden in einem silikatischen Ausgangsgestein und damit z. B. einem von Aluminium (Al^{3+}) dominierten Substrat entwickelt. Durch Lösung eines Salzes des dreiwertigen Aluminiums werden pro Feststoffmolekül drei Wassermoleküle dissoziiert und damit drei H^+ -Ionen freigesetzt. Der pH-Wert liegt im Bereich von 4.

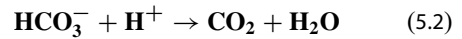
Durch die weiteren bodenbildenden Vorgänge, vor allem die biologischen, werden zusätzliche H^+ -Ionen freigesetzt. Durch den partiellen Abbau abgestorbener Organismenreste im Boden bilden sich Humin- und Fulvosäuren. Von dem als Humifizierung bezeichneten komplexen Abbauprozess

ist organisches Material unter Mitwirkung von Mikroorganismen betroffen. Es entstehen hochmolekulare organische Substanzen, an denen sich unter anderem Carboxy-Gruppen (COOH-) angelagert haben. Von diesen Carboxy-Gruppen dissoziieren relativ leicht H⁺-Ionen ab und erhöhen die Bodenazidität. Während unter dem Begriff der Huminsäuren die wasserunlöslichen hochmolekularen Substanzen zusammengefasst werden, steht der Begriff Fulvosäure für wasserlösliche Substanzen, die sich durch kleinere Moleküle auszeichnen. Details zu den chemischen Vorgängen der Humifizierung sind z. B. bei Schwedt (1996) beschrieben.

Durch die Aktivität lebender Organismen im Boden in Form der Wurzelatmung wird CO₂ an die Bodenluft abgegeben. Das freigesetzte Gas löst sich im Bodenwasser und bildet Kohlensäure (H₂CO₃). Pflanzen, die sich vorwiegend durch Kationenaufnahme ernähren, müssen zum Ladungsausgleich H⁺-Ionen abgeben, was zu einer zusätzlichen Versauerung von stark durchwurzelten Böden beiträgt.

Weitere Prozesse, wie der Eintrag saurer Niederschläge, Nitrifikation von Stoffwechselprodukten oder auch die Oxidation von Eisensulfiden im Boden, führen zu einem weiteren Absinken der pH-Werte. Häufig hält der Boden Puffersubstanzen bereit, die in der Lage sind, die freien H⁺-Ionen zu binden und damit in eine undissoziierte Form zu überführen.

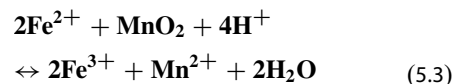
Ein sehr bedeutendes Puffersystem im Boden ist das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, das in kalkhaltigen Böden wesentlichen Einfluss auf die Bodenazidität nimmt. Bei der Zufuhr von H⁺-Ionen durch einen der oben beschriebenen Prozesse kommt es in Kalkböden zur Lösung von Kalzit, dabei werden Hydrogencarbonat-Ionen (HCO₃⁻) und gelöstes Kalzium bzw. im nächsten Schritt CO₂ und Wasser entsprechend den Gl. 5.1 und 5.2 gebildet. Trotz Eintrag von H⁺ in den Boden kommt es nicht zu einer Erhöhung der freien H⁺-Ionen, der pH-Wert bleibt stabil, solange CaCO₃ oder HCO₃⁻ zur Verfügung stehen. Erst wenn die Puffersubstanzen verbraucht sind, ist die Säureneutralisationskapazität (SNK) des Bodens erschöpft und die Bodenazidität steigt.



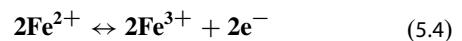
Neben den dargestellten Lösungsreaktionen kann auch eine mechanische Auswaschung von Puffersubstanzen zum Verlust der Pufferkapazität führen. Dies ist vor allem in humiden Klimaten mit starkem Sickerwasserdurchsatz der Fall und mit dafür verantwortlich, dass hydromorphe Böden meist saurer sind, als jene in ariden Klimaregionen, in denen wenig Wasserumsatz stattfindet. Um der Versauerung durch Bodenauswaschung entgegenzuwirken, ist es in der Land- und Forstwirtschaft gängige Praxis, Böden zu kalken und damit die Pufferkapazität künstlich aufrechtzuerhalten.

5.4.3 Redoxvorgänge im Boden

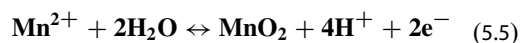
Bei Reduktions-Oxidations-Reaktionen (kurz: Redox-Reaktionen) finden Elektronenübergänge statt: Unter Reduktion versteht man die Aufnahme von Elektronen (Ladungszahl nimmt ab) und mit Oxidation wird die Elektronenabgabe (Ladungszahl nimmt zu) bezeichnet. Da in einer Lösung keine freien Elektronen vorkommen können, müssen Reduktion und Oxidation synchron auftreten, d. h. eine Oxidationsreaktion kann nur ablaufen, wenn gleichzeitig ein Reaktionspartner verfügbar ist, der das abgegebene Elektron aufnimmt, also reduziert wird. Die Gl. 5.3 bis 5.5 zeigen das Beispiel einer Redoxreaktion zwischen Fe²⁺ und Mn⁴⁺ in saurer Lösung:



mit den Teilreaktionen:



(Oxidation von zweiwertigem zu dreiwertigem Eisen, Reaktion von links nach rechts)



(Reduktion von vierwertigem zu zweiwertigem Mangan, Reaktion von rechts nach links)

In welche Richtung diese synchrone Reaktion stattfindet, hängt vom Redoxpotenzial der Lösung ab. Jede Halbreaktion weist ein für sie charakteristisches spezifisches Standardpotenzial auf. Das Redoxpotenzial eines Reaktionspaares ergibt sich dann aus dem Verhältnis zwischen den Konzentrationen der reduzierten und der oxidierten Form und dessen Abweichung vom Gleichgewichtszustand, dem Standardpotenzial. Das Redoxpotenzial einer Lösung oder auch des Bodens wird in Volt angegeben und stellt das Gesamtpotenzial aller im System enthaltenen Redoxpaare im Vergleich zu einer Standardelektrode dar. Positive Werte geben generell oxidierende Verhältnisse, negative Werte reduzierende Verhältnisse an. In natürlichen Böden werden Redoxpotenziale zwischen $-0,3\text{ V}$ und $+0,8\text{ V}$ gemessen. Hohe Potenziale treten in gut durchlüfteten, grobkörnigen und trockenen Böden auf, in denen von Organismen verbrauchter Sauerstoff über die Atmosphäre ausgeglichen wird. Geringe Potenziale charakterisieren schlecht durchlüftete, feinkörnige oder stark wasserhaltige Böden, in denen nur ein geringer Austausch mit der Atmosphäre und damit keine Sauerstoffzufuhr stattfindet.

Wie ► Gl. 5.3 zeigt, gehen Redoxreaktionen auch mit einer Veränderung der H^+ -Ionenkonzentration einher. So steigt der pH-Wert in unserem Beispiel durch die Hinreaktion an, H^+ -Ionen werden verbraucht. Es besteht demnach ein direkter Zusammenhang zwischen Redoxpotenzial und pH-Wert eines Bodens.

Weiterführende Informationen über die chemischen Vorgänge im Boden liefern z. B. Blume et al. (2013) oder Pansu und Gautheyrou (2006).

5.5 Bodenlösung

Die Bodenlösung (auch Bodenwasser) ist das Bindeglied zwischen der Pedosphäre und der Hydrosphäre. Es füllt, als Bestandteil des Bodens, Teile des Porenraums zwischen den festen Bodenbestandteilen aus und wirkt als Reagens und Transportmittel für andere Bodenbestandteile. Seine Zusammensetzung, wie auch der Anteil an Bodenlösung in Bezug auf das Gesamtvolumen eines Bodenkörpers, hängt maßgebend von

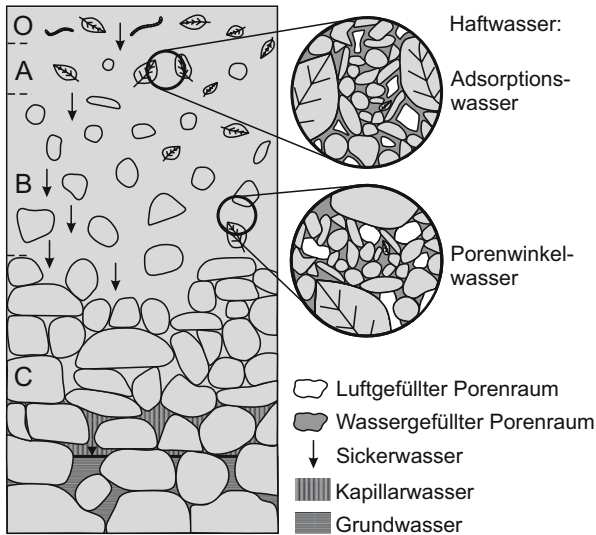
der Bodenbeschaffenheit ab. Andererseits trägt die Beschaffenheit und Menge des Bodenwassers wesentlich zur Bodenbildung bei und ist, wie in ► Abschn. 5.3.1 dargelegt, ein wichtiges Charakteristikum zur Klassifizierung von Böden.

Da das Bodenwasser als Teil des Wasserkreislaufs gesehen werden kann, sind Ausführungen zum Thema Bodenlösung vor allem im ► Kap. 4 verankert. An dieser Stelle soll ergänzend noch eine charakteristische Eigenschaft von Böden, die Wasserkapazität, erläutert werden.

Wasser kann im Boden als Sickerwasser auftreten, das den Bodenkörper in einer gravitativ bedingten Abwärtsbewegung durchfließt, bis es die Grundwasseroberfläche erreicht. Daneben kann Stauwasser auftreten, das aufgrund einer abdichtenden Bodenschicht oder der Wassersättigung des Bodens nicht abfließen kann. Die Menge dieses Wassers hängt in erster Linie vom Wasserdargebot bzw. von der Existenz einer stauenden Schicht im Bodenkörper ab.

Ein Teil des in den Boden eindringenden Niederschlagswassers kann jedoch, sofern es nicht zu Stauwasserbildung kommt, entgegen der Schwerkraft in den Poren zurückgehalten werden (Adsorptionswasser oder Porenwinkelwasser). Zudem kann Wasser von der Grundwasseroberfläche aus in Poren mit ausreichend kleinem Durchmesser ($< 10\text{ }\mu\text{m}$) nach oben steigen (Kapillarwasser). Verantwortlich für die Bildung von Haft- und Kapillarwasser ist der Dipolcharakter des Wassermoleküls (siehe ► Kap. 4) in Kombination mit den geladenen Oberflächen der Bodenkörner, an denen die Dipolmoleküle des Wassers anhaften können. Je größer die Oberfläche des Bodens ist, umso mehr Haftwasser kann angelagert werden. Die quantitative Beschreibung der Fähigkeit eines Bodens, Haftwasser aufzunehmen und gegen die Schwerkraft in der ungesättigten Bodenzone zu halten, bezeichnet man als Feldkapazität. Sie ist eine charakteristische Bodeneigenschaft, die von der Korngrößenverteilung und damit dem effektiven Porenraum, dem Bodengefüge, der Bodenmächtigkeit und dem Anteil an organischer Substanz abhängt.

Die verschiedenen, innerhalb eines Bodenkörpers möglicherweise auftretenden Arten von Wasser sind in ► Abb. 5.4 dargestellt.



■ Abb. 5.4 Auftreten von Wasser im Untergrund

Die Feldkapazität beschreibt einen Zustand, bei dem das Sickerwasser in den Grundwasserbereich abgesunken ist und eine Austrocknung des Bodens durch Verdunstungsprozesse an der Oberfläche noch nicht eingesetzt hat. In diesem Stadium enthält der Boden ein Maximum an Haftwasser und es besteht ein hydraulisches Gleichgewicht. Die Feldkapazität wird in Prozent, bezogen auf das Volumen des trockenen Bodens, angegeben und ist in sandigen Böden geringer als in schluffigen Substraten. Die höchste Feldkapazität weisen tonige Böden auf.

5.6 Bodenluft

Jener Anteil des Porenraums eines Bodenkörpers, der nicht mit Bodenlösung in Gestalt von Sicker- oder Haftwasser gefüllt ist, beinhaltet ein Gemisch aus Luft, anderen gasförmigen Substanzen und Wasserdampf. Wasser und Bodenluft, auch als Grundluft bezeichnet, ergänzen sich damit zu 100 % des Porenvolumens im Boden. Bei Feldkapazität ist der Bodenluftanteil in einem nicht eingestauten Boden daher am geringsten. Das Luftvolumen kann bei Feldkapazität in Sanden bis 40 Vol.-%, in Schluffen bis 25 Vol.-% und in Tonen ca. 5–10 Vol.-% betragen.

Im Vergleich zu atmosphärischer Luft weist Bodenluft eine deutlich andere Zusammensetzung

auf. Die biologische Aktivität im Boden, also die Wurzelatmung und die Atmung des Edaphons führen zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration zugunsten des CO_2 -Gehalts. Dieser Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je mächtiger und je weniger durchlässig die Überlagerung ist. Während es in den obersten Schichten eines grobkörnigen Bodens noch zu einem raschen Austausch zwischen Bodenluft und Atmosphäre kommt und daher in den Porenräumen annähernd Atmosphärenbedingungen herrschen, ist der CO_2 -Gehalt in tieferen Bodenhorizonten oder in feinkörnigen Böden, in denen nur ein sehr langsamer Austausch mit der Luft über dem Bodenkörper stattfindet, stark erhöht. Er kann mit Spitzenwerten von mehr als 5 Vol.-% um mehr als das 1000-fache gegenüber der Atmosphäre erhöht sein. Da die Bioaktivität jahreszeitlichen, aber auch täglichen Schwankungen unterliegt, zeigen sich in der Sauerstoff-Kohlendioxid-Verteilung Schwankungen, die jedoch mit zunehmender Bodentiefe abgeschwächt werden. In ■ Tab. 5.4 sind die wichtigsten Parameter von Atmosphäre und Bodenluft vergleichend angeführt.

Unter aeroben Bedingungen, d. h. sofern Sauerstoff verfügbar ist, ist die CO_2 -Produktion in der Bodenluft äquimolar. Es kommt also nicht zu einer Erhöhung des Gasdrucks, da gleich viel O_2 verbraucht, wie CO_2 gebildet wird. In einem von Vegetation bedeckten Boden (z. B. Waldboden) können durch die biologischen Prozesse mehrere Tonnen

CO₂ pro Hektar und Jahr produziert werden. Die Produktionsrate ist dabei in den obersten stark durchwurzelten und von Edaphon dichtest besiedelten Bereichen (wenige Dezimeter) am größten und nimmt mit der Tiefe stark ab.

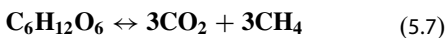
Die Bildung von CO₂, hier beispielhaft für die Glucoseumwandlung im aeroben Milieu, läuft nach

► Gl. 5.6 ab:



Der Gehalt an elementarem Stickstoff und Edelgasen wird von den biologischen Prozessen im Boden nur wenig beeinflusst und entspricht jenem der atmosphärischen Luft.

Neben diesen Hauptparametern der Luft kann sich unter anaeroben, sauerstoffarmen Bedingungen aus der organischen Substanz (hier: Glucose) Methan bilden, dargestellt in ► Gl. 5.7:



Da hier die Umsetzung von Feststoffen zu Gasen erfolgt, werden zusätzlich Gase produziert, das heißt, dass anders als bei der Bildung von CO₂ in aerobem Milieu, der Gasdruck erheblich ansteigen kann. Da diese Abbaureaktion außerdem ein exothermer Vorgang ist, geht sie mit einer Erhöhung der Bodentemperatur einher. Anaerobe Verhältnisse können z. B. in einem feinkörnigen, gering luftdurchlässigen Boden oder in einem Boden mit Wasserüberschuss und hohem organischen Anteil (z. B. Moor) auftreten.

Von großer Relevanz ist Methan im Einflussbereich von künstlichen Ablagerungen mit hohem organischem Anteil. Während Methan in der natürlichen Bodenluft (Ausnahme Moor) meist nur als Spurenstoff im ppm-Bereich auftritt, können in der auch als Deponiegas bezeichneten Bodenluft von Altanlagen Methangehalte von mehr als 50 Vol.-% erreicht werden. Im Detail wird eine typische Zusammensetzung und Entwicklung von Deponiegasen im ► Kap. 8 beschrieben.

Weitere Spurenstoffe wie Lachgas (N₂O) oder Ammoniak werden in der Bodenluft im Rahmen von Prozessen des Stickstoffkreislaufs (siehe ► Kap. 2) angereichert.

Die relative Luftfeuchtigkeit ist im Boden generell sehr hoch und unterschreitet nur in den ober-

■ **Tab. 5.4** Vergleich zwischen den durchschnittlichen Werten der wichtigsten Parameter in Atmosphärenluft und Bodenluft

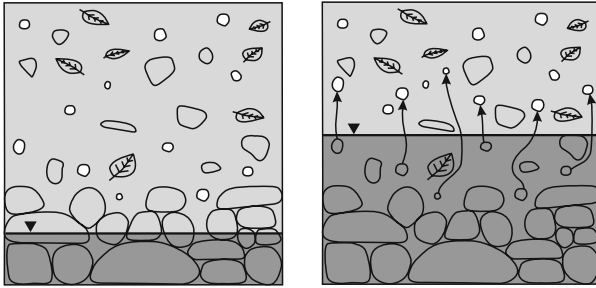
Komponente	Atmosphäre [Vol.-%]	Bodenluft [Vol.-%]
Sauerstoff	20,9	< 20,6
Stickstoff	79	~ 79
Kohlendioxid	0,04	> 0,2
Edelgas	1	1
Spurenstoffe (CH ₄ , N ₂ O, H ₂ S etc.)	ppm-Bereich	ppm-Bereich bis > 50 Vol.-% (z. B. CH ₄ bei anthropogenem Einfluss)
Wasserdampf	schwankend	95–100 % Sättigung

ten, der Austrocknung ausgesetzten Schichten von wenigen Zentimetern den Wert von 95 %. Man kann also von einer generellen Wasserdampfsättigung der Bodenluft sprechen.

Die Bewegung von Bodenluft kann durch Konvektion oder durch Diffusion erfolgen. Konvektiver Bodenlufttransport wird ausgelöst durch Volumensänderungen als Folge von Temperatur- oder Druckveränderungen im Boden. Dies spielt vor allem bei Gasneubildung in anaerobem Milieu eine wichtige Rolle. Zusätzlich ist die Verdrängung durch eindringende Wasser ein Faktor, der zu konvektiven Bewegungen der Bodenluft führt. Gravitativ absinkende Sickerwässer verdrängen beim Durchfließen des ungesättigten Porenraums die leichtere Bodenluft aus den tiefer liegenden Poren in höhere Bereiche des Bodenkörpers bzw. führen zum Austritt von Bodenluft in die Atmosphäre.

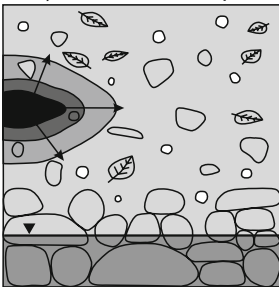
Der Transportmechanismus der Diffusion ist dagegen rein auf Konzentrationsunterschiede, also Gradienten im Partialdruck des jeweiligen Gases zurückzuführen. Ob und in welchem Ausmaß diffusionsbedingte Bewegung stattfindet, hängt einerseits von der Molekülgröße des jeweiligen Gases, andererseits vom Medium ab, durch welches das Gas hindurchdiffundiert. Der tatsächliche Gasfluss erfolgt in Abhängigkeit von Partialdruckgradient und Diffusionskoeffizient. Der Mechanismus des diffusiven Gastransports ist in der Altlastenpraxis bei der Bewertung der Ausbreitung leicht flüchtiger Schadstoffe von großer Bedeutung.

a) konvektiver Transport



Bodenluft entweicht in obere wasserfreie Poren

b) diffusiver Transport



Molekültransport in Richtung geringer Konzentration

■ **Abb. 5.5** Schematische Darstellung des Bodenlufttransports durch (a) konvektive und (b) diffusive Prozesse

5

Beide Transportmechanismen sind grafisch in **Abb. 5.5** dargestellt.

5.7 Anthropogene Einflüsse auf den Boden

Das sensible Zusammenspiel von Bodengefüge, Bodenchemie und Edaphon lässt sich durch menschliche Eingriffe relativ leicht beeinflussen. Ein einfaches Beispiel dafür ist die Bodenverdichtung als Folge regelmäßiger Bodenbelastung durch schwere Fahrzeuge, die den Boden vor allem in seiner Speicherfunktion beeinträchtigen. Am häufigsten ist dies in der hochtechnisierten Landwirtschaft zu beobachten, aber auch auf Skipisten oder Golfplätzen werden die Auswirkungen der Bodenverdichtung deutlich.

Unter Bodenverdichtung versteht man eine Verformung des Bodengefüges aufgrund von mechanischer Belastung, die dazu führt, dass sich die Lagerungsdichte des Bodens erhöht und im Gegenzug sein Porenvolumen schrumpft. Eine reine Verdichtung von Bodenschichten, hervorgerufen durch das regelmäßige Befahren von landwirtschaftlichen Nutzflächen

mit schweren Landmaschinen, führt zunächst dazu, dass sich die Wasser- und Luftdurchlässigkeit des Bodens verringert. Neben der höheren Lagerungsdichte kommt es zu einer Einregelung der Bodenkörner parallel zur Oberfläche, so dass die Veränderungen von Bodenkennwerten anisotropen Charakter haben – es stellen sich in vertikaler und horizontaler Richtung stark unterschiedliche Durchlässigkeiten ein. Mit zunehmender Entfernung von der Belastungsquelle, d. h. mit zunehmender Bodentiefe, nimmt das Ausmaß dieser Veränderung ab, so dass anthropogen verdichtete Böden oft in den obersten Horizonten deutlich dichter sind als in tieferen Bereichen. Die Folge ist eine stark verringerte Feldkapazität.

Bei einer flächigen Verdichtung kommt es in der Folge zur Verringerung der Grundwasserneubildung auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen, verbunden mit dem Absinken der Grundwasseroberfläche. Niederschläge fließen stattdessen als Oberflächenabfluss rasch dem nächsten Vorfluter zu. Die Folge ist ein Anstieg der mittleren Oberflächenabflüsse sowie erhöhte Hochwasserabflussspitzen. Das Ganze ist mit einer erhöhten Transportkraft des Oberflächengewässers und damit verstärkter

Erosion verbunden. Da die Erhöhung der Oberflächenabflüsse mit einer gleichzeitigen Verringerung der unterirdischen Abflüsse einhergeht, wird der Grundwasserhaushalt dadurch nachhaltig verändert, was in weiterer Folge z. B. zum Austrocknen von Quellen oder Feuchtgebieten führen kann.

Dieser kurze Überblick der möglichen Folgewirkungen der Bodenverdichtung – die nur eine von vielen Beispielen anthropogener Einflussnahmen ist – zeigt die komplexen Funktionen des Bodens und gleichzeitig die große Sensibilität der Pedosphäre, die auch für umweltgeologische Fragestellungen von großer Bedeutung ist.

Pedosphäre – Einiges, was man wissen sollte

- Der Begriff „Boden“ kann aus sehr verschiedenen fachlichen Perspektiven betrachtet werden und wird von den unterschiedlichen Disziplinen auch unterschiedlich definiert und abgegrenzt. Während sich Bodenkundler und Biologen vor allem für die organischen Komponenten interessieren, sind für Ingenieurgeologen seine physikalischen, für Hydro- und Umweltgeologen seine physikalisch-chemischen Eigenschaften von besonderer Bedeutung.
- Boden besteht in seiner Gesamtheit aus organischen und mineralischen Anteilen. Der Anteil organischer Komponenten nimmt mit der Tiefe in der Regel ab, der mineralische Anteil entsprechend zu. Die obersten Bodenhorizonte werden als organisch geprägt betrachtet, wenn sie mindestens zu 30 % aus organischer Substanz bestehen.
- Die Bodenbildung erfolgt in Abhängigkeit von klimatischen Faktoren (Temperatur und Wasserverfügbarkeit) durch die Verwitterung der organischen Auflage und des unterlagernden Gesteins. Böden, die vor allem durch das Ausgangsgestein geprägt werden, bezeichnet man als lithomorph, solche, die vor allem vom zirkulierenden Wasser geprägt sind, als hydromorph. Durch menschliche Aktivitäten veränderte Böden werden als anthropomorphe Böden klassifiziert.

- Zur Klassifizierung von Böden können morphogenetische, funktionale oder regionale Eigenschaften des Bodens herangezogen werden. Aufgrund der Vielfalt an möglichen Bodenausprägungen gibt es zahlreiche Klassifizierungen. Eine, wenn auch sehr grobe, dafür aber globale Klassifizierung erfolgt über die Weltbodenkarte der FAO-UNESCO, die seit 1994 verfügbar ist. Eine weltweit gültige Basis für regionale Klassifizierungen bildet die World Reference Base of Soil Resources (WRB).
- Die chemischen Verhältnisse innerhalb eines Bodens werden von der Mineralogie der Bodenkörner, der Korngrößenverteilung und vom Anteil organischer Substanzen geprägt. Diese Faktoren sind ursächlich dafür verantwortlich, ob Sorptions- und Kationenaustauschprozesse stattfinden und in welchem pH- und Redoxmilieu sich der Boden befindet. Die Bodenchemie ist wesentlich für das Schadstoffbindungsvermögen und damit umweltgeologisch von großer Relevanz.
- Wieviel Bodenlösung, auch Sickerwasser, ein Boden aufnehmen kann, wird vor allem durch die Korngrößenverteilung bestimmt. Die Wassermenge, die in einem Boden im Gleichgewichtszustand gebunden ist, wird als Feldkapazität bezeichnet.
- Bodenluft ist gegenüber atmosphärischer Luft deutlich verändert. Während der CO_2 -Gehalt durch biologische Aktivität im Boden stark erhöht sein kann, ist der Sauerstoffgehalt immer geringer als in der Atmosphäre. Bodenluft weist im Gegensatz zu Atmosphärenluft so gut wie immer Wasserdampfsättigung auf.

? Testfragen zum Kapitel Pedosphäre

1. Unterschiedliche Fragestellungen zur selben Materie können zu unterschiedlichen Definitionen desselben Begriffs führen. Beschreiben Sie anhand von Beispielen die unterschiedlichen Zugänge, die die verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen zum Boden haben.

2. Erläutern Sie die generelle Gliederung eines Bodenkörpers in unterschiedliche Horizonte. Wie beeinflussen die pedogenetischen Faktoren die Ausprägung dieser Horizonte?
3. Welche Bodenfunktionen werden unterschieden? Beschreiben Sie beispielhaft eine Klassifizierung von Böden (1) nach ihrem Schadstoffbindungsvermögen (Regelungsfunktion) und (2) nach ihrer Eignung als Massenrohstoff (Nutzungsfunktion).
4. Warum wird Boden als Schutzgut betrachtet? Nennen Sie einige der Maßnahmen, die in den vergangenen Jahrzehnten in die Europäische Gesetzgebung zum Bodenschutz eingeflossen sind.
5. Erläutern Sie, warum der Tonmineralgehalt von Böden und seine Ionenaustauschkapazität von großer Bedeutung bei geotechnischen, hydrogeologischen und umweltgeologischen Fragestellungen sind.
6. Beschreiben Sie die Kationenaustauschprozesse, die bei Zuströmung salziger Wässer in einen Bodenkörper ablaufen. Woran erkennt man, dass auf einen Boden Salzwässer einwirken?
7. Was versteht man unter dem Begriff der Bodenazidität? Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Bodensubstrat, Ausgangsgestein und dem pH-Wert eines Bodens.
8. Was versteht man unter Bodenluft und wie unterscheidet sie sich von atmosphärischer Luft? Welche Prozesse im Boden führen zu einer natürlichen Bodenluftzusammensetzung? Von welchen Faktoren hängen die Verteilung der Hauptparameter und das Auftreten von Spurenstoffen ab?

Literatur

- Benckiser J (Hrsg) (1997) Fauna in Soil Ecosystems. M. Decker, New York
- Blum W (2012) Bodenkunde in Stichworten. Hirt in Gebr. Borntraeger, Berlin
- Blume H-P, Stahr K, Leinweber P (2011) Bodenkundliches Praktikum, 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Blume HP, Brümmer GW, Schwertmann U, Horn R, Kögel-Knabner I, Stahr K, Auerswald K, Beyer L, Hartmann A, Litz N, Scheinost A, Stanjek H, Welp G, Wilke B-M (2013) Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Neubearbeitung
- BBodSchG (1998). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten – Bundes-Bodenschutzgesetz. Bundesrepublik Deutschland
- Bodenschutzprotokoll (2002). Protokoll zur Durchführung der Alpenkonvention von 1991 im Bereich Bodenschutz. Alpenanrainernstaaten und Europäische Gemeinschaft
- Doukachaev WW (1883) Russkij Cernozem. St. Petersburg
- Europarat (1972) Europäische Bodencharta. Europäische Union, Brüssel
- EN ISO 14688-1 (2002). Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden. Europäisches Normungsinstitut
- FAO-UNESCO (1994) Soil map of the world. FAO, Rome
- Haslinger E, Reimann C, Birke M (2014) A Short Guide to Soil Formation and the Soils of Europe. In: Reimann C, Birke M, Demetriades A, Filzmoser P, O'Connor P (Hrsg) Chemistry of Europe's Agricultural Soils, Part B. Schweizerbart science publishers, Stuttgart
- IUSS (2014). Working Group WRB – World Reference Base for Soil Resources 2014. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome
- Merritts D, De Wet A, Menking K (1998) Environmental Geology – An Earth System Science Approach. Freeman and Company, New York
- Nestroy O, Aust G, Blum WEH, Englisch M, Hager H, Herzberger E, Kilian W, Nelhiebel P, Ortner G, Pecina E, Pehamberger A, Schneider W, Wagner J (2011) Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. Mitt Der Österr Bodenkundl Ges 79:1–98 (Wien)
- ÖNORM S 2088-2 (2000). Altlasten, Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Boden, Ausgabe 2000-06-01. Österreichisches Normungsinstitut
- Pansu M, Gautheyrou J (2006) Handbook of Soil Analysis – mineralogical, organic and inorganic methods. Springer, Heidelberg
- Schröder D (1992) Bodenkunde in Stichworten, 5. Aufl. Verlag Ferdinand Hirt, Kiel
- Schwedt G (1996) Taschenatlas der Umweltchemie. Thieme Verlag, Stuttgart
- Stahr K, Kandeler E, Hermann L, Streck T (2008) Bodenkunde und Standortlehre. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Topp W (1981) Biologie der Bodenorganismen. Quelle & Meyer, Heidelberg, S 224
- USDA (1999). Soil taxonomy. 2. Aufl., US Department of Agricultural Soil Conservation Service, Washington D.C.
- Velde B, Barré P (2010) Soils, plants and clay minerals: mineral and biologic interactions. Springer, Berlin, S 349
- Velde B, Meunier A (2008) The origin of clay minerals in soils and weathered rocks. Springer, Berlin, S 406

Sedimente

Sylke Hilberg

- 6.1 Sedimente als umweltgeologisch relevanter Teil der Lithosphäre – 84
 - 6.2 Anthropogen bedingte Erosion – 87
 - 6.3 Qualitative Beeinträchtigungen von Flusssedimenten – 88
- Literatur – 93

Kurzfassung

Erosion und Sedimentation gehören als Abschnitte des geologischen Kreislaufs seinem exogenen Teil an. Da sie vergleichsweise kurzfristig und oberflächennah stattfinden, handelt es sich um die Prozesse, in die der Mensch am leichtesten eingreifen, die er damit auch nachhaltig beeinflussen kann, während die endogenen Prozesse von wenigen Ausnahmen abgesehen, vergleichsweise unwesentlich durch den Menschen beeinflusst werden können. Die umweltgeologische Betrachtung der Lithosphäre wird daher vor allem auf die Sedimente beschränkt, die den fließenden Übergangsbereich zwischen Lithosphäre und Pedosphäre darstellen.

Viele der im Kapitel Pedosphäre beschriebenen qualitativen Aspekte und Prozesse lassen sich direkt auf die Sedimente übertragen. In diesem Kapitel wird daher vor allem die umweltgeologisch relevante Rolle der Sedimente als Stofftransport- und Speichermedium besprochen.

Sedimenttransport kann durch Wind, Wasser, Gletscher oder Gravitation angetrieben werden. Kornform und Korngrößenverteilung geben Aufschluss über Transportmechanismus und Transportweiten. Mineralogie und geochemische Zusammensetzung der Sedimente lassen Rückschlüsse auf das Erosionsgebiet zu.

Stofftransport findet in humiden Klimazonen in besonderem Maße durch fluviatile Prozesse statt. Aufgrund ihres großen Potenzials zur Adsorption von Stoffen an Kornoberflächen sind vor allem die feinkörnigen Sedimente als Transportmedium geeignet. Eine Korngrößensortierung durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten führt zu einer Anreicherung von adsorbierten Stoffen in den feinkörnigen Ablagerungen der Stillwassersedimente. Untersuchungen zur Schadstoffbelastung von Flusssedimenten werden entsprechend an der Feinfraktion durchgeführt.

Das Kapitel beleuchtet anhand von Literaturbeispielen die zeitliche und räumliche Variation von Kohlenwasserstoffen und Schwermetallbelastungen in Sedimenten. Es zeigt sich einerseits, dass neben geogenen Einflüssen der Liefergebiete vor allem Beeinflussungen der Sedimentqualität vorliegen, die auf anthropogene Nutzungen in den Einzugsgebieten zurückzuführen sind. Der Vergleich von punktförmigen Emissionsquellen in einem regionalen Einzugsgebiet mit einem überregionalen Einzugsgebiet mit diffusen, dafür aber zahlreichen Emissionsquellen, macht die Unterschiede im Schadstoffspektrum deutlich.

Bei der Untersuchung von Flusssedimenten zeigen sich saisonale und ereignisbezogene zeitliche Variationen. Zusätzlich können anhand von Langzeitstudien aber auch Entwicklungstrends beobachtet werden. Durch verbesserte Technologien zum Schutz vor Abwasser- und Abgasemissionen ergibt sich ein deutlicher Rückgang der Schwermetallbelastungen in Flusssedimenten.

6.1 Sedimente als umweltgeologisch relevanter Teil der Lithosphäre

Die Lithosphäre als letzter, bisher noch nicht unter umweltgeologischen Aspekten betrachteter Teil des Gesamtsystems Erde, bildet den mengenmäßig größten Anteil des oberflächennahen globalen Systems. Neben der Erdkruste werden die oberen Bereiche des Erdmantels zur Lithosphäre gezählt, die unter den Kontinenten mehr als 100 Kilometer mächtig sein kann. In der Lithosphäre ist der weitestgehend größte Teil der mineralischen Stoffe gebunden.

Die Stoffkreisläufe innerhalb der Lithosphäre sind im Vergleich zu jenen in den bisher betrachteten Sphären oft sehr langfristig. Sie finden meist in Zeitskalen statt, die für die Betrachtung der Wechselwirkungen mit dem Menschen nicht relevant sind. Bei diesen sehr langfristigen Prozessen handelt es sich um die endogenen Anteile des geologischen Stoffkreislaufs, die in größeren Tiefen unter der Erdoberfläche stattfinden und durch menschliche Aktivitäten meist nicht beeinflusst werden können. Ausnahmen lassen sich wie überall natürlich auch für diese Regel finden. So werden z. B. tektonische Prozesse, die zu Erdbeben oder Vulkanausbrüchen führen, vom endogenen Kreislauf angetrieben und wirken direkt auf den Menschen ein. Manche Eingriffe des Menschen können wiederum derartige Prozesse induzieren, wie in den ► [Kap. 9](#) und [11](#) beschrieben wird.

Erosions- und Sedimentationsprozesse bilden den exogenen Anteil des geologischen Stoffkreislaufs. Die Zwischenprodukte innerhalb des Kreislaufs, die im Zuge von Erosion und anschließender Sedimentation entstehen, sind Lockergesteine, die man entsprechend ihrer Genese als Sedimente bezeichnet. Diese bilden die oberste Schicht der Li-

thosphäre und stellen einen fließenden Übergang zum Boden her. Viele Eigenschaften und Prozesse, die im ► [Kap. 5](#) beschrieben wurden, lassen sich ohne weiteres auch auf die Sedimente übertragen. So werden Sedimente z. B. von Blume et al. (2013) unter dem Aspekt der Bodenkunde beschrieben. Entsprechend ihrer Porosität können Sedimentkörper Grundwasserleiter sein. Sie spielen damit eine wichtige Rolle bei Hydrosphärenbetrachtungen.

Die Sedimente bilden jenen Bereich, in dem Stoffaustausch und Umwandlung zwischen den langfristigen endogenen und den kurzfristigen exogenen Kreislaufsystemen stattfinden. Als Brücke zwischen Lithosphäre einerseits und Pedo-, Hydro-, Atmosphäre und Biosphäre andererseits ist diese oberste Lithosphärenschicht für umweltgeologische Fragestellungen besonders relevant. Anthropogene Einflüsse qualitativer und quantitativer Art auf die Lithosphäre sind, wie oben bereits angemerkt und von wenigen Ausnahmen abgesehen, auf diese oberste Schicht beschränkt.

Sedimente können nach ihrer Entstehung in drei Gruppen unterteilt werden:

- Klastische Sedimente, die durch Erosion vom Festgestein gelöst und von Wasser, Wind, glazial oder gravitativ transportiert wurden.
- Chemische Sedimente, die durch Mineralfällung aufgrund hydrochemischer Ungleichgewichte gebildet wurden.
- Biogene Sedimente, die sich aus der Ablagerung von Organismenresten, wie Schalen und Skeletten, zusammensetzen.

Während chemische und biogene Sedimente meist in der Nähe ihres Entstehungsortes abgelagert werden, ist ein wichtiger Prozess bei der Entstehung klastischer Sedimente der Transport, der je nach Transportmedium über hunderte oder tausende von Kilometern erfolgen kann. Diese hohe Mobilität klastischer Sedimente macht sie für die Umweltgeologie besonders interessant, da sie als Medium zur Verbreitung anthropogener Einflüsse dienen können.

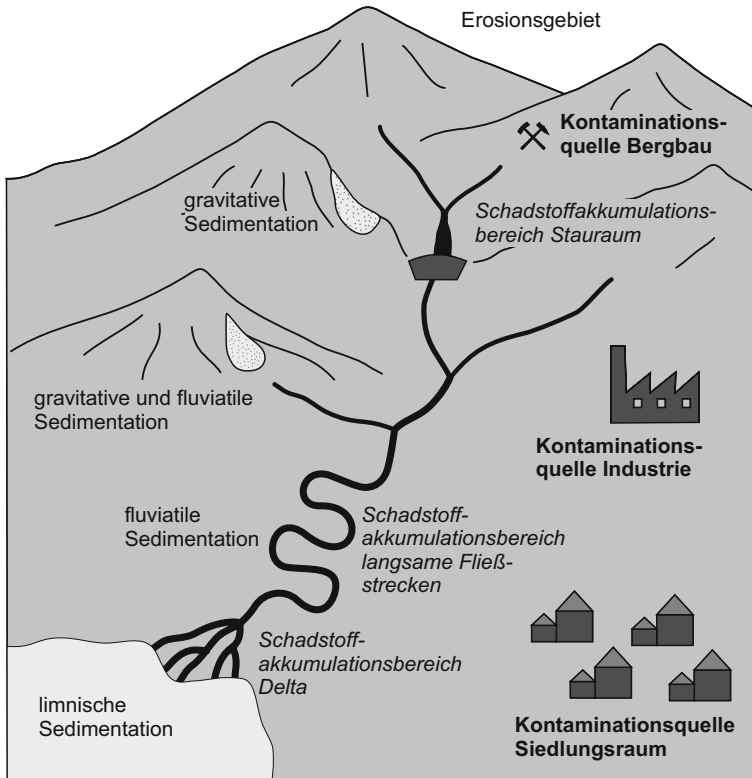
Klastische Sedimente bilden sich in marinen Ablagerungsräumen vor allem in Küstennähe (Deltaschüttungen). In terrestrischen Gebieten sind sie flächig und mengenmäßig die bedeutendste Form der Sedimentbildung. Erosion und Sedimenttrans-

port werden hier gravitativ oder von Wasser und Wind, also über Hydro- und Atmosphäre angetrieben. Die Art des Transports sowie die Entfernung zwischen Erosionsgebiet und Ablagerungsraum bestimmen Korngrößen, Korngrößenverteilung und Kornform der Sedimente.

Nach der Korngröße werden Ton ($< 2 \mu\text{m}$), Schluff ($> 2 \mu\text{m}$ bis $63 \mu\text{m}$) Sand ($> 63 \mu\text{m}$ bis 2mm), Kies ($> 2 \text{mm}$ bis 63mm), Steine ($> 63 \text{mm}$ bis 2m) und Blockwerk ($> 2 \text{m}$) unterschieden. Der Rundungsgrad (gerundet, kantengerundet oder kantig) gibt Aufschluss über Transportweite und Transportmechanismus. Die Korngrößenverteilung informiert über die Ablagerungsbedingungen. Die mineralogische Zusammensetzung der Körner lässt Rückschlüsse auf das Liefergebiet zu.

Je nach Transportmechanismus werden folgende Unterscheidungen getroffen:

- Äolische Sedimente, die vom Wind transportiert und an Land abgelagert werden. Sie sind aufgrund der geringen Transportkraft des Windes eher feinkörnig (maximal Sand) und bilden Dünen oder Lössdecken aus.
- Fluviale Sedimente, die von Fließgewässern transportiert und im Fluss abgelagert werden. Da die Transportkraft des Wassers von der Fließgeschwindigkeit abhängt und diese je nach Fließgefälle und Wassermenge erheblich variieren kann, decken fluviale Sedimente ein weites Spektrum an Korngrößen ab (Schluff bis Steine). Lokal lassen sich aber meist sehr gute Sortierungen feststellen. Die Komponenten weisen aufgrund der mechanischen Beanspruchung einen hohen Rundungsgrad auf.
- Limnische Sedimente, die über Fließgewässer in stehende Gewässer eingebracht und dort abgelagert werden. In den Deltabereichen von Seen werden Schwemmfächer mit charakteristischer Schichtung beobachtet. In den Zentralbereichen stehender Gewässer werden sehr feine Sedimente (Ton bis Schluff) gebildet.
- Glaziale Sedimente, die von Gletschern transportiert und nach Abschmelzen des Gletschers abgelagert werden. Diese Sedimente weisen ein sehr großes Spektrum an Korngrößen (von Ton bis Blockwerk) und Kornformen auf. Da die Liefergebiete meist großräumig sind, finden sich in diesen Sedimentkörpern



■ **Abb. 6.1** Erosions- und Ablagerungsgebiete und anthropogene Einflussfaktoren auf die Beschaffenheit von Sedimenten

außerdem verschiedenste mineralogische und petrographische Zusammensetzungen. Man spricht hier von polymikten Sedimenten und unterscheidet sie von monomikten Ablagerungen, die auf ein einziges Ausgangsgestein zurückzuführen sind.

- Gravitative Sedimente, die in Gebieten mit großem Relief durch Massenbewegungen entstanden sind. Es handelt sich meist um Berg- oder Felssturzmassen, die ohne wesentlichen Wassereinfluss am Fuß des Berges abgelagert wurden. Die Korngrößen entsprechen maximal den Kluftweiten im Liefergebiet. Die Sturzkörper können hausgroße oder noch größere Blöcke enthalten oder durch Zerkleineren entlang der Kluftflächen beim Sturz auch stark zerkleinert werden.

Vertiefende Informationen zur Sedimentologie liefern z. B. Reineck (1990) oder MacLane (1995). Spezielle Fakten über klastische Sedimente und deren Faziesräume und Ablagerungsprozesse können bei Schäfer (2010) nachgelesen werden.

Klastische Sedimente liefern zahlreiche Informationen über ihr Ursprungsgebiet, ihre Transportgeschichte und die Prozesse der Ablagerung. Diese Informationen können von Sedimentologen, aber auch von Strukturgeologen oder von Geomorphologen zur Lösung ihrer Fragestellungen genutzt werden.

Rezente Lockergesteinskörper speichern jedoch auch wichtige Informationen über anthropogene Einflüsse. So können künstlich angeregte Erosion als quantitativer Einfluss, die Anreicherung bestimmter Stoffe im Sediment als qualitativer Einfluss durch die Untersuchung der strukturellen, mineralogischen und geochemischen Beschaffenheit der Sedimente erfasst werden. Vor allem die geochemischen Analysen geben Umweltgeologen wichtige Hinweise auf Kontaminationsherde und mögliche Gefahrenpotenziale im Einzugsgebiet.

Anhand einiger Beispiele betrachten die folgenden Abschnitte die Sedimente unter dem Aspekt der Umweltgeologie. ■ **Abb. 6.1** gibt einen Überblick über Erosions- und Ablagerungsräume sowie die Bereiche, in denen anthropogene Eingriffe in den exogenen Kreislauf erfolgen.

Gebiete mit hoher Reliefenergie, z. B. Hochgebirgsräume oder Hanglagen in Mittelgebirgen, sind generell Erosionsbereiche. Vor allem in diesem Umfeld können anthropogene Eingriffe die natürlichen Erosionsprozesse beschleunigen und damit geotechnische und ökologische Probleme aufwerfen, wie es im ► **Abschn. 6.2** thematisiert wird. Die qualitative Beeinflussung von Sedimenten kann durch vielfältige Kontaminationsherde erfolgen. Beispielhaft sind in ■ **Abb. 6.1** Bergbau, Industrie und Siedlungsraum dargestellt.



6.2 Anthropogen bedingte Erosion

Ausgangspunkt für Sedimentationsprozesse ist die Erosion. Physikalische und chemische Verwitterung von Gesteinen führt zu einer Zerlegung des Festgesteins in kleinere und damit für Wasser oder auch Wind transportable Korngrößen. Der natürliche Prozess der Erosion kann durch anthropogene Veränderungen im Einzugsgebiet beeinflusst werden. Eine bewusste Einflussnahme stellt z. B. die künstliche Hangsicherung dar, die natürliche Erosion verzögern, im Idealfall verhindern soll. In den meisten Fällen erfolgt die Einflussnahme auf Erosionsprozesse aber indirekt als Folge von Eingriffen in die natürlichen Boden- und Vegetationsbedingungen und wirkt dabei beschleunigend.

Eingriffe dieser Art sind z. B. Rodung von Waldflächen oder Straßenbau an geneigten Flächen. Die Freilegung von Flächen führt dazu, dass Niederschlagswasser direkt auf den Boden auftreffen und nicht mehr von der Vegetationsdecke zurückgehalten werden. Es dringt mehr Wasser in den Untergrund ein und kann damit Material mobilisieren, also Erosionsprozesse beschleunigen. Grabungsarbeiten in Hangbereichen, wie sie zur Errichtung von Straßen oder Verlegung von Leitungen erforderlich sind, führen meist zu einer Versteilung des Geländereiefs und damit zu einer Destabilisierung, die durch Erosionsprozesse ausgeglichen wird.

6.2.1 Beispiel Forstwirtschaft

Hanglagen in den zentraleuropäischen Mittelgebirgslandschaften sowie in den tieferen Regionen

■ **Abb. 6.2** Holzbringungsweg in kalkalpinem Gebiet mit geringmächtiger Bodenbildung. Die entstehenden Fahrinnen im Waldboden werden nach der Bearbeitung des Waldstücks häufig sich selbst überlassen und tiefen sich durch den Oberflächenabfluss weiter ein

der Hochgebirge mit entsprechender Reliefenergie sind häufig bewaldet und werden forstwirtschaftlich genutzt. Zur Holzgewinnung werden dabei vorübergehend oder auch dauerhaft Forststraßen errichtet. Zur rationellen Bewirtschaftung von Waldflächen wurden schwere Maschinen, sogenannte Holzvollernter („Harvester“), entwickelt. Diese können in einem Arbeitsgang Bäume fällen, entasten, entrinden und schließlich auf Transportlängen zuschneiden. Um mit diesen Maschinen direkt zum zu fallenden Baum zu gelangen, sind sie auf ein geländegängiges Fahrzeug montiert, das die natürlichen lockeren Waldböden befahren kann. Obwohl die Bodenbelastung meist einmalig und kurzfristig ist, kommt es dennoch häufig zur Ausbildung tiefer Fahrinnen. Erfolgt nach der Befahrung keine Rekultivierung dieser Fahrinnen, wirken diese wie Kanäle. Es kann sich hier Niederschlagswasser sammeln und rasch oberflächlich abgeführt werden. Dieser rasche und konzentrierte Oberflächenabfluss geht mit erhöhter Transportkraft und damit häufig mit erosiv bedingter weiterer Eintiefung der Fahrinnen (siehe ■ **Abb. 6.2**) einher.

Eine künstlich erhöhte Erosionsrate kann zu einer Reihe von negativen Folgen sowohl im Liefergebiet als auch im Abflussraum führen. So führt der Abtrag von Lockergesteinsmaterial im Einzugsgebiet zum Verlust von Speichervolumen für Niederschläge. Diese werden als Oberflächenabfluss rasch dem nächsten Vorfluter zugeführt, anstatt in

der ungesättigten Bodenzone zu versickern und dem Grundwasserleiter zuzufließen. Die Folge ist ein Anstieg der mittleren Schüttungsmengen sowie erhöhte Hochwasserabflussspitzen in Oberflächengewässern.

Die höhere Transportkraft, die sich daraus ergibt, führt in der Folge zu weiterer Verstärkung der Erosionsprozesse. Flussabschnitte, die bisher Sedimentationsräume waren, können zu Erosionsgebieten werden, in denen sich das Flussbett eintieft. An anderer Stelle im Flussverlauf kann die Sedimentationsrate aufgrund der größeren Menge an Sedimentfracht ansteigen.

Nachhaltige Veränderungen von Erosions- und Sedimentationsbedingungen in Fließgewässern können schließlich auch nachhaltige Veränderungen der kommunizierenden Grundwasserkörper zur Folge haben. In den schneller entwässernden Einzugsgebieten kann es zum Trockenfallen von Quellen kommen. Entlang von Flusseintiefungen wird ein Absinken des Grundwasserspiegels beobachtet. In Flussstrecken mit erhöhter Sedimentationsrate kommt es zum Grundwasseranstieg und zu häufigeren Überflutungen. Insgesamt können die Folgen anthropogen induzierter Erosion vielfältig sein und sind in ihrer Gesamtheit aufgrund komplexer Folgewirkungen meist schwer prognostizierbar.

6.3 Qualitative Beeinträchtigungen von Flusssedimenten

In Sedimenten spiegeln sich zunächst vor allem die mineralogischen und geochemischen Verhältnisse des Liefergebietes wider. Im Ausgangsgestein vorhandene Mineralzusammensetzungen, aber auch Anreicherungen bestimmter Substanzen, wie Schwermetalle oder Arsen, sind je nach Einzugsgebiet häufig auch in den Sedimenten der Vorfluter zu finden und liefern damit wichtige Informationen über das Herkunftsgebiet. In den ► [Kap. 3](#) und [10](#) werden mit den Parametern Radon und Arsen Beispiele für die Ausbreitung geogener Schadstoffe über Atmo- und Hydrosphäre beschrieben. Ähnliche geogene Stoffanreicherungen lassen sich auch in Flusssedimenten beobachten.

Neben den physikalisch-chemischen abiotischen Partikeln aus dem Erosionsgebiet bilden bio-

gene Partikel aus dem Gewässer, das ja auch einen Lebensraum darstellt, eine zweite Komponente der Sedimentzusammensetzung.

Flüsse nehmen neben den dendritischen und organischen Komponenten auch anthropogene Stoffe auf. Vor allem die gering bis nicht wasserlöslichen Schadstoffe werden im Flusswasser als Partikel bzw. Moleküle an die mineralische und organische Sedimentfracht adsorbiert, transportiert und abgelagert. Klastische Sedimente in Fließgewässern haben unter diesem Aspekt eine besondere Bedeutung für den Transport und die Anreicherung von hydrophoben Schadstoffen. Zahlreiche Untersuchungen zur Qualität von Fließgewässern befassen sich daher auch intensiv mit der Beschaffenheit der Flusssedimente.

Die Korngröße von Flusssedimenten ist ein wichtiger Faktor für die Transportweite und den Sedimentationsbereich. Die Partikelgrößen sind darüber hinaus dafür ausschlaggebend, welche Substanzen in welchen Mengen angelagert werden können. Größere Sedimente im Sand- bis Kiesbereich sind meist Gesteinsfragmente, die aufgrund ihrer geringen spezifischen Oberfläche vergleichsweise wenige andere Stoffe adsorbieren. An sie sind häufig die geogen in der Mineralphase eingebauten Stoffe, wie z. B. Schwermetalle, gebunden. Die Feinkornfraktion der Schluff- oder Tonsedimente hat dagegen aufgrund der großen spezifischen Oberfläche ein erheblich höheres Potenzial zur Aufnahme von anthropogen freigesetzten Partikeln und Stoffen aus dem Wasser. Die Anreicherung von Stoffen an feinen Körnern führt zu einer Akkumulation von anthropogenen Schadstoffen in Flussabschnitten mit geringer Transportkraft wie etwa Flussaufweitungen, Retentionsflächen oder Deltabereichen. Zu diesen Akkumulationsbereichen gehören auch die zur Wasserkraftnutzung künstlich angelegten Stauräume (siehe ► [Kap. 11](#)).

Um repräsentative Informationen über Flusswasserbelastungen geogener oder anthropogener Herkunft aus Sedimentanalysen ziehen zu können, müssen feinkörnige Sedimente aus den Akkumulationsgebieten in einem ausreichend engmaschigen Probenintervall untersucht werden. Zur Technik der Probenahme an Flusssedimenten finden sich einige Informationen im ► [Kap. 7](#).

Eine gesetzliche Grundlage für Sedimentproben in Fließgewässern bildet die Europäische

■ Tab. 6.1 Zuordnung der Schwermetallgehalte von Sedimenten gemäß Geoakkumulations-Index nach Müller (1979)

Index-Klasse	Beurteilung	Blei [mg/kg]	Cadmium [mg/kg]	Zink [mg/kg]	Quecksilber [mg/kg]
	Hintergrundwert	20	0,3	95	0,4
0	Nicht belastet	< 30	< 0,45	< 142,5	< 0,6
1	Nicht bis mäßig belastet	< 60	< 0,9	< 285	< 1,2
2	Mäßig belastet	< 120	< 1,8	< 570	< 2,4
3	Mäßig bis stark belastet	< 240	< 3,6	< 1140	< 4,8
4	Stark belastet	< 480	< 7,2	< 2280	< 9,6
5	Stark bis übermäßig belastet	< 960	< 14,4	< 4560	< 19,2
6	Übermäßig belastet	> 960	> 14,4	> 4560	> 19,2

Wasserrahmenrichtlinie (siehe ► Exkurs 10.1). Auf Basis der Vorgaben der WRRL (2000) erfolgt in vielen Mitgliedsstaaten neben der Ermittlung der Wasserqualität auch ein Monitoring von Flusssedimenten. Für verschiedene praktische Fragestellungen ist die Sedimentgüte von großer Bedeutung. So wird z. B. von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland (WSV) ein Sedimentkataster geführt, in dem die Schadstoffbelastungen der Sedimente im Bereich der Schifffahrtsrouten beobachtet werden. Die hier gewonnenen Daten sind Grundlage für den Umgang mit dem anfallenden Baggergut.

6.3.1 Schwermetalle

Die Betrachtung von Schwermetallgehalten in feinkörnigen Flusssedimenten kann wichtige Hinweise über anthropogene Schadstoffeinträge in ein Flusssystem erbringen, die rein anhand von Wasseranalysen oft aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit dieser Schadstoffe schwer feststellbar sind.

Turekian und Wedepohl (1961) haben anhand weltweit ermittelter geochemischer Daten Standardwerte für natürliche Hintergrundgehalte von Schwermetallen in Tonsteinen festgelegt. Basierend auf diesen Werten erfolgt die Beurteilung von Schwermetallbelastungen in feinkörnigen Flusssedimenten.

Zur numerischen Bewertung von Schwermetallbelastungen wurde von Müller (1979) der Geoak-

kumulations-Index eingeführt. Basierend auf dem Tongesteinsstandard nach Turekian und Wedepohl (1961) werden natürliche Hintergrundwerte von Schwermetallen mit den gemessenen Werten der Feinfraktion (< 20 µm) des Flusssediments verglichen. Der Geoakkumulations-Index berechnet sich nach der ► Gl. 6.1.

$$I_{\text{geo}} = \log(C_i/1,5^* B_i) \quad (6.1)$$

I_{geo} = Geoakkumulations-Index

C_i = gemessene Konzentration des Schwermetallparameters

B_i = Hintergrundkonzentration.

Es erfolgt eine Einteilung in sieben Belastungsklassen (0 bis 6) von nicht belasteten bis übermäßig belasteten Sedimenten (■ Tab. 6.1).

Für die beispielhafte Darstellung von Schwermetallgehalten in Flüssen werden Daten aus Müller et al. (1999) für den Bereich der Saale sowie Untersuchungen von Donausedimenten im Bereich Wien aus Kralik und Sager (1986) vergleichend betrachtet. Die Betrachtungen erfolgen für die Parameter Blei, Cadmium, Zink und Quecksilber.

Die Saale im Oberlauf von Halle entwässert ein Einzugsgebiet, das intensiv vom Erzabbau geprägt ist. Es ist hier sowohl eine geogene Anreicherung gegenüber den globalen Schwermetallgehalten, im Besonderen aber auch eine anthropogene Anreicherung durch den Erzabbau zu erwarten. Um die

geogene Anreicherung im Vergleich zum globalen Standard zu bestimmen, wurden von Müller et al. (1999) zunächst anthropogen unbelastete Auelehme beprobt, die in prähistorischer Zeit abgelagert und nicht durch pedogenetische Prozesse verändert worden sind. Diese wurden mit den Konzentrationen der rezenten Flusssedimente verglichen, um den anthropogenen Anteil der Belastung zu bestimmen.

Die Schwermetallgehalte von Donausedimenten im Stadtgebiet von Wien repräsentieren im Vergleich dazu ein überregionales Einzugsgebiet, in dem zwar keine konzentrierte Freisetzung von Schwermetallen anzunehmen ist, stattdessen aber in einem großen Einzugsgebiet zahlreiche diffuse Emissionsquellen existieren.

Die Diagramme in **Abb. 6.3** zeigen die Schwermetallgehalte an Flusssedimenten der Elster oberhalb der Saalemündung bei Halle sowie der Donau bei Wien. Es sind hier jeweils auch die Bewertungsgrenzen gemäß Geoakkumulations-Index nach Müller (1979) angegeben.

Für die untersuchten Elemente Blei, Quecksilber, Zink und Cadmium zeigt sich eine mäßige bis starke Belastung der Flusssedimente.

Die als vorindustriell datierten und damit vor allem geogen geprägten Auesedimente der Elster weisen Schwermetallgehalte auf, die im Bereich der Tongesteinsstandards liegen. Die rezenten Flusssedimente aus Elster und Donau zeigen im Vergleich dazu für alle vier betrachteten Elemente eine anthropogene Belastung, die zum Untersuchungszeitpunkt als mäßig bis stark (Index-Klasse 3) für Blei und Quecksilber sowie als stark bis übermäßig (Index-Klasse 5) für Zink und Cadmium bewertet wird. Blei und Quecksilber sind im überregionalen städtisch-industriell geprägten Einzugsgebiet stärker ausgeprägt, während Zink und Cadmium im kleineren, aber durch Erzbergbau belasteten Liefergebiet in deutlich höherer Konzentration vorkommen.

Da Fließgewässer im Allgemeinen einer starken jahreszeitlichen bzw. ereignisbezogenen Dynamik unterliegen, sind Sedimentation und damit auch Akkumulation von Schadstoffen neben der räumlichen Varianz, die sich aus den Einflüssen des Einzugsgebiets ergeben, auch großen zeitlichen Variationen unterworfen. Schorer und Nagel (1999) zeigen dies anhand von zeitlich engmaschigen Sedimentuntersuchungen in rezenten Flusssedimenten. Der

Akkumulation von Schadstoffen in Niederwasserzeiten steht der Sedimenttransport und damit auch die Verfrachtung und Verdünnung von Schadstoffkonzentrationen in Hochwasserzeiten gegenüber.

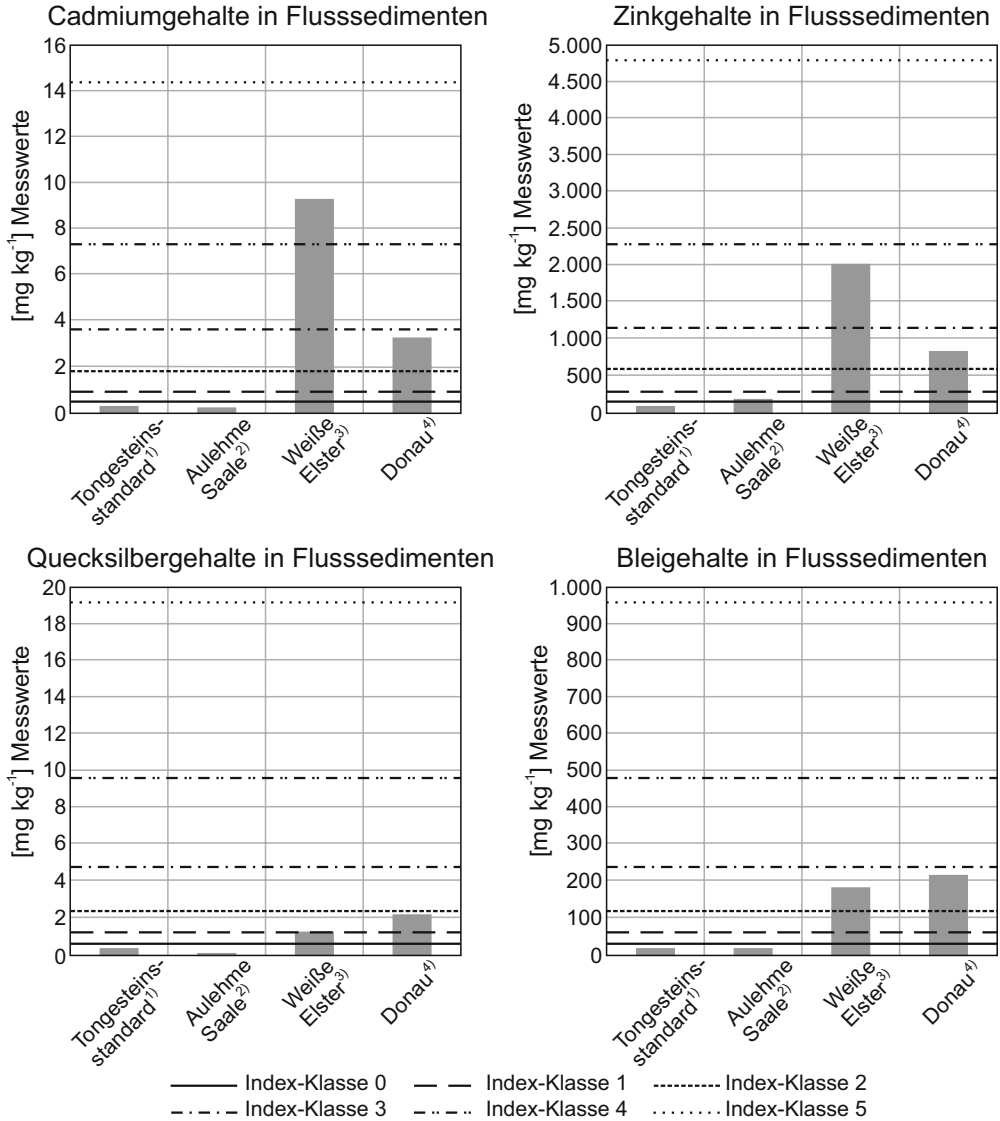
Über die jahreszeitlich bedingten Variationen hinaus können aber auch langfristige Entwicklungstrends beobachtet werden, die vor allem Rückschlüsse auf die Emissionssituation zulassen. Andresen (2011) führte eine Auswertung von Schwermetallanalysen an mehreren Sedimententnahmestellen am Neckar durch. Dabei wurden Daten aus dem Jahr 1979 mit solchen aus 1990, 1998 und 2008 verglichen. Die Gehalte an Blei sind in diesen 30 Jahren im Mittel von 156 mg kg^{-1} (Index-Klasse 3) auf 38 mg kg^{-1} (Index-Klasse 1) zurückgegangen. Jene an Zink wurden von 742 mg kg^{-1} (Index-Klasse 3) auf 247 mg kg^{-1} (Index-Klasse 1) reduziert. Der deutliche Rückgang der Schwermetallbelastungen in Flusssedimenten lässt sich auf Verbesserungen im Bereich der Abwassertechnik und der Abfallwirtschaft sowie auf die Reduktion von Luftschadstoffen zurückführen.

6.3.2 Organische Schadstoffe

Neben den Schwermetallen werden auch organische Substanzen adsorptiv an Flusssedimente angelagert und geben damit Hinweise auf eine anthropogene Belastung von Fließgewässern. Aliphatische Kohlenwasserstoffe können sowohl anthropogener wie auch biogener Herkunft sein. Wie bei der Beurteilung von Schwermetallbelastungen ist es auch hier notwendig, zur Beurteilung einer anthropogenen Belastung zunächst den natürlichen Hintergrundwert an Kohlenwasserstoffen eines Gewässers zu bestimmen.

Biogene aliphatische Kohlenwasserstoffe entstehen beim anaeroben Abbau organischer Substanzen, wie z. B. Landpflanzen oder Phytoplankton im Gewässer. Anhand der Molekülstruktur oder Molekülgrößen der (hauptsächlich vorherrschenden) Alkane lassen sich biogene Kohlenwasserstoffen meist nicht von anthropogenen Mineralölkohlenwasserstoffen unterscheiden. Die Identifizierung von anthropogenen Belastungen kann z. B. über den Nachweis erhöhter Konzentrationen in den oberflächennahen Flusssedimenten im Vergleich zu den Konzentrationen tieferer Sedimentschichten erfolgen. Sofern es möglich ist, Sedimente zu bepro-

6.3 • Qualitative Beeinträchtigungen von Flusssedimenten



Quelle	Tongesteinsstandard ¹⁾	Aulehme Saale ²⁾		Weiße Elster ³⁾		Donau ⁴⁾	
	Messwert [mg kg^{-1}]	Messwert [mg kg^{-1}]	I_{geo}	Messwert [mg kg^{-1}]	I_{geo}	Messwert [mg kg^{-1}]	I_{geo}
Blei	20	19	0	182	3	216	3
Cadmium	0,3	0,23	0	9,3	5	3,2	3
Zink	95	170	1	2000	5	829	3
Quecksilber	0,4	0,13	0	1,2	2	2,3	2

■ **Abb. 6.3** Gehalte der Schwermetalle Blei, Quecksilber, Zink und Cadmium in Sedimenten der Flüsse Elster und Donau mit Bezug zum Geoakkumulationsindex nach Müller (1979). ¹⁾ nach Turekian und Wedepohl (1961), ²⁾ ³⁾ nach Müller et al. (1999), ⁴⁾ nach Kralik und Sager (1986)

ben, die sich vorindustriellen Zeiträumen zuordnen lassen, ist durch den Vergleich der Konzentrationen in verschiedenen Schichttiefen eine Beurteilung der anthropogenen Sedimentbelastung der rezenten Schichten möglich. Dieser Ansatz scheitert jedoch in vielen Fällen daran, dass Flusssedimente im Zuge von Hochwasserereignissen abgetragen werden und ältere, vorindustrielle Sedimentschichten häufig nicht vorhanden sind.

Eine weitere Möglichkeit zur Quantifizierung des anthropogenen Anteils der KW-Belastung ist der Vergleich von Flusssedimenten in Flussstrecken mit geringer Besiedelung mit solchen, die im Abstrom von infrastrukturell und industriell stark beanspruchten Gebieten liegen. Scharf et al. (2004) zeigen z. B. anhand von Untersuchungen an Flusssedimenten im österreichischen Teil der Donau einen signifikanten Anstieg der Gehalte an KW zwischen Probenahmestellen oberhalb und unterhalb von Wien. So wurden oberhalb von Wien KW-Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze bzw. von wenigen mg kg^{-1} gemessen. Im Mündungsbereich des Zuflusses Schwechat, der ausgedehnte Industrieflächen (u. a. ein Raffinerieareal) entwässert und einen hohen Anteil an gereinigten Abwässern der Stadt Wien führt, wurden im Rahmen einer einmaligen Beprobung KW-Gesamtgehalte von 77 mg kg^{-1} gemessen. Der Prüfwert gemäß ÖNORM S2088-2 (2000) zur Beurteilung von Bodenverunreinigungen im Altlandbereich liegt vergleichsweise bei 50 mg kg^{-1} .

Sedimente – Einiges, was man wissen sollte

- Erosion und Sedimentation bilden den exogenen Teil des geologischen Kreislaufs. Da sie vergleichsweise kurzfristig und oberflächennah stattfinden, kann der Mensch nachhaltig auf Lithosphärenprozesse einwirken.
- Sedimente vermitteln gewissermaßen zwischen Lithosphäre und Pedosphäre. Viele umweltgeologisch relevante Aspekte der Pedosphäre lassen sich auf die Sedimente übertragen.
- Generell können biogene, chemische und klastische Sedimente unterschieden werden. Während biogene und chemische

Sedimente meist am Ort ihrer Ablagerung gebildet werden, sind klastische Sedimente das Resultat von Transportprozessen. Der Transportvorgang macht sie für umweltgeologische Fragestellungen besonders interessant.

- Ausgangsprozess der Bildung klastischer Sedimente ist zunächst die Erosion. Erosionsbeschleunigende Eingriffe des Menschen in die Landschaft, z. B. durch Rodung oder Veränderung von Geländeformen, haben auch eine Erhöhung der Sedimentationsraten an anderer Stelle zur Folge.
- Eine Störung des Gleichgewichts von Erosion und Sedimentation in einem Einzugsgebiet kann sich negativ auf Oberflächenabflüsse und Grundwasserkörper auswirken.
- Sedimenttransport kann äolisch, fluvial, glazial oder gravitativ erfolgen. Für umweltgeologische Fragen besonders relevant sind der fluviale Transport bzw. die rezenten Flusssedimente, da sie anthropogene Einflüsse widerspiegeln können.
- Aufgrund der größeren Oberfläche haben feinkörnige Sedimente ein höheres Adsorptionspotenzial gegenüber Stoffen als grobkörnige. Die Untersuchung der Schadstoffbelastungen von Flusssedimenten erfolgt daher üblicherweise an der Feinkornfraktion ($< 20 \mu\text{m}$).
- Die Korngrößenverteilung in Flusssedimenten ist eine Funktion der Fließgeschwindigkeit des Wassers. Feine Ablagerungen finden sich in langsamen Fließstrecken mit geringer Transportkraft. Zur Probenahme werden daher Stillwasserzonen, Gleithangbereiche oder Stauräume bevorzugt.
- Die Konzentration von Schwermetallen in Flusssedimenten beruht zunächst auf den geogenen Hintergrundwerten des Ausgangsgesteins. Eine anthropogene Belastung ergibt sich aus zusätzlichen Freisetzungen durch belastete Abwässer oder den Eintrag über Aerosole aus Abgasen. Das Ausmaß der anthropogenen Belastung wird z. B. über den Geoakkumulations-Index quantifiziert.

❓ Testfragen zum Kapitel Sedimente

1. Warum ist für die Umweltgeologie vor allem der exogene Teil des geologischen Kreislaufs von Bedeutung? Kennen Sie mögliche Ausnahmen von dieser Regel?
2. Welche bezüglich ihrer Genese unterschiedlichen Sedimente kennen Sie? Erläutern Sie, warum vor allem eine dieser Sedimentgruppen für umweltgeologische Fragestellungen besonders interessant ist.
3. Unterscheiden Sie die klastischen Sedimente nach Transportmedium und Transportprozess. Warum beschäftigen sich Umweltgeologen in diesem Zusammenhang vor allem mit den Flusssedimenten?
4. Welche Informationen lassen sich aus Flusssedimenten entnehmen und wie können diese Informationen auch zur Klärung umweltgeologischer Fragestellungen beitragen?
5. Warum lassen sich bestimmte Schadstoffbelastungen von Fließgewässern oft besser in den Flusssedimenten als im Wasser selbst nachweisen?
6. Beschreiben Sie eine Methode zur numerischen Quantifizierung einer anthropogenen Schwermetallbelastung rezenter Flusssedimente.
7. Neben anthropogenen Schadstoffquellen können aliphatische Kohlenwasserstoffe auch durch biogene Prozesse in Flusssedimenten angereichert werden. Wie lassen sich anthropogen eingebrachte Kohlenwasserstoffbelastungen in Flusssedimenten von biogenen unterscheiden?
8. Nennen Sie die typischen Schadstoffe, die sie in rezenten Flusssedimenten in einem Stauraum im Abstrom einer Großstadt erwarten würden. Nutzen Sie dazu auch die Informationen, die Ihnen die ► [Kap. 2](#), [5](#) oder [10](#) zum Thema liefern können.
Tipp: hier sind besonders Schadstoffeigenschaften und das Vorkommen bestimmter Schadstoffgruppen relevant. Begründen Sie ihre Auswahl.

Literatur

- Andresen H (2011). Vergleichende Untersuchung der Sedimentgüte der Moskva, der Oka und des Neckars am Beispiel von Schwermetallen und ortho-Phosphat. Diss. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- Blume HP, Brümmer GW, Schwertmann U, Horn R, Kögel-Knabner I, Stahr K, Auerswald K, Beyer L, Hartmann A, Litz N, Scheinost A, Stanjek H, Welp G, Wilke B-M (2013) Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, München, Wien
- Huch M, Geldmacher H (1999) Ressourcen-Umwelt-Management, Wasser, Boden, Sedimente. Springer Verlag, Heidelberg
- Kralik M, Sager M (1986) Umweltindikator „Schwermetalle“: Gesamtgehalte und Mobilität in österreichischen Donausedimenten. Mitt Österr Geol Ges 79:77–90
- MacLane M (1995) Sedimentology. Oxford Univ. Press, New York
- Müller A, Hanisch C, Terling L, Arnold A, Lohse M (1999) Anthropogene Schwermetallbelastung von feinkörnigen Flusssedimenten. In: Huch M, Geldmacher H (Hrsg) Ressourcen-Umwelt-Management, Wasser, Boden, Sedimente. Springer Verlag, Heidelberg
- Müller G (1979) Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veränderungen seit 1971. Umschau 79:778–783
- ÖNORM S2088-2 (2000). Altlasten – Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Boden. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- Reineck H-E (1990) Kurzgefasste Sedimentologie Clausthaler Tektonische Hefte. Loga Verlag, Köln
- Schäfer A (2010) Klastische Sedimente, 2. Aufl. Springer Spektrum, Heidelberg
- Scharf S, Loss S, Uhl M, Kreuzinger N (2004) Untersuchung von Donausedimenten und Schwebstoffen auf ausgewählte organische Stoffe. TU Wien und Umweltbundesamt BE-249, Wien
- Schorer M, Nagel A (1999) Zeitliche Dynamik von anthropogen angereicherten Schadstoffen in rezenten Flusssedimenten. In: Huch M, Geldmacher H (Hrsg) Ressourcen-Umwelt-Management, Wasser, Boden, Sedimente. Springer Verlag, Heidelberg
- Turekian KK, Wedepohl KH (1961) Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. Geol Soc Am Bull 72:175–192
- WRRRL (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 – Wasserrahmenrichtlinie. Europäische Union, Brüssel

Teil B – Umweltgeologie in der Praxis

- Kapitel 7** **Probengewinnung für umweltgeologische
Fragestellungen – 97**
Sylke Hilberg
- Kapitel 8** **Abfallmanagement und Altlastenpraxis – 121**
Sylke Hilberg
- Kapitel 9** **Rohstoffe – 147**
Sylke Hilberg
- Kapitel 10** **Rohstoff Wasser – 171**
Sylke Hilberg
- Kapitel 11** **Energieversorgung – 191**
Sylke Hilberg
- Kapitel 12** **Geologie in der Umweltverträglichkeitsprüfung – 215**
Sylke Hilberg

Probengewinnung für umweltgeologische Fragestellungen

Sylke Hilberg

- 7.1 Repräsentative Probenahme – 98
- 7.2 Bodenluft – 100
- 7.3 Bodenlösung – 104
- 7.4 Grundwasser – 106
- 7.5 Feststoffe – 112
- Literatur – 120

Kurzfassung

Eine wichtige Voraussetzung, um anthropogene Einflüsse auf natürliche Systeme zu vermeiden oder eindämmen zu können, ist es, sie in Art und Umfang zu erkennen. Dies setzt entsprechende reproduzierbare Beobachtungsmethoden voraus. Um zu Informationen über Stoffkonzentrationen in geologisch relevanten Systemen zu gelangen, müssen geeignete Proben für eine zielführende Analytik gewonnen werden.

Da die Probenahme aus einem Umweltkompartiment zunächst immer nur eine zeitlich und räumlich punktuelle Situation abbildet, ist es besonders wichtig, dass eine Stichprobe als repräsentativ für den jeweiligen Untersuchungsraum bzw. Untersuchungszeitraum angesehen werden kann. Dazu werden in den verschiedenen Sphären, mit denen die Umweltgeologie befasst ist (Atmo-, Hydro-, Pedo- und Lithosphäre), unterschiedliche Methoden angewendet.

In diesem Kapitel werden die Methoden zur Gewinnung von Proben aus Bodenluft, Bodenlösung, Grundwasser und Feststoffen vorgestellt. Für die Gewinnung gasförmiger und flüssiger Proben müssen Aufschlüsse geschaffen und die jeweils an die Fragestellung angepassten Entnahmestellen eingerichtet werden. Das Kapitel zeigt auf, welche Fakten bei der Konzeption von Bodenluft- und Grundwassermessstellen und Messnetzen berücksichtigt werden müssen und wie diese im jeweiligen Fall umzusetzen sind.

Die Beprobung von Feststoffen, wie Boden (im pedologischen und geologischen Sinne), Abfällen oder Flusssedimenten scheint zunächst vergleichsweise einfach, da die Probensammlung, anders als bei Luft oder Grundwasser, direkt durch Entnahme aus dem Kompartiment erfolgen kann, ohne eigens dafür errichtete Messstellen. Eine besondere Herausforderung bei der Feststoffprobenahme ist die Gewinnung einer repräsentativen Probe, die auf größere Bereiche übertragbare Aussagen in Bezug auf die jeweilige Fragestellung zulässt. Dabei sind Überlegungen zum Entnahmeort, zur erforderlichen Probemenge oder auch zur Dichte an Beprobungspunkten über eine definierte Fläche oder Entnahmetiefe anzustellen.

In allen Fällen ist eine an Fragestellung und Umgebungsbedingungen angepasste Probenahme die Grundlage für umweltgeologisch interpretierbare Ergebnisse. Diesen Überlegungen ist ein eigenes Kapitel gewidmet.

7.1 Repräsentative Probenahme

Die Grundlagenkapitel haben gezeigt, dass die Erde ein geschlossenes, dabei aber gleichzeitig sehr dynamisches System ist, das sich in Sphären mit typischen Eigenschaften unterteilen lässt. Innerhalb und zwischen den Sphären finden Stofftransport- und Umwandlungsprozesse statt. Bezogen auf das Gesamtsystem Erde und die sehr langen Zeiträume befinden sich die Prozesse im Gleichgewicht. Kurzfristige Stoffkreisläufe, vor allem innerhalb der exogenen Systeme, können jedoch nachhaltig ins Ungleichgewicht geraten. Dies kann durch Beschleunigung oder Verzögerung eines natürlichen Kreislaufs erfolgen oder durch den künstlich angeregten Übergang von Stoffen aus einem langfristigen Kreislauf in ein kurzfristiges System. Es können aber auch neue Kreisläufe synthetischer Stoffe in Gang gesetzt werden, die ihrerseits die natürlichen Abläufe beeinflussen.

Eine Voraussetzung, um derartige anthropogene Einflüsse vermeiden oder eindämmen zu können, ist zunächst, sie in Art und Umfang zu erkennen. Voraussetzung sind entsprechende, reproduzierbare Beobachtungsmethoden. Neben der klassischen geologisch-hydrogeologischen Geländeaufnahme können geeignete geophysikalische Methoden oder die der Fernerkundung genutzt werden. Eine umfangreiche Darstellung der in der Umweltgeologie verwendeten Feldmethoden findet sich bei Knödel et al. (2007).

Wir wollen uns in diesem Kapitel vor allem der Ermittlung von Qualitätsdaten widmen. In vielen Fällen liefern messbare Stoffkonzentrationen und deren Entwicklung Hinweise auf anthropogene Einflüsse, wie sie in den folgenden Praxiskapiteln beleuchtet werden. Um zu Informationen über Stoffkonzentrationen zu gelangen, müssen geeignete Proben für eine entsprechende Analytik gewonnen werden.

Die große Herausforderung ist ohne Frage, repräsentative Proben zu gewinnen. Die Ergebnisse, die die entnommenen Proben liefern, müssen auf abgrenzbare größere Bereiche (räumlich und zeitlich) übertragbar sein. Zur Gewährleistung der räumlichen Übertragbarkeit müssen Überlegungen zum Entnahmeort, zur erforderlichen Probemenge oder auch zur lateralen und vertikalen

Verteilung der Entnahmestellen angestellt werden. Hinsichtlich der zeitlichen Übertragbarkeit sind die Rahmenbedingungen der Probenahme und deren Einfluss auf die Ergebnisse zu klären. Wirken sich z. B. Witterungsbedingungen oder Lufttemperatur auf die Stoffkonzentration innerhalb eines Kompartiments aus, so müssen Proben unter verschiedenen Rahmenbedingungen entnommen und verglichen werden, um den Einfluss dieser Rahmenbedingungen einzugrenzen und die Bandbreite der Konzentration quantifizieren zu können.

Um die Repräsentativität von Proben nachvollziehbar und überprüfbar zu machen und Ergebnisse interpretieren zu können, ist die präzise und detaillierte Dokumentation ein unverzichtbarer Bestandteil einer Beprobung. Aus der Dokumentation müssen alle Rahmenbedingungen der Probenahme hervorgehen. Diese Informationen über die Gewinnung von Daten werden als Metadaten bezeichnet. Zu den Metadaten, die in einem Probenahmeprotokoll erfasst werden, gehören je nach Art der Proben z. B. folgende Aspekte:

- Zeitpunkt
- Dauer der Probenahme
- Witterung, Lufttemperatur
- Aufschlussituation oder Messstellenausbau
- Entnahmewerkzeug/Entnahmeverfahren
- Entnahmemenge
- Probengebinde
- Probentransport und -lagerung bis zur Laboruntersuchung
- Messung von Feldparametern und deren Entwicklung bis zur Probenahme
- Probenehmer
- Besonderheiten, Vorkommnisse während der Probenahme

Vor allem wenn Schwierigkeiten bei der Interpretation von Laborergebnissen auftreten, stellen die Metadaten eine wichtige Informationsquelle dar.

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten der Beprobung unterscheiden:

- Stichprobe: Aus dem gesamten Untersuchungsraum werden nach dem Zufallsprinzip, nach einem festgelegten Raster oder auf der Grundlage von Vorwissen über eine Stoffausbreitung Entnahmepunkte und Entnahme-

zeitpunkte festgelegt. Jede Probe wird einzeln analysiert.

- Mischprobe: Aus mehreren Stichproben, die räumlich oder zeitlich verteilt entnommen wurden, wird eine Mischprobe hergestellt. So kann z. B. an einem Aufschluss oder einer Messstelle aus verschiedenen Tiefenstufen beprobt werden. Die jeweiligen Stichproben werden vermischt, um eine Aussage über den gesamten Tiefenbereich an diesem Aufschlusspunkt zu erhalten. Es kann aber auch aus mehreren Aufschlusspunkten aus immer der gleichen Tiefenstufe oder dem gleichen Schichtglied beprobt und damit eine Aussage über die Eigenschaften einer bestimmten Schicht getroffen werden. Mischproben aus Stichproben, die zu verschiedenen Zeitpunkten entnommen wurden, können vor allem bei Bodenluft oder Grundwasserproben sinnvoll sein. Sie können über einen definierten Zeitraum kontinuierlich oder diskontinuierlich gebildet werden. Die Analyse erfolgt an der Mischprobe.

Zur Bewertung umweltgeologischer Fragestellungen können Probenahmen an gasförmigen, flüssigen und festen Substanzen erforderlich sein. Je nach Mobilität der Substanzen werden unterschiedliche Anforderungen an das Konzept der Beprobung gestellt. So müssen zur Planung von Bodenluftproben die Luftdurchlässigkeiten in der ungesättigten Zone bekannt sein. Die chemisch-physikalischen Eigenschaften der relevanten Gasphasen und deren Mobilität müssen zur Optimierung des Probenahmeplans berücksichtigt werden. Eine repräsentative Probenahme von Grundwasser setzt voraus, dass die Grundwassersituation (Fließverhältnisse und saisonale Variationen) bekannt ist. Bei der Beprobung von mehr oder weniger immobilten Feststoffen spielt die räumliche Verteilung von Entnahmestellen eine besondere Rolle. Die Übertragbarkeit von Stichprobenergebnissen auf vertikal und horizontal ausgedehnte Bereiche muss durch ein ausreichend dichtes Netz an Entnahmepunkten gewährleistet werden.

7.2 Bodenluft

Bodenluftuntersuchungen werden vor allem in der Altlastenerkundung eingesetzt und können zur Klärung folgender Fragestellungen herangezogen werden:

- Deponiegasentwicklung einer Altablagerung
- Konzentrationen leicht flüchtiger Stoffe in der ungesättigten Bodenzone
- Ermittlung und dreidimensionale Abgrenzung von Schadensherden in der ungesättigten Zone

7.2.1 Wichtige Bodenluftparameter und deren Interpretation

Anthropogen unbelastete Bodenluft besteht im Wesentlichen aus den Parametern, die auch die Atmosphärenluft aufbauen. Es handelt sich dabei um Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2), Edelgase und Kohlendioxid (CO_2). Wesentlicher Unterschied zur Außenluft ist die Verteilung zwischen O_2 und CO_2 , die sich aus der Bioaktivität innerhalb der belebten Bodenzone ergibt. Je mehr pflanzliche und tierische Organismen im Boden aktiv sind, umso mehr Sauerstoff wird bei gleichzeitiger Bildung von CO_2 verbraucht. Typische Bodenluftzusammensetzungen sind in **Tab. 5.4** angeführt.

Der Abbau organischer Substanz unter Luftabschluss (► Gl. 5.7) führt neben einem CO_2 -Anstieg zur Bildung von Methan (CH_4). Erhöhte CO_2 -Gehalte in Kombination mit messbaren Methangehalten und deutlich verringerten Sauerstoffkonzentrationen deuten daher auf das Vorhandensein organischer Stoffe im Untergrund und auf eine luftundurchlässige Deckschicht hin. Dies ist typischerweise z. B. im Bereich von geschlossenen Deponien für Siedlungsabfälle der Fall. Die Bodenluft in einem derartigen Milieu kann nahezu zur Gänze aus den beiden Parametern CO_2 und CH_4 zusammengesetzt sein. Die Verteilung von CO_2 , CH_4 , O_2 und N_2 in der Bodenluft lässt Rückschlüsse auf die Abbauprozesse und den Abbaufortschritt innerhalb eines Deponiekörpers zu (siehe dazu ► **Exkurs 8.1**).

Leichtflüchtige Substanzen sind Stoffe, die unter Standardbedingungen flüchtig sind, aber aufgrund ihres hohen Dampfdrucks leicht in die Gasphase

übergehen. Es kann sich dabei um organische Substanzen, wie z. B. leicht flüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) oder Einringaromaten handeln, aber auch anorganische Stoffe, wie Quecksilber, können in dieser Form in der Bodenluft angereichert werden. In einem anthropogen unbelasteten Bodenkörper tauchen diese Substanzen normalerweise nicht in nachweisbaren Konzentrationen auf. Werden sie im Rahmen von Bodenluftuntersuchungen festgestellt, so deutet dies auf die Existenz eines Emissionsherdes im Untergrund. Es kann sich dabei um eine Flüssigkeit, eine im Grundwasser gelöste Substanz oder um an Bodenkörnern adsorbierte Stoffe handeln, die aufgrund ihres hohen Dampfdrucks in die Gasphase übergehen. Oft ist dafür ein nahegelegener Altstandort verantwortlich, an dem mit den jeweiligen Substanzen umgegangen wurde.

Leicht flüchtige Stoffe, die aus Altstandorten freigesetzt werden, liegen in der Bodenluft in Spurenkonzentrationen (ppm-Bereich) vor.

7.2.2 Vorrichtungen zur Bodenluftentnahme

Der Porenraum in Boden und Lockergestein, der nicht mit Wasser gefüllt ist, wird von Bodenluft ausgefüllt. Um Informationen über die Zusammensetzung der Bodenluft zu erhalten, müssen Messstellen errichtet werden, die den Bereich der ungesättigten Zone erschließen und die gegen einen Zutritt von Atmosphärenluft abgedichtet sind. Zur Errichtung von Bodenluftmessstellen werden Bohrungen mit geringem Durchmesser über den zu beprobenden Bereich, maximal bis zum Grundwasserspiegel, abgeteufelt. Die erforderliche Überlagerung ist von der Durchlässigkeit der ungesättigten Zone abhängig. In jedem Fall sollte zwischen Entnahmebereich und Oberfläche mindestens ein Meter Überlagerung vorhanden sein, um einen Einfluss von Atmosphärenluft bei der Probenahme ausschließen zu können. Bodenluftuntersuchungen sind daher erst ab einem Grundwasserflurabstand von ca. 2 m sinnvoll umsetzbar.

Die Aufschlüsse können als Rammsondierungen oder als Ramm- bzw. Rotationskernbohrungen ausgeführt werden.

Die Rammsondierung hat den Vorteil, dass sie zumindest in fein- bis mittelkörnigen Lockergesteinsschichten sehr rasch in mehrere Meter Tiefe vorgetrieben werden kann und die Beprobung der Bodenluft direkt und tiefenorientiert im Zuge des Bohrfortschritts erfolgt. Je nach Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte sind die Bohrungen auch ohne den Einsatz von Maschinen durch Handbohrgeräte möglich. Diese Art der Bodenluftbeprobung ohne Vorbohrung eignet sich als orientierende Untersuchung zum Auffinden von Kontaminationsschwerpunkten innerhalb großer Flächen. Durch eine rasterförmige Anlage der Bohrpunkte kann mit verhältnismäßig geringem Aufwand eine Aussage zur räumlichen Verteilung von Bodenluftkontaminationen getroffen werden. Ein Nachteil dieser direkten Methode zur Bodenluftentnahme ist das Fehlen von Aufschlussinformationen. Da kein Kerngewinn erfolgt, können durch die Bohrungen nur eingeschränkt Aussagen zum Untergrundaufbau gemacht werden. Nachteilig für die Qualität der Ergebnisse ist außerdem, dass es durch das Rammverfahren an der Bohrlochwand zu Materialverdichtung kommen kann. Dies führt zu einer Herabsetzung der Bodenluftwegsamkeit. Die Entnahme von Bodenluft kann dadurch erheblich erschwert werden. Eine Fehleinschätzung der Durchlässigkeit und des Bodenluftvolumens kann in der Folge auch zu falschen Einschätzungen des Gefährdungspotenzials durch Bodenluftbelastungen führen.

Die Bodenluftentnahme aus Kernbohrungen ist mit größerem Zeit- und Kostenaufwand verbunden, führt aber oft zu deutlich besseren Ergebnissen. Hierbei wird zunächst die Bohrung im Ramm- oder Rotationskernbohrverfahren abgeteuft. Je nach Untergrundaufbau ist eine Hilfsverrohrung notwendig, um den Verstoß des Bohrlochs im Lockergestein zu verhindern. Vor allem bei grobkörnigen Böden mit wenig Ton- oder Schluffanteilen ist das angebracht. Nach Erreichen der Endteufe erfolgt der Ausbau durch Filter- und Vollrohre.

Die Bereiche des Bohrlochs, aus denen die Bodenluft entnommen werden soll, werden mit geschlitzten Filterrohren versehen, durch welche die Bodenluft aus der Umgebung in die Bohrung gesaugt werden kann. Die Bereiche, aus denen keine Bodenluft gezogen werden soll, werden mit

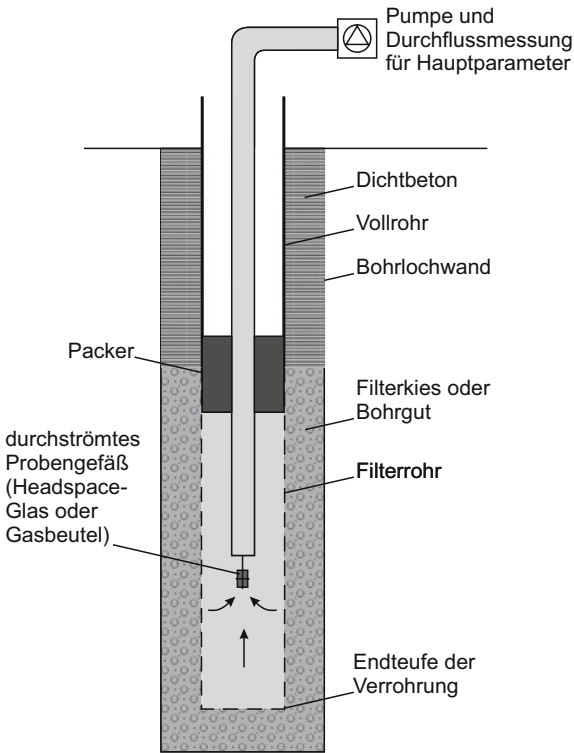
einer geschlossenen Verrohrung ausgestattet. Vor allem der Abdichtung der obersten Abschnitte der Bohrung ist bei Bodenluftmessstellen besondere Aufmerksamkeit zu widmen, da eine Verbindung zwischen Bohrloch und Oberfläche zu einer erheblichen Verfälschung der Bodenluftzusammensetzung durch atmosphärische Einflüsse führen würde. Der Ringraum des Bohrloches wird im Probenahmebereich mit Filterkies angepasster Körnung, im Bereich der Vollrohrstrecke mit dichtenden Materialien, z. B. Dichtbeton, verfüllt. Durch den Dichtbeton wird ein Einströmen von Atmosphärenluft durch den Ringraum verhindert. Je nach Untergrundaufbau bietet es sich an, Multilevel-Messstellen zu errichten, die eine Untersuchung der Bodenluft in verschiedenen Tiefenstufen erlauben.

In **Abb. 7.1** sind die wesentlichen Bestandteile einer stationären Bodenluftmessstelle dargestellt. Die Abbildung zeigt eine Methode der Probenahme, bei der die Bodenluft direkt im Bohrloch in die Probengebinde abgefüllt wird. Die Abdichtung des Entnahmebereichs erfolgt durch einen Packer. Dabei handelt es sich um ein aufblasbares Dichtelement, das an der Entnahmeverrichtung montiert ist, im Bohrloch aufgeblasen wird und das Bohrloch zur Oberfläche hin abdichtet.

Eine andere Methode sieht die Probenahme außerhalb des Bohrlochs vor. Dabei bleibt die Bodenluftmessstelle permanent verschlossen und ist nur über ein Entnahmeventil zugänglich. Es wird ein Unterdruck erzeugt und Bodenluft an die Oberfläche gesaugt. Die Luft kann dann wie in **Abb. 7.1** über mobile Messgeräte geleitet werden. Neben der Feldmessung der Hauptparameter erfolgt die Befüllung der Probengebinde für die Laboranalytik auch an der Oberfläche.

Nachteil der Probenahme außerhalb des Bohrlochs: Es kann zur Kondensation und damit zur Verfälschung der Ergebnisse kommen, wenn Bodenlufttemperatur und Außentemperatur stark voneinander abweichen.

Die Dokumentation der Feldparameter und die Probenahme erfolgen erst, wenn das Luftvolumen der Bodenluftsonde vollständig abgesaugt wurde, also tatsächlich Luft aus dem Porenraum entnommen wird. Dies lässt sich auch über die Stabilität der Werte der kontinuierlich gemessenen Feldpa-



■ **Abb. 7.1** Aufbau einer stationären Bodenluftmessstelle, bei der die Entnahme im Bohrloch mit Entnahme- und Packervorrichtung erfolgt. Das Probengefäß wird in das Bohrloch eingebracht und von der gepumpten Bodenluft durchströmt. Die Probe wird unter Standortbedingungen gewonnen. Die stabilen Werte der vor Ort kontinuierlich gemessenen Konzentrationen der Hauptparameter geben an, wann tatsächlich Bodenluft gefördert wird und die Probe genommen werden kann

parameter beobachten. Während der Beprobung werden Begleitmessungen von Unterdruck und Bodenlufttemperatur durchgeführt, um einen Zutritt von Außenluft feststellen zu können.

Je nach Bodenluftparametern können die Luftqualitätsdaten durch eine entsprechende Feldsensorik direkt vor Ort bestimmt werden. Dazu werden z. B. mobile Photometer oder Gaschromatographen verwendet. Vor Ort werden üblicherweise die Hauptparameter O_2 , CO_2 und CH_4 detektiert.

Spurenparameter werden laboranalytisch erfasst. Zur Probensammlung werden bei der Direktprobenahme gasdiffusionsdichte Behälter wie Gasbeutel oder Headspacegläser verwendet. Eine weitere Möglichkeit ist die Sammlung von Bodenluftkomponenten durch Adsorption an ein Trägermedium wie Aktivkohle. Vorteil der indirekten Probenahme ist die Anreicherungsmöglichkeit. Damit kann die Nachweisgrenze für Spurenstoffe herabgesetzt und es können auch sehr geringe Konzentrationen nachgewiesen werden.

Um Aussagen über das Schadstoffpotenzial und die Schadstofffrachten im Untergrund machen zu

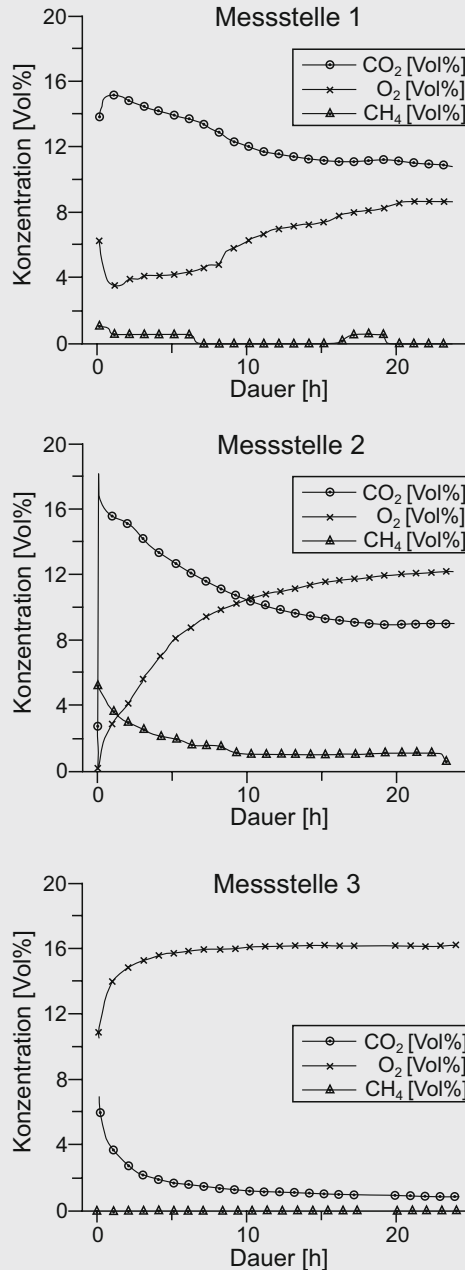
können, sowie um Informationen zur Luftdurchlässigkeit in der ungesättigten Zone zu gewinnen, werden Bodenluftabsaugversuche durchgeführt (► **Exkurs 7.1**). Dabei wird über einen Zeitraum von Stunden oder Tagen bis hin zu Monaten mit einem definierten Unterdruck Luft abgesaugt und die Konzentration der Hauptparameter kontinuierlich oder in definierten Zeitabständen erfasst. An benachbarten Bodenluftmessstellen wird der entstehende Unterdruck gemessen, um die Reichweite der Maßnahme und damit die Luftdurchlässigkeit des Untergrunds bestimmen können. Die Ergebnisse von Bodenluftabsaugversuchen dienen als Grundlage bei der Planung von Sanierungsmaßnahmen (siehe ► **Kap. 8**).

Um eine unkontrollierte Freisetzung kontaminierter Luft über längere Zeiträume zu vermeiden, wird beim Bodenluftabsaugversuch die abgesaugte Bodenluft in Filteranlagen gereinigt; die Schadstoffe lagern sich an Aktivkohle an. Erst danach erfolgt die Freisetzung der gereinigten Abluft in die Atmosphäre.

Exkurs 7.1 Bodenluftabsaugversuch in einer Altdeponie

In **Abb. 7.2** ist der Verlauf von Bodenluftabsaugversuchen an drei Messstellen im Bereich einer Hausmülldeponie dargestellt.

- Messstelle 1 liegt direkt im Bereich des Deponiekörpers und zeigt signifikante Beeinträchtigungen der Bodenluftqualität. Während der Versuchsdauer wird weniger stark belastete Luft aus Randbereichen der Deponie zur Messstelle transportiert. Die O_2 -Konzentration ist mit ca. 8 Vol.-% deutlich zugunsten der CO_2 -Konzentration verringert. Methan tritt nur untergeordnet auf.
- Messstelle 2 liegt im Randbereich des Deponiekörpers. Zu Beginn des Versuchs wird noch deutlich kontaminiertes Deponiegas gefördert. Mit zunehmender Versuchsdauer nehmen CO_2 und CH_4 -Gehalte ab, während O_2 aus weniger belasteten Bereichen angesaugt wird. Auch nach 24 h Pumpdauer ist die Bodenluft aber noch deutlich durch die Deponieprozesse geprägt.
- In Messstelle 3 wird nach wenigen Stunden für O_2 bereits annähernd Atmosphärenkonzentration gemessen. CO_2 liegt nach anfänglich hoher Konzentration von knapp 10 Vol.-% am Ende des Versuchs nur noch mit ca. 2 Vol.-% vor. Methan wird in keiner Phase des Versuchs detektiert. Es handelt sich hier um die natürliche Bodenluftzusammensetzung. Die hohen O_2 -Gehalte lassen außerdem auf eine unkorrekte Ausführung der Messstelle schließen. Offenbar wird hier mit steigendem Unterdruck Sauerstoff aus der Atmosphäre zugeführt.



■ **Abb. 7.2** Ergebnisse von 24-stündigen Bodenluftabsaugversuchen an drei Messstellen im Bereich einer Hausmülldeponie

Vertiefende Informationen über die Gewinnung und Analyse von Bodenluft und Deponiegas werden von Hilse und Voigt (2007) gegeben.

7.3 Bodenlösung

Für umweltgeologische Fragestellungen sind vor allem Wasserproben aus den unterirdischen Reservoiren von Bedeutung. Neben dem Grundwasser, das in ► **Abschn. 7.4** thematisiert wird, gehört dazu auch das Bodenwasser.

Wasser kommt, wie das ► **Kap. 4** ausführlich beschreibt, in den verschiedensten Kompartimenten vor. Es kann als Wasserdampf in der Atmosphäre, als Niederschlag, Oberflächen- oder Grundwasser auftreten. Bevor versickernde Niederschläge den Grundwasserkörper erreichen, befinden sie sich in der ungesättigten Bodenzone. Als Bodenwässer oder Bodenlösung nehmen sie Stoffe aus dem Boden auf und dienen als Transportmedium für natürliche und anthropogen in den Boden eingebrachte Substanzen. Im Bereich von Altablagerungen wird das Wasser, das die ungesättigte Zone des Ablagerungskörpers durchströmt, als Deponie-Sickerwasser bezeichnet.

7.3.1 Prozesse und Stoffe

Die Ausbreitung der Bodenlösung erfolgt generell gravitativ, d. h. Stoffe, die auf der Bodenoberfläche aufgebracht werden, werden mit einer Vertikal-komponente in tiefere Bodenhorizonte bzw. entlang geneigter Geländeoberflächen zusätzlich mit einer lateralen Komponente verfrachtet. Beim Stofftransport innerhalb der Bodenlösung spielt also auch das Geländereief eine wichtige Rolle. Im Bereich von Kuppen erfolgt ein Austrag von Stoffen, in Hangbereichen werden Stoffe vor allem transportiert und in Muldenzonen werden Stoffe, die mit der Bodenlösung verlagert werden, relativ zu anderen Zonen angereichert. Für lokale oder regionale Fragestellungen der Bodenwasserqualität ist daher häufig die Wahl des Probenahmepunktes von großer Bedeutung.

Bei Stofftransport und Umwandlung spielt natürlich das Edaphon, also die Gesamtheit der bodenlebenden Organismen, eine große Rolle, die aber im Rahmen dieses Buches nicht behandelt

werden kann. Einiges zu diesem Thema findet sich aber z. B. bei Blume et al. (2013).

Stoffumwandlung, Lösung und Fällung sowie in erheblichem Maße Kationenaustauschprozesse beeinflussen die Qualität der Bodenlösung. Wichtige natürliche Inhaltsstoffe der Bodenlösung sind neben Alkali- und Erdalkalimetallen die Anionen Hydrogenkarbonat, Sulfat und Chlorid, deren Konzentrationen sich aus der Beschaffenheit des Bodens ergeben.

Substanzen, die vermehrt durch anthropogene Aktivitäten auf oder in den Boden und damit in die Bodenlösung eingebracht werden, sind z. B. Phosphat oder Nitrat, die als Düngemittel in der Landwirtschaft ausgebracht werden. Daneben finden sich erhöhte Chlorid- und Natriumgehalte im Einflussbereich von Straßen, die im Winter mit Streusalz schneefrei gehalten werden. Organische Kohlenwasserstoffe in der Bodenlösung liefern Hinweise auf eine diffuse oder punktuelle Freisetzung von Mineralölprodukten. Aufgrund ihrer geringen Löslichkeit in Wasser werden diese Stoffe meist an Bodenkörnern adsorbiert. Ein Nachweis von Kohlenwasserstoffen in der Bodenlösung lässt daher auf eine erhebliche Menge an ungelöster flüssiger Phase schließen. Schwermetalle, die über die Atmosphäre in den Boden eingebracht werden, können sich ebenfalls in der Bodenlösung bemerkbar machen.

7.3.2 Gewinnung von Bodenlösung

Die Gewinnung von Bodenlösung oder Sickerwasser kann je nach Fragestellung und den relevanten Parametern auf verschiedene Arten erfolgen (► **Tab. 7.1**).

Eine vergleichsweise schnelle und einfache Methode zur Gewinnung der löslichen Stoffe in der Bodensubstanz erfolgt durch die Behandlung einer Feststoffprobe im Labor. Nach einer definierten Verfahrensanleitung (Europäische Norm EN 1744-3-2002 11 für Böden, EN 12457 für Abfälle) wird die Feststoffprobe in einem Schüttelverfahren mit einem definierten Wasser-Feststoff-Verhältnis (10:1 oder 2:1) behandelt. Stoffe, die hydrophil sind und aus dem Bodenverband in Lösung gehen könnten, werden durch das Verfahren herausgelöst. Das gewonnene Eluat kann anschließend laboranalytisch untersucht werden. Zur Beurteilung der Mobilität einer Schadstoffbelastung im Boden und damit zur

■ **Tab. 7.1** Einige Möglichkeiten zur Gewinnung von Bodenlösung aus der ungesättigten Bodenzone mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen

Verfahren zur Gewinnung von Bodenlösung	Labor/ in-situ	Vorteile	Nachteile
Eluatgewinnung nach EN 1744-3	Labor	Geringer Aufwand, rasche, reproduzierbare Ergebnisse	Konzentrationen werden möglicherweise überschätzt
Zentrifugieren oder Verdrängung	Labor	Gewinnung von „echter“ Bodenlösung	Geringe Mengen gewinnbar bzw. große Probenmengen erforderlich
Säulenelution	Labor	Geringer Aufwand, rasche, reproduzierbare Ergebnisse	Qualität der Ergebnisse stark davon abhängig, wie gut die natürlichen Verhältnisse simuliert werden
Drainagen	in-situ	Geringer Aufwand	Auf Hanglagen und stark vernässte Böden beschränkt
Saugkerzen	in-situ	Gewinnung aus ungestörtem natürlichem Bodengefüge	Hoher Installation- und Betreuungsaufwand, Unterdruck verfälscht natürliche Durchströmungsverhältnisse
Lysimeter	in-situ	Bildet die Situation in Langzeitversuchen am besten ab	Hoher Errichtungs- und Betriebsaufwand, lange Zeitdauer bis zur Gewinnung erster Resultate

Gefährdungsabschätzung reichen die Informationen der Eluatuntersuchung in vielen Fällen aus. Da aber die Verdünnung nicht den Verhältnissen im Feld entspricht und Effekte wie Lagerungsdichte, Bodentemperatur, Bioaktivität, Vegetationsdecke, Bodenfeuchte und Niederschlagssituation am Standort und deren Einfluss auf die Entwicklung der Bodenlösung unberücksichtigt bleiben, ist diese Methode nur eingeschränkt zur Beurteilung der Bodenlösung geeignet. Sie ist ebenfalls ungeeignet, wenn der Anteil an leicht flüchtigen Stoffen im Boden bestimmt werden soll, was häufig bei der Untersuchung von Altstandorten der Fall ist.

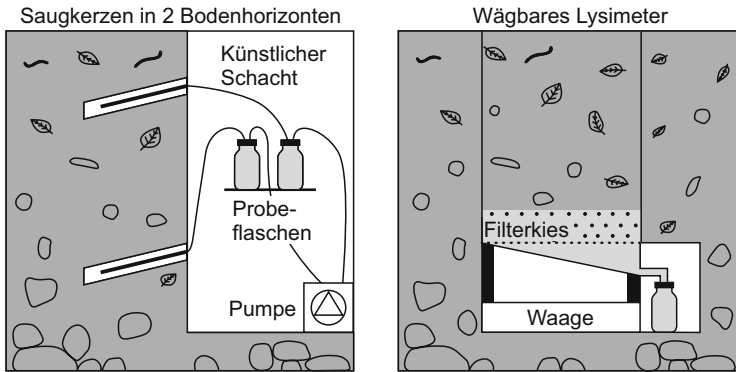
Die in einer Feststoffprobe vorhandene Bodenlösung kann durch Verdrängungsverfahren oder durch Zentrifugieren aus der Probe extrahiert werden. Mit diesen Verfahren ist es möglich, die tatsächliche Qualität des im Boden zirkulierenden Wassers zu bestimmen. Die Verfahren haben den Vorteil, die tatsächlich im Boden gelösten Stoffe und deren Konzentrationen abzubilden. Eluatuntersuchungen zeigen dagegen, statt der Bodenlösung selbst, die Gesamtheit der potenziell löslichen Stoffe im Boden und führen möglicherweise zu einer Überbewertung von Stoffkonzentrationen. Zentrifugieren oder Verdrängung eignen sich ebenfalls nicht zur Bestimmung leicht flüchtiger Substanzen

in der Bodenlösung. Im Normalfall können außerdem nur geringe Mengen an Bodenlösung gewonnen werden, aus denen der Nachweis von Spurenstoffen oft problematisch sein kann.

Eine weitere Methode zur Gewinnung von Bodenlösung ist die Säulenelution. Dabei wird Probenmaterial in eine Glassäule eingebracht und über einen definierten Zeitraum von mehreren Tagen mit Wasser und einer definierten Durchflussrate durchströmt. Das so gewonnene Eluat bildet näherungsweise die Verhältnisse in der Bodenlösung ab, sofern die Durchströmung an die natürliche Situation angepasst ist. Die Lagerungsverhältnisse im Bodenkörper können in einem Säulenmodell nur bedingt simuliert werden.

Viele Fragestellungen erfordern die Gewinnung von Bodenlösung im Verband unter Berücksichtigung der Standortsituation. Dies kann im einfachsten Fall und bei entsprechender Hangneigung durch die Anlage von Drainagen erfolgen. In den Drainagegräben, die quer zur Fließrichtung angelegt werden, kann Bodenwasser entnommen werden. Die Methode eignet sich vor allem bei stark vernässten Böden, in denen große Mengen an Bodenwasser anfallen.

Aufwändiger und langwieriger ist die Installation von Saugkerzen oder Lysimeteranlagen. Saugkerzen werden in definierten Tiefen in den Boden einge-



■ **Abb. 7.3** Saugkerzen und wägbares Lysimeter zur Gewinnung von Bodenlösung im Verband

führt und sind über Schlauchleitungen mit einer Pump- und Probenahmestation verbunden. Durch eine Vakuumpumpe wird im Boden ein Unterdruck erzeugt und die Bodenlösung in die entsprechenden Probeflaschen gesaugt. Die Saugkerzen, die aus Keramik, Kunststoff oder Glas bestehen können, werden meist in vorgebohrte Hohlräume eingebracht. Der Boden im Umfeld der Bohrung bleibt unberührt, so dass an den Entnahmestellen weitgehend natürliche Gegebenheiten abgebildet werden. Bodenlösung, die mit Hilfe von Saugkerzen gewonnen wird, bildet die Wasserqualität im Bodenverband gut ab.

Lysimeteranlagen können einerseits zur Entnahme von Bodenwasser für hydrochemische Untersuchungen herangezogen werden, sie liefern aber auch Daten über die Menge an Bodenlösung, die in einem definierten Zeitraum einen definierten Bodenquerschnitt durchströmt. In einem Lysimeter wird in einem abgrenzbaren Querschnitt Bodenmaterial mit einer definierten Lagerungsdichte eingebracht. Je nach Fragestellung können damit die Verhältnisse am Standort nachgebildet oder andere Bodentypen simuliert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine Vegetationsdecke aufzubringen, um den Einfluss verschiedenster Pflanzentypen auf die Bodenlösung zu untersuchen. An der Sohle des Bodenkörpers wird eine Probensammelvorrichtung installiert, über die die Bodenwasserprobe entnommen werden kann. Wägbare Lysimeter bieten außerdem die Möglichkeit, die Menge an Bodenlösung kontinuierlich über die Gewichtsbestimmung zu beobachten. Quantitative Aufzeichnungen der Bodenlösung durch Lysimeteranlagen werden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung herangezogen (Langguth und Voigt 2004).

In **Abb. 7.3** sind Prinzipskizzen einer Saugkerzen-Anordnung sowie eines wägbaren Lysimeters dargestellt.

7.4 Grundwasser

Die Gewinnung von Probenmaterial aus Grundwasserkörpern kann über natürliche Grundwasseraustritte (Quellen) oder durch die Errichtung entsprechender Aufschlüsse bzw. Messstellen erfolgen. Für den natürlichen Austritt von Quellen kann es vielfältige geologische Gründe geben. Meist sind Unterschiede in der Durchlässigkeit des Untergrunds und damit verbundene Stauereffekte für den freien Austritt von Grundwasser verantwortlich. In Gebieten mit ausgeprägter Morphologie treten Quellen am Verschnitt von Trennflächen (Schichtgrenzen, Schieferungsflächen, Kluft- oder Störungszonen) mit der Geländeoberfläche auf.

Im **Kap. 10** werden einige Möglichkeiten der Beeinträchtigung von Grundwasserkörpern beleuchtet. Um diese qualitativ erfassen zu können, ist eine Probenahme an Grundwasseraufschlüssen erforderlich. Für die meisten Fragestellungen rund um anthropogene Beeinflussungen von Grundwässern kann nicht auf natürliche Grundwasseraustritte zugegriffen werden. Vor allem im Bereich von Porengrundwasserkörpern sind derartige natürliche Austritte selten. Dies gilt im Besonderen in Gebieten mit geringem Relief. Da die meisten Problemstellungen eine Entnahme von Grundwasser an definierten Punkten erfordern, ist die Errichtung von Grundwassermessstellen bzw. von Netzwerken an Grundwassermessstellen fast immer erforderlich.

7.4.1 Grundwassermessstellen

Zur Errichtung von Grundwassermessstellen sind zunächst entsprechende Untergrundaufschlüsse durch Bohrungen zu erstellen. Die Wahl des Bohrvorgangs richtet sich dabei in erster Linie nach dem erwarteten Untergrundaufbau sowie danach, ob ein Kerngewinn gewünscht ist.

Während in grobkörnigen Böden das Rotationsbohrverfahren die eindeutig besseren Ergebnisse liefert, können in bindigen Böden aufgrund des schnelleren Bohrfortschritts Rammverfahren bevorzugt werden. Sind detaillierte Informationen über den Untergrundaufbau gewünscht, müssen Bohrverfahren mit Kerngewinn (Rotationskernbohrung, Rammkernbohrung) gewählt werden. Bohrverfahren ohne Kerngewinn sind grundsätzlich kostengünstiger und mit geringerem Zeitaufwand verbunden, lassen aber Fragen zum Untergrundaufbau offen.

Auch die Tiefe einer Grundwassermessstelle richtet sich nach Untergrundaufbau und der jeweiligen Fragestellung. Soll der gesamte Grundwasserhorizont mit der Messstelle erfasst werden, muss die Bohrung bis in den unterlagernden, gering durchlässigen Stauhorizont abgeteuft werden. Liegen mehrere Grundwasserstockwerke vor, die durch stauende Schichten voneinander abgetrennt sind, ist bei der Bohrung besondere Sorgfalt walten zu lassen, um einen Kurzschluss zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken zu vermeiden. Wird ein Grundwasserkörper über seine gesamte Mächtigkeit erfasst, spricht man von einer vollkommenen Messstelle bzw. einem vollkommenen Brunnen. Werden nur die oberen Bereiche des Grundwasserkörpers durch die Messstelle abgedeckt, reicht die Bohrung also nicht bis zum Stauhorizont, wird die Messstelle als unvollkommen bezeichnet. Sollen mehrere Grundwasserstockwerke erschlossen werden, werden Multilevel-Messstellen errichtet. Dazu werden mehrere nah beieinander liegende Bohrungen unterschiedlich tief abgeteuft bzw. in unterschiedlichen Tiefen ausgebaut.

Bedeutend für die nachhaltige Funktionsfähigkeit einer Grundwassermessstelle ist ihr fachgerechter Ausbau. Dabei spielen sowohl Verrohrung als auch Ringraumfüllung eine wichtige Rolle. Das Verrohrungsmaterial muss korrosionsbeständig

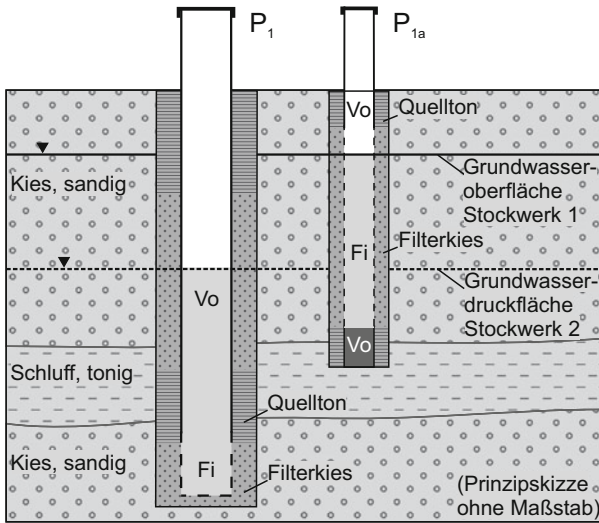
sein und darf keine Stoffe an das Grundwasser abgeben. Vor allem im Bereich von Grundwasserkontaminationen muss bei der Auswahl des Materials auch darauf geachtet werden, dass es nicht durch den Schadstoff angegriffen wird. Üblicherweise werden PVC-Rohre oder verzinkte Stahlrohre zum Ausbau verwendet.

Der tiefste Bereich einer vollkommenen Messstelle sollte mit einem Sumpfrohr ausgestattet werden. Dabei handelt es sich um ein Vollrohr, das in den feinkörnigen Stauhorizont einbindet und den Zustrom von Feinmaterial in die Messstelle verhindern soll. In einer unvollkommenen Messstelle ist ein Sumpfrohr nicht erforderlich.

Im Grundwasserbereich zwischen Stauhorizont und Grundwasserspiegel muss eine ungehinderte Durchströmung der Grundwassermessstelle gewährleistet sein. Dazu wird dieser Abschnitt mit geschlitzten Filterrohren ausgestattet. Die Filterstrecke reicht über die erbohrte Grundwasseroberfläche hinaus, um auch bei höheren Grundwasserständen noch die gesamte Wassersäule erfassen zu können.

Den Abschluss nach oben bildet erneut ein Vollrohr, das kurz unter der Geländeoberfläche abschließt (Unterflurmessstelle) oder über die Geländeoberfläche hinausreicht (Überflurmessstelle). Unterflurmessstellen werden an Standorten errichtet, an denen es zu Nutzungskonflikten oder Beschädigungen der Messstellen kommen könnte, z. B. an Straßen und Straßenrandbereichen. Die Errichtung von Überflurmessstellen dient vor allem der leichten Auffindbarkeit und sie wird überall dort vorgezogen, wo keine Beeinträchtigung der bestehenden Nutzung zu befürchten ist. Zur Sicherung gegen Beschädigungen wird das überstehende Vollrohr dennoch meist mit einem Stahlrohr ummantelt.

Der Ringraum zwischen Bohrloch und Verrohrung wird im Bereich der Filterstrecke mit Filterkies verfüllt. Die Körnung richtet sich dabei nach der Korngrößenverteilung in der gesättigten Zone. Sie muss einerseits fein genug sein, um ein Zufließen feiner Partikel zu verhindern, darf aber nicht wesentlich geringer durchlässig sein als der umgebende Lockergesteinskörper, da andernfalls der Zustrom zur Messstelle eingeschränkt wird. Im oberen Vollrohrbereich muss der Ringraum gegen das Zufließen von Sickerwässern abgedichtet werden. Dazu werden hier Dichtbeton oder Quelltone



■ **Abb. 7.4** Ausbauschema einer Multilevel-Messstelle zur Überwachung zweier Grundwasserhorizonte. Das obere Grundwasserstockwerk wird durch eine vollkommene Messstelle (P1a) erschlossen. Die Filterstrecke reicht über die gesamte Mächtigkeit der gesättigten Zone. Das untere Grundwasserstockwerk wird nur im obersten Bereich durch die Filterstrecke der Messstelle P1 erfasst. Um einen Kurzschluss zwischen den beiden Stockwerken zu vermeiden, muss der Ringraum der Messstelle P1 im Bereich des StauhORIZONTES abgedichtet sein

eingebaut. Die Dichtstrecke sollte mindestens einen Meter mächtig sein.

Die Anforderungen an die technische Ausführung einer Grundwassermessstelle sind in der Europäischen Norm EN ISO 22475-1 (2006) definiert.

In ■ **Abb. 7.4** ist der schematische Ausbau einer Multilevel-Messstelle dargestellt. In dieser Anordnung wird der oberste Grundwasserhorizont über seine gesamte Mächtigkeit erschlossen. Eine zweite Bohrung durchörtert das oberste Grundwasserstockwerk und den unterlagernden StauhORIZONT. Sie erschließt den unteren zweiten Grundwasserhorizont aber nicht zur Gänze, ist also als unvollkommene Messstelle ausgebaut. ■ **Abb. 7.5** zeigt eine Multilevelmessstelle im Gelände. Das Pegelrohr P1 erschließt das tiefere Grundwasserstockwerk als unvollkommene Messstelle, P1a erschließt als vollkommene Messstelle das obere Grundwasserstockwerk.

7.4.2 Messstellennetze

Eine einzelne Grundwassermessstelle kann bereits wichtige Informationen über die Grundwassermächtigkeit, die hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserkörpers oder die hydrochemische Beschaffenheit des Grundwassers liefern. Da die Untergrundverhältnisse nicht zwangsläufig über größere Flächen homogen sind und das Grundwasser einer Fließbewegung unterliegt, sind diese punktuellen Informationen zur Charakterisierung

der Grundwassersituation aber unzureichend. Um Informationen über die Grundwassersituation in der Fläche zu erlangen, ist die Errichtung eines Netzwerks an Messstellen erforderlich. Im einfachsten Fall müssen mindestens drei Messstellen errichtet werden, um die Raumlage der Grundwasseroberfläche und damit Fließrichtung und Fließgefälle bestimmen zu können. Hölting und Coldewey (2013) zeigen die Vorgangsweise zur Ermittlung der Raumlage der Grundwasseroberfläche mithilfe des hydrologischen Dreiecks. Anhand von Qualitätsdaten lassen sich unter Umständen bereits aus dieser einfachen Anordnung von mindestens drei Messstellen räumliche Verteilungen von Stoffen im Grundwasser ableiten. Meist werden je nach Fragestellung deutlich umfangreichere Messnetze errichtet.

Überregionale Grundwassermessnetze

Da Grundwasserkörper als potenzielle Trinkwasserreservoirs von erheblicher gesellschaftlicher Bedeutung sind, besteht ein hohes öffentliches Interesse an der flächigen Erfassung von Grundwasserfließverhältnissen und Grundwasserqualität. In Gestalt überregionaler Messnetze werden diese Daten seit vielen Jahrzehnten von den zuständigen Fachbehörden im deutschsprachigen Raum gesammelt. Mit der Umsetzung der Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) erfolgte eine Systematisierung der Messungen nach definierten Wasserkörpern. Die abgrenzbaren Grundwasser-

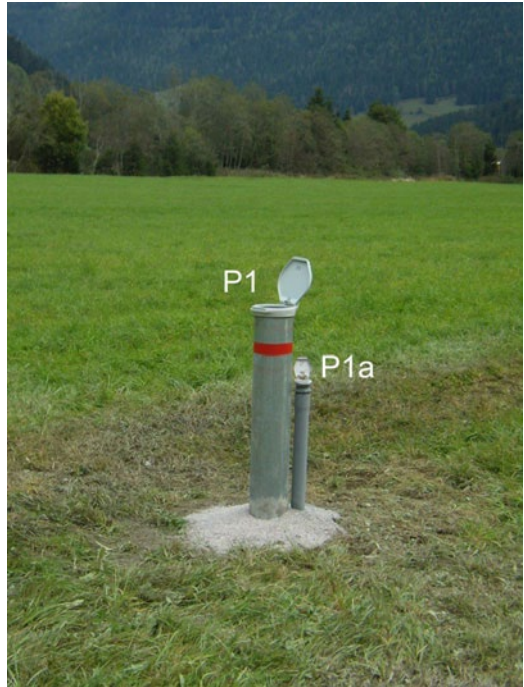
körper richten sich dabei nach den großräumig abgegrenzten Flussräumen und können, ebenso wie diese, grenzübergreifend sein. Der Umfang der Qualitätsuntersuchungen wurde an die Vorgaben der WRRL angepasst.

Die staatliche Grundwasserüberwachung erfolgt auf Basis eines eher weitmaschigen Grundnetzes, an dem zeitlich unbefristet in definierten Intervallen quantitative und qualitative Grundwasserdaten erhoben werden. Dabei werden Basismessstellen betrieben, die vor allem Informationen zu geogenen Hintergrundwerten liefern sollen. In potenziell anthropogen beeinflussten Gebieten werden zusätzlich Trendmessstellen errichtet, die dazu dienen, langfristige Entwicklungen infolge diffuser oder auch punktueller Schadstoffeinträge in den Grundwasserkörper frühzeitig zu erkennen. Zur Beobachtung bestimmter überregional auftretender Schadstoffe werden auch spezielle Messnetze betrieben. Hier ist z. B. das Nitratmessnetz in Deutschland nennen, über welches speziell der Einfluss der in der Landwirtschaft freigesetzten Nitrate beobachtet wird.

Im Bedarfsfall wird das überregionale Messstellennetz räumlich verdichtet. Dies geschieht etwa, um festgestellte Grundwasserbelastungen näher eingrenzen oder um Detailfragen zur Wasserversorgung oder zu Wasserschutz zonen klären zu können.

Zur Errichtung überregionaler Messnetze werden eigens Messstellen errichtet, daneben werden aber auch geeignete bestehende Messstellen oder Grundwassernutzungen in das Messnetz einbezogen. Es können auf diese Weise z. B. auch private Brunnenanlagen Teil des staatlichen Messnetzes werden. Um zur Beobachtung langfristiger Trends geeignet zu sein, müssen überregionale Messnetze mit einer entsprechenden Konstanz betrieben werden. Das heißt jedoch nicht, dass sie, einmal eingerichtet, über Jahrzehnte unverändert bleiben sollten. Es muss immer auch die Möglichkeit bestehen, auf Beobachtungen zu reagieren, indem neue Messstellen eingefügt, andere aufgelassen werden.

Die Beobachtungsintervalle müssen auf Basis der hydrogeologischen und hydrologischen Verhältnisse sowie der potenziellen Einflussfaktoren festgelegt werden. Es muss z. B. gewährleistet sein, dass die Intervalle dicht genug sind, um repräsentative Daten für Nieder-, Mittel- und Hochwasserstände erfassen zu können. Dazu muss zumindest



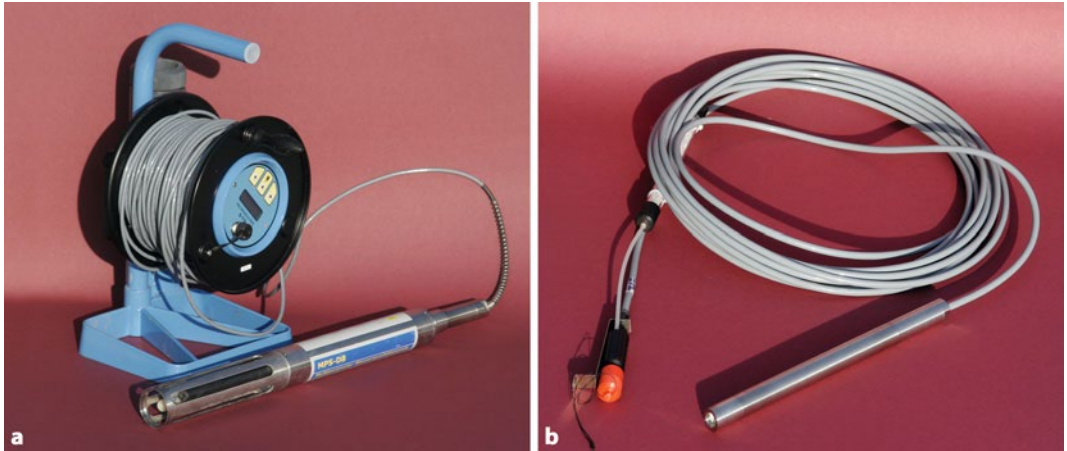
■ Abb. 7.5 Abschluss einer Multilevel-Messstelle, Ausbau als Überflurmessstelle

eine Probenahme zu jeder Jahreszeit, also vierteljährlich erfolgen. Grundwasserkörper, die sehr dynamisch sind und in direkter Kommunikation mit Oberflächengewässern stehen, müssen entsprechend engmaschiger untersucht werden. Dazu können auch Datensammler zur kontinuierlichen Erfassung eingesetzt werden. Um den Einfluss von hydrologischen Extremereignissen (Hochwasser, extreme Trockenzeiten) erfassen zu können, werden ereignisbezogene Probenahmen durchgeführt.

Die Grundlagen zur Errichtung staatlicher Messnetze sowie die Umsetzung in Deutschland werden z. B. von Langguth und Voigt (2004) beschrieben.

Lokale Messnetze

Für räumlich abgrenzbare konkrete Fragestellungen werden lokale, im Vergleich zu den überregionalen, deutlich dichtere Messnetze errichtet. Fragestellungen, die dies erfordern, können z. B. im Zusammenhang mit der Planung von Trinkwasserversorgungen und der erforderlichen Schutzgebietsabgrenzung auftreten. Bei aktiven Eingriffen in Grundwasser-



7 **Abb. 7.6** a Multiparametersonde zur Bestimmung von Grundwasserhöhe, Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffgehalt und Redoxpotenzial. Weitere Parameter können über die Ergänzung entsprechender Sensoren ebenfalls vor Ort bestimmt werden; b Datensammler zur kontinuierlichen Erfassung von Grundwasserständen und Wassertemperatur (Fotos H.-P. Steyrer)

körper, wie die Wasserhaltung während großer Bauprojekte oder Grundwasserveränderungen im Einflussbereich von Stauräumen, ist eine detaillierte Kenntnis der Grundwasserdynamik erforderlich, die auch die Beurteilung der Wasserqualität einschließt. Die Daten, die durch derartige Messnetze gewonnen werden, bilden wichtige Grundlagen zur Erstellung von numerischen Grundwassermodellen, die je nach Fragestellung auch mit Stofftransportmodellen gekoppelt werden können. Die Ergebnisse dienen generell dazu, Auswirkungen anthropogener Eingriffe zu prognostizieren.

Die Beobachtung von Grundwasserständen sowie der Grundwasserqualität erfolgt anhand des stationären Messstellennetzes in festgelegten Intervallen. Im Rahmen von Stichtagsmessungen können Wasserstände und Feldparameter vor Ort bestimmt sowie Probenahmen für die Laboranalytik durchgeführt werden. Vor allem zur Beurteilung von Grundwasserspiegelschwankungen und deren Auswirkung auf die Wasserqualität bietet es sich an, den Wasserstand sowie Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit als Summenparameter kontinuierlich mit Hilfe von Datensammlern zu erfassen. In **Abb. 7.6a** ist eine Multiparametersonde zur Bestimmung der Grundwasseroberfläche sowie verschiedener chemisch-physikalischer Feldparameter dargestellt. **Abb. 7.6b** zeigt einen Datensammler zur kontinuierlichen Erfassung der

Höhenlage der Grundwasseroberfläche und der Wassertemperatur.

7.4.3 Grundwassererkundung in der Altlastenpraxis

Die Errichtung lokaler Grundwassermessnetze ist häufig auch im Zusammenhang mit Untergrundkontaminationen erforderlich. Die Anordnung und Ausstattung von Grundwassermessstellen zur Erkundung von Schadstoffkontaminationen richtet sich nach folgenden Aspekten:

Die räumliche Anordnung der Messstellen muss so gestaltet werden, dass die kontaminierten Wässer im direkten Abstrombereich des Schadensherdes erfasst werden. Daneben müssen aber auch Referenzmessstellen zur Verfügung stehen, die die Grundwasserqualität vor dem Kontakt mit dem Schadensherd dokumentieren. Um Variationen der Fließrichtung und deren Auswirkungen auf die Grundwasserqualität erfassen zu können, müssen auch seitlich des Schadenszentrums Messstellen zur Wasserqualitätsbestimmung verfügbar sein.

Tiefe und Ausbau der Messstellen müssen gewährleisten, dass der gesamte möglicherweise betroffene Grundwasserbereich abgedeckt werden kann. Neben Grundwasserflurabstand, also der vertikalen Distanz zwischen Geländeoberfläche

und Grundwasseroberfläche, und Tiefenlage des Stauhizonts müssen bei der Messstellenplanung daher auch die Eigenschaften der Schadstoffe berücksichtigt werden. Für Schadstoffe, die in Wasser gut löslich sind und sich daher auf den gesamten Bereich verteilen, muss die Messstelle den gesamten grundwasserführenden Horizont erfassen und eine Probenahme über die gesamte Grundwassermächtigkeit erlauben. Für LNAPL-Substanzen (siehe ► Kap. 2) muss vor allem die Grundwasseroberfläche durch die Filterstrecke der Messstelle erschlossen werden. Dies muss auch bei hohen Wasserständen gewährleistet sein. Wenn DNAPL-Substanzen erwartet werden, ist dafür Sorge zu tragen, dass die Grundwassersohle durch die Messstelle erschlossen wird, da sich die schwer löslichen Substanzen, die schwerer als Wasser sind, an der Sohle des Grundwasserkörpers anreichern werden, während im Grundwasser selbst vergleichsweise geringere Kontaminationen auftreten.

Zur optimalen Gestaltung eines Grundwassermessstellennetzes im Altlastenbereich ist demnach bereits ein großes Maß an Vorwissen über den Standort erforderlich. Neben einer räumlichen Abgrenzung des Schadensherdes müssen Informationen über den Untergundaufbau, die Grundwasserfließverhältnisse und die Schadstoffparameter vorliegen. Meist wird ein optimiertes Grundwassermessstellennetz daher nicht in einem Schritt errichtet, sondern in mehreren aufeinanderfolgenden Stufen mit zwischengeschalteter Interpretation der Ergebnisse. Diese Vorgangsweise ist mit erheblichem Zeitaufwand verbunden. Zudem kann es vor allem in der Anfangsphase zu Fehleinschätzungen kommen und damit zur Errichtung später unbrauchbarer Messstellen.

Um derartige „Umwege“ bei der Errichtung eines dauerhaften Messnetzes zu vermeiden, bietet sich unter anderem die „direct-push“ Technologie zur orientierenden Grundwassererkundung an. Bei diesem Verfahren werden mit technisch möglichst einfacher Ausstattung Grundwasserproben tiefenorientiert aus Rammsondierungen entnommen. Bereits mit der Rammsonde wird die Probenahmeapparatur in den Untergrund eingebracht, um geringe Wassermengen aus definierten Tiefenstufen zu entnehmen. Die Proben werden mit mobilen Analysergeräten direkt im Feld untersucht und die Schad-

stoffkonzentrationen semiquantitativ bis quantitativ bestimmt. Die Endteufe der jeweiligen Messstelle sowie die flächenhafte Anordnung der temporären Messstellen zueinander und zum vermuteten Schadensherd erfolgt flexibel auf Basis der kurzfristig gewonnenen Messergebnisse. Diese Vorgangsweise erlaubt es, mit geringem Aufwand die oben angesprochenen Fragen im Rahmen einer ersten Untersuchungsphase zu klären und darauf aufbauend das stationäre Grundwassermessstellennetz zu errichten.

Ein Beispiel für die Anwendung der „direct-push“-Technologie bei der Erkundung eines Altstandortes beschreiben Radny et al. (2012). Weitere Beiträge zum Thema finden sich im 2012 veröffentlichten Themenband zum „direct push“-Verfahren der Zeitschrift „Grundwasser“.

Beprobung und Analytik der Grundwässer erfolgt über mindestens ein hydrologisches Jahr zu verschiedenen Jahreszeiten, um saisonale Einflüsse auf die Entwicklung erfassen zu können. Dabei werden neben den im Grundwasserabstrom installierten Messstellen auch die seitlich sowie die oberhalb des Schadensherdes errichteten beprobt. Durch diese Vorgangsweise kann einerseits der direkte Zusammenhang zwischen Grundwasserkontamination und Schadensherd nachgewiesen werden, andererseits können Variationen in der Grundwasserfließrichtung und damit auch in der Richtung der Schadstoffausbreitung mit erfasst werden.

Die Probenahme erfolgt üblicherweise mit Unterwasserpumpen. Es wird ein Förderstrom erzeugt, der den Gegebenheiten des Grundwasserkörpers entspricht. Es muss über längere Zeiträume gepumpt werden können, ohne dass die Grundwasseroberfläche deutlich abgesenkt wird, andererseits muss der Förderstrom stark genug sein, um in vertretbaren Zeiträumen zunächst das Volumen der Grundwassermessstelle auszutauschen und anschließend einen kontinuierlichen Zustrom aus dem Grundwasserkörper zu erhalten. Die Kontinuität des Zustroms wird über die Stabilität der Feldparameter dokumentiert. Diese werden im Förderstrom kontinuierlich gemessen. Sind die Werte für Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert stabil, ist davon auszugehen, dass die Entnahme aus dem Bereich des Grundwasserkörpers und nicht mehr aus der Messstelle und dem davon beeinflussten Ringraum erfolgt.



■ **Abb. 7.7** Kabellichtlot mit angeschlossenem Probenheber zur Entnahme von MKW-kontaminierten Grundwasserproben (Foto H.-P. Steyrer)

Die Entnahmetiefe richtet sich nach der Ausbautiefe der Grundwassermessstelle. Die Pumpe sollte möglichst im Bereich der Filterstrecke positioniert werden, die ja gemäß der jeweiligen Fragestellung angelegt wurde (siehe ► [Abschn. 7.4.1](#)).

Zielen die Grundwasseruntersuchungen auf Schadstoffe, die gut in Wasser löslich sind, muss die Probenahme den gesamten grundwasserführenden Bereich erfassen. Werden vor allem gering wasserlösliche Substanzen untersucht, die schwerer sind als Wasser, so müssen die Proben an der Aquifersohle entnommen werden. Soll auf Stoffe untersucht werden, die gering wasserlöslich und leichter als Wasser sind, wie z. B. Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), so erfolgt die Probenahme an der Grundwasser Oberfläche, da die Schadstoffkonzentration hier am höchsten sein wird. Werden diese leichten Substanzen als aufschwimmende Flüssigphase erwartet, so bietet sich statt der Pumpprobenahme die Entnahme von Schöpfproben an. Über einen Probenheber, der bis zur Grundwasser Oberfläche in die Messstelle eingeführt wird, können die Proben direkt von der Oberfläche entnommen werden. ■ **Abb. 7.7** zeigt einen Probenheber in Kombination mit einem Kabellichtlot zur Messung des Grundwasserabstichs bzw. der Entnahmetiefe.

Bei der Entnahme von Grundwasserproben ist generell darauf zu achten, dass keine Kontamination der Probe über die Entnahmevorrichtungen erfolgt. Vor allem bei kontaminierten Wässern muss die

gesamte Probenahmeeinrichtung gereinigt werden, bevor eine neue Messstelle damit angefahren wird.

Detaillierte Beschreibungen der Methoden zur Erkundung von Grundwassersystemen sowie zur Grundwasserprobenahme und Analytik finden sich in Knödel et al. (2007).

7.5 Feststoffe

Während die Repräsentativität von Bodenluft- oder Grundwasserproben an punktförmigen Entnahmestellen dadurch gewährleistet werden kann, dass vor der Beprobung über ausreichend lange Zeiträume abgesaugt bzw. gepumpt und die Stabilität der Feldparameter angestrebt wird, müssen bei der Entnahme von Feststoffproben aufgrund der Heterogenität des Untergrundes andere Strategien gewählt werden, um repräsentative Proben zu gewinnen. Die Probenahme Strategie wird dabei von folgenden Faktoren bestimmt:

- Intention der Feststoffuntersuchung
- Umfang des zu untersuchenden Areals
- Untergrundaufbau
- Erwartete Schadstoffparameter
- Immissionspfad für die relevanten Parameter

Intention der Feststoffuntersuchung

Bodenprobenahmen werden zur allgemeinen Bewertung und Überwachung der Bodenqualität meist mit der Frage nach ihrer Leistungsfähigkeit verknüpft (Blume et al. 2013). Neben den bodenkundlichen Parametern werden vor allem auch die Schwermetallgehalte der Böden untersucht. Wie im ► [Abschn. 7.4.2](#) für nationale Grundwassermessnetze beschrieben, werden auch Böden einer flächendeckenden Beobachtung unterzogen. Grundlage hierfür ist in Deutschland das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG 1998). In Österreich ist Bodenschutz Ländersache, die Überwachung der Bodenqualität obliegt den einzelnen Bundesländern. Die Gesetze auf Bundes- oder Landesebene zum Bodenschutz basieren aktuell, anders als jene zum Wasserschutz, nicht auf einer Rahmenrichtlinie der Europäischen Union. Der Entwurf einer Europäischen Bodenrahmenrichtlinie, der im Jahr 2006 von der Europäischen Kommission vorgelegt worden war, wurde bisher von den Mitgliedsstaaten nicht akzeptiert.

Exkurs 7.2 Fallbeispiel Regionale Dauerbeobachtung

Im Rahmen der Bodenzustandsinventur im Land Salzburg wurde in den 1990er Jahren mehr oder weniger zufällig eine massive Bodenbelastung mit Schwermetallen, Arsen und organischen Schadstoffen auf einer landwirtschaftlich genutzten Hangfläche im mittleren Salzachtal entdeckt. Das weitmaschige Probenraster zur allgemeinen Bewertung der Bodenqualität im Land Salzburg wurde daraufhin im Bereich der festgestellten Bodenbelastung stark verdichtet. Der Erstbefund wurde durch die verdichtete Beprobung bestätigt. Historische Recherchen ergaben, dass in dem betroffenen Bereich der Rauchgasschacht eines ehemaligen Kupferverhüttungsbetriebes angesiedelt war. Das Rauchgas wurde durch einen hangparallelen unterirdischen Stollen von der Kupferhütte im Talboden auf ca. 80 m über Talniveau geleitet und

hier über einen Schornstein an die Atmosphäre abgegeben. (Die Situation ist in [Abb. 9.6](#) im [Exkurs 9.2](#) dargestellt.)

Der Bauschutt des abgerissenen Schornsteins, der durch Anlagerung der Rauchgase an die Schachtwände massiv kontaminiert war, war im Nahbereich als Halde abgelagert worden. Eine stetige Freisetzung von Schadstoffen aus der Halde nach Schließung des Betriebes und die vorherige jahrzehntelange Deposition von Schwermetallen und Arsen über den Luftpfad haben zu einer erheblichen Belastung des Oberbodens im betroffenen Bereich geführt.

Die fragile hochkontaminierte Fläche wurde zur Altlast erklärt und anschließend durch den Abtrag des kontaminierten Bauschutts und den Austausch des Bodenhorizonts saniert. Zur Festlegung von Sanie-

rungszielwerten (siehe [Kap. 8](#)) wurden die Hintergrundwerte der Region berücksichtigt, die aufgrund der früheren intensiven Bergbauaktivitäten höher sind, als in anthropogen unbelasteten Gebieten. Diese Hintergrundbelastung der Region war bereits vor der Entdeckung des Areal aus den Dauerbeobachtungen der Bodenzustandsinventur bekannt.

Das Beispiel zeigt, wie durch ein überregionales Netz an Beobachtungen zur Umweltqualität auch punktuelle Emissionsquellen entdeckt und die Freisetzung von Schadstoffen daraus eingedämmt werden kann.

Details zum geschilderten Fallbeispiel sind im Österreichischen Altlastenkataster (Umweltbundesamt 2001) beschrieben.

Zur Überprüfung der Bodenqualität in Deutschland und Österreich werden Boden-Dauerbeobachtungsflächen eingerichtet. Zielsetzung der Beobachtungsprogramme ist die Beschreibung des aktuellen Bodenzustands, eine langfristige Überwachung der Veränderung von Böden sowie die Erstellung von Prognosen über die künftige Entwicklung. Eine Beschreibung des Bodenzustands in Deutschland auf der Grundlage des länderübergreifenden Beobachtungsprogramms ist in Huschek et al. (2004) dargestellt. In Österreich wird ein ähnliches Messnetz mit der sogenannten Bodenzustandsinventur der Länder betrieben. Bei diesen Beprobungen werden flächendeckend rasterförmig angelegte Untersuchungsflächen beprobt, um repräsentative Aussagen über eine regionale Belastungssituation z. B. durch die Landwirtschaft oder durch Luftschadstoffe für größere Gebiete zu erlangen.

Für konkrete Fragen der Bodenbelastung, wie sie im Rahmen von Altlasten auftreten, ist eine Probenahmestrategie erforderlich, die sehr eng an den jeweiligen Schadensfall angelehnt ist. Räumliche

Ausbreitung des Schadensherdes sowie Eigenschaften der Schadstoffe sind gleichermaßen ausschlaggebend.

Häufig bauen verdichtete Messnetze in bestimmten Gebieten auf den Ergebnissen überregionaler Dauerbeobachtungsaktivitäten auf. Ein Beispiel dafür ist im [Exkurs 7.2](#) beschrieben.

Ausdehnung des Untersuchungsgebiets

Bei der Festlegung eines Probenahmeplans spielt der Umfang des Untersuchungsraums eine große Rolle. Für regionale Beobachtungsflächen staatlicher Messnetze muss eine Messstellendichte gewählt werden, die einerseits ausreichend ist, um die verschiedenen Bodentypen und Umweltsituationen (Exposition, Vegetationsdecke, Nutzung, anthropogene Einflüsse) zu erfassen, die andererseits aber praktisch umsetzbar und finanzierbar ist. In lokal abgegrenzten Untersuchungsgebieten muss sich die Messstellendichte nach der Heterogenität richten. Dabei müssen Untergrundaufbau und Schadstoffverteilung berücksichtigt werden.

Eine Verdichtung der Probenahmestellen mit der Nähe zum Schadensherd kann in vielen Fällen sinnvoll sein.

Untergrundaufbau

Der Aufbau des Bodens und seine Heterogenität in lateraler und in vertikaler Richtung bilden einen wichtigen Faktor bei der Festlegung eines Beprobungsrasters. Je heterogener der Untergrund ist, umso dichter muss der Probenahmeraster gewählt werden. Bei einer engen Wechsellagerung verschiedenster Korngrößenverteilungen im Untergrund müssen je nach Fragestellung auch entsprechend tiefengestufte Probenahmen erfolgen. Die Korngrößenverteilung bestimmt die erforderliche Probenmenge. Je größer die größten Komponenten eines Bodens sind, umso größer muss die Probenmenge sein, um alle Korngrößen entsprechend ihres Anteils im Boden auch in der Probe abbilden zu können. Für Korngrößen bis in den Kiesbereich reichen meist Probenmengen von ca. 5 kg aus. Einzelne größere Komponenten können als Einzelproben unter Angabe ihres prozentualen Anteils entnommen werden. Dominieren generell größere Komponenten, muss die Probenmenge entsprechend umfangreicher sein.

Schadstoffparameter

Eine wichtige Überlegung bei der Festlegung einer Probenahmestrategie bezieht sich auf die Eigenschaften der Schadstoffe, die durch die Untersuchung detektiert werden sollen. Zielt die Beprobung auf die allgemeine Beurteilung der Bodenfunktionen, so muss ein durchgängiges Bodenprofil an jedem Punkt des Rasters erfasst werden. Handelt es sich um konkrete Untersuchungen auf hydrophobe, viskose Substanzen, die an die Oberflächen der Bodenkörner adsorbiert werden, ist die Ausbreitung des Schadstoffes möglicherweise auf einen kleinen Bereich in der Nähe des Schadensherdes beschränkt. Sind die Schadstoffe dagegen gering viskos und wasserlöslich, finden sich die Schadstoffe am Feststoff in geringerer Konzentration, dafür jedoch in einer lateralen und vertikal größeren Ausdehnung. Der Beprobungsraster muss entsprechend weitläufiger sein, die Bodenaufschlüsse unter Umständen in größere Tiefe reichen.

Immissionspfad für die relevanten Parameter

Ausschlaggebend für die Planung der Untersuchungsmaßnahmen ist auch die Frage danach, wie der Schadstoff in den Boden eingebracht wurde. Folgende grundsätzliche Immissionspfade können unterschieden werden:

- Luftschadstoffe aus der Atmosphäre, die als nasse oder trockene Deposition in den Untergrund gelangen
- Bewusste Ausbringung von Schadstoffen als Dünger oder Schädlingsbekämpfungsmittel in der Landwirtschaft
- Freisetzungen aus einem Schadstoffherd im Untergrund

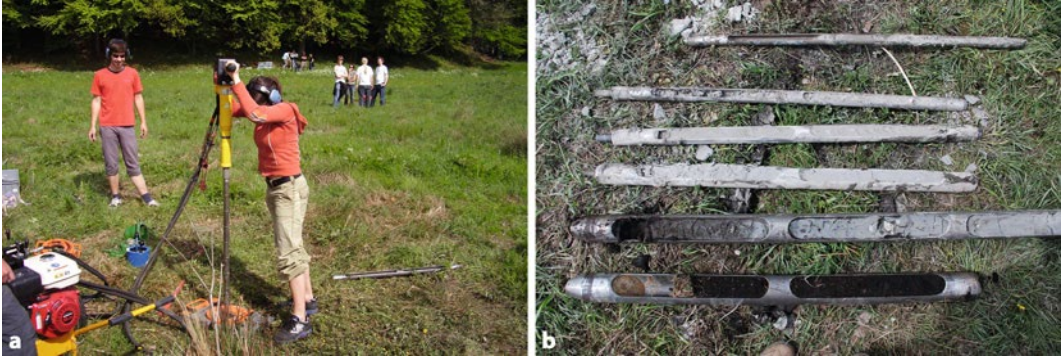
Die Konzentration der atmosphärisch eingebrachten Schadstoffe nimmt im Allgemeinen mit der Tiefe rasch ab. Eine Beprobung der obersten Dezimeter des Oberbodens reicht oft völlig aus, vor allem dann, wenn die Schadstoffe wenig mobil sind und in den oberen Bodenzonen adsorbiert werden. Die durch die Landwirtschaft konzentriert auf den Boden aufgebrachten Stoffe dringen mit den Niederschlagswässern tiefer in die ungesättigte Zone ein und erreichen häufig auch die gesättigte Zone. Auch hier nehmen die Konzentrationen von der Oberfläche in größere Tiefen in der Tendenz eher ab. Für Kontaminationen aus Altlasten müssen Feststoffproben je nach Mobilität der relevanten Parameter über den gesamten potenziell durch die Altlast betroffenen Bereich entnommen werden. Dabei kann sowohl die ungesättigte als auch die gesättigte Zone betroffen sein.

7.5.1 Aufschlussverfahren für die Bodenprobenahme

Bei der Wahl des Aufschlussverfahrens sind die folgenden Faktoren relevant:

- Zugänglichkeit des Probenahmepunktes
- Erforderliche Aufschlusstiefe
- Notwendige Probenmenge

Sofern nur geringe Tiefen beprobt werden sollen und nur geringe Probenmengen erforderlich sind, ist die Entnahme mittels Spaten oder durch



■ **Abb. 7.8** a Durchführung einer Kleinbohrung; b Bohrstöcke zur Entnahme von Bodenproben aus geringen Tiefen und eher feinkörnigen Böden (Fotos M. Marbach)

sogenannte Kleinbohrverfahren (bis 80 mm Bohrdurchmesser) möglich. Der Einsatz eines Bohrstockes ist hier das einfachste Aufschlussverfahren. Ein Bohrstock ist ein hohler, seitlich geschlitzter Stahlstab mit einer Spitze und einem Durchmesser bis maximal 80 mm. Dieser wird entweder durch Hammerschläge mit Körperkraft oder durch ein hydraulisches System in den Boden getrieben. Ist die Entnahmetiefe erreicht, wird der Stock um 360° gedreht, so dass sich die Höhlung mit Bodenmaterial füllt. Nach Herausziehen des Stockes kann das Material aus dem Hohlraum entnommen werden. Die Aufschlusstiefe kann je nach Untergrundbeschaffenheit einige Meter betragen. Die Methode kann in Umgebungen eingesetzt werden, die mit größeren fahrzeugmontierten Geräten nicht zugänglich sind. Die Aufschlussmethode hat zudem den Vorteil, dass sie ohne größere Flurschäden durchzuführen ist. ■ **Abb. 7.8** zeigt Bohrstöcke verschiedener Durchmesser und die Ausführung einer Bohrung im Gelände.

Für größere Aufschlusstiefen und grobkörnige Böden ist der Einsatz von leistungsfähigeren Bohrgeräten erforderlich.

Die Probengewinnung erfolgt im Ramm- oder Rotationskernbohrverfahren, mit dem eine Tiefenzuordnung der Proben mit einer Genauigkeit im Dezimeterbereich möglich ist. Schneckenbohrverfahren sind meist weniger zeitaufwändig, liefern jedoch nur begrenzte Möglichkeiten einer tiefendifferenzierten Bodenansprache und Beprobung. Je nach Untergrundaufbau und Geräteeinsatz können mit fahrzeugmontierten Bohrgeräten große Aufschlusstiefen erreicht werden. Voraus-

setzung ist eine entsprechende Anfahrbarkeit des Bohrpunktes.

Müssen größere Mengen an Probenmaterial aus jedem Aufschlusspunkt gewonnen werden, so bietet es sich an, Aufschlüsse mithilfe eines Schaufelbaggers herzustellen. Baggerschürfe können, je nach Geräteausstattung, Beprobungstiefen von ca. 6 m im Maximum erschließen. Sehr heterogene Böden mit sehr groben Komponenten können auf diese Weise repräsentativ beprobt werden. Muss mit einem großen Aufschlussdurchmesser eine größere Tiefe erschlossen werden, können Greiferbohrungen ausgeführt werden. Dabei wird eine Hilfsverrohrung hydraulisch in den Untergrund gedreht und das Material innerhalb der Verrohrung mittels Greifer entnommen. In verfestigten Böden sind die Möglichkeiten dieser Methode stark eingeschränkt.

7.5.2 Abfallprobenahme

Die repräsentative Beprobung von Altablagerungen stellt eine besondere Herausforderung dar. Im Vergleich zu natürlichen Böden sind künstliche Ablagerungen von Abfällen häufig in Inhalt, Korngrößenverteilung und chemischer Beschaffenheit sehr heterogen. Die Probennahmestrategie muss daher so angelegt sein, dass durch das Beprobungsnetz zunächst Feststoffeinheiten definiert werden können. Feststoffeinheiten können Untergrundschichten ähnlicher Kornverteilung sein, es können Bereiche sein, die einen ähnlichen Verunreinigungsgrad aufweisen. Es kann sich aber auch um abgrenzbare Bereiche ähnlicher Abfälle handeln. Eine detail-



■ **Abb. 7.9a,b** Heterogenität von Böden entscheidet über die Probenahme-strategie in der Altlastenpraxis. Bei homogenen Böden wie in **a** erfolgt die Probenahme soweit möglich nach organoleptischem Befund (Geruch, Farbe) wie hier aus Baggerschürfen oder auch aus Bohrkernen; **b** zeigt eine Greiferbohrung innerhalb einer ehemaligen Hausmülldeponie. Die sehr heterogenen Verhältnisse erfordern die Entnahme großer Abfallmengen, um eine repräsentative Probenahme zu gewährleisten

lierte Planung des vertikalen und lateralen Beprobungs-rasters setzt daher bereits ein hohes Maß an Kenntnissen über die Altablagerung voraus, die im Zuge mehrphasiger Erkundungsmaßnahmen (siehe ► **Kap. 8**) gewonnen werden müssen.

In die Planung muss außerdem eine Abschätzung des Gefährdungspotenzials einfließen. Ist innerhalb einer Ablagerung mit dem Auftreten von Deponiegasen zu rechnen, müssen aus Gründen des Arbeitsschutzes parallel zur Feststoffbeprobung kontinuierliche Messungen der Deponiegasgehalte durchgeführt werden.

Da in einer Altablagerung meist die verschiedensten Materialien entsorgt wurden, sind große Variationen in der Größe der Komponenten zu erwarten. Von sehr feinkörnigen Schlämmen über Bauschutt-komponenten bis zu Haushaltsgeräten oder Autowracks kann jede Art von Abfall auftreten. Um dieses Spektrum weitgehend vollständig erfassen zu können, werden zur Beprobung von Feststoffen im Altlastenbereich üblicherweise Großaufschlussverfahren, wie Baggerschürfe und Greiferbohrungen, gewählt. Zur Dokumentation der Aufschlüsse werden die angetroffenen Abfälle möglichst detailliert beschrieben. Dabei müssen einzelne Komponenten, die ein besonderes Gefährdungspotenzial mit sich bringen können, gesondert

erwähnt und untersucht werden. Bei diesen Einzelkomponenten kann es sich z. B. um Autowracks, Kühlschränke, Batterien oder Kanister oder Fässer mit unbekanntem Inhalt handeln.

Liegt ein Gemenge verschiedener Abfallarten vor, müssen diese möglichst genau anteilmäßig erfasst werden. So kann innerhalb eines Baggerschurfs z. B. ein Material erschlossen werden, das zu 75 % aus Hausmüll mit hohem organischen Anteil besteht, aber das mit Beton und Ziegelbruchstücken vermischt ist, die die restlichen 25 % ausmachen und als Bauschutt klassifiziert wird.

Im Bereich von Altstandorten erstreckt sich die Feststoffprobenahme meist auf natürliche Böden, die mit bestimmten Schadstoffen kontaminiert sind. In solchen Fällen liegt dann ein vergleichsweise homogener Untergrundaufbau vor. Schadstoffkonzentrationen können zwischen verschiedenen Schichten stark variieren. Im Idealfall sind die Konzentrationsunterschiede organoleptisch erfassbar, so dass eine gezielte Probenahme in verschiedenen stark belasteten Horizonten erfolgen kann. Ist eine Abgrenzung von Schadensbereichen anhand des organoleptischen Befundes nicht möglich, so ist die rasterförmige Beprobung bestimmter vorher definierter Tiefenstufen eine Möglichkeit, um die Kontamination in ihrer räumlichen Ausdehnung

zu erfassen. In **Abb. 7.9** ist ein hinsichtlich der Korngrößen sehr homogener Boden einer Altablagerung gegenübergestellt. Der Vergleich macht deutlich, dass in den beiden Situationen grundsätzlich unterschiedliche Konzepte zur repräsentativen Beprobung erforderlich sind.

Die Feststoffbeprobung erfolgt im Feld immer zunächst in Form von Einzelproben, die jeweils nur eine abgrenzbare Feststoffeinheit umfassen. Die Definition der Feststoffeinheit richtet sich nach vorab festgelegten Kriterien. Bereiche, die bezüglich dieser Kriterien als homogen bezeichnet werden können, werden jeweils mit einer Stichprobe erfasst. Die Homogenität bezieht sich auf Kornverteilung, organoleptisch erfassbarer Verunreinigungsgrad, Tiefenbereich, Aufschlusspunkt oder Abfallart. Wichtig ist dabei in jedem Fall eine einheitliche und nachvollziehbare Vorgangsweise zur Bildung von Stichproben.

Mischproben werden vor allem zur Kostenersparnis und einer effizienteren Erkundung einer Kontamination aus den Stichproben gebildet, sofern es die Fragestellung und die Situation vor Ort zulassen. So kann z. B. eine Mischprobe aus Einzelproben gebildet werden, die in verschiedenen Aufschlüssen in gleicher Tiefenstufe entnommen wurden. Es können auch Mischproben verschiedener Feststoffeinheiten innerhalb eines Aufschlusspunktes für bestimmte Fragestellungen sinnvoll sein. In jedem Fall sollten jedoch zuerst Einzelproben entnommen werden und die Mischung erst auf Basis der vollständigen Erkundungsergebnisse im Labor erfolgen.

Die Entnahme von Doppelproben zur Qualitätssicherung, von Rückstellproben für spätere Auswertungen oder auch die Entnahme von Referenzproben aus unbelasteten Gebieten kann für bestimmte Fragestellungen im Altlastenbereich von Bedeutung sein. Vor allem bei der Bildung von Rückstellproben sind mögliche Veränderungen der Beschaffenheit oder der Schadstoffkonzentrationen z. B. durch Sauerstoffkontakt oder die Freisetzung leicht flüchtiger Stoffe zu berücksichtigen. Eine lange Aufbewahrungsdauer von Rückstellproben kann unter Umständen zu erheblichen Verfälschungen der Probenbeschaffenheit führen. Die Sinnhaftigkeit der Sammlung von Rückstellproben richtet sich nach den Eigenschaften der Schadstoffe, die damit dokumentiert werden sollen.

7.5.3 Beprobung von Flusssedimenten

Im **Kap. 6** wurde anhand einiger Beispiele beschrieben, welche umweltrelevanten Informationen über die Untersuchung von Flusssedimenten gewonnen werden können. Voraussetzung dafür ist natürlich auch hier die Entnahme repräsentativer Proben an relevanten Stellen. Wie im Kapitel ausgeführt, sind für geogene oder anthropogene Belastungen vor allem die feinkörnigen Sedimente der Stillwasserbereiche von Interesse. Proben zur Erkundung von Schadstoffbelastungen in Fließgewässern werden stets in den ruhigen Randzonen, im Bereich von Stauräumen oder an Seesedimenten entnommen.

Generelle Voraussetzung für die Interpretierbarkeit der Ergebnisse von Sedimentuntersuchungen ist die Kenntnis der Sedimentationsdynamik im Bereich der Entnahme. In einem Stillwasserbereich, der über lange Zeitspannen unverändert bleibt, können Sedimentpakete abgelagert werden, die Zehner bis Hunderte Meter mächtig sind und Sedimententwicklungen über viele Jahrzehnte bis Jahrtausende dokumentieren. Vor allem die Sedimente tiefer Seen liefern Informationen über Langzeitentwicklungen und anthropogene Einflüsse. Ruhigere Fließstrecken in Flüssen und künstliche Stauräume weisen dagegen meist höhere Sedimentationsraten auf. Die Sedimente werden jedoch regelmäßig z. B. bei Hochwasserereignissen und künstlichen Stauräumenspülungen wieder abtransportiert. In diesem Milieu gewonnene Proben bilden in erster Linie kurzfristige Entwicklungen ab.

Je nach Wassertiefe und der gewünschten Kernlänge variiert der Aufwand für die Entnahme von Sedimenten deutlich. Die Probenahme kann mit Schlammgreifern vom Boot aus, von Brücken oder vom Randbereich des Gewässers aus erfolgen. Je nach Größe des Greifers kann auf diese Weise eine Mischprobe der obersten Sedimentlage entnommen werden. Da die Entnahmetiefe in direktem Zusammenhang mit dem Alter des Sediments steht, entscheidet die Wahl des Greifers darüber, welche Zeitspanne mit der Sedimentprobe abgedeckt wird. Mit einem Greifer, der die obersten 10 cm des Flusssediments entnimmt, kann bei einer Sedimentationsrate von 1 cm pro Jahr eine Mischprobe über die

letzten 10 Jahre entnommen werden. Bei höheren Sedimentationsraten, z. B. in Stauräumen, kann mit derselben Entnahmevorrichtung eine Jahresprobe entnommen werden. Eine Interpretation der Probenanalysen setzt daher eine möglichst genaue Kenntnis der Sedimentationsraten im Entnahmebereich voraus. Ereignisbezogene Sedimentbeprobungen an Hochflutsedimenten in Auegebieten erlauben es, sehr kurzfristige Entwicklungen in der Schadstoffbelastung der Sedimentfracht zu beurteilen. Eine derartige Studie haben z. B. Krüger et al. (2000) erstellt.

Zur tiefengestuftem Beprobung kann die Entnahme mit verschiedenen Stechtechniken erfolgen. Die Probenahmenvorrichtung ist entweder an ein Gestänge montiert oder bei größeren Wassertiefen an eine Seilführung gebunden. Mit Hilfe eines Falllots wird das Stechrohr in den Untergrund gedrückt und so die Probe gewonnen. Das Material, das auf diese Weise in den Stechzylinder eingebracht wird, stellt bei günstigen Bedingungen eine annähernd ungestörte Probe dar. Die Analyse einzelner Scheiben dieser ungestörten Probe lässt eine Abschätzung der Entwicklung der Schadstoffbelastung über den beprobten Zeitraum zu.

Da der Übergangsbereich zwischen Wasserkörper und Sediment im Normalfall stark aufgelockert ist und hohe Wassergehalte aufweist, kommt es bei den oben beschriebenen Methoden häufig zu einer Durchmischung des Sediments, die keine Tiefenabstufung im Zentimeterbereich mehr ermöglicht. Für Untersuchungen in Gebieten mit sehr geringen Sedimentationsraten ist jedoch diese Genauigkeit unbedingt erforderlich, da Abweichungen von wenigen Zentimetern bereits eine Ungenauigkeit von Jahrzehnten oder mehr ergeben können. Aussagen über anthropogen bedingte qualitative Veränderungen sind damit so gut wie nicht möglich. In solchen Fällen werden die Proben mit Hilfe des Gefrierkernverfahrens gewonnen. Dazu wird eine Stahllanze in den Untergrund eingebracht, um über eine Schlauchleitung in der Lanze flüssigen Stickstoff in den Untergrund zu leiten. Durch Verdampfen des Stickstoffs wird die Lanze gekühlt. Das Sediment im Umfeld der Lanze gefriert und kann nach einiger Zeit im Verband ungestört entnommen werden.

Details zur Feststoffprobenahme werden von Birke et al. (2007) dargestellt. Spezielle Informa-

tionen über Entnahmetechniken aus Sedimenten werden z. B. von Negendank et al. (2002) beschrieben.

Probengewinnung für umweltgeologische Fragestellungen – Einiges, was man wissen sollte

- Um anthropogene Einflüsse auf ein Umweltkompartiment bewerten zu können, werden Daten über Stoffkonzentrationen benötigt, die aus der Analyse von Proben gewonnen werden. Eine wichtige Voraussetzung, um Analyseergebnisse auf ein Untersuchungsgebiet übertragen zu können, ist eine nicht durch andere Einflüsse verfälschte, nachvollziehbare und für weitere Bereiche oder Zeiträume repräsentative Probenahme.
- Zur Bewertung von Untersuchungsergebnissen müssen die Rahmenbedingungen der Probenahme detailgenau in einem Probenahmeprotokoll dokumentiert werden. Dazu gehören Beschreibungen des Aufschlusspunktes bzw. der Messstelle, die Dokumentation der Dauer der Probenahme und der verwendeten Werkzeuge. Auch Informationen zur Witterung oder zur Lufttemperatur während der Beprobung sind von Interesse. Diese Metadaten über eine Probe können eine wichtige Hilfe bei der Interpretation von Ergebnissen darstellen.
- Die Gewinnung von Bodenluft kann über temporäre Messstellen erfolgen. Dabei wird eine Sonde mittels Rammsondierung direkt in den Beprobungsbereich gebracht und die Bodenluft abgesaugt. Aufwändiger ist die Errichtung von stationären Bodenluftmessstellen mit Vorbohrungen, die anschließend zu Messstellen ausgebaut werden und mehrfach zur Beprobung genutzt werden können.
- Bodenlösung kann aus einer Feststoffprobe im Labor gewonnen werden. Die einfachste Methode ist die Eluatgewinnung. Nach einem genormten Verfahren wird die Feststoffprobe in Wasser gelöst und die löslichen Anteile anschließend hydrochemisch unter-

sucht. Die Separation des Bodenwassers aus einer Probe kann durch Zentrifugieren oder Verdrängung erfolgen.

- Die Gewinnung von Bodenlösung im Verband ist dann erforderlich, wenn Umgebungsbedingungen wie Lagerungsdichte, klimatische Verhältnisse und Vegetationsdecke in die Untersuchungen einbezogen werden sollen. In diesem Fall werden Saugkerzen oder Lysimeter eingesetzt.
- Um die Raumlage einer Fläche bestimmen zu können, sind zumindest drei Fixpunkte erforderlich. Dementsprechend besteht ein Grundwassermessnetz aus mindestens drei Messstellen, an denen annähernd zeitgleich der Grundwasserstand erfasst werden muss, um Aussagen über Grundwasserfließrichtung und Gefälle treffen zu können.
- Die Gestaltung von Grundwassermessstellen richtet sich nach der Korngrößenverteilung und Tiefenlage von gut und weniger gut durchlässigen Schichten. Der Bereich, in dem die Wasserführung stattfindet, wird durch Filterrohre erschlossen. Ein Sumpfrohr schützt bei vollkommenen Messstellen vor dem Eintritt feinkörniger Materialien an der Messstellensohle. Vollrohre im oberen Bereich in Kombination mit der Abdichtung des Ringraumes schützen vor dem Zutritt von Oberflächenwässern.
- Nationale oder überregionale Grundwassermessnetze dienen der Erfassung der Grundwasserqualität unter Berücksichtigung geogener und anthropogener Einflüsse. Sie können als weitmaschige Grundmessnetze oder als verdichtete Trendmessnetze ausgestaltet sein.
- Im Altlastenbereich dienen Grundwassermessnetze dazu, das Ausmaß der Grundwasserbelastung durch einen Schadensherd zu erfassen. Dazu werden Messstellen ober- und unterhalb des vermuteten Schadensherdes sowie seitlich davon errichtet.
- Bei der Beprobung von Feststoffen ist die Frage der Repräsentativität von großer Bedeutung. Dabei sind Faktoren, wie die Größe

des Untersuchungsgebiets, der Untergroundaufbau sowie die Eigenschaften der erwarteten Schadstoffparameter zu berücksichtigen. Je heterogener der Boden ist, umso größer muss die Probenmenge sein, um Repräsentativität zu erzielen. Dies gilt in besonderem Maße für Abfallproben.

- Zur Interpretation von Qualitätsdaten über Sedimente aus Oberflächengewässern muss die Sedimentationsrate bekannt sein. Ungenauigkeiten von wenigen Zentimetern bei der tiefengestuftem Probenahme können zu erheblichen Fehlinterpretationen führen, sofern die Zeit-Tiefen-Beziehung im Sediment nicht in ausreichender Genauigkeit bekannt ist.

2 Testfragen zum Kapitel Probengewinnung für umweltgeologische Fragestellungen

1. Um durch die Analyse von Proben umweltgeologische Fragestellungen beantworten zu können, müssen die Proben vor allem die Voraussetzung der Repräsentativität erfüllen. Beschreiben Sie, wie diese Repräsentativität bei der Beprobung von Bodenluft, Grundwasser oder Feststoffen gewährleistet werden kann.
2. Was versteht man unter den Metadaten einer Probe? Wie werden sie bei der Probenahme berücksichtigt?
3. Zur Gewinnung von Bodenluftproben müssen Untergroundaufschlüsse eingerichtet werden. Die Entnahme kann direkt aus einer Rammsondierung erfolgen oder nach einer Vorbohrung aus einer ausgebauten Messstelle. Erläutern Sie Vor- und Nachteile der beiden Verfahren.
4. Mit welcher Fragestellung werden Bodenluftabsaugversuche durchgeführt? Welche Beobachtungen erwarten Sie bei einem 24-stündigen Absaugversuch im Randbereich einer Altablagerung? Beschreiben Sie die Entwicklung verbal und grafisch und begründen Sie den Konzentrationsverlauf der Hauptkomponenten der Bodenluft.

5. Beschreiben Sie die Ihnen bekannten Verfahren zur Gewinnung von Bodenlösung mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen.
6. Warum entspricht der eluierbare Anteil einer Feststoffprobe nicht automatisch der Beschaffenheit der Bodenlösung im Verband?
7. Beschreiben Sie die Funktionsweise eines Lysimeters.
8. Skizzieren Sie den Ausbau einer vollkommenen Grundwassermessstelle. Welche Entscheidungen sind bei der Ausbauplanung zu treffen, welche geologisch-hydrogeologischen Faktoren sind dabei zu berücksichtigen?
9. Unter Berücksichtigung welcher Gesichtspunkte wird ein Messstellennetz zur Erkundung einer Grundwasserkontamination konzipiert?
10. Was versteht man unter der „direct-push“-Technologie? Wann wird sie mit welcher Zielsetzung angewendet?
11. In welchem Zusammenhang stehen die Eigenschaften wie Wasserlöslichkeit und Dichte von Schadstoffen mit der Entnahmetiefe von Grundwasserproben?
12. Welche Überlegungen spielen bei der Ausgestaltung eines Rasters für Feststoffprobenahmen eine Rolle?
13. Welche Überlegungen sind anzustellen, wenn eine repräsentative Feststoffprobenahme im Altlastenbereich zu planen ist?
14. Überlegen Sie, wie sich die Art eines kontaminierten Standortes auf die erforderliche Probenmenge auswirkt. Berücksichtigen Sie dabei auch die Unterscheidungen zwischen Altablagerung und Altstandort, wie sie in ► Kap. 8 beschrieben werden.

- book of Field Methods and Case Studies. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg
- Blume HP, Brümmner GW, Schwertmann U, Horn R, Kögel-Knabner I, Stahr K, Auerswald K, Beyer L, Hartmann A, Litz N, Scheinost A, Stanjek H, Welp G, Wilke B-M (2013) Schef-fer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, München, Wien (Neubearbeitung)
- EN 1744-3 (2003). Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 3: Herstellung von Eluaten durch Auslaugung von Gesteinskörnungen. Europäische Norm
- EN 12457 (Teile 1 bis 4) (2003). Charakterisierung von Abfällen – Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchungen für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen – Teil 1 bis 4. Europäische Norm
- EN ISO 22475-1 (2006). Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen – Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung. Europäische Norm
- Hilse H, Voigt H-J (2007) Sampling and Analysis of Soil Gas and Landfill Gas. In: Knödel K, Lang G, Voigt H-J (Hrsg) Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg
- Höltling B, Coldewey WG (2013) Hydrogeologie, 8. Aufl. Springer Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, Stuttgart
- Huschek G, Krenzel D, Kayser M, Bauriegel A, Burger H (2004) Länderübergreifende Auswertung von Daten der Boden-Dauerbeobachtung der Länder. Forschungsbericht UBA-FB 00726. Umweltbundesamt, Berlin
- Knödel K, Lang G, Voigt H-J (Hrsg) (2007) Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg
- Krüger F, Kunert M, Büttner O, Friese K, Rupp H (2000) Geochemische Zusammensetzung von Hochflutsedimenten an der Elbe bei Wittemberge. In: Huch M (Hrsg) Geldmacher, Umweltgeochemie in Wasser, Boden und Luft. Springer, Heidelberg
- Langguth H-R, Voigt R (2004) Hydrogeologische Methoden, 2. Aufl. Springer-Verlag, Heidelberg
- Negendank JFW, Mingram J, Brauer A, Brüchmann C, Kulbe T, Wulf S (2002) Gewinnungstechniken für Binnensee-Sedimente Zweijahresbericht, Bd. 2000/2001. Geoforschungszentrum Potsdam, Potsdam
- Radny D, Leven C, Flachowsky J, Scheytt T, Dietrich P (2012) Einsatz von Direct Push im Rahmen von Sanierungsuntersuchungen – Fallbeispiel Elsterwerda, Brandenburg. Grundwasser 17:7–17
- WRRL (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 – Wasserrahmenrichtlinie. Europäische Union, Brüssel
- Umweltbundesamt (2001) Sanierter Altlast S8 Esse Mitterberghütten. <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/altlasten/verzeichnisse/sanaltlasten/salzburg/s8/>. Zugegriffen: 30.08.2014

Literatur

- BBodSchG (1998). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderung und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz). Bundesrepublik Deutschland
- Birke M, Nitsche C, Voigt H-J (2007) Sampling and Analysis of Soil, Rock, Stream and Lacustrine Sediments. In: Knödel K, Lang G, Voigt H-J (Hrsg) Environmental Geology – Hand-

Abfallmanagement und Altlastenpraxis

Sylke Hilberg

- 8.1 Der Abfallbegriff – 122
- 8.2 Verwerten, behandeln oder doch deponieren? – 122
- 8.3 Schadstoffpotenzial von Abfällen – 123
- 8.4 Deponierung von Abfällen – 124
- 8.5 Erkennen und Bewerten von Altlasten – 127
- 8.6 Sanierung von Altlasten – 135
- Literatur – 145

Kurzfassung

In Deutschland und Österreich werden pro Jahr insgesamt mehr als 500 Millionen Tonnen Abfall produziert. Gute 10% davon stammen aus privaten Haushalten bzw. sind als Siedlungsabfall im weiteren Sinne zu bezeichnen. Der Rest wird von der Industrie, der Bauwirtschaft und weiteren Wirtschaftszweigen produziert.

Nach einer Definition des Abfallbegriffes sowie einer überblicksmäßigen Beschreibung der Abfallarten nach geltendem europäischem Recht werden die Grundsätze der modernen Abfall-, oder heute besser „Kreislaufwirtschaft“ gesagt, erläutert. Es wird gezeigt, wie sich das Ausbringen von Abfällen auf die (geologische) Umwelt auswirken kann und welche Maßnahmen im modernen Abfallmanagement angewendet werden, um derartige Auswirkungen in Zukunft zu vermeiden. Wir widmen uns hier auch einem bis dato nicht endgültig gelösten Abfallproblem: dem von Endlagern für gefährliche Abfälle. Das Kapitel beleuchtet die aktuellen Anstrengungen auf diesem Gebiet und diskutiert, ob ein für Hunderttausende von Jahren sicherer Lagerplatz aus geologischer Sicht denkbar ist.

Eine wichtige Aufgabe der Umweltgeologie in der Praxis ist die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Kontaminationen, die sich aus der Abfallentsorgung früherer Zeiten, aber auch aus anderen anthropogenen Aktivitäten ergeben haben. Altablagerungen werden dementsprechend von Altstandorten unterschieden.

Es wird ein Einblick in die systematische Arbeitsweise bei der Erkundung und Bewertung von Altlastenverdachtsflächen gegeben. Dazu wird das E-T-I-Konzept vorgestellt, nachdem sich sowohl die Gefährdungsabschätzung, als auch die spätere Sanierungsplanung auf die Schadstoffquelle (E – Emission), den Transportweg (T – Transmission) sowie auf die potenziell beeinflusste Umwelt (I – Immission) beziehen. Der Ablauf von Erkundung und Sanierung wird schematisch und anhand eines Fallbeispiels erläutert.

Als potenziell gefährlich eingestufte Verdachtsflächen müssen saniert werden. Dazu gibt es die beiden grundsätzlichen Ansätze der Dekontamination und der Sicherung. Während die Dekontamination den Abbau der Schadstoffquelle zum Ziel hat, zielt die Sicherung vor allem darauf, Emissionswege zu unterbrechen und damit die Freisetzung der Schadstoffe zu verhindern. Verschiedene aktuelle Verfahren zur Sanierung oder Sicherung von Altlasten werden vorgestellt. Anhand

einer beispielhaften Altlast wird die Entscheidungsfindung zur Wahl der ökologisch und ökonomisch besten Sanierungsvariante hergeleitet.

8.1 Der Abfallbegriff

Unter dem Begriff „Abfall“ werden Stoffe oder Gegenstände zusammengefasst, deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat bzw. deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen nicht zu beeinträchtigen. Dieser Passus aus dem deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2012) oder auch dem Österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002) beschreibt einen wesentlichen Aspekt, nämlich die Entledigungsabsicht. Der Besitzer kann den Gegenstand nicht mehr brauchen und möchte (subjektiver Abfallbegriff) oder muss (objektiver Abfallbegriff) ihn loswerden.

Aus dieser Definition ergibt sich noch keinerlei Wertung hinsichtlich einer möglichen Umweltgefährdung, die mit dem Abfall einhergeht. Dennoch sind die Beschaffenheit des Abfalls und die Art und Weise, in der die Entledigung erfolgt, von großer Bedeutung für die Umweltfolgen, die sich aus dem Abfallaufkommen ergeben können.

Eine Klassifizierung von Abfällen erfolgt in Deutschland wie auch in Österreich durch die Abfallverzeichnisverordnung (AVV 2001 bzw. AVV 2008). Die Zuordnung richtet sich sowohl nach der Entstehung des Abfalls als auch nach den Inhaltsstoffen und ermöglicht anhand der Klassifizierung bereits eine erste Bewertung von Gefährdungspotenzialen. Die Codierung des Abfalls entsprechend der AVV bildet letztlich die Grundlage für Vorschriften zu Transport, Wiederverwendung, Verwertung bzw. Beseitigung des Abfalls.

Vertiefende Informationen zum Abfallrecht finden sich z. B. bei Kluth und Smeddinck (2013) und Schwartmann (2006).

8.2 Verwerten, behandeln oder doch deponieren?

Der Umgang mit Abfällen beruht innerhalb von Europa auf der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie

(AbfRRL 2008). Sie bildet die Basis für nationale Gesetzgebungen zum Umgang und zur Klassifizierung von Abfällen. Ein wesentlicher Aspekt ist die Prioritätenfolge für die nationalen Maßnahmen im Umgang mit dem Abfallaufkommen. In der Abfallwirtschaft ist nach folgender Reihung vorzugehen:

1. Abfallvermeidung
2. Für dennoch anfallende Abfälle: Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. bzw. Einspeisung in einen Recycling-Kreislauf
4. Sind diese Maßnahmen nicht umsetzbar, so ist die stoffliche Verwertung des Abfallmaterials oder die thermische Behandlung unter energetischer Verwertung umzusetzen.

Eine direkte Folge dieser Maßnahmenreihung ist das inzwischen in nationales Recht umgesetzte Deponierungsverbot für nicht vorbehandelte Siedlungsabfälle. Wurden diese in Deutschland und Österreich bis längstens zum Jahr 2005 auf Hausmülldeponien abgelagert, ist dies europaweit heute nicht mehr zulässig. Hausmüll wie Altpapier, Altglas, Verpackungen und Bioabfall werden stattdessen für eine Wiederverwendung vorbereitet, recycelt, stofflich verwertet oder in thermischen Behandlungsanlagen (Müllverbrennungsanlagen) zur Energiegewinnung genutzt. Nur solche Abfälle, die nicht durch eine dieser Maßnahmen behandelt werden können, werden auf einer dafür geeigneten Deponie abgelagert. Die an eine „geordnete Deponie“ gestellten Anforderungen werden in ► [Abschn. 8.4](#) beschrieben.

Thermische Behandlungsanlagen erfüllen den Zweck der energetischen Verwertung von Abfällen. Sie nutzen die Eigenschaft von Abfällen, im Zuge ihrer Verbrennung Energie freizusetzen. Gleichzeitig erfolgt durch den Verbrennungsvorgang eine drastische Volumenreduzierung der Abfälle (Scholz et al. 2001).

Beim Verbrennungsvorgang bleiben Schlacken sowie Filterrückstände des Rauchgases zurück. Während die meist reaktionsneutralen Schlacken beispielsweise in der Bauwirtschaft verwendet werden können, handelt es sich bei den Filterrückständen der Rauchgasreinigung um mit Schadstoffen hoch angereicherte und daher nicht zu einer Wiederverwendung geeignete Stoffe. Für diese bleibt ausschließlich die Ablagerung auf einer dafür ge-

eigneten Deponie mit den Eigenschaften eines Endlagers (siehe ► [Abschn. 8.4.2](#)).

8.3 Schadstoffpotenzial von Abfällen

Hinter den umfangreichen Rechtsvorschriften auf europäischer Ebene zum Umgang mit Abfällen steht natürlich die Tatsache, dass von Abfällen eine Gefahr für die Umwelt ausgehen kann. In Bezug auf geologische Fragen betrifft das die Medien Boden, Grundwasser und Bodenluft, die in diesem Zusammenhang auch als Wirkungspfade bezeichnet werden. Über diese Medien können Abfälle zur Freisetzung und andernorts Anreicherung von Stoffen führen, wo sie zu Schadstoffen werden und ein Gefährdungspotenzial für die Biosphäre und letztendlich den Menschen entwickeln. Zur Bewertung des Gefährdungspotenzials von Schadstoffen werden deren Mobilität, chemische Reaktivität, Toxizität, Bioverfügbarkeit und Persistenz herangezogen.

In der Altlastenpraxis wird vor allem die Frage der Mobilität von Schadstoffen behandelt, denn sobald die im Abfall auftretenden Schadstoffe mobilisiert und an die Umwelt abgegeben werden, droht die Gefahr der Kontamination. Eine wesentliche Größe zur Beurteilung der Mobilisierbarkeit bildet das Auslaugverhalten eines Abfalls. Es ist also die Frage zu klären, ob und unter welchen Bedingungen Schadstoffe im fließenden Grundwasser abtransportiert und damit mobilisiert werden können.

Ob und in welchem Ausmaß Schadstoffe aus einem Abfall gelöst werden können, hängt von den physikalischen und chemischen Rahmenbedingungen ab. Dazu zählen z. B. Lagerungsdichte, hydraulische Durchlässigkeit, Fließgeschwindigkeit von Sicker- und Grundwasser, außerdem pH-Wert, Temperatur und Sauerstoffgehalt. Überdies sind Menge, Löslichkeit und die adsorptiven Eigenschaften des Schadstoffes relevant. Biologische Parameter spielen vor allem bei Abfällen mit hohem organischem Anteil eine wichtige Rolle bei der Beurteilung des Schadstoffpotenzials.

Die chemischen Hintergründe des Stofftransports durch Lösungs- und Fällungsprozesse oder Adsorptionsprozesse innerhalb von wasserdurchflössenen Abfällen werden vertiefend z. B. in Koß

(1997) oder Schwedt (1996) dargestellt. Einen Überblick über das Schadstoffpotenzial und die typischen Schadstoffparameter, mit denen bei den verschiedensten Abfallarten zu rechnen ist, ist dem Grundlagenkapitel 2 zu entnehmen. Vertiefende Informationen hierzu geben auch Bilitewski und Härdtle (2013).

Um die Mobilisierung von Schadstoffen, also den Austrag über die Wirkungspfade Wasser (Grund-, Sicker-, Oberflächenwasser) oder Bodenluft zu verhindern, werden an die moderne Deponietechnik hohe Anforderungen gestellt, die im folgenden Abschnitt näher betrachtet werden sollen.

8.4 Deponierung von Abfällen

Eine Deponierung von Abfällen ist nur unter Einhaltung von Schutzmaßnahmen gegen die Freisetzung von Schadstoffen gestattet. Je nach Gefährdungspotenzial der abzulagernden Abfälle sind diese Maßnahmen unterschiedlich aufwändig und damit kostenintensiv. Die Zuordnung der Abfälle zu Deponien, die den jeweils erforderlichen Sicherheitsstandards entsprechen, erfolgt über Deponieklassen, die über Grenzwerte für bestimmte Schadstoffkonzentrationen definiert werden. Bestimmte Stoffe, wie z. B. Abfälle mit hohem organischen Anteil, dürfen nicht deponiert, sondern müssen vor der Deponierung einer Behandlung unterzogen werden.

Welche Abfälle welcher Deponiekategorie zuzuordnen sind, regeln jeweils nationale Gesetze, wie die Deponieverordnung (DepV 2009) in Deutschland oder die Verordnung über Deponien (DVO 2008) in Österreich. Neben den Grenzwerten für Schadstoffkonzentrationen der Abfälle sind hier auch die Mindestanforderungen an die jeweilige Deponietechnik festgelegt. So werden z. B. an eine Bodenaushubdeponie geringere Anforderungen gestellt als an eine Deponie, auf der Bau- und Abbruchabfälle abgelagert werden dürfen. Das Verbot der Ablagerung organischer Abfälle rührt u. a. daher, dass organische Materialien intensive chemische und biochemische Umsetzungsprozesse durchlaufen. Damit steigt die Gefahr einer unkontrollierten Freisetzung von Schadstoffen an

die Umwelt. Eine Deponie, in der Reaktionen und Stofftransport stattfinden können, wird auch als Reaktordeponie bezeichnet.

Besondere Vorschriften an die Deponietechnik bzw. die Sicherheit gegen Schadstoffaustrag gelten für Deponien, auf denen als gefährlich eingestufte Abfälle abgelagert werden dürfen. Dazu gehören z. B. die Rückstände aus der thermischen Behandlung, d. h. der sogenannte Filterkuchen aus der Rauchgasableitung, der Schadstoffe in hoher Konzentration enthält. Derartige Abfälle können nur in einem Lager für gefährliche Abfälle, etwa einer Untertagedeponie, abgelagert werden. Diese Deponien sollen im Gegensatz zur Reaktordeponie Eigenschaften eines Endlagers (siehe ► Abschn. 8.4.2) aufweisen, in dem auch über lange Zeiträume keinerlei Stofftransport und kein Austausch mit der Umgebung stattfinden können.

8.4.1 Die geordnete Deponie

In der Deponietechnik wird heute generell nach dem Multibarrierenkonzept gearbeitet. Das Prinzip beinhaltet mehrere voneinander unabhängige Sicherheitskonzepte, die die Umweltverträglichkeit auch bei Versagen einer einzelnen Barriere noch immer gewährleisten.

Erster wichtiger Teil des Konzepts ist die Abfallvorbehandlung, die gewährleisten soll, dass die abgelagerten Materialien, soweit möglich, von Umweltschadstoffen befreit sind bzw. nicht durch spätere Reaktionsprozesse in der Deponie neuerlich Schadstoffe entstehen können. Die Deponieingangskontrolle, die über das Begleitscheinwesen dokumentiert wird, garantiert die stoffliche Eignung des Abfalls für die jeweilige Deponie. Sie ermöglicht es auch, nachträglich zu jeder Zeit nachzuvollziehen, welche Stoffe auf der Deponie abgelagert wurden.

Einen wichtigen Teil des Multibarrierenkonzepts bildet die Wahl des Deponiestandorts unter Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Situation. Das Vorhandensein einer natürlichen geologischen Barriere ist daher als Voraussetzung für die Bewilligung eines Deponiestandortes in der Deponieverordnung festgelegt. Eine Barriere darf, je nach Mächtigkeit der Barriere, Wasserdurchlässigkeiten von $k_f \leq 5 \cdot 10^{-10}$

bis $k_f \leq 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ nicht überschreiten. Neben der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit der geologischen Barriere werden hier auch die speziellen Eigenschaften der Tonminerale, wie Plastizität und Quellfähigkeit (siehe auch ► [Exkurs 5.2](#)) genutzt, um eine Schadstoffbindung im Deponiebereich zu gewährleisten (Hiltmann und Stribrny 1998). Die Eignung quartärer Sedimente als geologische Barriere wird von Hammer (1998) ausführlich behandelt.

Zusätzlich zur natürlichen geologischen Barriere sind technische Maßnahmen erforderlich, die ein Austreten von Schadstoffen aus einer Reaktordeponie verhindern sollen. Dazu gehören z. B. die Deponiebasisabdichtung sowie die Oberflächenversiegelung. Der Aufbau einer geordneten Deponie besteht aus der in der Auflistung dargestellten Abfolge übereinander lagernder Schichten, wobei nicht in jedem Fall alle Schichten vorkommen müssen.

■ **Folgende Bestandteile können zu einer geordneten Deponie gehören.**

Je nach Deponieklasse können einzelne der angegebenen Schichten fehlen.

- Rekultivierungsschicht mit Bewuchs
- Entwässerungsschicht zur Ableitung der Niederschlagswässer
- Schutzschicht
- Kunststoffdichtung
- mineralische Dichtung
- Ausgleichs- bzw. Gasdrainageschicht
- **Abfall**
- Entwässerungsschicht (k_f -Wert $\leq 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$) mit Sickerwasserableitung
- Schutzschicht (zum Schutz der Kunststoffdichtung vor mechanischer Beschädigung)
- Kunststoffdichtung
- mineralische Dichtung (Tongemisch, quellfähig, adsorptiv, k_f -Wert $\leq 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$, mind. 0,5 m mächtig)

Der dargestellte Schichtaufbau soll durch ein System teilweise redundanter Schutzmaßnahmen verhindern, dass Schadstoffe unkontrolliert austreten. Dabei wird berücksichtigt, dass auch in einer nach geltenden Vorschriften geführten Deponie noch immer bis zu 5 % organische Abfälle abgelagert

werden dürfen und damit Stoffumwandlungsprozesse stattfinden, die mit Phasenübergängen (festflüssig, flüssig-gasförmig) und Änderungen der Umgebungsbedingungen (Temperatur und Druck) einhergehen (siehe dazu ► [Exkurs 8.1](#)). Ein kontrollierter Umgang mit den Reaktionsprodukten ist daher von großer Bedeutung.

Eine Entwässerungsschicht unter dem Abfallkörper sowie eine Gasdrainage oberhalb des Abfallbereichs dienen dazu, die anfallenden Deponiesickerwässer und Deponiegase zu sammeln und vor einer Ableitung in die Umwelt einer entsprechenden Behandlung zu unterziehen.

Details zur Deponietechnik unter geologisch-geotechnischen Aspekten werden ausführlich z. B. von Dachroth (2012) und Bilitewski und Härdtle (2013) beschrieben.

Zu allen geschilderten geologisch-hydrogeologischen und technischen Maßnahmen zum Schutz vor Schadstofffreisetzungen kann auch die vorgeschriebene Nachsorge betrachtet werden. Dazu gehören Funktionsnachweise der oben beschriebenen Barrieren durch regelmäßige Kontrolle sowie etwaige Nutzungseinschränkungen im Bereich des Deponiekörpers als weitere Barriere. Mit der Problematik der Stilllegung und Nachsorge für Deponien beschäftigt sich vertiefend Kranert (2014).

8.4.2 Endlager für gefährliche Abfälle

Abfälle, die Schadstoffe in besonders hohen Konzentrationen aufweisen und keiner weiteren Behandlung mehr unterzogen werden können, müssen so abgelagert werden, dass sie für lange Zeiträume immobilisiert und den Stoffkreisläufen entzogen werden. Zu derartigen gefährlichen Abfällen zählen z. B. die hochkonzentrierten Filterrückstände aus Müllverbrennungsanlagen, medizinische Abfallprodukte oder auch radioaktive Abfälle.

Die Ablagerung derartiger Stoffe in obertägigen Deponien setzt ein hohes Maß an Sicherheitsvorkehrungen entsprechend dem geschilderten Multi-barrierenkonzept voraus. Nachdem die abgelagerten gefährlichen Abfälle für sehr lange Zeiträume immobilisiert werden sollen, müssen alle Barrieren

mindestens genauso lang wirksam sein. Vor allem hinsichtlich der Nachsorge, die für Jahrhunderte, wenn nicht Jahrtausende erforderlich sein würde, erscheint die Umsetzbarkeit dieser Voraussetzungen fraglich. Während die Deponierung gefährlicher Abfälle obertägig zumindest als Zwischenlager nach der deutschen Deponieverordnung möglich ist, ist sie nach österreichischer Gesetzgebung generell verboten.

Bisherige Ansätze zur Schaffung von Endlagern konzentrieren sich auf künstlich geschaffene Hohlräume in gering bis nicht wasserdurchlässigen Festgesteinen und in Tiefen von mindestens mehreren hundert Metern (Untertagedeponien, UTD). Grundgedanke hierbei ist es, die Stoffe in Lithosphärenbereiche zu bringen, die nicht an den kurzfristigen Stoffkreisläufen (► Kap. 2) teilnehmen und sie damit dauerhaft der Biosphäre zu entziehen. Dabei sollen die speziellen Eigenschaften bestimmter Lithologien, wie deren geringe Kluft- und Matrixporosität und damit geringe Durchlässigkeit für fluide Phasen genutzt werden. Auch hohe Plastizität und die damit verbundene Eigenschaft, künstlich geschaffene Hohlräume selbständig wieder zu verschließen, wird als Vorteil in Bezug auf die Eignung einer geologischen Formation als Endlager gesehen. In Kombination mit einer mächtigen Überlagerung, d. h. großen Ablagerungstiefen, sollen diese Eigenschaften bestmögliche Bedingungen zur sicheren Lagerung gefährlicher Abfälle liefern. Auch der Planung, Errichtung und dem Betrieb von Untertagedeponien muss ein Multibarrierenkonzept zugrunde liegen.

In Deutschland werden aufgelassene Salzbergbaue als Endlager in Betracht gezogen und auch bereits in dieser Weise genutzt. So wurde im abgebauten Bereich des Kalibergbaus im hessischen Herfa-Neurode die derzeit größte Sondermülldeponie der Welt installiert. Aufgrund der hohen Plastizität der Zechsteinsalze werden diese Ablagerungen als geeignet angesehen, langfristig Schadstoffe zu fixieren. Es wird davon ausgegangen, dass die mit Sondermüll befüllten Hohlräume sich langsam selbständig verschließen und ein Austausch mit der Oberfläche oder ein Einwirken auf natürliche Stoffkreisläufe für lange Zeiträume ausgeschlossen werden kann. Details zur Sondermülldeponie Herfa-Neurode, sowie weitere in Deutschland be-

triebene UTD werden von Bilitewski und Härdtle (2013) beschrieben.

In der Schweiz setzt man zur endgültigen Ablagerung von Atommüll auf dichte Tonsteinschichten in mehreren hundert Metern Tiefe, die durch die Errichtung von Stollenbauten erschlossen und nach der Befüllung mit Atommüll wieder dicht verschlossen werden sollen. Zur Aufsuchung eines geeigneten Standorts wurde in einem Zusammenschluss des Schweizer Innenministeriums und den Betreibern von Kernkraftwerken die „Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle“ (NAGRA) gegründet.

In Skandinavien werden vor allem tiefe Stollen in mächtigen Granitzügen als potenzielle Endlager für gefährliche Abfälle in Betracht gezogen. Zwei Endlager für radioaktiven Müll sind in Schweden und Finnland derzeit im Bau.

Allen diesen Ansätzen ist gemein, dass sie für überschaubare Zeiträume von maximal einigen tausend Jahren möglicherweise eine Lösung bieten, dass jedoch eine Prognose der globalen Entwicklungen über hunderttausende von Jahren oder sogar Jahrtausenden nicht möglich ist. In derartigen Zeiträumen können Eiszeiten oder tektonische Prozesse, die die Erdoberfläche gestalten können, zu einer völligen Veränderung der geologischen Situation im Bereich eines Endlagers führen. Zudem wird sich die Überlieferung der Standortinformation an nachfolgende Generationen schwierig gestalten. Wenn man bedenkt, dass die heutige Gesellschaft nur bedingt in der Lage ist, Überlieferungen der frühen Menschheitsgeschichte zu entschlüsseln, stellt sich die Frage: Wie sollten nachkommende Generationen in Jahrtausenden verstehen, wo die von den Vorfahren hinterlassenen Gefahren lauern und womit man es hier zu tun bekommt?

Das Ausmaß der Schwierigkeit, die von früheren Generationen verursachten Umweltprobleme zu lösen, lässt sich bei der Betrachtung der Altlastenpraxis im folgenden Abschnitt erahnen. Dabei geht es hier „nur“ um Prozesse, die in den letzten 50 bis 100 Jahren stattgefunden haben und sich im oberflächennahen Bereich abspielen. Sie sind ungleich leichter zu entschlüsseln, als es die Probleme nachfolgender Generationen mit unseren Hinterlassenschaften in geologischen Tiefenlagern wären.

8.5 Erkennen und Bewerten von Altlasten

Unter einer Altlast im Sinne umweltgeologischer Betrachtungen versteht man eine Verunreinigung des Untergrundes aufgrund früherer anthropogener Aktivitäten, von der eine Gefährdung von Schutzgütern ausgeht. Als Schutzgüter, die durch eine Altlast gefährdet sein können, gelten die menschliche Gesundheit, Tiere und deren Lebensräume, Pflanzen, Gewässer, Böden, das Landschaftsbild oder auch Sachgüter, wie z. B. Gebäude.

Nicht zwangsläufig stellt jede Verunreinigung auch eine Gefährdung für Schutzgüter dar und wird damit zur Altlast. Ob eine Gefährdung besteht, hängt von Faktoren ab, die sich entweder auf die Schadstoffquelle (Emission), auf den Transportweg (Transmission) oder das betroffenen Schutzgut (Immission) beziehen können. Diese, auch als E-T-I-Konzept bezeichnete Betrachtung berücksichtigt sowohl bei der Gefährdungsabschätzung als auch bei der anschließenden Sanierungsplanung (siehe ► [Abschn. 8.6](#)) folgende Aspekte:

- Emission – Schadstoffquelle
 - Schadstoffspektrum: Art, Konzentration und räumliche Verteilung der Stoffe, Reaktivität, Toxizität, Persistenz
 - Ausbreitungsverhalten der Schadstoffe: chemisch-physikalische Eigenschaften wie Aggregatzustand, Wasserlöslichkeit, Dampfdruck, Adsorptionsverhalten, Viskosität
 - Zustandsform: fest, flüssig, in Wasser gelöst, suspendiert oder emulgiert, gasförmig
- Transmission – Ausbreitungswege
 - Transportmedium und Wirkungspfad: Art des Transportmediums, direkter Stoffaustausch durch Kontakt zwischen Schutzgut und Boden, indirekter Stoffaustausch durch den Verzehr von Pflanzen oder Wasser oder durch die Atmung
 - Transportbarrieren: Rückhaltevermögen des Untergrundes durch gering durchlässige Schichten bzw. bevorzugte Transportwege entlang gut durchlässiger Schichten
- Immission – betroffene Schutzgüter
 - Nutzung der betroffenen Fläche

- Nutzung der verunreinigten Kompartimente im Umfeld der Fläche
- Betroffene Ökosysteme

Damit eine Verunreinigung als Altlast klassifiziert werden kann, muss nachgewiesen werden, dass von einer Fläche eine Gefährdung für Schutzgüter ausgeht. Es müssen also die oben genannten Faktoren durch Erhebungen und Untersuchungen abgeklärt werden.

Als Ausbreitungsmedium für Schadstoffe im Untergrund kann neben dem Grundwasser auch die Bodenluft in den Porenhohlräumen der ungesättigten Zone fungieren. Der verunreinigte Boden selbst ist in diesem Sinne nicht als Ausbreitungsmedium zu verstehen, da er ja ohne aktiven Eingriff durch den Menschen (oder das Edaphon) nicht bewegt wird. Es können jedoch die im Boden befindlichen Schadstoffe selbst mobil sein, so dass es Sinn macht, unter dem Aspekt der Schadstoffausbreitung auch den Boden zu berücksichtigen.

Die generellen Mechanismen, nach denen Stoffe um Untergrund transportiert werden, werden im ► [Kap. 2](#) beschrieben.

8.5.1 Arten von Altlasten

Je nach den Prozessen, die zur Entstehung einer Altlast geführt haben, unterscheidet man generell zwischen Altablagerung und Altstandort.

Altablagerungen sind stillgelegte Anlagen zur Ablagerung von Abfällen. Dies kann als Muldenschüttung (Verfüllung einer Geländemulde) oder als Haldenschüttung (Auftrag von Abfällen auf die bestehende Geländeoberfläche) erfolgt sein. Die Ablagerung kann dabei geregelt und legal oder auch ungeregelt und illegal erfolgt sein. Nachdem bei der früheren Ablagerung von Abfällen häufig keine Trennung nach Abfallarten vorgenommen wurde, liegt meist ein großes Spektrum an Schadstoffen vor. Ein oft hoher Anteil organischer Abfälle führt zu intensiven Abbaureaktionen innerhalb des Ablagerungskörpers, weshalb mit einer verstärkten Mobilisierung der abgelagerten Schadstoffe zu rechnen ist.

Altstandorte sind Grundstücke stillgelegter Anlagen, in denen mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen worden ist und von denen eine

■ **Tab. 8.1** Generelle Unterschiede zwischen Altstandort und Altablagerung (Auswahl)

	Altablagerung	Altstandort
Untergrundaufbau	Erheblich verändert, inhomogen	Natürliche Schichtung ± homogener Untergrundaufbau
Relevante Schadstoffe	Methan, Kohlendioxid, Metalle, (Erd-) Alkalimetalle, Salze	Abhängig vom Prozess, häufig Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle
Beeinflussung Grundwasser	Erhöhte Gesamtmineralisation, oft >> 500 µS cm ⁻¹	Abhängig vom Schadstoff, in Phase aufschwimmend (Mineralöl-KW), im Wasser gelöst, in Phase an GW-Sohle
Beeinflussung Boden	Adsorption an Kornoberflächen hohe Gesamt- und Eluatgehalte der o. g. Stoffe	Abhängig vom Schadstoff, Adsorption, Kationenaustausch
Beeinflussung Bodenluft	CH ₄ , CO ₂ im Vol.-%-Bereich, erhöhter Druck, erhöhte Temperatur	Abhängig vom Schadstoff (leicht flüchtige Schadstoffe im ppm-Bereich angereichert), keine/geringe Druck- und Temperatureinflüsse
Prozesse	Mikrobiologischer Abbau, Migration (Entgasung, Ausschwemmung)	Migration (Entgasung, Ausschwemmung), mikrobiologischer Abbau

Kontamination des Untergrundes ausgeht. Die Freisetzung von Schadstoffen erfolgte durch unsachgemäßen Umgang oder unsachgemäße Lagerung der umweltgefährdenden Stoffe bzw. ist die Folge von Unfällen oder Beschädigungen an Anlagenteilen. Das Gefährdungspotenzial einer solchen Kontamination kann, in Abhängigkeit vom freigesetzten Schadstoff und seiner Menge, stark variieren.

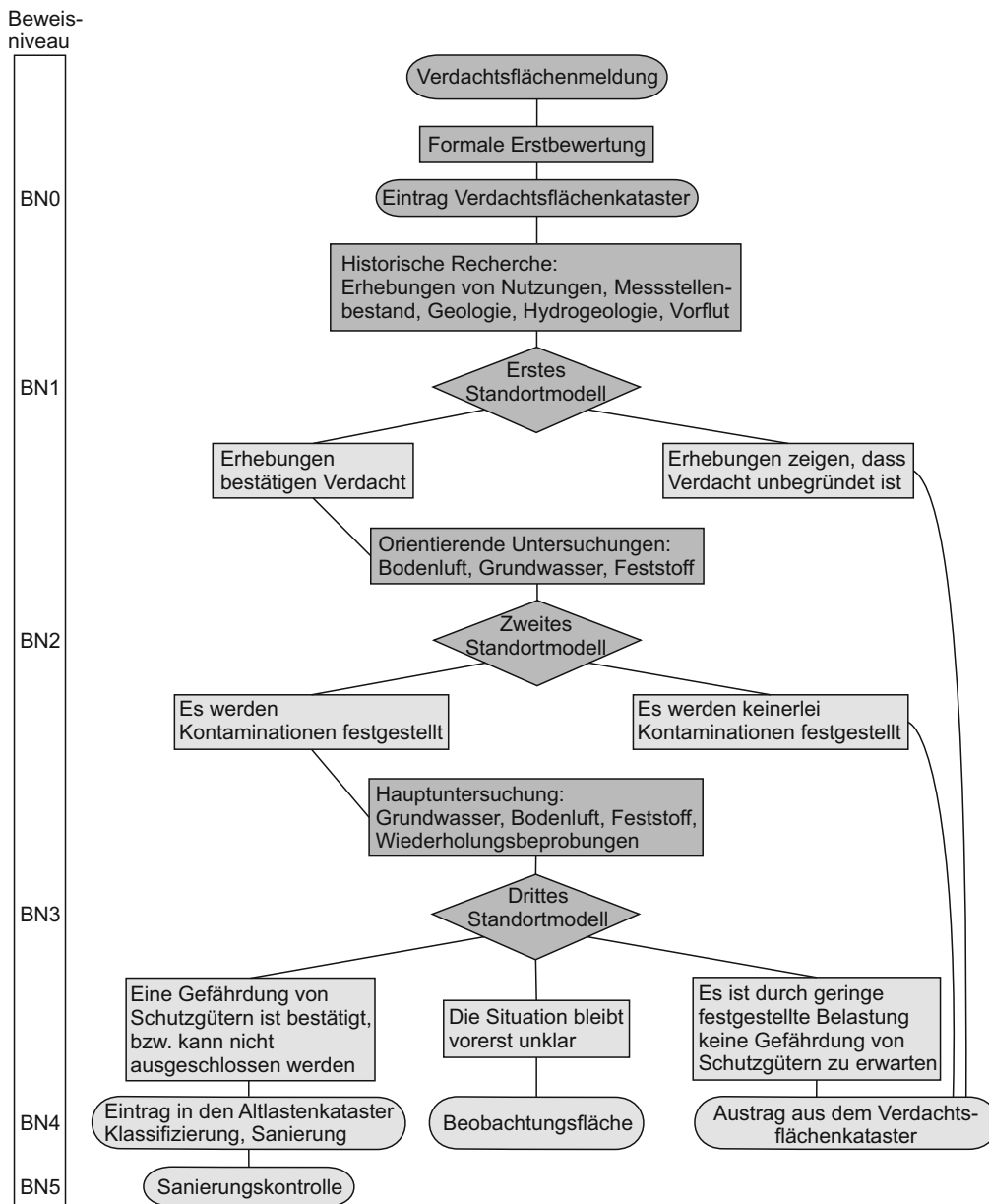
Schadstoffspektren und deren Verteilung auf die Wirkungspfade Grundwasser, Bodenluft und Boden in Altablagerungen und Altstandorten unterscheiden sich meist. ■ **Tab. 8.1** stellt einige der generellen Unterschiede dar.

8.5.2 Von der Verdachtsfläche zur Altlast – Die umweltgeologische Erkundung

Flächen, die aufgrund der früheren Nutzung vermuten lassen, dass von ihnen eine Schadstoffbelastung ausgeht, werden als Altlastenverdachtsflächen bezeichnet. Um vom Verdacht zu gesicherten Aussagen über Emissionspotenzial, Transmissionspotenzial und Immissionssensibilität zu kommen, sind Erhebungen und Untersuchungen erforderlich, die in einem mehrstufigen Verfahren ablaufen.

Zur systematischen Bearbeitung ist es in Deutschland üblich, jede Bearbeitungsstufe durch ein Beweismittel (BN) zu charakterisieren, von dem aus Art und Umfang der weiteren Untersuchungen festgelegt werden. In der österreichischen Altlastenpraxis wird nach jeder Untersuchungsphase eine Bewertung der Sachlage vorgenommen, die sich am besten durch ein Standortmodell auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes darstellen lässt. Das Standortmodell zeigt den aktuellen Wissensstand auf und stellt Informationsdefizite dar. Es bietet die Grundlage für die Planung weiterer Erkundungsschritte. Trotz unterschiedlicher Nomenklatur sind die Vorgehensweise und die resultierenden Entscheidungen beider Systeme vergleichbar. In jeder Phase wird auf Grundlage der Ergebnisse die Entscheidung zur Weiterführung oder der Einstellung der Maßnahmen getroffen. In **Abbildung 8.1** ist der Ablauf einer Verdachtsflächen erkundung schematisch dargestellt. Dabei wird sowohl die deutsche als auch die österreichische Vorgehensweise berücksichtigt.

Nach einer formalen Erstbewertung (BN 0) wird eine gemeldete Verdachtsfläche zunächst in einem Verdachtsflächenkataster registriert (z. B. Umweltbundesamt 2014). In der Folge werden historische Recherchen über die Fläche angestellt sowie Informationen über die möglicherweise betroffene Umwelt erhoben (BN 1 bzw. erstes Standortmodell).



■ **Abb. 8.1** Schematischer Ablauf einer Verdachtsflächenenerkundung mit dem Ziel der Altlastenklassifizierung. In der Abbildung werden sowohl die deutsche Betrachtungsweise nach Beweismiveau als auch die österreichische Vorgangsweise zur Erstellung von Standortmodellen dargestellt. Das Diagramm zeigt gut, dass es keine wesentlichen Unterschiede in der prinzipiellen Vorgangsweise gibt, obwohl die beiden Systeme auf unterschiedlichen Regelwerken beruhen. Dies ist nicht verwunderlich, da die naturwissenschaftlichen Grundlagen ja die gleichen sind.

Auf Grundlage der Ergebnisse wird ein orientierendes Untersuchungsprogramm geplant und ausgeführt, das mit vergleichsweise geringem Aufwand die Basis für eine vertiefende Hauptuntersuchung

und einen ersten Überblick über den Schadensfall liefern soll (BN 2 bzw. zweites Standortmodell). Die Ergebnisse der Hauptuntersuchung dienen dann zur Gefährdungsabschätzung und Klassifizierung der

Fläche als Altlast (BN 3 bzw. drittes Standortmodell).

Liefern die Ergebnisse der Erkundungen auf BN 0 bis 3 keinerlei Hinweise auf eine Gefährdung von Schutzgütern, kann in jeder Stufe der Verdacht verworfen und die Untersuchung eingestellt werden. Die Fläche wird dann ohne weitere Maßnahmen wieder aus dem Verdachtsflächenkataster gestrichen.

Ergebnis der Bewertungen auf BN 3 bzw. Ergebnis des dritten Standortmodells kann es auch sein, dass eine Verdachtsfläche zunächst zur Beobachtungsfläche wird, weil das Gefährdungspotenzial zum Zeitpunkt der Entscheidung weder eindeutig bestätigt noch ausgeschlossen werden kann. Die Fläche wird dann weiter beobachtet, potenziell betroffene Schutzgüter beweisgesichert.

Ergeben die Erkundungen die Notwendigkeit einer Sanierung, werden vertiefende Untersuchungen zur Sanierungsplanung (BN 4) durchgeführt. Nach der Umsetzung der Sanierungsmaßnahme wird deren Erfolg über einen ausreichend langen Zeitraum beobachtet (BN 5). Die Beweisniveaus 4 und 5 betreffen damit die Sanierung und werden im ► **Abschn. 8.6** näher behandelt.

Die grundsätzlich unterschiedlichen Prozesse, die zum Entstehen einer Altablagerung bzw. eines Altstandortes führen, setzen bereits ein differenziertes Vorgehen bei der historischen Recherche voraus. Noch mehr gilt dies für die Erkundungsmaßnahmen.

Altablagerung

Bei der Erkundung von Altablagerungen zielt die historische Recherche auf Fragen nach dem Ablagerungszeitraum, den räumlichen Abgrenzungen sowie den abgelagerten Materialien. Erste Informationen können durch die Befragung von Behörden, Grundstückseigentümern oder Anrainern gewonnen werden. Hat es sich um eine legale, bewilligte Deponierung von Abfällen gehandelt, z. B. für kommunale Abfälle, sollten Aufzeichnungen über den Zeitraum, das Volumen und die Art der Abfälle beim früheren Deponiebetreiber verfügbar sein. Wurde die Ablagerung jedoch ohne offizielle Bewilligung durchgeführt („wilde Deponie“), ist es naturgemäß wesentlich schwieriger, zuverlässige Informationen zu erhalten. Generell kann die Analyse

von Luftbildaufnahmen relevanter Zeiträume helfen, den Ablagerungszeitraum und die Ausdehnung des Deponiebereichs zu bestimmen. Über diese Bilder können z. B. ehemalige Aushubaktivitäten (z. B. Kiesentnahmen) und die nachfolgende Wiederverfüllung terminiert und lateral abgegrenzt werden.

Im Rahmen von Vorerhebungen werden bereits vorhandene Informationen über den geologischen Untergundaufbau, über die hydrogeologische Situation oder auch über bereits bestehende Messstellen (Grundwassermessstellen, Bodenluftsonden) ermittelt. In dieser Phase müssen außerdem Informationen zur Nutzung auf der Fläche und in angrenzenden Gebieten eingeholt werden. Diese Informationen sind wesentlich, um eine potenzielle Gefährdung des Schutzgutes „menschliche Gesundheit“ oder anderer Schutzgüter, also die Immissionssituation, abschätzen zu können. Wichtige zu stellende Fragen sind beispielsweise:

- Ist die Ablagerungsfläche selbst bebaut und gibt es unterirdische Gebäude (Keller, Schächte etc.)? Dies ist vor allem hinsichtlich einer möglichen Bodenluftkontamination relevant.
- Gibt es im Einflussbereich Grundwasserentnahmen (als Nutz- oder Trinkwasser)?
- Wird der Boden im Bereich speziell genutzt, z. B. durch Landwirtschaft, Gärten oder dienen Freiflächen als Naherholungsgebiet oder als Kinderspielplatz?
- Sind weitere Schutzgüter, wie ökologisch hochwertige Landschafts- und Lebensräume, Gewässer etc. im Einflussbereich der Verdachtsfläche potenziell gefährdet?

Im Rahmen erster Geländebegehungen können geologische und hydrogeologische Informationen gesammelt werden. Dabei kann es sich z. B. um die Aufnahme von Straßenaufschlüssen, die Kartierung von Flussterrassen sowie auch die Erhebung der Vorflutsituation handeln. Wichtige Hinweise auf bestehende Schadstoffemissionen können auch Bioindikatoren geben. So sind Stellen, an denen Deponiegas austritt, häufig vegetationsfrei oder es siedeln sich bestimmte Gräser an, die ansonsten für den jeweiligen Standort untypisch sind. Austritte von Deponiesickerwässern können an besonders üppiger Vegetation erkennbar sein, wie sie für sehr nährstoffreiche Böden typisch ist.

Die Ergebnisse der Vorerhebungen dienen dazu, ein erstes Standortmodell eines Gebietes zu entwickeln, in dem alle relevanten und bereits bekannten Informationen abgebildet werden. Auf Basis des ersten Standortmodells werden die noch offenen Fragen definiert und die erforderlichen weiteren Erkundungsschritte festgelegt (BN 1).

Das Erkundungsprogramm wird je nach Datenlage und Fragestellung in mindestens zwei Stufen abgewickelt, der orientierenden Untersuchung, die eine Bewertung auf BN 2 ermöglicht bzw. zum zweiten Standortmodell führt und die Detailuntersuchung, die die abschließende Bewertung des Sanierungserfordernisses zum Ziel hat (BN 3, drittes Standortmodell).

Die orientierende Untersuchung umfasst z. B. Raumluftmessungen in benachbarten unterirdischen Gebäuden oder auch die Erstbeprobung bestehender Grundwasseraufschlüsse und Grundwassernutzungen. Eine rasterförmige Erkundung des Deponiebereichs, z. B. durch Rammkernsondierungen mit kleinem Bohrdurchmesser, kann mit vergleichsweise geringem Aufwand zahlreiche Informationen über die Emissionsquelle selbst liefern:

- Räumliche Abgrenzung des Ablagerungskörpers
- Erster Überblick über das Abfallspektrum, die Abbauprozesse und Abbaustadien
- Qualität der Deponiesickerwässer
- Bodenluftsituation – Potenzial für Deponiegasemissionen

Eine spezielle Methode zur orientierenden Erkundung der räumlichen Verbreitung von Grundwasserkontaminationen ist die sogenannte „direct push-Technologie“ (DPT). Hierbei werden Filterrohre mit geringem Durchmesser (meist 2“) im Rammverfahren niedergebracht und das zufließende Grundwasser während des Bohrfortschritts tiefenorientiert beprobt. Die Analyse der Proben erfolgt direkt im Anschluss an die Probenahme mit mobilen Analysegeräten. Basierend auf den Ergebnissen wird direkt vor Ort die Lage weiterer Messstellen festgelegt. Die Methode hat den Vorteil, dass – anders als beim stationären Messstellennetz – nicht interpoliert werden muss, sondern die Messstellen gezielt anhand der bereits detektierten Schadstoffausbreitung situiert werden können.

Auch flächige und weitgehend eingriffsfreie geophysikalische Untersuchungen können dazu dienen, einen ersten Überblick über Ausdehnung und Inhalte eines Altlastenareals zu erhalten. Es werden vornehmlich magnetische und elektromagnetische Verfahren angewendet (Milsom 1996). Auch seismische Messungen oder Bodenradar kommen zum Einsatz (Knödel et al. 2005).

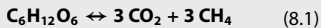
Basierend auf den Ergebnissen der orientierenden Erkundungen erfolgt die Bewertung auf BN 2 bzw. Entwicklung des zweiten Standortmodells sowie die Planung der Detailuntersuchung. In diesem Stadium werden z. B. anhand großvolumiger Aufschlüsse (z. B. Baggerschürfe, Greiferbohrungen) detailliertere Untersuchungen des abgelagerten Materials vorgenommen. Dazu erfolgt einerseits eine Abfallansprache, d. h. eine rein qualitative Beschreibung dessen, was in einzelnen Aufschlüssen angetroffen wurde. Außerdem werden repräsentative Proben des Abfalls entnommen und einer Analyse der Gesamt- und Eluatgehalte an den relevanten Schadstoffen unterzogen.

Ebenfalls aufbauend auf den Ergebnissen einer orientierenden Erkundung werden stationäre Grundwassermessstellen errichtet. Diese dienen dazu, die Entwicklung der Schadstoffbelastung im Umfeld einer Altablagerung sowohl räumlich, als auch, durch mehrfache Beprobungen zu verschiedenen Jahreszeiten und verschiedenen Grundwasserständen, zeitlich zu bewerten. Auch eine kontinuierliche Erfassung bestimmter Parameter durch Datensammler kann in manchen Fällen sinnvoll sein.

Die Bodenluftsituation ist besonders in Altablagerungen mit großem Anteil an organischer Substanz von Relevanz, da sie einen erheblichen Anteil am Gefahrenpotenzial haben kann. Zur Untersuchung der Deponiegasgehalte in Altablagerungen werden daher stationäre Bodenluftmessstellen errichtet. An diesen werden die Gehalte an Methan, Kohlendioxid, Sauerstoff und eventuell weiterer für den Standort relevanter Gase untersucht. Auch Bodenluftuntersuchungen werden über längere Zeiträume und zu verschiedensten Witterungs- und Temperaturbedingungen durchgeführt. Neben Hinweisen zur Gefährdungsabschätzung können Deponiegasuntersuchungen auch Informationen über die im Deponiekörper stattfindenden Prozesse geben. Details dazu sind im ► [Exkurs 8.1](#) dargestellt.

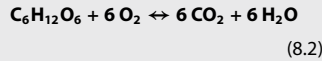
Exkurs 8.1 Deponiegasentwicklung in einer Hausmülldeponie.

Die Entwicklung der Hauptbodenluftkomponenten innerhalb einer Deponie mit hohem organischem Anteil lässt sich, je nach Fortschritt des Abbaus der organischen Substanz, in Phasen unterteilen: Methanphase und Langzeitphase: Methan > 50 Vol.-%, CO₂ bis 45 Vol.-%, kein Sauerstoff vorhanden, Überdruck: Methan und CO₂ können entweichen, Temperaturen bis 50 °C. In der Frühphase nach der Schließung der Deponie findet massiver anaerober Abbau statt. Der Sauerstoff wird rasch zur Gänze verbraucht, die organische Substanz (hier durch Glucose repräsentiert) wird zu CO₂ und CH₄ umgesetzt. Die exotherme Reaktion führt zu massiver Erwärmung des Deponiekörpers.

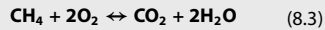


Luft Eindringphase: Methan bis 40 Vol.-%, CO₂ bis 30 Vol.-%, Stickstoff bis 30 Vol.-%, kein Sauerstoff, kein Überdruck, Temperaturen bis 30 °C.

Durch die Volumenverringerung kommt es zu Setzungen, es entstehen Wegsamkeiten, über die Atmosphärenluft eindringen kann, Sauerstoff wird bei aerobem Abbau der organischen Substanz zu CO₂ und Wasser umgesetzt.



Methanoxidaionsphase: Methan < 20 Vol.-%, CO₂ > 20 Vol.-%, wenig Sauerstoff, kein Überdruck, Bodenlufttemperatur entspricht Jahresmittel der Außenluft. Die organische Substanz ist abgebaut, es kommt zur Oxidation von Methan nach ► Gl. 8.3 unter Zunahme der CO₂-Gehalte.



Luftphase: Nach vollständigem aerobem Abbau der organischen Substanz, der Oxidation des Methans und der Durchlüftung

des Deponiekörpers aufgrund von Bodenluftwegsamkeiten stellen sich Bodenluftzusammensetzungen ein, die jenen in einem natürlichen Bodenaufbau entsprechen. Der Zeitrahmen, in dem dieser Prozess stattfindet, ist stark von den Rahmenbedingungen abhängig. Wie viel organisches Material ist vorhanden? Wie dicht ist die Deponie gegen Außenluft abgeschirmt? Welche hydrochemischen Prozesse finden im Deponiekörper statt? Beeinflussen Phasenübergänge (fest-flüssig) die Stabilität des Deponiekörpers? Generell ist von einer Prozessdauer im Bereich von Jahren bis Jahrzehnten auszugehen. Belüftungsmaßnahmen, wie sie im ► Abschn. 8.6 beschrieben werden, zielen darauf ab, den hier geschilderten Abbauprozess zu beschleunigen.

Ziel der mehrphasigen Erkundungskampagne ist es, schlussendlich ein Standortmodell zur Altablagerung vorlegen zu können, das keine Fragen hinsichtlich des Emissionsherdes, der potenziellen Transmission sowie der Immissionssituation, also des gesamten Gefährdungspotenzials, mehr offen lässt und die Grundlage für eine generelle Sanierungsentscheidung bietet. Die Ergebnisse reichen jedoch in ihrer Detailgenauigkeit meist noch nicht aus, um darauf die konkrete Sanierungsplanung aufzubauen. Hierfür sind anschließend weitere Untersuchungen durchzuführen, die im ► Abschn. 8.6 diskutiert werden.

Die Entwicklung des Standortmodells bis zur Sanierungsentscheidung ist beispielhaft im ► Exkurs 8.2 dargestellt.

Altstandort

Bei der Erkundung von Altstandorten liegt der Schwerpunkt der historischen Recherche auf der Rekonstruktion der Produktionsprozesse, die am Standort stattgefunden haben. Dabei werden nicht nur die jüngsten Aktivitäten berücksichtigt. Meist

muss die gesamte Historie des Standortes aufgearbeitet werden. Informationen dazu können z. B. über Grundbuch oder Firmenbuch bezogen werden. Basierend auf den Produktionsprozessen ist ableitbar, in welchen Zeiträumen mit welchen umweltgefährdenden Schadstoffen hier gearbeitet wurde. Zur Abschätzung des Schadstoffspektrums können auch entsprechende Stoffkataloge herangezogen werden, die für verschiedene Industriezweige typische Stoffgruppen angeben.

Das weitere Untersuchungsprogramm ist eng an die Ergebnisse dieser historischen Recherchen angelehnt. Es lässt sich aber im Allgemeinen mit Erkundungsschritten bearbeiten, die mit den oben beschriebenen Maßnahmen zur Erkundung von Altablagerungen vergleichbar sind.

Da in industriell genutzten Gebieten häufig von verschiedenen Produktionsbetrieben ähnliche Stoffe verwendet werden, tritt im Zusammenhang mit Kontaminationen aus Altstandorten oft die Frage nach dem Verursacher eines Schadens auf. Auch zeitlich nacheinander folgende Produktionsprozesse mit ähnlichen Gefahrenstoffen können

Exkurs 8.2 Beispiel für die Erkundung einer Altablagerung.

Das folgende Beispiel beschreibt eine Altlastenverdachtsflächen-Erkundung in Österreich. Es wird hier, wie es im realen Fall erfolgt ist, mit Standortmodellen gearbeitet. Auf eine Übertragung auf Beweinsniveau wird zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Anhand von **Abb. 8.1** ist diese jedoch leicht nachvollziehbar.

Im Zeitraum 1959 bis 1977 wurde eine Kiesgrube am Ufer eines großen Vorfluters mit den kommunalen Abfällen einer mittelgroßen Stadt (ca. 100.000 Einwohner) verfüllt. Auf einer Fläche von ca. 140.000 m² wurden unsortierte Abfälle abgelagert. Die Deponie wurde ohne Basisabdichtung, Sickerwasserfassung oder Anlagen zur Deponiegaserfassung betrieben und nach der Verfüllung im Jahr 1977 mit Humus abgedeckt und begrünt. Aufgrund der Kenntnisse der lokalen geologischen Situation ist bekannt, dass unter der damals abgebauten fluvialen Kieschicht eine mächtige Schluff- bis Tonschicht lagert, die die Sohle des obersten Grundwasserstockwerks bildet. Der Grundwasserkörper im Deponiebereich entwässert in den nahegelegenen Vorfluter. Der Flurabstand ergibt sich aus der Lage des Flusswasserspiegels und beträgt ca. 4 m. Die Altablagerung ist unbaut und wird an einer Seite vom Fluss, an drei Seiten von Wohnbebauung und Kleingartenanlagen begrenzt. Es sind im Anstrom und im Abstrom der Fläche einige wenige Nutzwasserbrunnen bekannt.

Die Erhebungen lassen vermuten, dass eine Gefährdung des Schutzgutes „menschliche Gesundheit“ durch Grundwasser- und Bodenluftkontamination in Kombination mit der nahen Wohnbebauung und Gartennutzung gegeben ist. Außerdem ist eine Beeinträchtigung des Oberflächenengewässers möglich. Basierend auf den Erkenntnissen des ersten Standortmodells (**Abb. 8.2a**) und den festgestellten potenziellen Gefahren werden die

orientierenden Untersuchungen geplant. Diese beinhalten die Messung der Grundwasseroberfläche an vorhandenen Grundwasseraufschlüssen, um die Fließrichtung und damit An- und Abstrom in Bezug zum Deponiekörper zu bestimmen. Zusätzlich erfolgen eine erste Beprobung der bestehenden Nutzwasserbrunnen, Raumluftmessungen in den Kellerräumen der Gebäude sowie die Erkundung des Deponiekörpers (räumliche Abgrenzung und Inhalt) mit rasterförmig über das Gelände verteilten Rammkernbohrungen. Neben einer ersten Feststoffbeurteilung dienen die Rammkernbohrungen als temporäre Deponiegasmessstellen.

Der Vergleich der Grundwasserzusammensetzung im Anstrom und Abstrom der Altablagerung zeigt eine deutliche Beeinträchtigung der Grundwasserqualität. Die Rammkernbohrungen führen zu einer lateralen Abgrenzung des Deponiekörpers, können jedoch aufgrund von Bohrhindernissen nicht überall bis zur Deponiesohle abgeteuft werden. In den Bohrkernen werden neben einem hohen Anteil an bereits stark zersetzter organischer Substanz auch Metalle, Glas, Bauschuttbestandteile, Textilien und Kunststoffe gefunden. Die Frage nach der Mächtigkeit der Müllschüttung muss noch offen bleiben. Raumluftmessungen haben keine Hinweise auf eine Migration von Deponiegasen in Kellerräume ergeben, allerdings zeigen die orientierenden Deponiegasmessungen Methangehalte von über 50 Vol.-% und CO₂-Gehalte von 40 Vol.-% im zentralen Bereich des Deponiekörpers.

Nachdem nun im zweiten Standortmodell (**Abb. 8.2b**) die Grundwasserfließrichtung grob bekannt ist, erfolgt die Errichtung von stationären Grundwassermessstellen im An- und Abstrom sowie seitlich des Deponiebereichs. In den Bereichen mit der höchsten Deponiegasbelastung und in den

Randbereichen werden stationäre Bodenluftmessstellen errichtet. Zur Erkundung der abgelagerten Abfälle und der Tiefenlage der Deponiesohle werden Greiferbohrungen durchgeführt. Diese ermöglichen großvolumige Aufschlüsse bis in Tiefen von mehreren Zehnermetern. An den stationären Grundwasser- und Deponiegasmessstellen und im abstromig verlaufenden Vorfluter werden im Verlauf eines Jahres vier Probenahmen durchgeführt und die Entwicklung beurteilt.

Mit der Erstellung des dritten Standortmodells (**Abb. 8.2c**) bleiben keine wesentlichen Fragen zur Gefährdungsabschätzung mehr offen. Die Deponie liegt mit einer maximalen Mächtigkeit von 10 m deutlich im Grundwasser und erreicht in weiten Bereichen den unterlagernden Stauhorizont – sie erstreckt sich über die gesamte Aquifermächtigkeit. Da der Deponiekörper wesentlich geringere Durchlässigkeiten aufweist als der Aquifer, kommt es zu einer Umströmung der Deponie. Grundwässer, die die Ablagerung jedoch in den Randbereichen durchströmen, sind in ihrer Qualität deutlich von den Abfällen beeinträchtigt. Es werden bei jedem Beprobungsdurchgang erhöhte Mineralisierungen (elektrische Leitfähigkeit > 1000 µS cm⁻¹) und hohe Arsen- und Nickelgehalte sowie erhöhte Grundwassertemperaturen von 15 bis 18 °C festgestellt. Die Nähe zum Vorfluter führt dazu, dass die kontaminierten Wässer rasch abgeführt und stark verdünnt werden. Im Oberflächengewässer ist keine qualitative Beeinträchtigung nachweisbar.

Die Deponiegaszusammensetzung zeigt, dass sich die Ablagerung in der Langzeitphase befindet, also hohe Methan- und CO₂-Gehalte mit Überdruck und hohen Temperaturen einhergehen. Obwohl in den benachbarten Gebäuden keine Deponiegase gemessen wurden, stellt dieser Umstand eine potenzielle Gefahr für die Anrainer dar.

Exkurs 8.2 (Fortsetzung) Beispiel für die Erkundung einer Altablagerung.

Mit Hilfe der Greiferbohrungen wurden neben den bereits dokumentierten typischen Hausmüllkomponenten auch Chemikalienbehälter, Ölfässer und Autobatterien gefunden. Diese Inhaltstoffe stellen ein besonderes Gefahrenpotenzial dar, sobald ein Austrag der Schadstoffe über den Grundwasserpfad möglich wird.

Zusammenfassende Bewertung von orientierender Erkundung und Detailuntersuchungen bis zum dritten Standortmodell:

Deponiegas: Obwohl derzeit keine akute Gefährdung von Personen durch Deponiegase vorliegt, kann diese jederzeit auftreten, da in der Deponie aktuell Methan produziert wird und Überdruck herrscht. Eine Migration der Gase ist wahrscheinlich.

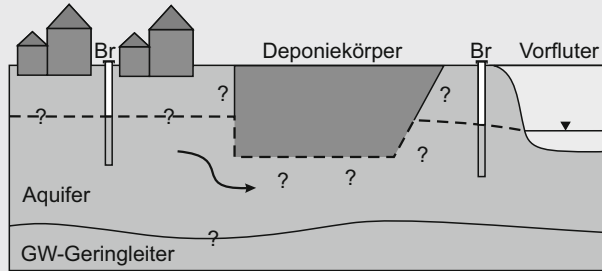
Grundwasser: Aufgrund der dichten Lagerung des Mülls findet eine Durchströmung nur in geringem Ausmaß statt. Auch Sickerwässer treten nur untergeordnet auf.

Dennoch deutet die Wasserqualität an den Grundwassermessstellen im direkten Abstrom auf einen deutlichen Deponieeinfluss hin. Aufgrund der Nähe zum Vorfluter wirkt sich die Grundwasserkontamination nur kleinräumig aus. Allerdings ist mindestens ein Nutzwasserbrunnen betroffen.

Die Feststoffuntersuchung gibt Hinweise auf gefährliche Abfälle in einzelnen Bereichen der Altablagerung. Die Schadstoffe sind derzeit nicht mobil, könnten aber bei einer Änderung der Situation, z. B. Verbesserung der Wasserwegsamkeit durch Setzungen nach weiterem Abbau der organischen Substanz, mobilisiert werden.

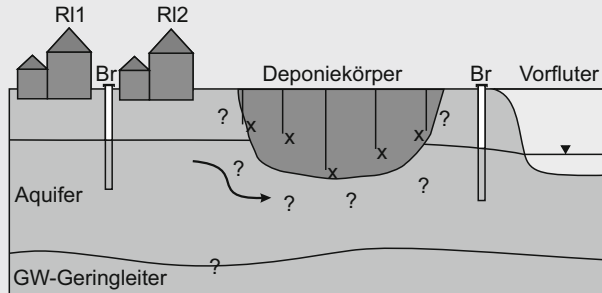
Zusammenfassend birgt die Altablagerung ein erhebliches Gefahrenpotenzial für die Schutzgüter menschliche Gesundheit und Grundwasser und wurde dementsprechend zur Altlast erklärt.

Erstes Standortmodell



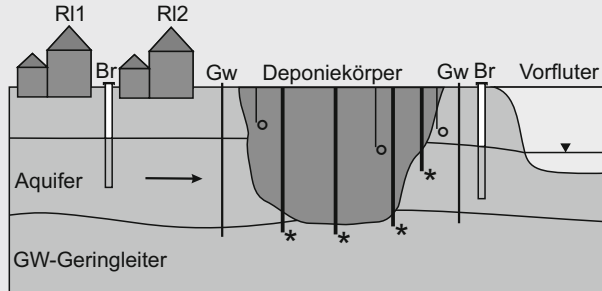
a Nutzwasserbrunnen Br

Zweites Standortmodell



b Nutzwasserbrunnen Br, Raumluftmessstelle RI Rammkernbohrungen x

Drittes Standortmodell



c Nutzwasserbrunnen Br, Raumluftmessstelle RI, Greiferbohrungen *, Bodenluftmessstelle o, Grundwassermessstelle Gw

■ **Abb. 8.2** Entwicklung des Standortmodells auf Basis des jeweiligen Kenntnisstandes während der Verdachtsflächen erkundung

zu Kontaminationen führen, die mehreren potenziellen Verursachern zugeordnet werden könnten. Vor allem, wenn es sich um Kontaminationen mit Kohlenwasserstoffen handelt, werden immer öfter auch Isotopenmethoden herangezogen, um den Schadstoffherd eindeutig identifizieren zu können. Die Methoden nutzen die unterschiedlichen Isotopensignaturen der zu verschiedenen Zeiten bzw. für verschiedene Produktionsprozesse verwendeten Stoffe.

Sowohl bei der Erkundung von Altablagerungen als auch von Altstandorten ist, neben der qualitativen Beurteilung des Schadensfalles, möglichst auch die Quantifizierung in Form einer Wasser- und Stoffbilanz erforderlich – eine wichtige Grundlage für die folgende Sanierungsplanung. Aufgrund der Erkenntnisse zur Hydrogeologie am Standort (Durchlässigkeit des Aquifers, Grundwassergefälle und Fließgeschwindigkeit etc.) in Kombination mit der Erfassung von Schadstoffkonzentrationen, können Aussagen über die Menge an Schadstoffen sowie Prognosen über die weitere zeitliche und räumliche Entwicklung der Kontamination erstellt werden. Je engermaschiger das Beobachtungsnetz geknüpft ist, umso genauer können künftige Entwicklungen vorausgesagt und darauf aufbauend Sanierungsmaßnahmen geplant werden. Detaillierte Hinweise zur Anwendung von Wasser- und Stoffbilanzen bei der Gefährdungsabschätzung gibt z. B. Entenmann (1999).

Weitere Details zur Erkundung und Bewertung von Altlasten sind z. B. bei Neumaier et al. (1996) nachzulesen. Lange und Knödel (2003) beschreiben die Methoden der Verdachtsflächenerkundung anhand zahlreicher Fallbeispiele.

8.6 Sanierung von Altlasten

Zeigen die Ergebnisse einer Verdachtsflächenerkundung, dass von der untersuchten Fläche eine Gefährdung von Schutzgütern ausgeht, wird sie zur Altlast erklärt. Es muss über die Sanierung des Schadensfalles entschieden werden (BN 4). In Deutschland werden Rechtsfragen zur Altlastensanierung über das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG 1998) und die Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 1999) geregelt. In Österreich

bildet das Altlastensanierungsgesetz (ALSAG 1989) eine wichtige Grundlage zur Umsetzung.

Der Begriff „Sanierung“ umfasst zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze, mit einer Untergrundkontamination umzugehen: die Dekontamination und die Sicherung. In Anlehnung an das im ► **Abschn. 8.5** vorgestellte E-T-I-Konzept zielt die Dekontamination auf die Unterbindung von Emissionen (E), die Sicherung auf die Unterbrechung von Emissionswegen, also die Transmission (T), ab. Schutzmaßnahmen oder Nutzungsbeschränkungen zählen nicht zu den Sanierungsansätzen, dienen aber der Vermeidung von Immissionen (I), sofern Dekontamination und Sicherung nicht zufriedenstellend umsetzbar sind.

Dekontamination hat die komplette Entfernung des Schadstoffherdes zum Ziel. Dies kann entweder durch die tatsächliche Räumung und anschließende Behandlung des kontaminierten Materials oder durch den chemischen oder biologischen Abbau des Schadstoffes an Ort und Stelle (In-situ) erfolgen. Beides hat zum Ziel, dass nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen keine weitere Nachsorge erforderlich ist und keine Nutzungseinschränkungen auf der Fläche mehr bestehen.

Sicherungsmaßnahmen sollen dagegen die Ausbreitung der Schadstoffe, also die Transmission, wirksam verhindern, indem bestehende bzw. potenzielle Wirkungspfade unterbrochen werden. Der Schadstoffherd selbst bleibt dabei an Ort und Stelle. In diesem Fall ist einerseits eine dauerhafte Nachsorge erforderlich, andererseits kann die Fläche auch auf lange Sicht nur eingeschränkt genutzt werden.

Sind an einem Standort weder Dekontamination noch Sicherung möglich oder aus verschiedenen Gründen nicht zumutbar oder nicht sinnvoll, muss ein Ordnungsrahmen vorgegeben werden, der Maßnahmen bzw. Nutzungseinschränkungen zum Schutz vor Immissionen vorsieht.

Der Auswahl der jeweils besten Sanierungsvariante geht eine Sanierungserkundung voraus, die auf den Detailerkundungen (BN 3, drittes Standortmodell), die im ► **Abschn. 8.5.2** beschrieben wurden, aufbaut. Dazu sind zunächst bestehende Informationsdefizite zu identifizieren und es ist aufzuzeigen, welche Untersuchungen für eine detaillierte Sanierungsplanung noch zusätzlich erforderlich

sind. Dies können neben ergänzenden Standortuntersuchungen auch Vorversuche sein, um die Wirksamkeit verschiedener Sanierungsmethoden an Testflächen oder mit Proben des kontaminierten Materials zu prüfen. Die Sanierungsuntersuchung hat außerdem zum Ziel, Leitparameter und Sanierungszielwerte festzulegen. Sanierungszielwerte sind jene Schadstoffkonzentrationen, die unter Berücksichtigung der geplanten Nachnutzung bzw. der betroffenen Schutzgüter sowie etwaiger Hintergrundwerte am Standort tolerierbar sind, die also nach erfolgter Sanierung nicht mehr überschritten werden dürfen.

Die Sanierungsuntersuchung muss so gestaltet werden, dass sie eine optimale Datengrundlage für die Detailplanung aller Sanierungsschritte liefert. Gleichzeitig muss der Aufwand für die Sanierungsuntersuchung in einem vertretbaren Verhältnis zum Sanierungsaufwand stehen.

Die Sanierungserkundung führt weiter zu BN 4, auf dem entschieden wird, ob eine Sanierung sinnvoll, erforderlich und zumutbar ist sowie welches Sanierungsverfahren unter Berücksichtigung des Aufwands den größten Nutzen bringt. Bevor im ► Abschn. 8.6.3 die Entscheidungsfindung auf BN 4 näher beleuchtet wird, wollen wir uns aber zunächst den verschiedenen Sanierungsverfahren widmen.

8.6.1 Dekontamination

Die Dekontamination einer Altlast zielt darauf ab, den Emissionsherd zu beseitigen. Dazu müssen Verfahren gewählt werden, die den Schadstoff vom Umweltmedium (Boden, Grundwasser, Bodenluft) trennen bzw. so umwandeln, dass keine Umweltgefährdung mehr davon ausgeht. Danach, ob das kontaminierte Material direkt vor Ort behandelt oder zur Behandlung entnommen wird, werden In-situ- von Ex-situ-Verfahren unterschieden. Danach, ob es nach der Entnahme direkt am Standort in mobilen Anlagen behandelt und anschließend wieder eingebaut wird oder ob es zur Behandlung in eine zentrale Anlage oder zur Deponierung transportiert werden muss, unterscheidet man zwischen on-site- und off-site-Verfahren.

Unabhängig davon, wie mit dem kontaminierten Material weiter verfahren wird, steht am Beginn

aller Ex-situ-Verfahren die Entnahme des belasteten Materials (Abfall oder kontaminierte Böden), d. h. die Räumung. Die Detailplanung einer Räumungsmaßnahme muss auf die geologisch-hydrogeologische Situation Bezug nehmen. So sind z. B. vorab Fragen der Stabilität von Böschungen und damit einhergehend der möglichen Auswirkungen auf benachbarte Grundstücke und Gebäude zu klären. Basierend auf bodenmechanischen Kennwerten sind die maximal zulässigen Böschungsneigungen oder auch eventuell erforderliche geotechnische Sicherungsmaßnahmen zu Nachbargrundstücken in die Planung einzubeziehen.

Zur Planung und Optimierung der Wasserhaltung im Aushubbereich müssen die Grundwasserhältnisse am Altlastenstandort bekannt sein. Es ist zu klären, ob die Entnahmesohle im oder sogar unter dem Grundwasserschwankungsbereich liegt. Ist dies der Fall, müssen die Eigenschaften des Aquifers sehr detailliert erkundet werden. Dabei sind folgende Fragen von besonderer Bedeutung:

- Tiefenlage des Grundwasserschwankungsbereichs
- Mächtigkeit des Grundwasserkörpers
- Hydraulische Durchlässigkeit der wasserführenden Horizonte
- Grundwasserfließrichtung
- Grundwasserqualität

Auf der Grundlage dieser Informationen erfolgen die Planungen von temporären Umschließungen sowie die Dimensionierung von Pumpeinrichtungen und Abwasserbehandlungsanlagen.

Je nach Größe und Aushubvolumen kann eine Räumung mehrere Monate oder sogar Jahre in Anspruch nehmen. Witterungsbedingte Extremereignisse wie Hochwasser müssen daher durch entsprechende Schutzmaßnahmen und eine entsprechende Planung des zeitlichen Ablaufs berücksichtigt werden.

Der Umgang mit dem ausgehobenen Material wird infolge von Feststoffuntersuchungen und der räumlichen Verteilung der kontaminierten Materialien festgelegt. Ziel einer detaillierten begleitenden Materialklassifizierung ist es, die Menge an Abfällen, die vor Ort behandelt (on-site), abtransportiert (off-site) und andernorts gereinigt oder nach Stand der Technik erneut deponiert werden muss, so ge-

ring wie möglich zu halten. Dazu wird vor Ort eine Sortierung und Beprobung des Aushubmaterials vorgenommen. Auf der Basis der Ergebnisse der Feststoffanalytik wird der Behandlungs- oder Entsorgungsweg festgelegt. Materialien, die hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung im Bereich des Sanierungsziels liegen, können unbehandelt zur Wiederverfüllung des Geländes herangezogen werden, während über das Sanierungsziel hinaus belastete Feststoffe dem festgelegten Dekontaminationsverfahren unterzogen werden.

Die Klassifizierung des Aushubmaterials, unter Berücksichtigung der vorab definierten Sanierungsziele, kann zum einen zu einer deutlichen Kostenreduktion einer Sanierungsmaßnahme führen und zum anderen unnötige Umweltbelastungen zum Beispiel durch übermäßigen Materialtransport vermeiden. Sie trägt außerdem den Vorgaben der eingangs erwähnten EU-Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL 2008) zur Prioritätenreihung im Umgang mit Abfällen Rechnung.

In-situ-Methoden zur Altlastensanierung haben einen Abbau der Schadstoffe durch standort- und schadstoffspezifische Maßnahmen an Ort und Stelle zum Ziel. Gegenüber der Räumung haben In-situ-Methoden den Vorteil, dass keine bis geringe Eingriffe in den Untergrund und damit in bestehende Bebauung oder Ökosysteme erfolgen müssen. Auch Materialtransporte und die damit verbundenen Umweltbelastungen sind bei diesen Verfahren ungleich geringer. Der Nachteil von In-situ-Methoden im Vergleich zur Ex-situ-Sanierung besteht einerseits in der Zeitdauer bis zum Erreichen des Sanierungsziels und den damit verbundenen dauerhaften Nutzungseinschränkungen, andererseits in den erforderlichen Maßnahmen zum Nachweis des Sanierungserfolges, wie regelmäßige Beprobung von Grundwasser, Bodenluft und Boden.

In-situ-Methoden werden vor allem dann gewählt, wenn aufgrund der aktuellen Standortnutzung eine Räumung nicht möglich ist oder unverhältnismäßig wäre. Das ist beispielsweise der Fall, wenn die Fläche dicht bebaut ist und die von der Altlast nur mittelbar betroffene Bebauung der Sanierungsmaßnahme weichen müsste.

Abhängig, teilweise aber auch unabhängig vom Einsatzort des Sanierungsverfahrens, lassen sich fol-

gende unterschiedliche Ansätze zur Dekontamination des belasteten Materials unterscheiden:

- Biologische und mikrobielle Verfahren
- Thermische Verfahren
- Waschverfahren
- Aktive pneumatische Verfahren
- Aktive hydraulische Verfahren

Biologische und mikrobielle Verfahren

Der Ansatz biologischer und mikrobieller Verfahren geht zunächst vom natürlicher Abbau (Fachbegriff „Natural Attenuation“, auch im deutschsprachigen Raum) aus. Natürlicher Abbau stellt keine Sanierungsmaßnahme im eigentlichen Sinne dar, kann aber unter Umständen als alleinige Maßnahme angewendet werden. Der Prozess des natürlichen Abbaus muss stets nach vorab festgelegten Kriterien beobachtet und dokumentiert werden. Es muss gewährleistet sein, dass bis zum Erreichen des Sanierungsziels keine Schadstofffreisetzung an Bereiche außerhalb der Altlast erfolgt. Dieser Ansatz ist nur bei organischen, wenig persistenten Schadstoffen sinnvoll und erfordert, entsprechend den Bedingungen im Altlastenkörper, häufig lange Sanierungszeiträume, in denen die Nutzung des Standorts eingeschränkt ist.

Zur Beschleunigung dieser natürlichen Alterung („Enhanced Natural Attenuation“) können aktive Maßnahmen wie die Belüftung oder auch das Einbringen von Mikroorganismen in den Untergrund dienen. Bei der Belüftung wird dazu Luft oder ein mit Sauerstoff angereichertes Gasgemisch über Bodenluftsonden in den Untergrund eingeblasen. Je nach geologischer Situation (Luftdurchlässigkeit der ungesättigten Bodenzone) kann durch Absaugungen an anderer Stelle die Durchlüftung gefördert werden. Abbauprozesse, die unter Sauerstoffzufuhr stattfinden, werden durch die Belüftungsmaßnahmen beschleunigt.

Die Unterstützung von Abbauprozessen durch den gezielten Einsatz von Mikroorganismen im Untergrund setzt eine genaue Kenntnis der Standortsituation voraus. Ein Schadstoff kann auf die Organismengesellschaft toxisch, neutral oder positiv wirken. Zur Sanierung müssen solche Organismen eingebracht werden, die den Schadstoff verarbeiten können und damit den Abbau entsprechend beschleunigen. Um zu gewährleisten, dass die für den

Standort passenden Organismen eingebracht werden, entnimmt man im Zuge der Sanierungserkundung Proben aus dem Altlastenkörper. Die hierin lebenden Organismengesellschaften werden im Labor vermehrt und zusammen mit passenden Nährlösungen wieder in den Untergrund eingebracht. Derartige Maßnahmen müssen in Deutschland im Einklang mit dem Wasserrecht erfolgen und werden nur in Abstimmung mit den Wasserrechtsbehörden unter strengsten Auflagen bewilligt. In Österreich ist die gezielte Einbringung mikrobiologisch aktiver Substanzen in den Untergrund nach aktueller Gesetzgebung generell nicht erlaubt und findet bisher nur im Rahmen von Laborversuchen bzw. an eng abgegrenzten Versuchsstandorten statt. Grundsätzlich können biologische Verfahren sowohl ex-situ (z. B. in Mieten am Standort), aber auch in-situ angewendet werden.

Thermische Verfahren

Thermische Verfahren können ebenfalls bevorzugt zur Abtrennung von organischen Schadstoffen eingesetzt werden. Sie können durch indirekte Beheizung ohne Sauerstoffzufuhr (Pyrolyse) oder durch direkte Beheizung mit Sauerstoff (Verbrennung) erfolgen. In beiden Fällen werden die Schadstoffe vom Feststoff getrennt und gehen in die Gasphase über. Die entstehenden Rauchgase sind hochangereichert und müssen vor ihrer Ableitung gereinigt werden. Zurück bleiben die Filterrückstände der Rauchgasreinigung, die unter hohen Schutzanforderungen deponiert werden müssen.

Waschverfahren

Waschverfahren setzen das kontaminierte Material einer wässrigen Waschlösung aus. Je nach Schadstoff werden Tenside, Säuren oder Laugen eingesetzt. Die ideale Zusammensetzung der Waschlösung wird im Rahmen von Vorversuchen ermittelt. In Kombination mit mechanischer Bearbeitung durch Hochdruck, Waschtrommel etc. werden die Schadstoffe aus dem Boden herausgewaschen und gehen entweder in Lösung oder liegen als Dispersion vor. Die chemisch-physikalische Bodenwäsche basiert auf dem Prinzip des Ionenaustausches oder der Auslaugung des Schadstoffes, wobei der Prozess jeweils an das Schadstoffspektrum angepasst werden muss. Bei diesen Verfahren bleibt der nicht biologisch ab-

baubare Schadstoff in hochkonzentrierter Form als Teil des Feststoffes oder in wässriger Lösung, jedenfalls aber als gefährlicher Abfall, zurück (Kofß 1997).

Sowohl thermische als auch Waschverfahren sind natürlich ausschließlich ex-situ einsetzbar.

Aktive pneumatische und hydraulische Verfahren

Aktive pneumatische und hydraulische Verfahren sind typische In-situ-Verfahren, bei denen die kontaminierte Bodenluft bzw. das Grundwasser aktiv entnommen, gereinigt und wieder zurückgeführt wird. Kontaminierte Feststoffe, von denen die Bodenluft- und Grundwasserverunreinigung ausgeht, bleiben an Ort und Stelle und werden durch diese auch als „pump-and-treat“-Verfahren bekannten Maßnahmen gereinigt. Die „pump-and-treat“-Verfahren werden vor allem dann angewendet, wenn gasförmige oder leicht flüchtige Schadstoffe die Problemparameter sind.

Pneumatische Verfahren zielen auf die Reinigung der Bodenluft in der ungesättigten Zone. Über Bodenluftsonden wird die schadstoffhaltige Luft mithilfe eines entsprechenden Unterdrucks entnommen. Vor einer Freisetzung der abgesaugten Luft an die Atmosphäre muss eine Reinigung des Gases, z. B. durch Aktivkohlefilter, erfolgen. Infolge des Unterdrucks strömt je nach Durchlässigkeit des Untergrunds saubere Atmosphärenluft in den Untergrund nach, was zu einer Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft führt.

Nach einem ähnlichen Prinzip funktionieren auch die aktiven hydraulischen Verfahren. Dazu werden im Abstrom des Schadensherdes Entnahmebrunnen errichtet, die so dimensioniert sind, dass das gesamte Grundwasser aus dem Kontaminationsbereich diesen Brunnen zuströmt und entnommen werden kann. Die Art der Entnahme und die Behandlung richten sich nach den spezifischen Eigenschaften des Schadstoffes. Mineralölkohlenwasserstoffe, die leichter als Wasser sind und auf dem Grundwasser aufschwimmen, müssen durch Schöpfen entnommen werden, während z. B. halogenierte Kohlenwasserstoffe, die besser wasserlöslich und schwerer als Wasser sind, über die gesamte Grundwassermächtigkeit und auch an der Grundwassersohle entnommen werden müssen.

Die Reinigung des abgepumpten Grundwassers kann durch mechanische Verfahren (z. B. Flockung, Sedimentation), durch Aktivkohleadsorption oder an den Schadstoff angepasste chemische oder biologische Maßnahmen erfolgen. Bei leichtflüchtigen Schadstoffen wird häufig auch das Stripp-Verfahren eingesetzt. Hier wird das kontaminierte Wasser durch Einblasen von Frischluft vom flüchtigen Schadstoff befreit.

Das behandelte Wasser wird im Anstrom des Schadensherdes wieder zur Versickerung gebracht und erneut in den Kreislauf eingeleitet. Die Injektion des gereinigten Wassers dient mehreren Zwecken. Das Wasser wird im Nahbereich der Entnahme mit geringem Aufwand wieder entsorgt, die Grundwasserfließverhältnisse im Umfeld bleiben weitgehend ungestört und eine verstärkte Durchströmung des kontaminierten Bereichs dient der Beschleunigung des Sanierungsvorgangs.

Aktive pneumatische und hydraulische Verfahren werden häufig auch kombiniert angewendet.

Bei allen geschilderten In-situ-Verfahren zur Dekontamination von Altlasten müssen Zeiträumen von Jahren bis Jahrzehnten zur Erreichung des jeweils festgelegten Sanierungszieles angesetzt werden. In diesem Zeitraum muss eine Gefährdung von Schutzgütern, vor allem dem Schutzgut „menschliche Gesundheit“ durch Nutzungseinschränkungen und die kontinuierliche Überwachung und Beweis-sicherung verhindert werden.

8.6.2 Sicherung

Bei der Anwendung von Sicherungsverfahren bleibt der Schadstoffherd mehr oder weniger unverändert an seinem Platz. Ziel der Sicherung ist es, eine Mobilisierung und Freisetzung der Schadstoffe durch geeignete Maßnahmen zu verhindern. Bezogen auf das E-T-I-Konzept kann dazu bei der Emission angesetzt werden, indem der Schadensherd selbst behandelt oder die Transmission verhindert wird, also der Ausbreitungsweg unterbunden. Welche Maßnahmen im Detail angewendet werden, hängt sehr stark vom Schadstoff selbst, vom Wirkungspfad sowie von der geologisch-hydrogeologischen Situation und der Nutzungssituation am Standort ab. Folgende Verfahren stehen

nach aktuellem Stand der Technik generell zur Verfügung:

- Oberflächenabdeckung/-abdichtung
- Allseitige Umschließung (Einkapselung)
- Passive hydraulische Verfahren
- Schadstoffimmobilisierung

Oberflächenabdeckung/-abdichtung

In manchen Fällen kann es ausreichend sein, die Freisetzung von Stäuben und die Windverfrachtung von Abfällen zu verhindern. In diesem Fall reicht eine Oberflächenabdeckung, die oft nur aus einer Schicht besteht. Ist es das Ziel der Sicherung, den Zustrom von versickernden Niederschlagswässern zu verhindern, um einen Austrag von Schadstoffen aus der Altlast über den Sickerwasserpfad zu unterbinden, muss eine Oberflächenabdichtung erfolgen. Dazu werden mehrere wasserundurchlässige Schichten in Kombination mit Drainagen zur Ableitung der auftreffenden Niederschlagswässer aufgebracht. Vor allem bei Deponien mit organischen Anteilen ist eine gleichzeitige Gasdrainage erforderlich, um die entstehenden Deponiegase geordnet ableiten zu können.

Allseitige Umschließung

Die Unterbrechung des Emissionsweges kann durch eine allseitige Umschließung oder auch Einkapselung des Kontaminationsherdes erfolgen. Die Umschließung soll einerseits vor einem Austritt von schadstoffbelasteten Substanzen schützen, andererseits aber auch verhindern, dass Stoffe in den Schadensbereich eintreten und unkontrollierte Prozesse, wie Lösung und damit neuerliche Mobilisation, in Gang setzen. Eine allseitige Umschließung umfasst stets die Oberflächenabdichtung, die seitliche Einfassung mit dichten Wänden und eine Basisabdichtung, die durch die Einbindung in einen gering durchlässigen natürlichen Untergrund oder durch künstliche Maßnahmen, wie z. B. Injektionen, erreicht werden kann.

Für die seitliche Abdichtung stehen verschiedene Methoden zur Einbringung vertikaler Grenzschichten zur Verfügung. Alle Arten von Dichtwänden müssen dabei den folgenden Anforderungen entsprechen:

- Dichtheit
- Lange Lebensdauer



■ Abb. 8.3 Errichtung einer Schmalwand

- Resistenz gegen die auftretenden Schadstoffe
- Möglichkeit zur dichten Einbindung in eine oft unregelmäßig ausgebildete Basisabdichtung

Beispiele von Dichtwänden:

- Stahlspundwände, wie sie als temporäre Maßnahmen bei Wasserhaltungen in Baugruben verwendet werden, entsprechen nicht diesen Voraussetzungen. Die einzelnen Spundbohlen sind über Schlösser miteinander verbunden, die keine vollständige Abdichtung darstellen. Die Einbindung in den Untergrund ist nicht gewährleistet, da natürliche Hindernisse, wie grobes Blockwerk, ein Einbringen bis zur erforderlichen Endteufe erschweren bzw. sogar verhindern können. Die Korrosionsresistenz und damit die Prämisse der langen Lebensdauer ist nicht erfüllt.
- Konstruktive Bohrpfehlwände werden errichtet, indem zunächst eine Reihe von Bohrungen errichtet wird, deren Abstand etwas geringer ist als der Bohrdurchmesser. Die Bohrungen werden mit einer Bentonit-Zement-Suspension verfüllt und nach Aushärten des Pfahls

durch Bohrungen in den Zwischenräumen überbohrt. Auch diese sekundäre Reihe an Bohrungen wird mit der Suspension verfüllt. Mit dieser Methode können große Endteufen erreicht werden. Sie bietet sich daher auch bei einem tief liegenden Einbindehorizont an.

- Zur Errichtung einer Schlitzwand erfolgt zunächst ein Grabenaushub mittels Greifer oder Schlitzwandfräse. Zum Schutz gegen Versturz wird der Graben während des Aushubs mit einer Suspension gefüllt. Nach Erreichen der Endteufe wird die Dichtungsmasse eingebracht und dadurch die leichtere Suspension verdrängt. Die Dichtungsmasse härtet anschließend aus, die Suspension kann aufbereitet und wiederverwendet werden. Es können mit dieser Methode große Tiefen (> 100 m wurden bereits realisiert) und sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten erreicht werden.
- Die Errichtung einer Schmalwand erfolgt, indem ein auf ein Raupenfahrzeug montierter Vortriebskörper bis zum Einbindehorizont in den Untergrund gerammt wird. Beim Herausziehen des Rammkörpers wird der Hohlraum mit einer Suspension verfüllt, die nach ausreichender Zeitdauer aushärtet. Je nach Wahl der Suspension können Durchlässigkeitsbeiwerte von 10^{-7} bis $< 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ erreicht werden. Nachdem Hohlraumbildung und Verfüllung in einem Arbeitsgang und mit Hilfe eines mobilen Gerätes erfolgen, ist dieses Verfahren vergleichsweise schnell. Allerdings ist die Methode nicht für größere Tiefen geeignet, da die Endteufe durch die Länge des Rammkörpers und die Kapazität der Rammvorrichtung beschränkt ist. Außerdem ist der Einsatz bei Böden mit großen Anteilen an grobem Blockwerk limitiert. Die Methode wird daher bei geringmächtigen Aquiferen und einer sehr seichten Lage des Stauhorizontes eingesetzt. ■ Abb. 8.3 zeigt die Errichtung einer Schmalwand.

Die seitliche Umschließung eines Kontaminationsherdes ist nur dann sinnvoll, wenn die dichte Einbindung in einen undurchlässigen Untergrund gewährleistet werden kann bzw. die Möglichkeit besteht, einen solchen nachträglich einzubauen. In vielen Fällen ist diese tiefe Abdichtung durch einen natür-

lich auftretenden StauhORIZONT gegeben. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass unter einer Altlast kein natürlicher Stauer vorhanden ist bzw. dieser in einer Tiefe liegt, die mit vertretbarem Aufwand nicht erschlossen werden kann. Für diesen Fall besteht die Möglichkeit, mit großem technischem und finanziellem Aufwand eine künstliche Basisabdichtung durch Injektionsmaßnahmen zu errichten. Meist wird in solchen Fällen von der allseitigen Umschließung als mögliche Sanierungsvariante aber abgesehen und stattdessen eine andere Sicherungsvariante bzw. die Dekontamination der Fläche bevorzugt.

Passive hydraulische Verfahren

Passive hydraulische Verfahren haben eine Veränderung der hydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse im Bereich der Altlast zum Ziel, ohne dass Grundwasser entnommen oder aktiv durch Pumpmaßnahmen auf die Fließverhältnisse eingewirkt wird. Dazu werden außerhalb der eigentlichen Kontamination Bereiche verringerter oder erhöhter Durchlässigkeiten geschaffen, um die Grundwasserfließrichtung zu verändern. Die durchströmten Bereiche können außerdem mit speziellen Materialien ausgestattet sein, die entweder den Schadstoff beim Durchströmen adsorptiv binden (Adsorptionswände) oder mit ihm reagieren (reaktive Wände), um das durchströmende Grundwasser zu reinigen. Um die Durchströmung der reaktiven oder adsorptiven Wand zu gewährleisten und ein Umfließen des kontaminierten Grundwassers zu vermeiden, werden häufig seitliche Dichtwände so in den Grundwasserkörper integriert, dass sie die kontaminierten Wässer in Richtung der reaktiven oder adsorptiven Wand leiten. Die Kombination seitlicher Dichtwände und einer reaktiven Wand wird auch als „*funnel and gate*“ bezeichnet.

Voraussetzung für passive hydraulische Verfahren ist, dass die Kontamination innerhalb der gesättigten Bodenzone liegt und der Schadstoffherd vom Grundwasser durchströmt wird.

Schadstoffimmobilisierung

Während die bisher dargestellten Sicherungsmaßnahmen auf die Unterbindung des Emissionsweges, also auf die Transmission zielen, setzt das letzte hier vorgestellte Sicherungsverfahren beim Schadstoff direkt an.

Grundansatz aller Immobilisierungsverfahren ist es, den Schadstoff mit chemischen oder physikalischen Mitteln so zu verändern, dass eine Freisetzung an die Umwelt nicht mehr möglich ist. Die dabei angewendeten Verfahren können die Verfestigung, die Verglasung, eine Verschiebung der Löslichkeit (Fällung) sowie eine Fixierung zum Ziel haben. Vor allem bei Schwermetallkontaminationen ist die Verfestigung mit basischen Bindemitteln ein bereits erprobtes Verfahren. In der Regel erfolgt die Immobilisierung als Ex-situ- und On-site-Verfahren. Das heißt, der kontaminierte Feststoff wird entnommen, direkt am Standort dem gewählten Verfahren unterzogen und wieder eingebaut.

Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren zur Schadstoffimmobilisierung gibt Azzam (2003). Aktuelle und umfangreiche Informationen zu zahlreichen weiteren Themen der Altlastensanierung liefern Franzius et al. (2014). Beschreibungen von Sanierungsverfahren nach dem jeweiligen Stand der Technik finden sich z. B. auch bei Neumaier et al. (1996), Koß (1997) oder bei Bilitewski und Härdtle (2013).

8.6.3 Auswahl des Sanierungsverfahrens/ Variantenstudium

Die Wahl des generellen Sanierungsansatzes richtet sich nach dem festgestellten Emissionspotenzial, den möglichen Transmissionswegen und der aktuellen Nutzungssituation am jeweiligen Standort (z. B. bestehende Bebauung, Hintergrundbelastung). So kann es z. B. nicht Ziel einer Sanierungsmaßnahme sein, unter allen Umständen den Schadstoffherd zu entfernen, obwohl keine Schadstofffreisetzung festgestellt wurde. Auch wenn die Fläche zukünftig nicht genutzt werden soll und die Räumung bedeuten würde, dass damit inzwischen am Standort entstandene ökologisch wertvolle Lebensräume zerstört werden, ist eine Sanierung häufig nicht gerechtfertigt. In einem großflächig durch Luftschadstoffe kontaminierten Industriegebiet muss die lokale Sanierung eines Bodenkörpers nicht soweit führen, dass dieser zukünftig zur landwirtschaftlichen Nutzung geeignet ist.

■ Tab. 8.2 Sanierungsziele in verschiedenen Phasen der Sanierungsplanung

Phase der Sanierungsplanung	Detailgenauigkeit	Mögliche Inhalte
Wahl des Sanierungsansatzes (Dekontamination/Sicherung)	Übergeordnetes Sanierungsziel	<ul style="list-style-type: none"> – Wiederherstellung der natürlichen Beschaffenheit der Schutzgüter – Herstellung eines Zustandes, der eine beliebige Nutzung ermöglicht – Beseitigung von Gefährdungen der Schutzgüter, damit eine geplante Nutzung möglich wird
Festlegung des Sanierungsverfahrens	Vorläufiges Sanierungsziel	<ul style="list-style-type: none"> – Konkretisierung des Zieles für den betroffenen Standort – Definition von Leitparametern (Hauptschadstoffe) – Definition von Emissionspfaden (Hauptausbreitungsmedium)
Detailplanung Sanierungsmaßnahme	Endgültiges Sanierungsziel	<ul style="list-style-type: none"> – Detaillierte Beschreibung der Ziele unter Berücksichtigung des gewählten Verfahrens – Quantitative Sanierungsziele – Definition von Art, Methode und Umfang der Kontrolle

Am Beginn der Überlegungen zur Sanierung einer Altlast muss die Definition des Sanierungszieles stehen, das mit fortschreitender Detaillierung der Sanierungsplanungen konkretisiert werden muss. In ■ Tab. 8.2 sind die möglichen Inhalte einer Sanierungszielentwicklung dargestellt.

Um die ökologisch und ökonomisch beste Vorgangsweise für jeden Altlastenstandort zu finden, sollte am Beginn jeder Sanierungsplanung ein umfassendes Variantenstudium (siehe ► Exkurs 8.3) stehen. Die Studie muss die generell möglichen Sanierungsvarianten anhand quantifizierbarer Kriterien vergleichen und zu einer transparenten und reproduzierbaren Sanierungsempfehlung kommen.

Wichtigstes Bewertungskriterium ist die Erreichbarkeit des festgelegten Sanierungszieles. Alle in Frage kommenden Verfahren müssen die Erreichung des definierten übergeordneten Ziels letztendlich garantieren. Mit dieser ersten Prämisse lassen sich meist zahlreiche der technisch machbaren Sanierungsverfahren bereits ausschließen.

Anhand von allgemeinen Bewertungskriterien kann eine erste Vorauswahl unter den generell denkbaren Verfahren getroffen werden. Diese Kriterien sind beispielsweise:

- Technische Umsetzbarkeit
- Zeitbedarf
- Nachsorgebedarf
- Nachhaltigkeit
- Überprüfbarkeit
- Emissionen (z. B. Verkehrsbelastung, CO₂-Ausstoß, Lärm- und Staubbelastung für Anrainer)

- Rechtliche Situation
- Nachnutzung
- Wertstoffrückgewinnung

Eine Quantifizierung dieser Kriterien kann z. B. erfolgen, indem der jeweils besten Variante eine maximale Punktzahl, der schlechtesten der Wert 0 zugewiesen wird. Die Gesamtsumme der nach allen Kriterien erzielten Punkte ergibt damit die beste Sanierungsvariante.

Diesen allgemeinen und ökologischen Kriterien sind die ökonomischen Kriterien, also die Kosten gegenüberzustellen. Neben den eigentlichen Kosten der Maßnahme müssen auch jene für eine langjährige Nachsorge und Beweissicherung in die Berechnungen einfließen.

Häufig sind die ökologisch besten Varianten gleichzeitig auch die teuersten. Wie die Gewichtung zwischen ökologischen und ökonomischen Kriterien erfolgt, muss im Einzelfall unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen geklärt werden.

Die im ► Abschn. 8.6 vorgestellten Beispiele von Sanierungsansätzen stellen nur einen Auszug aus den zahlreichen Möglichkeiten dar, mit einer als potenziell gefährdend eingestuften Altlast umzugehen. Generell erfordert jede Altlast ein spezifisch auf den Schadensfall und die herrschenden geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse abgestimmtes Vorgehen. Eine detaillierte Erkundung, die zu einem umfassenden Verständnis der Prozesse in der Altlast führt, ist daher Voraussetzung für eine optimale Sanierungsplanung.

Exkurs 8.3 Variantenstudie zur Sanierung einer Altablagerung

Für die im ► [Exkurs 8.2](#) vorgestellte ehemalige Deponie für kommunale Abfälle wurde ein Gefährdungspotenzial für Schutzgüter festgestellt. Die Fläche wurde zur Altlast erklärt und eine Sanierung wird als erforderlich erachtet.

Definition des Sanierungsziels: Als übergeordnetes Sanierungsziel wird die Beseitigung der festgestellten akuten oder auch zukünftigen Gefährdung definiert, die sich vor allem aus der Transmission über den Luft- und Grundwasserpfad und der Immissionsempfindlichkeit durch die benachbarte Bebauung und Grundwassernutzung ergibt. Eine aktive Nutzung der Fläche ist auch nach der Sanierung nicht geplant und ist auch nicht Sanierungsziel. Zur Konkretisierung wird anschließend das vorläufige Sanierungsziel definiert, das bereits die Hauptparameter sowie die Wirkungspfade berücksichtigt.

Als Ergebnis der Erkundung wurden zwei wesentliche Gefahren festgestellt:

- Hohe Deponiegaskonzentrationen, die aufgrund des Überdrucks jederzeit in benachbarte Bereiche austreten und auch die Wohnbebauung betreffen könnten.
- Punktuell hohe Konzentrationen an Schwermetallen und weiteren Schadstoffen, die derzeit in der Deponie fixiert sind, aber bei einer Veränderung der Durchlässigkeiten in der Deponie durch den fortschreitenden Abbau organischer Substanz mobilisiert werden könnten.

Die fraglichen Medien der Stoffausbreitung sind Bodenluft und Grundwasser. Es müssen also Sanierungsmaßnahmen gewählt werden, die sowohl die Deponiegasproblematik berücksichtigen als auch langfristig eine Emission von Schadstoffen über den Grundwasserpfad verhindern.

Als endgültiges Sanierungsziel werden folgende Vorgaben festgelegt:

- Der Abbau der organischen Substanzen soll beschleunigt, die Methankonzentration verringert werden. Bei den Abbauprozessen entstehende Gase müssen kontrolliert gesammelt und vor einer Ableitung in die Atmosphäre behandelt werden.
- Die Durchströmung des Deponiekörpers und damit eine Mobilisierung von Schadstoffen über den Grund- oder Sickerwasserpfad soll langfristig verhindert werden.
- Als Leitparameter dienen der Methangehalt der Bodenluft sowie die elektrische Leitfähigkeit der Grundwässer im Deponieabstrom.

Folgende Sanierungsvarianten wurden in einem ersten Schritt als generell möglich ausgewählt: Natural Attenuation: Es werden keinerlei Schritte gesetzt, die Emissionssituation über die Wirkungspfade Bodenluft und Grundwasser wird beobachtet.

Räumung mit off-site-Sanierung bzw. Deponierung: Die Altablagerung wird geräumt, die Abfälle sortiert, in einer Bodenwaschanlage behandelt, soweit möglich am Standort wieder eingebaut oder auf geeignete Deponien gebracht. Gefährliche Abfälle werden in ein Endlager verbracht.

Beschleunigung des mikrobiellen Abbaus durch Belüftung: Zur Beschleunigung des organischen Abbaus wird über entsprechende Bodenluftsonden ein sauerstoffreiches Gasgemisch in den Deponiekörper eingebracht. Die Bodenluft wird an anderer Stelle abgesaugt, die Gase über Filtereinrichtungen gereinigt und an die Atmosphäre abgegeben.

Umschließung: Der Deponiekörper wird seitlich und oberflächlich umschlossen. Die seitlichen Dichtwände werden in den unterlagernden Stauer eingebunden und verhindern auch zukünftig ein Durchströmen der Ablagerung.

Um die optimale Variante zu finden, werden die infrage kommenden Verfahren anhand definierter Kriterien verglichen (► [Tab. 8.3](#)). Zur Quantifizierung erfolgt eine Punktbewertung der Varianten relativ zueinander. Da nicht alle betrachteten Kriterien als gleich wichtig angesehen werden, wird außerdem vorab eine Gewichtung festgelegt. Der in ► [Tab. 8.3](#) beispielhaft dargestellte Variantenvergleich ergibt hinsichtlich der allgemeinen Kriterien eindeutige Vorteile der Sanierungsvariante Räumung, da diese am besten die Erreichung beider Sanierungsziele garantieren kann. Sie bietet außerdem die beste Überprüfbarkeit und schneidet hinsichtlich Zeit- und Nachsorgebedarf am günstigsten ab. Nachteile gegenüber den anderen Varianten ergeben sich beim Kriterium Transportaufwand/Emissionen. Auch unter Berücksichtigung der Kosten, die in unserem Fall mit einer dreifachen Gewichtung besonders stark in den Vergleich einfließen, ist die Räumungsvariante gegenüber den anderen Möglichkeiten als die beste anzusehen.

Das liegt vor allem daran, dass die Nullvariante im Betrachtungszeitraum zu keinerlei Zielerreichung führen würde und die Varianten Belüftung und Umschließung jeweils nur eines der beiden Sanierungsziele komplett sicherstellen können, während das jeweils andere Sanierungsziel nur unzureichend erreicht wird. Die Belüftung kann vor allem zu einer Verbesserung der Deponiegassituation führen, während die Umschließung in erster Linie das Problem des Schadstoffaustrages über den Grundwasserpfad löst. In einer vertiefenden Variantenstudie wäre es nun erforderlich, eine Kombination der Varianten Belüftung und Umschließung mit der Räumung zu vergleichen.

Exkurs 8.3 (Fortsetzung) Variantenstudie zur Sanierung einer Altablagerung

■ **Tab. 8.3** Beispiel eines Variantenvergleichs zur Optimierung der Sanierungsmaßnahme

Kriterium/Maßnahme	Natural Attenuation	Räumung	Belüftung	Umschließung	Gewichtung
Sanierungsziel Schutz vor Deponeiegas	0	3	3	2	2
Sanierungsziel Grundwasserschutz	0	3	1	3	2
Technische Umsetzbarkeit	3	3	1	2	1
Zeitbedarf	0	3	1	2	0,3
Überprüfbarkeit	0	3	2	2	1
Nachsorgebedarf	0	3	1	0	0,5
Transportaufwand/ Emissionen	3	0	1	2	1
Nachnutzung	0	3	1	1	0,1
Summe allg. Kriterien	6	20,7	12,9	16,7	
Kosten	3	0	2	1	3
Summe nach Gewichtung	15	20,7	18,9	19,7	

Abfallmanagement und Altlastenpraxis – Einiges, was man wissen sollte

- Der Umgang mit Abfall erfolgt in der EU nach den Grundsätzen der Abfallrahmenrichtlinie und richtet sich nach einer Prioritätenfolge, an deren Spitze die Abfallvermeidung steht. Dennoch anfallende Abfälle sollen zur Wiederverwendung vorbereitet, recycelt oder verwertet werden. Die Verwertung kann dabei stofflich oder energetisch erfolgen.
- Eine moderne Deponie wird nach dem Multibarrierenkonzept errichtet und betrieben. Dieses umfasst mehrere voneinander unabhängige Sicherheitskonzepte, die die Umweltverträglichkeit auch bei Versagen einer Barriere gewährleisten. Neben dem

vielschichtigen Deponieaufbau sind auch die Eingangskontrollen, das Begleitscheinwesen sowie die geologisch begründete Standortwahl als derartige Barrieren zu betrachten.

- In einer Reaktordeponie finden chemische und biochemische Prozesse statt, die langfristig zum teilweisen Abbau des deponierten Abfalls führen.
- Ein Endlager für gefährliche Abfälle muss über Jahrtausende eine Freisetzung von Schadstoffen verhindern. Dazu werden Tiefenlager innerhalb dichter Lithologien durch künstliche Hohlräume erschlossen.
- Altlasten im umweltgeologischen Sinne sind Verunreinigungen des Untergrundes auf-

grund früherer anthropogener Aktivitäten, von denen eine Gefährdung für Schutzgüter ausgeht.

- Altablagerungen sind stillgelegte Anlagen zur Ablagerung von Abfällen. Altstandorte sind Grundstücke stillgelegter Anlagen, in denen mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen wurde.
- Um von einer Altlastenverdachtsfläche zur Beurteilung der tatsächlichen Gefährdung zu kommen, sind umfangreiche und mehrstufige Untersuchungen an Boden, Feststoffablagerung, Grundwasser und Bodenluft erforderlich.
- Zur Bewertung des Gefährdungspotenzials sowie zur Wahl des Sanierungsverfahrens wird häufig das E-T-I-Konzept herangezogen. Es betrachtet die Faktoren Emission, Transmission und Immission um den Schadstoffherd (E) zu charakterisieren, die Ausbreitungswege (T) zu bestimmen und schließlich die Einwirkungen (I) auf die möglicherweise betroffene Umwelt zu definieren.
- Zur Sanierung von Altlasten können zwei grundsätzliche Ansätze gewählt werden: die Dekontamination und die Sicherung. Die Dekontamination hat den völligen Abbau des Schadstoffes zum Ziel, während die Sicherung eine Fixierung des Schadstoffes anstrebt und die Schadstoffausbreitung nachhaltig verhindern soll.

den Deponie. Welche Zielsetzungen stehen hinter den einzelnen Schichtgliedern der „geordneten Deponie“?

6. Welche geologischen Eigenschaften sollen Formationen aufweisen, um als Endlagerstätten für gefährliche Abfälle geeignet zu sein? Welche Strategien werden hierzu international verfolgt?
7. Welche generellen Unterschiede bestehen zwischen Altablagerungen und Altstandorten? Was bedeuten diese Unterschiede für das Vorgehen bei der Erkundung solcher Altlasten?
8. Erläutern Sie den Ablauf einer Erkundungsmaßnahme zur Bewertung einer Altlastenverdachtsfläche. Was beschreiben in diesem Zusammenhang Begriffe wie Beweinsniveau oder Standortmodell?
9. Wie unterscheiden sich Deponiegase in einer stillgelegten Hausmülldeponie von Bodenluft in einem natürlichen Bodenkörper?
10. Skizzieren Sie die Deponiegasentwicklung bei der Alterung einer Hausmülldeponie. Wovon hängt es ab, wie lange es dauert, bis in der Umgebung einer Altablagerung wieder Bodenluftverhältnisse herrschen?
11. Was ist der Unterschied zwischen Dekontamination und Sicherung? Nennen sie Vor- und Nachteile der beiden grundsätzlich unterschiedlichen Ansätze zur Altlastensanierung.
12. Beschreiben Sie die Entscheidungsfindung bei der Wahl der besten Sanierungsvariante für eine Altlast.

❓ Testfragen zum Kapitel Abfallmanagement und Altlastenpraxis

1. Welche Kriterien definieren die Abfalleigenschaft eines Stoffes?
2. Beschreiben Sie die Prioritätenfolge beim Umgang mit Abfall, wie sie in der Abfallrahmenrichtlinie definiert und von den EU-Staaten in nationalen Gesetzen umgesetzt wurde.
3. Was ist der generelle Unterschied zwischen einer Reaktordeponie und einem Endlager?
4. Was versteht man in der Deponietechnik unter dem Multibarrierenkonzept?
5. Skizzieren Sie schematisch den Aufbau einer dem Stand der Technik entsprechen-

Literatur

- AbfRRL (2008). Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.11.2008 über Abfälle – Abfallrahmenrichtlinie. Europäische Union
- ALSAG (1989). Bundesgesetz zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung – BGBl Nr. 299/1989 Altlastensanierungsgesetz. Republik Österreich
- AVV (2001). Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV). Bundesrepublik Deutschland

- AVV (2008). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis. Republik Österreich
- AWG (2002). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich; Abfallwirtschaftsgesetz BGBl Nr. 102/2002. Republik Österreich
- Azzam R (2003) Verfahren zur Schadstoffimmobilisierung. In: Franzius V, Altenbockum M, Gerold T (Hrsg) Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. C. F. Müller Verlag, Heidelberg
- BBodSchG (1998). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten – Bundes-Bodenschutzgesetz. Bundesrepublik Deutschland
- BBodSchV (1999). Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Bundesrepublik Deutschland
- Billtewski B, Härdtle G (2013) Abfallwirtschaft, Handbuch für Praxis und Lehre, 4. Aufl. Springer Verlag, Heidelberg
- Dachroth WR (2012) Handbuch der Baugeologie und Geotechnik, 3. Aufl. Springer Verlag, Heidelberg
- DepV (2009). Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV). Bundesrepublik Deutschland
- DVO (2008). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien. Republik Österreich
- Entenmann W (1999) Wasser- und Stoffbilanzen bei der Gefährdungsabschätzung von Altlasten und Deponien. In: Huch M, Geldmacher H (Hrsg) Ressourcen-Umwelt-Management – Wasser Boden Sedimente. Gesellschaft für Umwelt-Geowissenschaften. Springer Verlag, Heidelberg
- Franzius V, Altenbockum M, Gerold T (Hrsg) (2014) Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. C. F. Müller Verlag, Heidelberg
- Hammer J (1998) Handbuch zur Erkundung von Deponie und Altlasten. Band 9: Quartäre Sedimente als geologische Barriere. Springer Verlag, Heidelberg
- Hiltmann W, Stribny B (1998) Handbuch zur Erkundung von Deponie und Altlasten, Band 5: Tonmineralogie und Bodenphysik. Springer Verlag, Heidelberg
- Huch M, Geldmacher H (Hrsg) (1999) Ressourcen-Umwelt-Management – Wasser Boden Sedimente; Gesellschaft für Umwelt-Geowissenschaften. Springer Verlag, Heidelberg
- Kluth W, Smeddinck U (Hrsg) (2013) Umweltrecht – ein Lehrbuch. Springer Spektrum, Heidelberg
- Knödel K, Krumme H, Lange G (2005) Handbuch zur Erkundung von Deponie und Altlasten. Band 3: Geophysik. Springer Verlag, Heidelberg
- Koß V (1997) Umweltchemie – eine Einführung für Studium und Praxis. Springer Verlag, Heidelberg
- Kranert M (2014) Zeitgemäße Deponietechnik 2014 – die Deponie zwischen Stilllegung und Nachsorge. Dt. Industrie-verlag, München
- KrWG (2012). Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG). Bundesrepublik Deutschland
- Lange G, Knödel K (2003) Handbuch zur Erkundung von Deponie und Altlasten, Band 5: Erkundungspraxis. Springer Verlag, Heidelberg
- Milsum J (1996) Field Geophysics, Second Ed. Aufl. Wiley and Sons, Chichester
- Neumaier H, Weber H-H, Fresenius W, Matthes G (1996) Altlasten – Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag, Heidelberg
- Scholz R, Beckmann M, Schulenberg F (2001) Abfallbehandlung in thermischen Verfahren – Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. B. G. Teubner, Stuttgart
- Schwartzmann R (2006) Umweltrecht. C. F. Müller Verlag, Heidelberg
- Schwedt G (1996) Taschenatlas der Umweltchemie. Thieme-Verlag, Stuttgart
- Umweltbundesamt (2014) Verdachtsflächenkataster und Altlastenatlas, REP-0471. Umweltbundesamt, Wien

Rohstoffe

Sylke Hilberg

- 9.1 Rohstoffwirtschaft – 148
- 9.2 Flächenverbrauch zur Rohstoffgewinnung – 151
- 9.3 Metalle – 153
- 9.4 Evaporite – 157
- 9.5 Phosphat – 158
- 9.6 Massenrohstoffe – 159
- 9.7 Energierohstoffe – 162
- 9.8 Umweltbewusste Rohstoffgewinnung
und Kreislaufwirtschaft – 167
- Literatur – 170

Kurzfassung

Als Rohstoffe werden alle unverarbeiteten Stoffe bezeichnet, die in der Natur auftreten und vom Menschen direkt oder nach einer Aufbereitung genutzt werden. Sie können nach ihrer Entstehung, ihrer Verwendung oder danach unterschieden werden, ob sie nachwachsend oder nicht erneuerbar sind. Unter Berücksichtigung der großen Differenz zwischen der Zeitdauer ihrer Entstehung und ihres Abbaus müssen die in der Erdkruste verfügbaren Rohstoffe ausschließlich als nicht erneuerbare Ressourcen bezeichnet werden.

Die Rohstoffwirtschaft unterliegt den Gesetzmäßigkeiten des Marktes. So wird die Anreicherung eines Rohstoffes erst dann als Lagerstätte bezeichnet, wenn deren Abbau unter den gegebenen technischen und wirtschaftlichen Verhältnissen ökonomisch sinnvoll ist. Kommt es aufgrund mangelnder Reserven zu einer Verknappung eines Rohstoffes, steigt der Preis. Die Folge ist die Entwicklung neuer Technologien oder die Investition in schwerer zugängliche Akkumulationsgebiete. Dazu werden auch größere Umweltrisiken in Kauf genommen bzw. bis dahin anthropogen unbelastete Naturräume von der Rohstoffindustrie beansprucht.

Der Abbau von in der Erdkruste gelagerten Rohstoffen erfolgt auf eine von drei grundsätzlich unterschiedlichen Arten: im Tagebau, bergmännisch unter Tage oder durch Förderbohrungen. Unabhängig von der Art des Rohstoffes ist der Tagebau immer ein erheblicher Eingriff in die Landschaft und damit in Lebens- und Naturräume und stellt aus dieser Perspektive daher die größte Umweltbelastung dar.

Bei jeder Art von Bergbau können Grundwasserkörper von ausgeprägten Wasserhaltungsmaßnahmen betroffen sein. Auch wenn, wie im Falle von Nassbaggerungen zur Kiesgewinnung, keine Wasserhaltung erfolgt, wird der betroffene Grundwasserkörper quantitativ und qualitativ beeinflusst. Beim Abbau von Metallen kann es durch die Wasserhaltung, aber vor allem auch durch die spätere Aufbereitung der Erze zur Freisetzung von umweltbelastenden Stoffen wie sauren Minenwässern und Schwermetallen kommen. Eine Freisetzung von Stoffen über die Wirkungspfade Wasser oder Luft kann sich oft auch aus der Lagerung des Abraums ergeben.

Der Abbau von Evaporiten erfolgt häufig unter Tage. Künstliche Hohlräume des Bergbaus innerhalb der

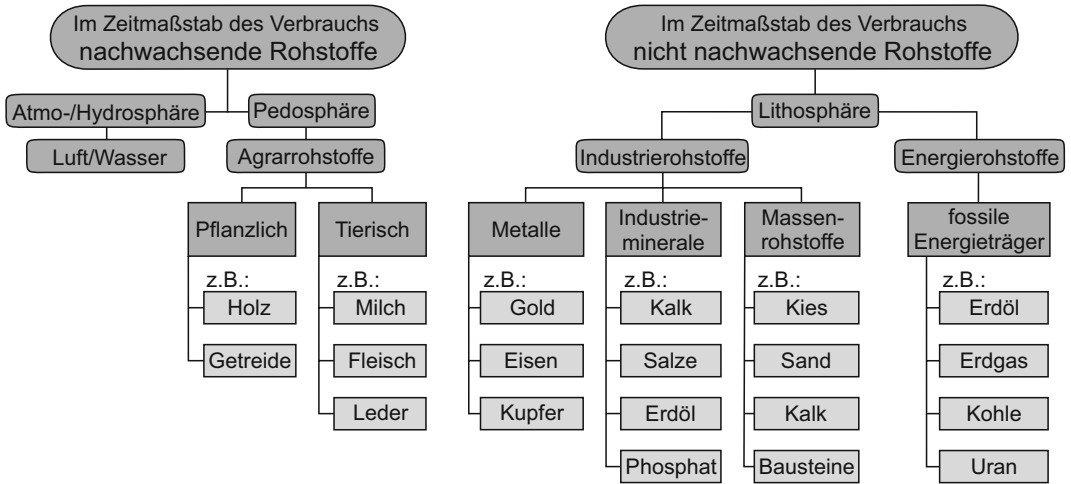
wasserlöslichen Gesteine können bei unkontrolliertem Wasserzutritt zu großen Stabilitätsproblemen im Grubengebäude bis hin zu Tagbrüchen führen. Mit einer Durchflutung von Gips- oder Salzbergbauen geht ein Austrag hochmineralisierter Wässer in Grundwasser oder Oberflächengewässer einher.

Betrachtungen rund um die Gewinnung und Nutzung fossiler Energierohstoffe machen die Endlichkeit von Ressourcen besonders deutlich. Die weltweiten Reserven an Erdöl sind z. B. bereits zur Hälfte aufgebraucht. Technologien, die neue Ressourcen wie die sogenannten nicht-konventionellen Kohlenwasserstofflagerstätten erschließen sollen, werden aufgrund ihrer möglichen Umweltauswirkungen sehr kontrovers diskutiert. Rohstoffgewinnung und -aufbereitung unter Berücksichtigung des Umweltschutzes sowie die Wiederverwertung von Materialien im Sinne einer Kreislaufwirtschaft werden angestrebt und in vielen Bereichen auch bereits mehr oder weniger zaghaft umgesetzt. Dieses Kapitel widmet sich den umweltgeologisch relevanten Aspekten der Rohstoffwirtschaft anhand einiger, aus der Vielzahl an Rohstoffen ausgewählter Beispiele.

9.1 Rohstoffwirtschaft

Unter dem Begriff „Rohstoffe“ werden generell alle unverarbeiteten Stoffe zusammengefasst, die in der Natur vorkommen und nach ihrer Gewinnung entweder direkt verbraucht oder als Ausgangsmaterial in Produktionsprozessen oder zur Energiegewinnung verwendet werden. Zur Klassifizierung von Rohstoffen können verschiedene Ansätze gewählt werden. Es kann zwischen organischen und anorganischen oder auch zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Rohstoffen unterschieden werden. Nach ihrem Bildungsort können Rohstoffe der Pedosphäre von solchen der Atmo- bzw. Hydrosphäre und der Lithosphäre unterschieden werden. Luft wäre unter diesem Aspekt z. B. ein Rohstoff der Atmosphäre, Wasser einer der Hydrosphäre. Der Pedosphäre entstammen land- und forstwirtschaftliche Rohstoffe, während die große Vielfalt an sogenannten „Bodenschätzen“ meist der Lithosphäre zuzurechnen sind.

Nach ihrer ökonomischen Zuordnung werden Agrar-, Industrie- und Energierohstoffe unter-



■ **Abb. 9.1** Einteilung der Rohstoffe nach Aspekten ihrer Herkunft, ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften und ihrer Verwendung

schieden. Agrarrohstoffe können bei nachhaltiger Flächenbewirtschaftung als nachwachsend im Zeitmaßstab ihres Verbrauchs angesehen werden. Industrie- und Energierohstoffe werden dagegen bedeutend schneller verbraucht, als sie in der Lithosphäre nachgebildet werden können (sofern Neubildung unter aktuellen Bedingungen überhaupt erfolgt). ■ **Abbildung 9.1** zeigt eine Klassifizierung nach den Aspekten Herkunft, Eigenschaften und Verwendung.

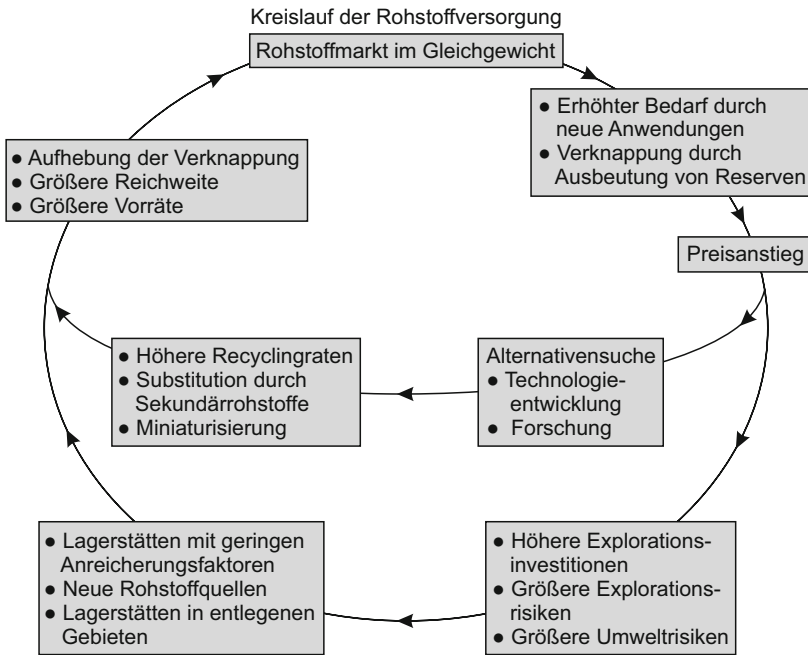
Rohstoffe kommen nicht gleichmäßig verteilt auf der Erde vor, sondern sind in bestimmten Gebieten angereichert, in anderen dagegen wenig oder gar nicht vorhanden. Betrachtet man z. B. die Verteilung des Rohstoffs Wasser auf der Erde, so ist offensichtlich, dass es viele Gebiete gibt, die Wasser im Überfluss haben, während in anderen Gebieten so gut wie kein Wasser zur Verfügung steht. Grund für diese ungleiche Verteilung ist im Fall des Wassers die klimatische Situation, die sich aus der geographischen Lage eines Gebietes in Kombination mit atmosphärischen Strömungen und Prozessen des Wasserkreislaufs ergibt.

Ähnliches, wenn auch vielleicht für uns als Beobachter weniger leicht nachvollziehbar, betrifft die Ungleichverteilung anderer Rohstoffe, wie Erze, Evaporite oder Kohlenwasserstoffe in der Erdkruste. Die Dynamik des geologischen Kreislaufs führt zu Anreicherungen bestimmter Stoffe in bestimmten Gebieten. Derartige Anreicherungen werden als

Mineralisationen bezeichnet, die bei ausreichender Größe und Konzentration zu Lagerstätten werden können.

Alle bekannten und vermuteten Vorkommen eines Rohstoffes können gemeinsam als Ressource betrachtet werden. Demgegenüber werden mit dem Begriff „Reserve“ jene Anteile des Rohstoffes bezeichnet, die aufgrund von Konzentration und Volumen der Anreicherung mithilfe der verfügbaren Technologie und entsprechend der aktuellen Marktlage wirtschaftlich abbaubar sind. Für jeden Rohstoff ergibt sich ein sogenannter wirtschaftlicher Anreicherungsfaktor. Dieser Begriff bezeichnet die Anreicherung im Vergleich zum kristallinen Durchschnittswert, ab welcher ein Abbau ökonomisch sinnvoll sein kann, sofern das Volumen des Akkumulationsgebiets ausreichend groß ist. Je nachdem, wie häufig der Rohstoff generell in der Lithosphäre vorkommt, wie aufwendig seine Gewinnung ist und welche Marktpreise erzielt werden können, kann dieser Faktor eine bis mehrere Größenordnungen betragen.

Die Abschätzung der Reserven eines Rohstoffes bildet die Grundlage zur Bestimmung seiner statischen Lebensdauer. Damit wird die prognostizierte Dauer der Verfügbarkeit des Rohstoffes unter der Annahme bezeichnet, dass die aktuellen Reserven mit gleichbleibender Rate weiterhin verbraucht werden. Nachdem jedoch Marktlage, Technologiestandards und damit letztlich die Reserven selbst einer



■ **Abb. 9.2** Kreislauf der Rohstoffwirtschaft (in Anlehnung an BGR 2014)

dynamischen Entwicklung unterliegen, kann diese Betrachtung nur als grobe Orientierung, nicht aber als belastbare Prognose betrachtet werden. Das Ausmaß dieser Dynamik wird als Volatilität bezeichnet und gibt einen ersten Anhaltspunkt darüber, wie zuverlässig ein im Wesentlichen auf geologischen Erkenntnissen und der aktuellen Bedarfssituation gründendes Prognosemodell sein kann.

Die Lebensdauer unter Berücksichtigung von prognostizierbaren Entwicklungen aller Einflussfaktoren wird als Reichweite bezeichnet und ist, so muss man realistisch zugeben, auf Basis geologischer Erkenntnisse allein nicht bestimmbar. Ein Ansatz zur Abschätzung der maximal förderbaren Mengen (Ultimate Recoverable Resource – URR) eines Rohstoffs beruht auf historischen Betrachtungen und ist als Hubbert-Modell bekannt. Das Modell wurde in den 1950er Jahren zur Abschätzung der Reichweite der US-amerikanischen Erdölreserven von M. K. Hubbert entwickelt (siehe ► [Abschn. 9.7](#)).

Die Dynamik der Entwicklung eines Rohstoffs erschließt sich über den Kreislauf der Rohstoffversorgung, wie er in [Abb. 9.2](#) dargestellt ist.

Die statische Lebensdauer wird für eine Situation berechnet, in der Rohstoffbereitstellung (Angebot) einerseits und der Rohstoffbedarf (Nachfrage) andererseits im Gleichgewicht stehen. Es wird also

ein stationärer Zustand betrachtet. Tritt jedoch der Fall ein, dass größere Mengen des Rohstoffs gebraucht werden, als aktuell gewonnen werden können, z. B. weil die Anwendungsbereiche des Rohstoffs durch neue Technologien erweitert wurden, kommt es zu einem Nachfrageüberhang, einer Verknappung. Gleiches gilt, wenn die Reserven des Rohstoffs bei gleichbleibendem Bedarf zur Neige und daher die Förderraten zurückgehen.

Nach marktwirtschaftlichen Regeln folgt auf die Verknappung ein Preisanstieg für den Rohstoff. Da höhere Preise eine Motivation für die Produzenten darstellen, ein Produkt am Markt verstärkt anzubieten, werden verschiedene Maßnahmen gesetzt, um die Angebotslücke zu schließen. Maßnahmen können entweder in der Erforschung und Entwicklung von Alternativen zu dem knappen Rohstoff liegen oder darin, neue Explorationstechnologien einzusetzen bzw. größere Explorationsrisiken und häufig damit auch größere Umweltrisiken einzugehen. Im Ergebnis führen beide Strategien dazu, dass die Reichweite des betreffenden Rohstoffes verlängert, die Verknappung zumindest vorübergehend aufgehoben wird.

Es gibt umfangreiche Lehr- und Fachliteratur über die geologischen Grundlagen, die Genese und Klassifizierung der verschiedensten Lagerstätten

(z. B. Eisbacher und Kley 2001; Pohl 2005; Rothe 2010 oder Neukirchen und Ries 2014). Petrologisch-mineralogische Hintergründe zur Entstehung von Rohstoffen werden ausführlich bei Okrusch und Matthes (2014) beschrieben. McDonald et al. (2005) stellt weltweit verteilte Beispiele für bedeutende mineralische Lagerstätten vor. Kausch et al. (2011) betrachten die Rohstoffversorgung Deutschlands unter ökonomischen Aspekten und dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit. Wiggering (1994) und Evans (1997) sowie einzelne Kapitel der zuerst genannten Werke über Lagerstätten und Rohstoffe thematisieren auch bereits einige der Umweltprobleme der Rohstoffgewinnung. Bardi (2013) befasst sich in seinem Sachbuch mit der Endlichkeit der Rohstoffressourcen und den ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Folgen einer nur von wirtschaftlichen Interessen gesteuerten Ausbeutung nicht nachwachsender Rohstoffe.

Die umweltgeologisch relevanten Auswirkungen der Rohstoffgewinnung sollen in den folgenden Abschnitten beleuchtet werden. Dabei können natürlich aus der großen Bandbreite von Rohstoffen und den damit verbundenen Umweltproblemen nur einige wenige beispielhaft betrachtet werden.

Die hinsichtlich Exploration, Abbau und Aufbereitung meist sehr unterschiedlichen Methoden zur Gewinnung von Erzen (Metalle), Industriemineralen (am Beispiel Evaporite und Phosphor), Massenerohstoffen und Energierohstoffen werden in den folgenden Abschnitten gesondert betrachtet. Zunächst sollen aber, unabhängig von der Art des Rohstoffs, die Gewinnungsmethoden und ihre Auswirkungen auf die Umwelt kurz beleuchtet werden.

9.2 Flächenverbrauch zur Rohstoffgewinnung

Grundsätzlich kann der Abbau von mineralischen Rohstoffen auf drei Arten erfolgen. Im Tagebau, unter Tage oder durch Förderbohrungen. Die Wahl der Abbaumethode richtet sich im Wesentlichen nach der Tiefe und Struktur der Lagerstätte und nach den Eigenschaften des Rohstoffs. Oberflächennahe mächtige, söhlig oder flach einfallende Lagerstätten werden obertägig abgebaut, während für tiefe Lagerstätten und solche, die sich in Form gering-



■ **Abb. 9.3** Der steirische Erzberg, Ansicht von Westen

mächtiger Flöze oder Gänge im Gebirge erstrecken, ein bergmännischer Abbau die wirtschaftlichere Variante ist. Über Förderbohrungen werden flüssige und gasförmige Rohstoffe gewonnen oder solche, die in-situ gelöst und mithilfe des Lösungsmittels transportiert werden können.

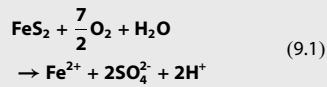
Der Abbau von Rohstoffen ist generell nicht ohne eine Belastung der Umwelt umzusetzen, die sich, je nach der Art des Rohstoffs, aus den Abbau- und Aufbereitungsmethoden sowie den Eigenschaften des Rohstoffs selbst ergibt. Ein wichtiger Aspekt ist stets auch die Flächenbeanspruchung, die zu Lasten der bisherigen Nutzungsform geht. Es können Siedlungsgebiete, aber auch wichtige Naturräume und damit Ökosysteme betroffen sein. Naturgemäß stellt der Flächenverbrauch im Tagebau im Vergleich zu den anderen Abbaumethoden eine besonders große Umweltbelastung dar. Weiterführende Überlegungen zur Fläche als begrenzter Ressource werden im ► [Kap. 12](#) angestellt.

Der Tagebau zur Eisenerzgewinnung ist, wie andere Tagebauanlagen auch, mit erheblichen Eingriffen in die Landschaft und großem Flächenverbrauch verbunden. Ein sehr markantes Beispiel einer Eisenerzlagerstätte ist der Steirische Erzberg. Aus dieser Sideritlagerstätte (FeCO_3), die den gesamten Berg aufbaut, wird bereits seit 2000 Jahren Erz im Tagebau, früher zeitweise auch bergmännisch, abgebaut.

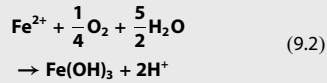
■ **Abbildung 9.3** zeigt eine Ansicht des Erzberges heute, der ein markantes anthropogen geprägtes Landschaftsbild bietet. Etwa 80 m des ursprünglichen Berges wurden bereits abgetragen. Näheres zur Geologie des Erzberges beschreibt Rothe (2010).

Exkurs 9.1 Pyritverwitterung

Eine Umweltbelastung, die sich vor allem auf die beteiligten Grundwässer auswirkt, ergibt sich beim Abbau von sulfidischen Erzen, wie z. B. dem Pyrit. Der Zustrom sauerstoffreicher Wässer in eine aufgelassene pyritführende Lagerstätte oder auch die Durchströmung von Bergbauhalden mit sauerstoffreichen Niederschlägen führt unter Mitwirkung von Mikroorganismen zur Oxidation, wobei dreiwertiges Eisen und Sulfat bei gleichzeitiger Versauerung der Wässer gebildet wird. Derartige Wässer im Einflussbereich von Erzabbau, aber auch von Braunkohlegebieten (siehe ► [Abschn. 9.7](#)) werden unter dem Begriff Acid Mine Drainage (AMD, saure Minenwässer) zusammengefasst. Umfangreiche Untersuchungen zum Thema AMD werden z. B. von Nordstrom et al. (2000) präsentiert. Die hydrochemischen Grundlagen der Pyritverwitterung sind u. a. bei Appelo und Postma (2005) dargestellt. Die Prozesse laufen unter Mitwirkung von Mikroorganismen nach folgenden Reaktionen ab: Oxidation von Sulfid (S^{-2}) zu Sulfat (S^{+6}):



Oxidation von zweiwertigem zu dreiwertigem Eisen:



Durch die Oxidationsprozesse erfolgt eine Fällung unlöslicher Eisenhydroxide, was sich in einer starken Rotfärbung der Wässer zeigt (► [Abb. 9.4](#)), gleichzeitig werden stark sulfathaltige und dabei sehr saure Wässer in die Oberflächengewässer oder den Grundwasserkörper abgegeben. Die stark sauren Wässer können überdies aus dem Gestein weitere Komponenten, vor allem Schwermetalle herauslösen und den Grund- und Oberflächengewässern zuführen.

In ► [Abb. 9.5](#) wird die Situation in einem bergmännischen Abbau dargestellt. Durch die Flutung des Grubengebäudes nach Einstellung des Abbaubetriebs und der Wasserhaltung werden sauerstoffreiche Grundwässer in die künstlichen Hohlräume im Gebirge verbracht. Unter Mitwirkung von Mikroorga-

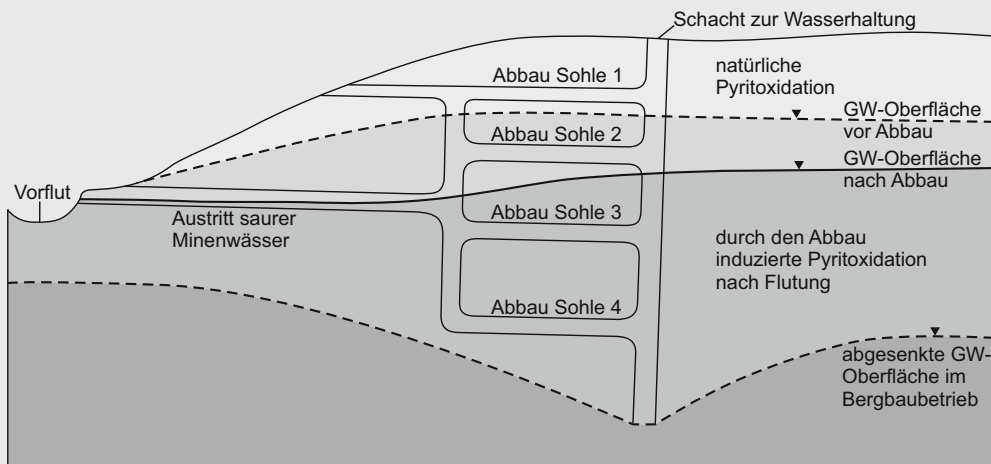
nismen kommt es zur chemischen Verwitterung der verbliebenen Erze. Die aus der Grube abfließenden Wässer sind stark sauer, sulfatreich und häufig angereichert mit Schwermetallen aus der Lagerstätte. Die gleichen chemischen Prozesse spielen sich auch in den Abraumhalden ab, die von sauerstoffreichen Niederschlagswässern durchströmt werden.

In der Praxis werden saure Minenwässer z. B. durch das Zusetzen von Kalk neutralisiert, bevor sie in die Umwelt freigesetzt werden. Weitere Maßnahmen zur Abwasserbehandlung können aufgrund hoher Schwermetall- und Sulfatkonzentrationen der Wässer erforderlich sein. Nicht nur Pyritlagerstätten, auch verschiedene sulfidische Buntmetallagerstätten (z. B. Chalkopyrit), führen zur Freisetzung saurer Minenwässer. Ein sehr berühmtes Beispiel für ein durch Bergbauabwässer belastetes Oberflächengewässer ist der Río Tinto. Dieser Fluss entwässert eine spanische Eisen- und vor allem Kupferlagerstätte, die bereits seit der Bronzezeit ausgebeutet wird. Nach diesem Fluss und dieser Lagerstätte ist auch einer der weltweit größten Rohstoffkonzerne benannt.



► [Abb. 9.4](#) Ausfällungen von Eisenhydroxiden im Bereich einer pyrithaltigen Erzlagerstätte

Exkurs 9.1 (Fortsetzung) Pyritverwitterung



■ **Abb. 9.5** Freisetzung saurer Minenwässer nach der Flutung eines aufgelassenen Erzbergbaus (in Anlehnung an Evans 1997)

Die meisten Tagebaue erfolgen, anders als beim Erzberg, in Form einer Geländeeintiefung – der Abbau findet unterhalb der umgebenden Geländeoberfläche statt. Um die Lagerstätte optimal ausbeuten und gleichzeitig die geotechnisch erforderlichen Böschungsneigungen einhalten zu können, reicht die Flächenbeanspruchung häufig weit über die eigentliche Lagerstätte hinaus. Der aktuell größte Erztagebau, eine Kupfermine, befindet sich in Utah (USA). Der 1200 m tiefe Abbaubereich beansprucht eine Fläche von 7,7 km². Dabei sind Halden und andere Manipulationsflächen noch nicht einbezogen.

Noch weit größere Flächen werden im Kohletagebau beansprucht. Aufgrund der söhlig Lagerung und der geringen Abbautiefe werden bevorzugt Braunkohlevorkommen in großen Tagebauen abgebaut. Der aktuell größte in Betrieb befindliche deutsche Braunkohletagebau liegt in Nordrhein-Westfalen und umfasst eine Fläche von ca. 40 km². Ein weiterer Ausbau dieses Tagebaus ist in Planung.

9.3 Metalle

Zu Beginn dieses Abschnitts soll nochmals auf Agricola und sein 1556 erstmals veröffentlichtes Werk


„De Re Metallica“ (Agricola 2007) Bezug genommen werden, der in der Einleitung dieses Buches zu Wort kommt und die grundsätzlichen Fragen der Umweltgeologie, hier im Bereich der Erzgewinnung, beschreibt. Die Gewinnung von Metallrohstoffen ist mit einem erheblichen Flächenverbrauch, mit großem Energiebedarf sowie mit der Freisetzung umweltgefährdender Stoffe verbunden (siehe ► Exkurs 9.1). Dies soll an den Beispielen der Gewinnung von Eisen, Buntmetallen und Gold diskutiert werden.

9.3.1 Eisen und Buntmetalle


Eisen

95 % des weltweit verwendeten Metalls ist Stahl, also eine Legierung, die zu großen Anteilen aus Eisen, zu maximal 2 % aus Kohlenstoff sowie unterschiedlichen Mengen an weiteren Metallen, wie Chrom, Mangan und Cobalt, den sogenannten Stahlveredlern, besteht. Die Erdkruste besteht im Durchschnitt zu ca. 5 % aus Eisen (Turekian und Wedepohl 1961). Abbauwürdige Lagerstätten enthalten über 30 % Eisen, können aber auch weit höhere Konzentrationen aufweisen. Einige der häufigsten Eisenerze, d. h. eisenhaltige Mineralphasen und Mineralgemenge, sind Magnetit (Fe₃O₄),

Hämatit (Fe_2O_3), Siderit (FeCO_3) und Pyrit (FeS_2). Eisenerzlagerstätten können sowohl sedimentär als auch durch magmatische und hydrothermale Prozesse gebildet werden. Dementsprechend können sie als mehr oder weniger söhligte Lagen nah an der Oberfläche auftauchen oder in Gängen und Intrusionskörpern tief in den Untergrund reichen. Eisenerze werden sowohl im Tagebau als auch bergmännisch gewonnen.

Vergleichsweise geringere Landschaftseingriffe ergeben sich aus dem bergmännischen, also untertägigen Abbau von Erzlagerstätten. Diese Methode wird dann gewählt, wenn die flächige Ausdehnung der Lagerstätte gering ist, die Anreicherung des Rohstoffs dafür in größere Tiefen reicht. Die Vererzung wird dann über Schächte und Abbausohlen erschlossen, wie sie in  Abb. 9.5 schematisch dargestellt sind.

Sowohl im Tagebau als auch im bergmännischen Abbau ist eine Bewirtschaftung nur mit gleichzeitiger Grundwasserhaltung möglich. Dazu wird die Grundwasseroberfläche durch Pumpbetrieb im Abbaubereich unter die Abbausohle abgesenkt. Natürlich bleibt diese Absenkung nicht auf den Abbaubereich beschränkt, sondern wirkt sich auf die weitere Umgebung des Abbaubiets aus. Das natürliche Grundwasserregime (Flurabstand, Fließrichtung, Interaktion mit dem Vorfluter) wird nachhaltig gestört, was sich auch auf die Grundwassernutzungen in der Umgebung des Abbaubiets auswirken kann. Erst eine Flutung des Grubengebäudes bzw. des Tagebaues nach Einstellung der Abbautätigkeiten kann zu einer Regeneration des Aquifers führen.


Neben der quantitativen Beeinträchtigung von Grundwasserkörpern kann die Erzgewinnung auch erhebliche qualitative Auswirkungen auf Grund- und Oberflächengewässer in ihrem Einflussgebiet haben, wie im  Exkurs 9.1 beispielhaft anhand von Sulfidvererzungen beschrieben wird.


Buntmetalle

Unter dem Sammelbegriff „Buntmetalle“ werden farbige Metalle und solche, die farbige Legierungen bilden, zusammengefasst. Dazu gehören unter anderem Kupfer, Blei, Zink und Cadmium. Diese Metalle kommen häufig nebeneinander in einer Lagerstätte vor. Es wird daher meist auch nicht nur

ein Metall gewonnen, sondern es werden auch die Begleitelemente, die in untergeordneter Konzentration auftreten, mit extrahiert. Ein häufiger Lagerstättentyp ist die Blei-Zink-Vererzung, die mitunter auch relevante Mengen an Kupfer und Cadmium aufweist. Daneben findet sich in den meisten Buntmetallagerstätten auch das Halbmetall Arsen sowie Edelmetalle in geringen Konzentrationen.

Zur Gewinnung der Metalle aus den Erzen, das heißt zur Reduktion und Reinigung der meist als Oxide oder Sulfide vorliegenden Metalle, werden Öfen verwendet, in denen die Metalle unter Mitwirkung von Kohlenmonoxid reduziert werden. Schachtöfen werden dazu mit Kohle und dem Erz befüllt. Das geschmolzene Metall und die Schlacke fließen getrennt voneinander ab. Zur Reduktion von Eisenerz werden Hochöfen verwendet, die kontinuierlich mit Erzen und Koks befüllt werden. Nach Aufschmelzen und Reduktion des Eisens kann das elementare Eisen neben der Schlacke im unteren Bereich des Hochofens abgelassen werden. Sulfidische Erze werden zunächst durch Rösten in Oxide überführt, bevor sie durch Reduktion in ihre elementare Form gebracht werden können. Dieser hier nur in aller Kürze dargestellte Vorgang der Verhüttung kann z. B. bei Neukirchen und Ries (2014) detaillierter nachgelesen werden.

Bei der Röstung von sulfidischen Erzen wird Schwefeldioxid (SO_2) freigesetzt. Schädliche Wirkungen dieses Gases in der Atmosphäre wurden bereits im  Kap. 2 erläutert. Neben SO_2 entstehen jedoch bei der Verhüttung weitere Rauchgase. Angelagert an Aerosolpartikel werden z. B. Blei, Cadmium und Arsen an die Atmosphäre abgegeben, sofern nicht eine entsprechende Rauchgasreinigung dies verhindert.

Während in modernen Verhüttungsanlagen die Freisetzung von kontaminierten Rauchgasen durch entsprechende Filter weitgehend vermieden werden kann, wurden derartige Umweltbelastungen bis vor einigen Jahrzehnten nicht beachtet. In der Umgebung von historischen Verhüttungsanlagen werden auch heute noch deutlich erhöhte Konzentrationen von Blei, Cadmium und Arsen im Boden und in Grundwässern festgestellt. Das Beispiel einer Bodenkontamination als Folge der Jahrhunderte dauernden Verhüttung ist in  Exkurs 9.2 dargelegt.

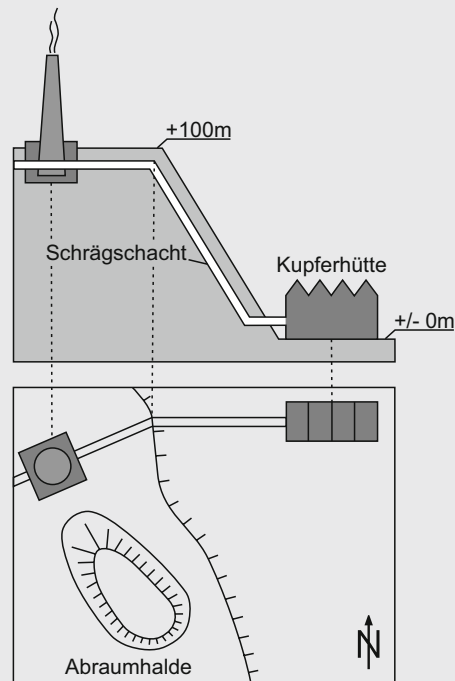
Exkurs 9.2 Fallbeispiel einer ehemaligen Verhüttungsanlage

Der Exkurs beschreibt die Umweltsituation im Bereich einer ehemaligen Kupferhütte im Salzburger Pongau am Westhang des Salzachtals. Die Region liegt innerhalb der ostalpinen Grauwackenzone, in der über Jahrhunderte zahlreiche Erzbergbaue betrieben wurden. In den 1990er Jahren wurden im Zuge von Erhebungen zur

Bodenqualität im Land Salzburg auf landwirtschaftlichen Flächen stark erhöhte Konzentrationen an Arsen, Cadmium, Quecksilber, aber auch an organischen Kohlenwasserstoffen, vor allem PAK, festgestellt. Recherchen ergaben, dass im Talraum unterhalb des kontaminierten Hangbereichs bis in die 1930er Jahre eine Kupferhütte betrieben wurde,

in der die wenige Kilometer südlich davon abgebauten Kupfererze aufbereitet wurden. Die Rauchgase wurden durch einen Schrägschacht im Hang etwa 100 m über den Talboden transportiert und hier über einen Schornstein abgeleitet, wie es in **Abb. 9.6** dargestellt ist.

■ **Abb. 9.6** Profil und Grundriss der Kupferhütte Mitterberghütten mit ihrer Rauchgasableitung zum 100 m oberhalb errichteten Schornstein



Die Hütte wurde im Jahre 1931 aufgelassen, die Gebäude inkl. Schornstein am Hang abgerissen. Die mit großen Mengen an Arsen, Quecksilber und Cadmium aus der Lagerstätte sowie mit PAK aus den Verbrennungsvorgängen kontaminierten Baurestmassen wurden auf einer Halde direkt neben dem Schornsteinfundament abgelagert. Das Fundament und der Schrägschacht wurden teilweise mit Bauschutt verfüllt.

Über die folgenden gut 60 Jahre wurden die Halde und die Fundamente von versickernden Niederschlagswässern durchströmt, wodurch es zu einer Mobilisierung der Schadstoffe und deren Transport in tiefere Bodenbereiche kam. Aufgrund der Hanglage und einer Grundmoränenbedeckung über dem gering durchlässigen Schiefer lag im Bereich von Halde und kontaminierten Böden kein zusammenhängender Grundwasserkörper

vor. Niederschläge auf der Fläche wurden relativ rasch oberflächlich abgeleitet. Erhöhte Schadstoffbelastungen im Talgrundwasserleiter wurden nicht festgestellt, da der Anteil an Hangwässern, die in diesem Bereich das Grundwasser dotieren, offenbar zu gering war, um sich hier nachhaltig und messbar auszuwirken. Als Sofortmaßnahme nach Entdeckung des Schadensfalls wurde die Bauschutthalde zunächst zugedeckt

Exkurs 9.2 (Fortsetzung) Fallbeispiel einer ehemaligen Verhüttungsanlage

und eingezäunt. Anschließend erfolgte die Räumung der Fläche unter entsprechenden Arbeitsschutzmaßnahmen. Die bis dahin noch bestehenden Fundamente, die Bauschutthalde und auch die obersten hochkontaminierten Bodenhorizonte in der näheren Umgebung der Bauschuttmassen wurden

abgetragen und als gefährliche Abfälle in eine Untertagedeponie verfrachtet. Zur Bestimmung von Sanierungszielwerten und damit zur Abgrenzung der abzutragenden Fläche, die ca. 2000 m² groß war, mussten die Hintergrundwerte in der Region herangezogen werden. Untersuchungen zeigten, dass die

Böden in der Region aufgrund der historischen Bergbau- und Verhüttungsaktivitäten generell erhöhte Arsengehalte aufweisen. Vertiefende Informationen zu dieser Altlast und ihrer Sanierung werden vom Umweltbundesamt, Wien (Umweltbundesamt 2001) zur Verfügung gestellt.

9.3.2 Edelmetalle

Unter dem Sammelbegriff „Edelmetalle“ werden besonders beständige, schwer oxidierbare Metalle zusammengefasst. Es handelt sich im Wesentlichen um die Metalle Gold, Silber und die Elemente der Platingruppe. Aber auch Kupfer und Quecksilber weisen Eigenschaften von Edelmetallen auf. Hier soll beispielhaft die Gewinnung von Gold betrachtet werden.

Die gesamte bisher von Menschen geförderte Goldmenge wird auf 160.000 t geschätzt (Neukirchen und Ries 2014). Es tritt in Seifenlagerstätten, in magmatischen Gängen oder in epithermalen Lagerstätten auf. Wirtschaftlich nutzbare Goldlagerstätten weisen Gehalte von etwa 0,5 bis 10 g t⁻¹ auf. Gold tritt meist in reiner, gediegener Form auf.

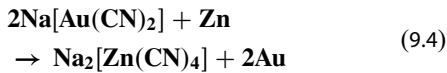
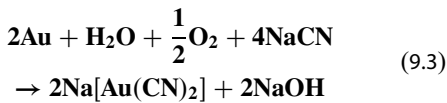
Bei der Aufbereitung von Goldvorkommen spielen dessen besondere chemisch-physikalischen Eigenschaften eine wichtige Rolle. So kann seine hohe Dichte von 17 g cm⁻³ genutzt werden, um Goldpartikel im Wasser durch Schwerentrennung von den weniger dichten Sanden oder Schluffen, in die sie eingebettet sind, zu separieren. Diese Art der Erzaufbereitung wurde unter dem Begriff des „Goldwaschens“ bekannt und kann sowohl im industriellen Maßstab als auch in sehr kleinem Umfang mit geringem Aufwand und ohne wesentliche Umweltbelastungen betrieben werden.

Die chemische Reaktivität von Gold gegenüber Quecksilber unter Bildung eines Amalgams wird ebenfalls zur Separation von Gold aus den Seifenlagerstätten genutzt. Dazu werden die goldhaltigen Schlämme mit Quecksilber vermischt und das Gold löst sich im Quecksilber auf. Es entsteht Amalgam, das sich aufgrund seiner höheren Dichte

am Grund des Gefäßes absetzt und abgelassen werden kann. Beim Erhitzen des Amalgams verdampft das Quecksilber und es bleibt Gold zurück. Sofern das verdampfende Quecksilber nicht durch Absaugung und Destillation wieder gewonnen wird, tritt es als Dampf in die Atmosphäre aus, kondensiert wieder und kontaminiert auf diese Weise Böden und Oberflächengewässer. Die toxische Wirkung des Quecksilbers auf Pflanzen, Tiere und den Menschen richtet immense Schäden in Goldabbaugebieten an. Vor allem bei kleiner, nicht industriell betriebener Goldgewinnung (z. B. Amazonien) ist dies immer noch ein großes Umwelt- und Gesundheitsproblem.

In der modernen Goldgewinnung im industriellen Maßstab wird die Cyanidlaugung eingesetzt, die die Reaktivität von Gold gegenüber Cyanidlösungen nutzt. Cyanide sind, wie im ► Kap. 2 beschrieben, Salze der Blausäure (HCN). Bei der Cyanidlaugung wird vor allem Natriumcyanid (NaCN) eingesetzt. Das Gold (aber auch andere Metalle in den Seifen) bildet in sauerstoffhaltiger NaCN-Lösung Komplexverbindungen, wird also gelöst. Durch Abfiltrieren der Schlämme nach der Metalllösung erfolgt die Trennung von den Seifen. Die Metalle werden anschließend durch Aktivkohle (Aktivkohle-Adsorptions-Verfahren) oder durch Zink (Merill-Crowe-Verfahren) aus dem Sickerwasser gewonnen.

Im Merill-Crowe-Verfahren erfolgt die Zugabe von Zink in die goldhaltige Cyanidlösung. Dies führt zu einer Fällung des Goldes bei gleichzeitiger Bildung eines Zinkkomplexes. Die Lösungs- und Fällungsreaktionen sind in den Gl. 9.3 und 9.4 beschrieben.



Die Cyanidlaugen werden in der Goldindustrie in einem Kreislaufsystem verwendet und ein Austreten von Laugen an die Umwelt in industriellen Anlagen im Regelfall vermieden. Im Fall von Unfällen oder Leckagen innerhalb der Anlagen kann es aber dennoch zu einer Freisetzung in die Umgebung kommen.

Auch die abgefilterten Schlämme stellen eine Umweltgefahr dar, da sie mit Rückständen der Cyanid-Lösung versetzt sind. Es gibt verschiedene industriell eingesetzte Verfahren zur Entfernung von Cyaniden, wie z. B. die Oxidation durch alkalische Chlorierung, die Oxidation mit Schwefeldioxid oder die Adsorption an Aktivkohle. Auch die Rückgewinnung der Cyanide aus den Rückständen und deren Wiedereinbringung in den Produktionsprozess erlangt immer größere Bedeutung.

Eine detaillierte Beschreibung der Cyanidlaugung, inklusive der technischen Umsetzung und der chemischen Prozesse bis hin zur Cyanidentfernung bzw. Rückgewinnung aus den Filtrerrückständen findet sich bei Wippermann et al. (2004).

9.4 Evaporite

Zu den Evaporitlagerstätten zählen Anreicherungen von wasserlöslichen Mineralen, die durch Verdunstung entstanden sind. Sie können sowohl im marinen als auch im terrestrischen Umfeld entstehen, wenn die potenzielle Verdunstung in einem Gebiet höher ist als der Niederschlag bzw. der Frischwasserzufluss. Bestehende Wasserflächen trocknen aus, zurück bleiben die Inhaltsstoffe der Wässer in Form von Fällungsprodukten.

Der Prozess von Lösung und Fällung in bzw. aus Wasser erfolgt nach thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten. Jede wasserlösliche Mineralphase kann bis zu einer bestimmten Konzentration im

Wasser gelöst, d. h. in ihre Kationen und Anionen zerlegt werden. Die unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen maximal mögliche Ionenkonzentration (besser Ionenaktivität) dieser Mineralphase wird mittels deren Dissoziationskonstante quantifiziert. Liegen diese maximalen Ionenaktivitäten im Wasser vor, herrscht für die Mineralphase Sättigungskonzentration und es können keine weiteren Minerale dieser Phase mehr gelöst werden. Das Wasser steht dann im Gleichgewicht mit dem umgebenden Gestein. Kommt es nun zur Verdunstung von Wasser ohne gleichzeitige Zufuhr von weniger mineralisiertem Frischwasser, so erhöht sich die Ionenaktivität im verbleibenden Wasser, das damit übersättigt wird. Die Folge ist eine Fällung des übersättigt vorliegenden Minerals.

Auf diese Weise wurden in der Erdgeschichte weltweit mächtige Evaporitlagerstätten gebildet. In Norddeutschland, Hessen und Thüringen zeugen die mächtigen Zechsteinablagerungen davon. In Österreich bildet das Haselgebirge (Oberperm) als Basis der Nördlichen Kalkalpen einen markanten Evaporithorizont.

Zu den Evaporiten gehören neben Halit (oder Steinsalz) (NaCl) auch Kalisalze (z. B. Sylvit KCl) und Polyhalit ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Anhydrit (CaSO_4) sowie letztlich auch Kalzit (CaCO_3) und Dolomit ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$). In den großen marinen Salzlagerstätten beobachtet man eine Ablagerungsfolge, die im tiefsten Bereich Kalzit und Dolomit, darüber Gips und Anhydrit, dann Halit und schließlich im obersten Bereich Kalisalze zeigt. Diese Abfolge kann sich je nach Geschichte des Ablagerungsraums vielfach wiederholen. Aufgrund der Ablagerungsbedingungen in Stillwasserbereichen sind Evaporite häufig mit Tonlagen vergesellschaftet.

Der Grund für die beschriebene Abfolge bestimmter Mineralphasen liegt in den oben beschriebenen Sättigungskonzentrationen bzw. Dissoziationskonstanten, die für jede Mineralphase unterschiedlich sind. So wird Übersättigung an Kalzit schon bei vergleichsweise geringen Konzentrationen von Ca^{2+} und CO_3^{2-} in der Lösung erreicht, während NaCl in wesentlich höheren Mengen im Wasser gelöst sein kann, bevor es zu Ausfällungen von Halit kommt. Vertiefende Informationen über thermodynamische Gleichgewichte und die daraus

resultierenden Lösungs- und Fällungsreaktionen können z. B. bei Appelo und Postma (2005) oder Merkel und Planer-Friedrich (2008) nachgelesen werden. Detailliertere Einblicke in die Genese von Evaporitlagerstätten bietet Pohl (2005).

Die Wasserlöslichkeit der Minerale ist nicht nur der Grund für die Entstehung der Lagerstätten, diese Eigenschaft kann und wird auch zur Rohstoffgewinnung direkt genutzt. Vor allem Salzlagerstätten werden häufig durch In-situ-Laugung abgebaut. Dazu wird mit relativ geringen Eingriffen durch Bohrungen oder kleinvolumige Stollen Wasser in den Untergrund eingebracht, das Salz gelöst und die Sole, die gesättigte Salzlösung, wieder an die Oberfläche transportiert. Es werden auf diese Weise große Hohlräume aus dem salzföhrnden Gebirge herausgelöst.

Gips und Anhydrit werden meist bergmännisch abgebaut, indem die Stollen durch Sprengung oder mit mechanischen Methoden vorgetrieben werden. Die Besonderheit von Anhydrit ist, wie sich aus seinem Namen bereits ableiten lässt, dass er ein wasserfreier Gips ist, der aber das Potenzial hat, Wasser aufzunehmen und sich damit in Gips umzuwandeln. Kommt Anhydrit mit Wasser in Kontakt, kommt es zur Gipsbildung unter einem Volumenzuwachs von bis zu 60 %.

Unkontrollierter Zutritt von Oberflächenwässern oder oberflächennahen Grundwässern über künstlich geschaffene Wegsamkeiten, wie Bergbaustollen, ist aus umweltgeologischer aber auch aus geotechnischer Sicht eines der wesentlichen Probleme im Zusammenhang mit Evaporitlagerstätten. Sowohl die unkontrollierte Lösung von Salz oder Gips durch eindringende, wenig mineralisierte Oberflächenwässer, als auch die Volumenzunahme von Anhydrit bei der Wasseraufnahme können sich bis zur Geländeoberfläche fortpflanzen und zu Tagbrüchen oder Geländehebungen föhren. Derartige Probleme treten z. B. im Bereich aufgelassener Stollenanlagen auf, deren Abdichtung zur Oberfläche hin nicht ausreichend sichergestellt wurde.

Neben der Auslaugung und einer möglichen Destabilisierung des Gebirges föhrt eine permanente, durch anthropogene Aktivitäten wie den Bergbau initiierte Durchströmung einer Evaporitlagerstätte jedoch auch zu Beeinträchtigungen der Wasserqualität im Abstrom der Lagerstätte. Halit-

oder gipsgesättigte Wässer treten aus dem Grubenbereich in den Grundwasserkörper oder einen Vorfluter aus und erhöhen dort die Gesamtmineralisation. Je nach Mischungsverhältnis kann ein derartig beeinflusstes Gewässer nachhaltig ökologisch geschädigt werden. Grundwässer, die auf diese Weise beeinflusst werden, können ab einer elektrischen Leitfähigkeit von $2790 \mu\text{S cm}^{-1}$ (TrinkwV 2011) oder ca. 1800 mg gelöster Ionen pro Liter Wasser nicht mehr als Trinkwasser genutzt werden. Zum Vergleich hat unbeeinflusstes Grundwasser je nach Aquiferbeschaffenheit eine Gesamtmineralisation im Bereich von 60 bis ungefähr 400 mg l^{-1} , Meerwasser bis zu 38.000 mg l^{-1} gelöste Ionen, Salzssole mehr als 65.000 mg l^{-1} . Der Vergleich zeigt, dass bei einem Wasseraustritt aus einer Salzlagerstätte in einen Grundwasserkörper der gesundheitsrelevante Trinkwassergrenzwert rasch überschritten werden kann.

Um mögliche negative Langzeitentwicklungen abschätzen und ihnen entgegenwirken zu können, werden Evaporitlagerstätten nach deren Schließung auf ihre Durchströmungssituation hin beurteilt. Ein Beispiel dafür wird von Hilberg et al. (2014) für einen österreichischen Gipsbergbau beschrieben.

9.5 Phosphat

Stellvertretend für viele bedeutende Industrieminerale soll an dieser Stelle der Rohstoff Phosphat thematisiert werden. Phosphat ist neben Stickstoff und Kalium der wichtigste Pflanzennährstoff. Etwa 95 % der weltweit abgebauten Phosphate werden zur Produktion von Düngemitteln verwendet.

Phosphatlagerstätten bilden sich vornehmlich im marinen Flachwassermilieu. Sie werden entweder im Zuge biogener Sedimentation im Schelfbereich gebildet oder als Verwitterungsmaterial in die Mündungsbereiche von Flüssen transportiert und küstennah sedimentiert. Etwa 90 % der Weltreserven an Phosphat befinden sich in derartigen Ablagerungsräumen und sind auf diese Genese zurückzuführen. Von großer regionaler Bedeutung sind aber auch Guanoablagerungen, also große Mengen an Vogelkot. So war der Export von Phosphat aus Guano auf der Pazifikinsel Nauru bis zu seiner Erschöpfung etwa zur Jahrtausendwende die Haupt-

einnahmequelle der ca. 10.000 Inselbewohner. Eher selten können Phosphatlagerstätten auch in Karbonatiten, karbonatischen Ergussgesteinen, auftreten.

Das Hauptmineral für Phosphorlagerstätten ist Apatit, dessen Zusammensetzung sehr variabel sein kann. Im Mineral $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ (Fluorapatit) kann Kalzium durch Mangan, Strontium, Natrium, Magnesium oder Uran ersetzt sein. Statt Fluor kann eine OH-Gruppe oder Chlor vorkommen und Phosphat kann durch Karbonat, Silikat oder Sulfat ersetzt werden. Abbauwürdige Lagerstätten enthalten 15 bis 30 % Phosphat. Häufig liegen Beimengungen von Schwermetallen, wie Cadmium, Chrom, Blei und Quecksilber oder von Arsen vor, deren Ursprung mitabgelagerte organische Substanzen oder Pyrit sein kann. Da die Abtrennung der Schwermetalle aufwändig ist, werden Lagerstätten mit nur geringen derartigen Beimengungen bevorzugt abgebaut.

Phosphat wirkt als Bestandteil von Düngemitteln auf die Fähigkeit von Pflanzen, Luftstickstoff zu fixieren (siehe auch ► [Kap. 2](#)) und ist deshalb für die globale Nahrungsmittelproduktion als alternativlos zu betrachten. Der Dünger wird als Kaliumhydrogenphosphat oder Ammoniumphosphat auf die Felder aufgebracht, wo ein großer Teil in wasserunlöslicher Form im Boden fixiert wird und daher nicht pflanzenverfügbar ist. Nur etwa 20 % des Phosphatdüngers wird von Pflanzen aufgenommen. Die restlichen Mengen tragen zur Phosphatbelastung in den Böden, im Grundwasser und in Oberflächenwässern bei.

Auch für den Rohstoff Phosphat gilt, dass die Ressourcen endlich sind. Abgesehen von Guano als aktuell abbauwürdige Phosphatquelle erfolgt in historischen Zeiträumen keine Neubildung des Rohstoffes. Auch die Guanoreserven wurden, wie das Beispiel Nauru zeigt, in deutlich kürzerer Zeit verbraucht, als sie nachgebildet werden können.

Die Umwandlung von Ressourcen zu Reserven, wie sie infolge einer absehbaren Verknappung des Rohstoffs künftig auch beim Phosphat erfolgen wird, wird sich in diesem Fall zunächst auf die Qualität der Lagerstätten auswirken. Es werden künftig vermehrt solche Lagerstätten ausgebeutet, die, wie oben erläutert, erhöhte Schwermetallkonzentrationen aufweisen. Die Aufbereitung wird daher nicht nur aufwändiger und teurer werden, sondern zwangsläufig auch mit höheren Umwelt-

belastungen durch die Freisetzung der Rückstände einhergehen.

In Hinblick auf die Tatsache, dass Phosphat für die Welternährung unverzichtbar ist, dass nur ca. 20 % der Produktion tatsächlich wirksam werden und dass die maximale Phosphatförderung nach verschiedensten aktuellen Studien irgendwann zwischen 2034 und 2048 erreicht sein wird, müssen zwingend alternative Gewinnungs- und Nutzungsverfahren entwickelt werden. Abwässer und Schlämme aus Kläranlagen enthalten große Mengen an Phosphor, die bisher ungenutzt bleiben. Ein Ansatz für die Zukunft wäre es, diese zukünftig für die Düngemittelproduktion zu verwerten.

9.6 Massenrohstoffe

Als Massenrohstoffe werden mineralische Rohstoffe bezeichnet, die in großen Mengen vorkommen und auch in großen Mengen für die industrielle Produktion oder die Bauindustrie benötigt werden. Eine Anreicherung, wie sie für die bisher betrachteten Rohstoffe beschrieben wurde, ist hier nicht erforderlich, da sie fast überall verfügbar sind. Die Massenrohstoffe werden auch unter dem Begriff „Steine und Erden“ zusammengefasst und umfassen Lockergesteine wie Kies, Sand, Ton aber auch die große Bandbreite an Bausteinen, wie Kalk und Marmor, Granit, Gneis, Sandsteine oder Schiefer.

Kies, Sand und Ton können überall dort in großen Mengen gewonnen werden, wo entsprechende Sedimentationsprozesse (fluviatil, limnisch, äolisch) stattgefunden haben. Je nach Liefergebiet der Sedimente können die Lockergesteine unterschiedliche mineralogische und petrographische Zusammensetzungen haben. Je nach Transportprozess ergeben sich unterschiedliche Korngrößenverteilungen und Kornformen.

Bausteine werden aus dem anstehenden Festgestein durch Sprengen oder Reißen herausgelöst und anschließend in die gewünschte Größe und Form gebracht. Die Verfügbarkeit bestimmter Bausteine ist also direkt mit der geologischen Situation verknüpft. Aus den in einer Region häufig verwendeten Bausteinen lassen sich Rückschlüsse über die Geologie der Gegend ziehen. Aufgrund der teuren und aufwändigen Transporte von Bausteinen wur-

den diese früher meist im Nahbereich des Abbaus eingesetzt und nur in Sonderfällen über größere Distanzen transportiert. Für moderne Bauten ist diese Regel nur mehr eingeschränkt gültig, da aufgrund der weltweit großen Unterschiede in den Produktionskosten trotz weiter Transportwege die Verwendung von beispielsweise asiatischen Bausteinen in Europa kostengünstiger sein kann, als die Nutzung regional verfügbarer Materialien.

Da die Massenrohstoffe immer oberflächennah zu finden sind, erfolgt ihr Abbau in den allermeisten Fällen im Tagebau in Steinbrüchen oder in Kies-, Sand- oder Tongruben.

Für den Betrieb von Steinbrüchen und Gruben zur Gewinnung von Lockergestein gelten einige der Feststellungen, die im ► **Abschn. 9.2** getroffen wurden. Derartige Gewinnungsanlagen sind mit einem erheblichen Eingriff in die Landschaft verbunden. Betroffen sind sowohl Naturräume als auch Kulturräume. Neben dem eigentlichen Abbaubereich müssen Betriebsflächen zur Gesteinsaufbereitung, Lagerung und Verladung geschaffen werden, einschließlich der Zufahrten zum Betriebsgelände. Findet der Abbau in dicht besiedelten Gebieten statt, ist eine Beeinträchtigung der Siedlungsräume durch Lärm und Staub unvermeidbar. Die Neuinbetriebnahme von Steinbrüchen ist daher häufig von massiven Widerständen der Anrainer begleitet.

In weniger dicht besiedelten Gebieten werden dagegen eher natürliche Lebensräume und Ökosysteme beeinträchtigt. Häufig müssen z. B. Waldflächen gerodet werden, was unter anderem zu einer Beeinträchtigung des Wasserhaushalts im betroffenen Gebiet führen kann. Niederschlagswässer, die im unberührten Zustand im Waldboden versickern und langsam zur Grundwasserneubildung beitragen, werden auf den freigelegten Felsoberflächen direkt oberflächlich abgeführt und strömen rasch dem Vorfluter zu. Betrachtet man z. B. **Abb. 9.3**, zeigt sich das völlig andersartige Erscheinungsbild des Steinbruchgebiets am Erzberg gegenüber seiner dicht bewaldeten Umgebung.

Die geschilderten Eingriffe zugunsten eines Steinbruchs lassen sich generell nicht vermeiden. Umso mehr Bedeutung hat die Rekultivierung einer solchen Eingriffsfläche nach dem Ende einer Abbaumaßnahme. Dazu muss z. B. eine unnatürliche Geländeoberfläche, etwa ein treppenförmiger

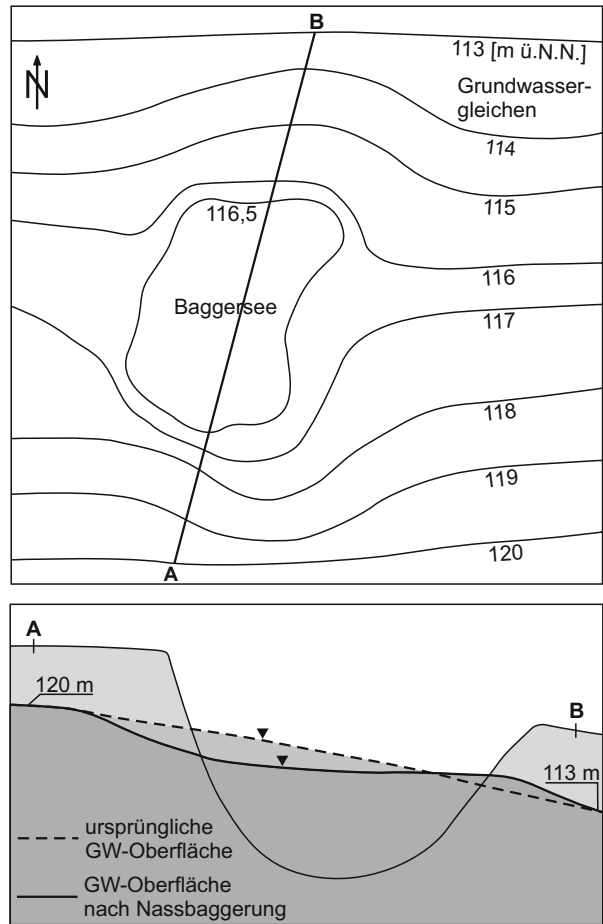
ger Abbau, nach Einstellung des Betriebs durch gezielte Sprengungen ein natürlicheres, weniger regelmäßig-künstliches Relief bekommen. Eine Begrünung kann je nach Standortverhältnissen im Idealfall durch natürliche Wiederansiedelung der standortüblichen Vegetation erfolgen. Wo dies nicht möglich ist bzw. wo rasch erosionshemmende Maßnahmen getroffen werden müssen, werden Saatmischungen und Dünger aufgebracht, um die Rekultivierung zu beschleunigen.

Ein spezielles umweltgeologisches Problem stellen Kies- oder Sandgruben im Grundwasserschwankungsbereich, sogenannte Nassbaggerungen, dar. Besonders ergiebige und leicht abbaubare Kies- und Sandvorkommen finden sich in den Flusstälern, in denen über lange Zeiträume fluviatile Sedimentation stattfand. Die Schichtpakete bilden in solchen Landschaften gleichzeitig meist auch ergiebige Grundwasserleiter, die in direkter Interaktion mit dem Oberflächengewässer stehen. Die Grundwasseroberfläche liegt im Bereich des Flusswasserspiegels und damit häufig nur wenige Meter unter Gelände. Um dennoch wirtschaftlich ausreichende Mengen an Lockergestein aus einer Kies- oder Sandgrube entnehmen zu können, erfolgt häufig ein Abbau in Tiefen, die deutlich unter die Grundwasseroberfläche reichen. Dabei kann durch Wasserhaltung das Grundwasser zunächst flächig abgesenkt und anschließend trocken abgebaut werden. Da eine großflächige Wasserhaltung mit hohem technischem Aufwand verbunden ist und auch weit über die Abgrenzung des Abbaus hinaus Auswirkungen auf die Grundwassersituation hat, wird häufig die Methode der Nassbaggerung gewählt. Dabei verzichtet man auf eine Wasserhaltung und entnimmt die Massenrohstoffe direkt aus den grundwasserführenden Horizonten.

Durch die Nassbaggerung wird ein großflächiger Grundwasseraufschluss geschaffen, was Auswirkungen auf den gesamten Wasserhaushalt einer Region haben kann. So erhöht sich durch eine neu geschaffene große Wasserfläche z. B. die Luftfeuchtigkeit der Region aufgrund der stärkeren Verdunstung. Je nach Standortbedingungen kann es häufiger zu Nebelbildung kommen.

Vermutlich bedeutender sind aber die Auswirkungen, die ein Baggersee auf die Grundwassersit-

■ **Abb. 9.7** Grundwasserverhältnisse im Einflussbereich eines Baggersees



situation hat. Der Hohlraum, den der Baggersee ausfüllt, stellt aus hydrogeologischer Sicht eine Zone deutlich erhöhter Durchlässigkeit im Vergleich zur Umgebung dar. Im Anstrom kommt es daher zu einer Grundwasserabsenkung, im Abstrom zu einer Aufhöhung der Grundwasseroberfläche. ■ **Abbildung 9.7** zeigt einen Grundwassergleichenplan und den zugehörigen Profilschnitt durch einen Baggersee mit Bezug zur Grundwasseroberfläche. Im Schnitt wird die ursprüngliche Grundwasseroberfläche der durch die Nassbaggerung beeinflussten Grundwassersituation gegenübergestellt.

Neben der Veränderung des Grundwassergefälles kann die Verdunstung über der freien Wasseroberfläche mit einer Entnahme aus dem Grundwasserkörper gleichgestellt werden. In Summe kann eine zusätzliche Absenkung des Grundwassers die Folge sein.

Die Veränderungen der Grundwasseroberfläche aufgrund von Nassbaggerungen können im Bereich von Dezimetern bis Metern liegen. Ein wichtiger Aspekt ist auch die Orientierung der Nassbaggerung in Bezug zur Grundwasserfließrichtung. Wohlrab et al. (1995) beschreiben die Auswirkungen von Baggerseen auf die Grundwasserhöhen in Abhängigkeit von der Umrissform des Sees und der Grundwasserfließrichtung.

Von großer Bedeutung bei der Beurteilung der Umweltauswirkungen von Nassbaggerungen sind aber auch qualitative Aspekte. Während das umgebende Grundwasser durch einige Meter mächtige Schichten gegenüber Einflüssen von der Oberfläche geschützt ist, liegt die Grundwasseroberfläche in einem Baggersee offen. Es können hier z. B. auf direktem Weg Schadstoffe, wie Schmiermittel oder Treibstoffe aus Baumaschinen, in das Grundwasser

eindringen. Aber selbst wenn ein solcher Zufluss von Schadstoffen durch entsprechende Schutzmaßnahmen vermieden wird, kommt es zu Veränderungen der Grundwasserqualität. Sauerstoffreiche, gering mineralisierte Niederschläge, die sich in ihrem Chemismus stark von den Grundwässern unterscheiden, treffen ungefiltert auf die Wasseroberfläche auf und verdünnen das wieder in das Grundwasser eintretende Baggerseewasser. Jahreszeitliche Temperaturschwankungen wirken sich direkt auf den Grundwasserleiter aus. Vertiefende Überlegungen zu den Auswirkungen von Baggerseen auf die Qualität von Grund- und Oberflächenwässern stellen Hofmann und Müllegger (2011) an.

Bis vor wenigen Jahrzehnten war es außerdem üblich, die ausgebeuteten Kiesgruben mit Material zu verfüllen, dessen Eignung zum Einbau in den Grundwasserleiter nicht immer gegeben war. Im schlimmsten Fall wurden die Gruben mit Siedlungsabfällen verfüllt und anschließend rekultiviert. Derartige vom Grundwasser durchströmte Müllablagerungen werden heute als Verdachtsflächen klassifiziert und müssen aufgrund ihres Schadstoff- und Gefährdungspotenzials in vielen Fällen als Altlasten eingestuft und saniert werden (siehe ► Kap. 8).

9.7 Energierohstoffe

Fossile Energierohstoffe decken aktuell ca. 86 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs (IEA 2014). Zu dieser Rohstoffgruppe zählen Kohle (Stein- oder Braunkohle), Erdöl und Erdgas sowie Uran, das aktuell mit rund 4 % an der globalen Primärenergieversorgung beteiligt ist. Auch die Erdwärme, derzeit global betrachtet als Energieträger noch von untergeordneter Bedeutung, wird häufig als fossile Energiequelle genannt, da sie aus der Frühphase der Erde stammt bzw. in weit zurückliegenden Prozessen freigesetzt wurde. Da aber noch immer bedeutende exotherme Vorgänge in der Lithosphäre und darunter stattfinden, die weiterhin Energie liefern, kann die Geothermie auch als erneuerbarer Energieträger angesehen werden. Wir behandeln das Thema Geothermie daher im ► Kap. 11. Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit der Gewinnung und Nutzung der fossilen Kohlenwasserstoffe. Das umfassende und vielschichtige

Thema Kernenergie und Themen rund um den Uranbergbau werden in diesem Buch nicht aufgegriffen.

Die Verteilung zwischen den fossilen Energieträgern Kohle, Erdöl und Erdgas hat sich im Verlauf der letzten einhundert Jahre massiv verändert. Während zu Beginn des 20. Jahrhunderts Kohle noch die absolut dominierende fossile Energiequelle war, werden heute 32 % der Primärenergie durch Erdöl gedeckt, 21 % durch Erdgas und nur mehr 29 % durch Stein- oder Braunkohle.

Der wesentliche Nachteil fossiler Energieträger gegenüber erneuerbaren Energiequellen ist die große Differenz zwischen der Bildungsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit, mit der sie aktuell und in der jüngeren Vergangenheit abgebaut und verbraucht wurden. Eine nachhaltige Bewirtschaftung ist, wie bei allen in diesem Kapitel bereits beschriebenen Rohstoffen, daher generell nicht möglich. Unabhängig von den derzeitigen Prognosemodellen und den mehr oder weniger fundierten Abschätzungen der noch verfügbaren Erdöl-, Erdgas- und Kohlemengen werden die Reserven früher oder später erschöpft sein, auch wenn die Lebensdauer dieser Rohstoffe durch neue Technologien und die Erschließung neuartiger Lagerstätten immer wieder verlängert werden kann.

Der zweite große Nachteil der Nutzung fossiler Kohlenwasserstoffe als Energielieferanten ist der mit ihrer Verbrennung verbundene Ausstoß von Kohlendioxid (CO_2) und weiterer in den fossilen Kohlenwasserstoffen langfristig gebundener Substanzen. Wie im ► Kap. 2 beschrieben, stellt der CO_2 -Ausstoß durch Verbrennung fossiler Kohlenwasserstoffe einen Eingriff in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf dar (► Abb. 2.2). Die globalen Folgen dieser Veränderungen in Form des Klimawandels stehen inzwischen außer Streit.

Neben der Nutzung ist aber auch die Gewinnung fossiler Kohlenwasserstoffe nicht frei von umweltgeologisch relevanten Problemen, was im Folgenden anhand einiger Beispiele gezeigt werden soll.

Kohle

Stein- und Braunkohle werden sowohl bergmännisch als auch im Tagebau gewonnen. Die mit dem Tagebau generell verbundenen Nachteile der Land-

schaftsbelastung wurden in diesem Kapitel bereits an anderer Stelle thematisiert. Im bergmännischen Kohlebergbau stellen die erforderlichen Wasserhaltungsmaßnahmen sowie die Abraumhalden die wesentlichen Umweltbeeinträchtigungen dar. Saure Minenwässer, wie sie im Zusammenhang mit Erzlagerstätten auftreten können (siehe ► [Abschn. 9.3](#)), bilden sich ebenso in gefluteten Kohlebergwerken, im Bereich von Abraumhalden sowie in den Restseen der Tagebaue. Auch hier ist die Oxidation von Sulfiden für die Bildung sehr saurer, sulfatreicher Wässer verantwortlich. AMD ist daher auch bei der Kohlegewinnung ein umweltrelevantes Problem, dem mit Maßnahmen zum Schutz von Grund- und Oberflächengewässern begegnet werden muss.

Ein globales wirtschaftliches als auch ökologisches Problem stellen Brände in Kohlelagerstätten dar. Sie sind weltweit im Bereich der großen Kohlegebiete verbreitet und setzen erhebliche Mengen an klimawirksamen Gasen (vor allem CO_2 , SO_2 , CH_4) und Feinstäuben in die Atmosphäre frei. Kohlebrand entsteht durch spontane Selbstentzündung bei der Oxidation in den Kohleflözen oder Abraumhalden. Der exotherme Vorgang der Kohlenstoffoxidation führt zu einem Temperaturanstieg, der, sofern die Wärmeenergie aus den Gruben oder Halden nicht abgeführt werden kann, schließlich zur Entzündung führt. In vielen Fällen ist aber auch der unvorsichtige Umgang mit Sprengmitteln oder bei Schweißarbeiten in Kohlegruben für die Entstehung von Kohlebränden verantwortlich. Kohlebrände zu löschen ist aufwändig und langwierig. Die Ansätze dazu zielen einerseits auf das Unterbrechen der Sauerstoffzufuhr, die Kühlung des brennenden Bereichs durch Wasserzufuhr sowie die Errichtung von Barrieren zwischen brennenden und noch nicht brennenden Kohlen, z. B. durch Injektionen in das Grubengebäude.

Erdöl und Erdgas

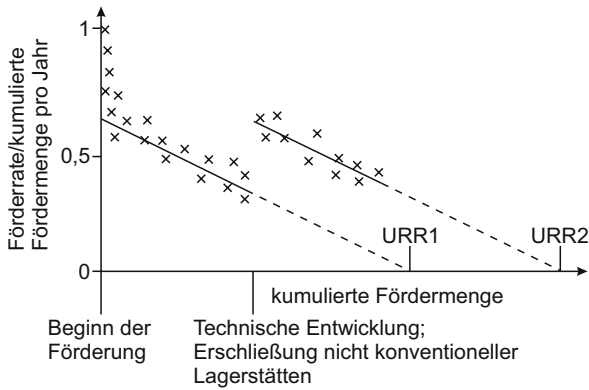
Eine Betrachtung der Erdöl- und Erdgasressourcen, Reserven und der kumulierten Förderung zeigt, dass z. B. in Nordamerika bereits deutlich mehr als die Hälfte der konventionellen Kohlenwasserstoffvorkommen verbraucht worden sind (Kümpel 2011). Weltweit entsprechen die Ölreserven etwa den bisher geförderten Ölmengen. Bereits in den 1950er Jahren wurde vom amerikanischen

Erdölexperten M. K. Hubbert der Begriff des „Peak Oil“ (Ölfördermaximum) geprägt. Der Ansatz geht davon aus, dass die Ölförderung bereits deutlich vor der Erschöpfung der Reserven zurückgehen wird. Das Peak Oil-Konzept berücksichtigt zwei wesentliche Aspekte der Rohstoffwirtschaft:

- Die Vorkommen nicht erneuerbare Rohstoffe sind limitiert und zwangsläufig irgendwann aufgebraucht.
- Die leicht erreichbaren Lagerstätten werden zuerst ausgebeutet. Mit zunehmender Gesamtfördermenge nimmt der Aufwand zur Gewinnung der Rohstoffe zu, die Förderraten nehmen daher ab. Es kommt ab einem bestimmten Zeitpunkt zu einer maximalen Förderrate, dem Peak, danach geht die Förderung des Rohstoffes trotz noch vorhandener Reserven zurück.

Um aus dieser Erkenntnis zu einer Prognose über die Reichweite der Kohlenwasserstoffreserven zu kommen, werden historische Förderraten den kumulativen Fördermengen zum jeweiligen Zeitpunkt gegenübergestellt. Es ergibt sich eine annähernd lineare Regression, die extrapoliert für zukünftige Fördermengen und dazugehörige Förderraten einen Wert für die maximal förderbaren Ressourcen (URR) darstellt. Das Hubbert-Modell bietet in vielen Fällen eine gute Abschätzung über die künftige Entwicklung anderer nicht erneuerbarer Rohstoffe. Die historische Betrachtung kann jedoch letztendlich auch nicht alle zukünftigen Einflussfaktoren berücksichtigen. So wurde das 1974 von Hubbert prognostizierte Erreichen des Peak Oil für 1995 nicht festgestellt – unter anderem auch deshalb, weil neue Technologien bzw. die Erschließung nicht konventioneller Kohlenwasserstofflagerstätten sich natürlich nicht anhand historischer Betrachtungen voraussagen lassen.

In [Abb. 9.8](#) ist die Entwicklung des URR unter dem Einfluss neuer Technologien anhand des von Hubbert entwickelten Linearisierungsdiagramms für einen beliebigen Rohstoff schematisch dargestellt. Neue Entwicklungen führen zu einer Erhöhung der Reichweite eines Rohstoffs, da durch sie die Förderrate in Bezug auf die Gesamtfördermenge in nicht vorhersehbarer Weise angehoben wird. Die Unsicherheit in Bezug auf die Prognosen künftiger



■ **Abb. 9.8** Linearisierungsdiagramm nach Hubbert (in Anlehnung an Bardi 2013). Auf der Y-Achse ist das Verhältnis zwischen den erfassten jährlichen Fördermengen und der kumulierten Gesamtfördermenge eines beliebigen Rohstoffs dargestellt. Dieser Quotient wird der kumulierten Fördermenge auf der x-Achse gegenübergestellt. Es ergibt sich eine Regressionsgerade, die, in die Zukunft extrapoliert, die maximal förderbaren Ressourcen (URR) eines Rohstoffs angibt. Neue Technologien oder Lagerstättentypen, wie die off-shore-Förderung oder die Erschließung von Schiefergas führen zu einer Erhöhung der jährlichen Fördermengen, versetzen damit die Regressionsgerade und erhöhen die URR

Technologieentwicklungen ist auch ein wesentlicher Grund dafür, dass das Konzept „Peak Oil“ unter Rohstoffexperten stark umstritten ist. Es wird von einigen Rohstoffexperten mit der Begründung der immer weiter entwickelbaren Technologien sogar die Ausgangsthese der „Endlichkeit“ fossiler Rohstoffe in Abrede gestellt.

Auch wenn die begrenzte Verfügbarkeit der Kohlenwasserstoffreserven vor allem von Ölkonzernen bestritten wird, ist es dennoch eine Tatsache, dass im vergangenen Jahrhundert die leicht zu fördernden Öl- und Gasreserven der Erde weitgehend ausgeschöpft wurden. Die Erdöl- und Erdgasproduzenten müssen auf immer schwerer erreichbare Vorkommen zurückgreifen, um Ressourcen durch neue verbesserte Technologien in Reserven umzuwandeln. Die mit erheblich aufwändigeren Methoden zu gewinnenden und mit deutlich größeren Umweltrisiken belasteten sogenannten nicht konventionellen Öl- und Gaslagerstätten sollen in der Zukunft die Versorgung mit fossilen Brennstoffen sicherstellen.

Nicht konventionelle Kohlenwasserstofflagerstätten

Unter dem Begriff der nicht konventionellen Kohlenwasserstofflagerstätten werden solche zusammengefasst, die nicht in den leicht abbaubaren Erdöl- und Erdgasfallen unter Landoberflächen gebunden sind. Ihre Erschließung ist generell mit höherem Aufwand und höheren Kosten, oft auch mit größeren Umweltrisiken verbunden. Neben den Tiefseelagerstätten und potenziellen Abbaugebieten in den Polarregionen als speziellen Entnahmegebieten, gehören auch spezielle Formen der Koh-

lenwasserstoffanreicherung im Untergrund zu den nicht konventionellen Lagerstätten. Eine eindeutig definierte Abgrenzung zu den konventionellen Lagerstätten existiert nicht. Im Folgenden sollen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einige Typen nicht konventioneller Lagerstätten und ihre potenziellen Umweltauswirkungen diskutiert werden.

Technologien zur Förderung untermeerischer Vorkommen in den küstennahen Schelfgebieten (off-shore-Förderung) wurden bereits vor mehreren Jahrzehnten entwickelt. Im Laufe der Zeit wurde die off-shore-Förderung in immer tiefere Gewässer verlegt. Neben Beeinträchtigungen der sensiblen küstennahen Lebensräume, erwachsen aus der off-shore-Förderung vor allem dann Probleme, wenn es zu technischen Gebrechen an den Bohr- oder Förderanlagen kommt, die in den tiefen Meeresgebieten nur schwer kontrolliert werden können. Ein Beispiel hierfür ist der bekannte Ölunfall, der sich im Golf von Mexiko im Jahr 2010 ereignet hat. Bei einer Explorationsbohrung in 1500 m Wassertiefe kam es zum unkontrollierten Austritt von Erdöl und Gasen („blowout“), verbunden mit Explosionen, die kurze Zeit später zum Sinken der Bohrplattform „Deepwater Horizon“ führten. Aus dem abgeknickten Steigrohr der Bohrung traten dann über fast drei Monate unter hohem Druck große Mengen an Öl aus. Das gebrochene Steigrohr konnte aufgrund der großen Wassertiefe nur sehr schwer wieder verschlossen werden. Dieses Ereignis gilt als die schwerste Umweltkatastrophe in der Geschichte der Erdölindustrie.

Die Polarregionen waren bisher schwer zugänglich und sind daher von anthropogenen Einflüssen weitgehend verschont geblieben. Die

globale Erwärmung führt jedoch derzeit zu Erleichterungen hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit von Explorationsvorhaben in Polarregionen, so dass die Erschließung polnaher Kohlenwasserstofflagerstätten immer mehr ins Interesse der Erdölkonzerne rückt. Die Folgen derartiger Eingriffe in die hochsensiblen Ökosysteme sind schwer abschätzbar.

Erdöl und Erdgas können auch in anderen geologischen Settings als den klassischen Kohlenwasserstofffallen auftreten. Die Begriffe Ölsand, Ölschiefer, Flözgas, Gashydrat und Schiefergas beschreiben jeweils ganz unterschiedliche Vorkommen nicht konventioneller Kohlenwasserstoffe. Sie können sehr oberflächennah auftreten und im Tagebau abbaubar sein oder werden aus großen Tiefen mit erheblichem technischem Aufwand durch Förderbohrungen gewonnen.

Ölsande sind oberflächennahe Lockersedimente, in die natürlich aufsteigendes Rohöl aus tieferen Reservoirs eingedrungen ist. Unter Mitwirkung von Mikroorganismen wurde aus dem Rohöl Schweröl bzw. Teer, der sich in den Porenräumen zwischen den Sandkörnern einlagerte. Das größte genutzte Vorkommen dieser Art befindet sich im östlichen Vorland der Rocky Mountains im kanadischen Bundesstaat Alberta. Die Gewinnung dieser Ölvorkommen erfolgt im Tagebau mit den bereits mehrfach thematisierten Folgen für die betroffenen Flächen. Hinzu kommt eine erhebliche Beeinträchtigung der Wasserqualität durch die Mobilisierung von Schadstoffen aus der Lagerstätte bzw. die Freisetzung wassergefährdender Stoffe bei der Aufbereitung des Rohstoffs.

Ölschiefer sind tonige bis mergelige Gesteine mit hohem bituminösem Anteil. Die organische Substanz liegt noch im Muttergestein als Kerogen vor und kann durch Pyrolyse (Erhitzen auf ca. 500 °C) herausgelöst werden. Ölschiefer, die oberflächennah auftreten, werden meist im Tagebau gewonnen. Aufgrund des hohen Energiebedarfs zum Erhitzen des Gesteins ist die Energieausbeute, also der Wirkungsgrad dieser Energiequelle, gering. In größerem Ausmaß tragen Ölschiefer in Estland zur Energieversorgung bei (Neukirchen und Ries 2014).

Flözgas ist an das Vorkommen von Kohle gebunden. Das Erdgas wird an den Oberflächen der

Kohle adsorbiert und bleibt hier unter den erhöhten Druckbedingungen gebunden. Es kann durch Förderbohrungen aus den Kohlelagerstätten gewonnen werden.

Gashydrate sind eisähnliche Feststoffe, die bei niedrigen Temperaturen und hohem Druck aus Methan und Wasser gebildet werden. Sie können in Meeresböden bei Wassertiefen von mehr als 300 m sowie in Permafrostböden gespeichert werden. Das Methan kann entweder frei aus Erdgaslagerstätten aufgestiegen oder durch mikrobiologische Prozesse im Boden gebildet worden sein. Die möglichen Folgen einer unkontrollierten Freisetzung von Methan aus Gashydratanreicherungen als Folge tauender Permafrostböden werden aktuell diskutiert.

Tight Oil oder Tight Gas bezeichnet Erdöl- oder Erdgasspeicher in sekundär verdichteten, ursprünglich porösen Gesteinen. Im Zuge der Diagenese sandiger Sedimente wurde deren ursprüngliche Permeabilität stark herabgesetzt. Die Kohlenwasserstoffe sind aus dem Muttergestein in diese Gesteinsschichten migriert und wurden hier gebunden. Schieferöl und Schiefergas bezeichnen dagegen Kohlenwasserstoffe, die noch in ihrem Muttergestein in größeren Tiefen gebunden sind. Es handelt sich dabei um gering durchlässige Tonsteine, aus denen die organische Substanz nicht entweichen konnte. Die Förderung derartiger Kohlenwasserstoffvorkommen wurde vor allem in den USA in den vergangenen Jahrzehnten massiv vorangetrieben. Die rasante Erschließung von Schiefergas hat zu erheblichen Nachjustierungen der Reichweitenprognosen fossiler Energieträger geführt.

Überall, wo ausreichend mächtige Tonsteinhorizonte in größeren Tiefen vorhanden sind, besteht Schiefergaspotenzial, was generell ein großer Vorteil gegenüber der konventionellen Erdöl- und Erdgasgewinnung ist. Allerdings sind die Schiefergase ohne künstliche Maßnahmen zur Verbesserung der Durchlässigkeit des Gesteins nicht zu mobilisieren. Dazu werden künstlich Risse im Gebirge erzeugt. Die Technologie wird mit dem Begriff „hydraulic fracturing“ oder kurz „Fracking“ bezeichnet (siehe ► Exkurs 9.3). Ihre Anwendung wird aktuell in Europa sehr kontrovers diskutiert.

Auch wenn die Technologie des Frackings zur Gewinnung von Schiefergas unter Beachtung al-

Exkurs 9.3 Hydraulic fracturing (Fracking)

Die Methode des hydraulic fracturing, also der hydraulischen Rissbildung, wird angewendet, um die Durchlässigkeit gering durchlässiger Gesteinsschichten zu erhöhen und damit in den gering permeablen Schichten gebundene Fluide zu mobilisieren. Die Methodik wird sowohl bei der Exploration von Kohlenwasserstoffen als auch, mit Abweichungen von der hier beschriebenen Vorgangsweise, in der tiefen Geothermie (siehe ► Kap. 11) eingesetzt.

Zur Gewinnung von Schiefergas muss zunächst eine Vertikalbohrung bis zum Zielhorizont in mehreren hundert bis tausend Metern Tiefe abgeteuft werden. Um den Entnahmebereich zu vergrößern, wird die Bohrung dann entsprechend dem Einfallen der gasführenden Schiefergesteine schräg oder horizontal nochmals einige hundert Meter oder mehr weitergeführt. In das Bohrloch wird dann mit sehr hohem Druck ein Frackingfluid eingepresst, um künstliche Risse im Gestein rund um das Bohrloch zu erzeugen und die Durchlässigkeit des Gesteins zu erhöhen.

Beim sogenannten „Wasserfrack“ besteht das Frackingfluid aus reinem Wasser, welches in großer Menge und unter hohem Druck in das Bohrloch verpresst wird, um in der Tiefe wenige große Rissflächen zu erzeugen. Der Wasserfrack wird vor allem in der tiefen Geothermie eingesetzt, mit dem Ziel, ausreichende Hohlraumvolumina für die Zirkulation der Wässer zu schaffen. Zur Schiefergasgewinnung ist reines Wasser als Frackingfluid nicht geeignet. Hier ist das Ziel nicht die Erzeugung einzelner große Risse über längere Distanzen, stattdessen sollen möglichst viele kleinere Risse im Nahbereich der Bohrung entstehen, die jeweils ihre Gaseinschlüsse freigeben können. Um dies zu erreichen, ist deutlich weniger Frackingfluid erforderlich. Allerdings muss das Fluid neben dem eigentlichen Aufreißen des Gesteins weitere Aufgaben erfüllen. Neben dem Wasser

werden dem Fluid daher Stützmittel und Chemikalien beigemischt:

- Sand dient dazu, die Risse im Gestein längerfristig offen zu halten und ein rasches Verschließen unter dem hohen Überlagerungsdruck des Gebirges zu verhindern.
- Zugesezte Säuren dienen dazu, das Gestein zu lösen und damit die Porosität weiter zu verbessern. Die Säurestimulation wird unter anderem auch in der hydrothermalen Geothermie zur Verbesserung der Ergiebigkeit eingesetzt.
- Weitere chemische Zusätze sollen die Viskosität des Fluids herabsetzen, die Reibung zwischen Gestein und Fördergut verringern, eine Entmischung der Suspension, die Entstehung von Biofilmen oder auch Korrosion oder Mineralfällung in Anlagenteilen verhindern.

Die genaue Zusammensetzung der Frackingfluide wird von den Betreibern der Förderanlagen meist nicht bekannt gegeben. Generell muss man jedoch davon ausgehen, dass zumindest einige der eingesetzten Substanzen als umweltgefährdend einzustufen sind und eine Freisetzung in oberflächennahe Grundwasserkörper oder an Oberflächengewässer in jedem Fall verhindert werden muss. Ein technisch einwandfreier gesetzkonformer Ausbau der Bohrung mit Abdichtung des Ringraums ist Voraussetzung, um ein Austreten von Frackingfluiden über die Bohrung zu verhindern. Risse, die sich aus dem Zielhorizont heraus soweit erstrecken, dass sie oberflächennahe Grundwasserleiter mit dem tiefen Horizont kurzschließen, wären eine weitere potenzielle Umweltgefährdung. Über diese Risse könnten Frackingfluide und das freigesetzte Gas austreten. Derartige Gefahren können durch geologische Vorkundungen der Überlagerung und eine angepasste Dimensionierung des Drucks beim Frackingprozess

verhindert werden. Sorgfältiger Umgang mit dem Fluid und den geförderten Wässern, die anschließend ja entsorgt werden müssen, kann eine konkrete Umweltgefährdung vermeiden helfen. Unfälle und mangelnde Sorgfalt bzw. menschliches Versagen können jedoch nie ganz ausgeschlossen werden. Daher dürfen Frackingaktivitäten nicht im Einzugsgebiet von Trinkwassernutzungen oder Trinkwasserhoffigkeitsgebieten erfolgen. Auch ökologisch sensible Naturräume müssen gemieden werden.

Künstlich induzierte Erdbeben, wie sie im ► Kap. 11 im Zusammenhang mit der tiefen Geothermie thematisiert werden, sind auch bei der Schiefergasgewinnung mittels Fracking ein Thema. Jeder Frackingvorgang ist im Prinzip ein kleines künstliches Erdbeben. In den meisten Fällen wird dies aber so schwach sein, dass es nur mit entsprechenden hochsensiblen Messeinrichtungen nachweisbar ist. Allerdings wird im Zusammenhang mit Fracking immer wieder von erhöhter Erdbebenaktivität und auch von Schadbeben berichtet.

Die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2012) hat eine Abschätzung des Erdgaspotenzials aus dichten Tongesteinen in Deutschland durchgeführt. Sie kommt darin zu dem Schluss, dass die potenziellen Schiefergasmengen Deutschlands die konventionellen Ressourcen deutlich (um bis zu zwei Größenordnungen) übersteigen und damit auch bei einem Gewinnungsfaktor von nur 10% noch über den konventionellen Reserven liegen. Die Gefahr von Umweltauswirkungen durch die Freisetzung von Frackingfluiden oder induzierte Erdbeben wird als gering eingeschätzt. Vertiefende Betrachtungen zum Thema „Fracking“ wurden aktuell von Habrich-Böcker et al. (2014) zusammengestellt.

ler Sicherheitsmaßnahmen möglicherweise nicht mehr oder weniger umweltgefährdend ist als die Gewinnung vieler anderer Rohstoffe, sollte man sich dennoch die Frage stellen, ob der Ausbau weiterer fossiler Energieträger ein langfristig sinnvolles und nachhaltiges Konzept für die globale Energieversorgung sein kann. Neben der Endlichkeit fossiler Energierohstoffe ist auch die nachhaltige Störung natürlicher Stoffkreisläufe, hier vor allem des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs, mit den weithin bekannten Folgen für unser Klima ein wichtiges Argument gegen einen weiteren Ausbau fossiler Energiequellen und damit auch gegen das Fracking.

9.8 Umweltbewusste Rohstoffgewinnung und Kreislaufwirtschaft

Es steht natürlich außer Frage, dass ungeachtet der Umweltgefährdungen und -belastungen auch in Zukunft Rohstoffe benötigt werden und daher ihr Abbau erforderlich sein wird. Gleichzeitig ist klar, dass es für die nicht erneuerbaren Rohstoffe, von denen in diesem Kapitel die Rede ist, keine wirkliche nachhaltige Nutzung geben kann. Sind die Lagerstätten ausgebeutet, steht der Rohstoff nicht mehr zur Verfügung. Spätestens dann müssen Alternativen bereitstehen.

Um einerseits die Umweltbelastungen durch die Rohstoffgewinnung so gering wie möglich zu halten und andererseits die Lebensdauer nicht nachwachsender Rohstoffe zu verlängern, braucht es umweltbewusste Abbaumethoden und Technologien, die eine Mehrfachnutzung der Rohstoffe im Rahmen eines Kreislaufsystems erlauben.

Die Vorgaben, die sich aus bergrechtlichen Gesetzeswerken wie dem Bundesberggesetz (BBergG 1980) in Deutschland oder dem Mineralrohstoffgesetz (MinroG 2006) in Österreich ergeben, berücksichtigen bereits Belange des Umweltschutzes. Die Verankerung von Bergbauprojekten in der Gesetzgebung zur Umweltverträglichkeitsprüfung (siehe ► Kap. 12) verpflichtet die Betreiber von Rohstoffgewinnungsanlagen zur Einbeziehung von Umweltschutzaspekten bereits im Planungsstadium eines Bergbaus. Die UVP soll garantieren, dass Rohstoff-

gewinnung, unabhängig davon ob es sich um Tagebau, Bergbau oder Förderbohrungen handelt, unter Berücksichtigung von bestehenden Schutzgebieten (Landschafts-, Wasser-, Naturschutz) und vor allem im Einvernehmen mit der ansässigen Bevölkerung erfolgt. Es steht außer Frage, dass dadurch die Aktivitäten der Rohstoffkonzerne nicht unbedingt erleichtert werden.

Mögliche Verbesserungen der Umweltbilanz liegen im Tagebau, der ja immer eine erhebliche Beeinträchtigung der Landschaft bedeutet, in einer kleinflächigen Strukturierung des Abbaus. Dies ist in vielen Lagerstätten aufgrund der Struktur der Mineralisation nicht möglich. Muss z. B. eine Vererzung in größere Tiefen verfolgt werden, steigt mit zunehmender Tiefe auch der Flächenbedarf. Die Verhältnismäßigkeit zwischen Rohstofftrag und der Flächeninanspruchnahme ist mit zunehmender Abbautiefe zu hinterfragen.



Im Bereich der Massenrohstoffe ist der kleinräumig strukturierte Abbau in vielen Fällen bereits gängige Praxis. Es werden jeweils nur möglichst kleine Flächen für den Abbau geöffnet, die Lagerstätte an dieser Stelle ausgebeutet und im direkten Anschluss nach ökologischen Gesichtspunkten wieder rekultiviert.


Bei der Aufbereitung von Erzen kann unter Umständen statt der energieaufwändigen und emissionsreichen Verhüttung die mechanische Aufarbeitung durch Brechen und anschließende Schwerentrennung in Wasser oder Druckluft erfolgen. Eisen kann durch Magnetscheideverfahren aus dem Erz abgetrennt werden. Die Extraktion von Bunt- und Edelmetallen kann über die sogenannte Biolaugung erfolgen, bei der Mikroorganismen die Sulfidminerale zersetzen.

Mit dem Begriff Phytomining wird die Extraktion von Schwermetallen aus Böden mithilfe von Pflanzen bezeichnet. Diese Methode wird jedoch weniger zur Rohstoffgewinnung, sondern zur Sanierung von schwermetallbelasteten Böden in der Altlastenpraxis eingesetzt. Die Pflanzen entziehen dem Boden die Metalle und reichern sie in der Pflanzensubstanz an. Durch Verbrennung der Pflanzen können die Schwermetalle abgetrennt werden.

Dies sind nur einige wenige Beispiele für Möglichkeiten einer umweltschonenderen Rohstoffgewinnung. Neben den existierenden Methoden

besteht in diesem Bereich aber sicherlich für die Zukunft großes Entwicklungspotenzial.

Auch bei der umweltschonendsten Gewinnungsmethode bleibt immer die Tatsache bestehen, dass die meisten Rohstoffe der Lithosphäre nicht nachwachsen. Die immer schwierigere Erschließung von Lagerstätten führt einerseits zu höheren Preisen, andererseits aber auch zu höheren Umweltrisiken, wie das Beispiel der off-shore-Förderung von Erdöl zeigt. Es ist daher sowohl im Interesse der Rohstoffindustrie als auch der Umwelt, Alternativen zu suchen und die Wiederverwertung von Rohstoffen in einem weitgehend geschlossenen Kreislaufsystem anzustreben (siehe dazu  [Abb. 2.3](#) und  [Kap. 8](#)). Recycling hat sich inzwischen für viele Buntmetalle und vor allem für Eisen durchgesetzt. Für Edelmetalle und die selteneren Metalle, die in der Elektronikindustrie eine große Rolle spielen (Elemente der Seltenen Erden), sind die Recycling-Technologien dagegen noch ausbaufähig.

Im Bereich der Energierohstoffe kann das Problem der sich verringenden Reserven langfristig nur durch den entschlossenen Umstieg auf erneuerbare Energieträger gelöst werden. Den umweltgeologischen Aspekten der Nutzung erneuerbarer Energiequellen widmet sich das  [Kap. 11](#).

Rohstoffe – Einiges, was man wissen sollte

- Rohstoffe können nach ihrer Entstehung, ihrer Verwendung, ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften oder auch ihrem Entstehungsort klassifiziert werden. Ein bedeutender Faktor zur Klassifizierung von Rohstoffen ist die Erneuerbarkeit in Bezug auf die Geschwindigkeit des Abbaus. Danach richtet es sich, ob ein Rohstoff nachhaltig bewirtschaftet werden kann oder nicht.
- Rohstoffgewinnung wird im Wesentlichen vom Marktgeschehen gesteuert. Die Verknappung eines Rohstoffs setzt eine Dynamik von Forschung und Entwicklung in Gang, an deren Ende entweder Alternativen zum knappen Rohstoff oder die Erschließung neuer Ressourcen steht.

- Die Gewinnung von Metallen, Industrierohstoffen oder Kohle im Tagebau stellt einen erheblichen Eingriff in Landschafts- und Naturräume dar. Anders als bei räumlich flexiblen Industrieanlagen muss ein Abbaustandort dort eingerichtet werden, wo sich die Lagerstätte befindet und kann nicht unter Berücksichtigung sensibler Umweltbereiche angesiedelt werden.
- Massive Wasserhaltungsmaßnahmen können sowohl im Tage- als auch im Bergbau erforderlich sein. Diese wirken sich jedoch nicht nur auf den direkten Bergbaubereich aus, sondern führen weit über die Lagerstätte hinaus zu einer Absenkung der Grundwasseroberfläche.
- Durch den Zustrom sauerstoffreicher Wässer in Erz- und Kohlebergbau nach der Schließung kommt es zur Verwitterung von Sulfidmineralen wie Pyrit unter Bildung von Schwefelsäure. Die sauren Wässer (Acid Mine Drainage – AMD) können zur Lösung von Metallen aus dem Gestein führen.
- Die Verhüttung als Methode der Erzaufbereitung ist mit der Freisetzung von Schadstoffen über Rauchgase verbunden. Heutige Anlagen verfügen über entsprechende Rauchgasreinigungen. Da die Abgase jedoch bis vor wenigen Jahrzehnten ungereinigt an die Atmosphäre abgegeben wurden, sind Verhüttungsstandorte auch heute noch oft von deutlich erhöhten Gehalten an Schwermetallen in Böden, Grundwasser und Oberflächenwässern belastet.
- Der Abbau von Evaporitlagerstätten findet oft bergmännisch statt. Da die Stollen im Bereich der wasserlöslichen Gesteine künstliche Wasserwege darstellen, besteht auch nach Auflassen eines solchen Bergbaus die Gefahr der Auslaugung des Gebirges durch zirkulierende Grundwässer oder versickernde Niederschläge. Neben der Gefahr von Tagesbrüchen kann es zur Freisetzung hochmineralisierter Wässer kommen.

- Immer knapper werdende Reserven an Energierohstoffen lassen die Produzenten zu Lagerstätten greifen, die einerseits mit größerem Explorationsaufwand verbunden, andererseits aber auch mit höherem Umweltrisiko behaftet sind. So stellt z. B. die off-shore-Förderung von Erdöl und Erdgas in Bereichen großer Wassertiefen ein erhebliches Gefährdungspotenzial dar.
- Nicht konventionelles Erdöl wird z. B. aus Ölsanden oder Ölschiefern gewonnen. Während Ölsande das Resultat eines natürlichen Aufstiegs von Erdöl aus Erdölfällen ist, handelt es sich beim Ölschiefer um Muttergestein, aus dem das Erdöl noch nicht in eine Erdölfalle migrieren konnte. Der obertägige Abbau ist mit großen landschaftlichen Eingriffen, die Gewinnung des Öls mit hohem Energieaufwand verbunden.
- Mithilfe von Fracking werden Erdgas- und Erdölvorkommen erschlossen, die in gering durchlässigen Gesteinsformationen gespeichert sind. Um die Durchlässigkeiten des Speichergesteins zu erhöhen, werden in mehreren hundert bis tausend Metern Tiefe durch Einpressen eines Frackingfluids Risse erzeugt, über die das Gas entweichen kann. Das Fluid besteht aus Wasser, Sand und verschiedensten Chemikalien, die nicht in Kontakt mit dem oberflächennahen Grundwasser kommen dürfen.
- Die Gewinnung und Nutzung von Rohstoffen muss unter dem Aspekt der Umweltverträglichkeit erfolgen. Neben einer Einbindung der Bevölkerung, wie sie im UVP-Gesetz geregelt ist, gehört dazu auch die Berücksichtigung sensibler Zonen, wie Wasserschutzgebiete, Landschaftsschutzgebiete oder Biotope.
- Alle hier besprochenen Rohstoffe wurden durch Prozesse im geologischen Kreislauf gebildet. Sie sind damit kurzfristig nicht nachwachsend und somit limitiert. Die Forcierung der Kreislaufwirtschaft sowie ein Umstieg auf erneuerbare Alternativen muss ein wichtiges Ziel einer umweltgerechten Rohstoffwirtschaft sein.

? Testfragen zum Kapitel Rohstoffe

1. Erläutern Sie den Regelkreislauf der Rohstoffwirtschaft anhand eines Beispiels. Sie können ein hier genanntes Beispiel aufgreifen oder ein eigenes wählen.
2. Was versteht man unter der statischen Lebensdauer eines Rohstoffs im Unterschied zu dessen Reichweite?
3. Klassifizieren Sie die Rohstoffe nach ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften und ihrer Verwendung. Was ist der wesentliche Unterschied zwischen Agrarrohstoffen und Erzen aus Sicht einer nachhaltigen Bewirtschaftung?
4. Erläutern Sie das Hubbert-Modell. Welche Grundannahmen liegen dem Modell zugrunde und wie kann es in der Praxis eingesetzt werden, um die Reichweite eines Rohstoffs abzuschätzen?
5. Erläutern Sie den Prozess der Pyritverwitterung. Unter welchen Umständen führt dieser Prozess bei der Erzgewinnung zu Umweltproblemen und welche Ansätze gibt es, diese zu vermeiden?
6. Es gibt mehrere Möglichkeiten, gediegenes Gold aus einer Seifenlagerstätte zu gewinnen. Nennen Sie die Ihnen bekannten Methoden und beschreiben Sie eine davon näher.
7. Was versteht man unter dem Begriff „Massenrohstoffe“?
8. Erläutern Sie die Probleme, die sich bei Nassbaggerungen für den betroffenen Grundwasserkörper ergeben können.
9. Nennen Sie die Ihnen bekannten Quellen nicht konventionellen Erdöls und Erdgases.
10. Wie entstehen Ölsande und wie wird das Öl daraus üblicherweise gewonnen? Erläutern Sie auch die damit zusammenhängende Umweltproblematik.
11. Wie entstehen Ölschiefer und wie wird das Öl daraus üblicherweise gewonnen? Erläutern Sie auch die damit zusammenhängende Umweltproblematik.
12. Erklären Sie die Technologie des „hydraulic fracturing“ (hydraulische Rissbildung). Wo wird sie eingesetzt? Welche Vorbehalte be-

stehen gegen diese Technologie aus Sicht des Umweltschutzes?

13. Erläutern Sie, wie aus Ihrer Sicht eine umweltbewusste Rohstoffbewirtschaftung funktionieren könnte und worauf dabei zu achten ist.
14. Warum kann die Nutzung von Rohstoffen aus der Lithosphäre zwar umweltbewusst, nie aber nachhaltig sein?

Literatur

- Agricola G (2007) *De Re Metallica Libri XII – Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen*, 2. Aufl. Marix Verlag GmbH, Wiesbaden (Unveränderter Nachdruck der Erstausgabe des VDI Verlags, Berlin, 1928)
- Appelo CAJ, Postma D (2005) *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A. A. Balkema Publishers, Leiden/London/New York/Philadelphia/Singapore
- Bardi U (2013) *Der geplünderte Planet – Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen*. Oekom, München
- BBERG (1980). Bundesberggesetz. Bundesrepublik Deutschland
- BGR (2012) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Abschätzung des Erdgaspotenzials aus dichten Tonsteinen (Schiefergas) in Deutschland. Geozentrum, Hannover
- BGR (2014) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe – Regelkreis der Rohstoffversorgung. http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Rohstoffverfuegbarkeit/rohstoff-verfuegbarkeit_node.html. Zugegriffen: 07.12.2014
- Eisbacher GH, Kley J (2001) *Grundlagen der Umwelt- und Rohstoffgeologie*. Enke im Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Evans AM (1997) *An Introduction to Economic Geology and its Environmental Impact*. Blackwell Science, Oxford
- Habrich-Böcker C, Krichner B, Weissenberger P (2014) *Fracking – die neue Produktionsgeografie*. Springer, Wiesbaden
- Hilberg S, Arminger V, Riepler F, Gschwandtner G, Galler R (2014) Hydrogeologie im Gipskarst als Basis geotechnischer Langzeitprognosen im Bergbau. *Grundwasser* 19(1):39–49
- Hofmann T, Müllegger C (2011) *Abschlussbericht Einfluss von Nassbaggerungen auf die Oberflächen- und Grundwasserqualität*. Universität Wien, Wien
- International Energy Agency (IEA) (2014) *Key world energy statistics*. IEA Paris, Paris
- Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J (Hrsg) (2011) *Energie und Rohstoffe – Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft*. Springer Spektrum, Heidelberg
- Kümpel H-J (2011) *Situation der Energierohstoffe – Retrospektive und Ausblick*. In: Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J (Hrsg) *Energie und Rohstoffe – Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft*. Springer Spektrum, Heidelberg
- McDonald I, Boyce AJ, Butler IB, Herrington RJ, Polya DA (Hrsg) (2005) *Mineral Deposits and Earth Evolution*. Geological Society, London (Special Publication)
- Merkel B, Planer-Friedrich B (2008) *Grundwasserchemie*. Springer, Heidelberg
- MinroG (2006). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich – Mineralrohstoffgesetz 1999, BGBl Nr. 113, Novelle 2006. Republik Österreich
- Neukirchen F, Ries G (2014) *Die Welt der Rohstoffe – Lagerstätten, Förderung und wirtschaftliche Aspekte*. Springer Spektrum, Heidelberg
- Nordstrom DK, Alpers CN, Ptacek CJ, Blowes DW (2000) *Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain*. *California Environ Sci Technol* 34(2):254–258
- Pohl W (2005) *Mineralische Rohstoffe und Energierohstoffe – Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten*, 5. Aufl. W. und W. E. Petraschecks Lagerstättenlehre. E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Okrusch M, Matthes S (2014) *Mineralogie – Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*, 9. Aufl. Springer Spektrum, Heidelberg
- Rothe P (2010) *Schätze der Erde – Die faszinierende Welt der Rohstoffe*. WBG Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- TrinkwV (2011). *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch*. Bundesrepublik Deutschland
- Turekian KK, Wedepohl KH (1961) *Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust*. *Geol Soc Am Bull* 72:175–192
- Wiggering H (Hrsg) (1994) *Die benutzte Erde: Ökosysteme, Rohstoffgewinnung, Herausforderungen*. Alfred-Wegener-Stiftung. Ernst und Sohn, Berlin
- Wippermann T, Hollerbach A, Bosecker K, Atmaca T (2004) *Goldgewinnung durch Cyanidlaugung und Maßnahmen zur Vermeidung möglicher Gefahren*. *Geol. Jb., Bd. 5. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover*, S 77–124
- Wohlrab B, Ehlers M, Günneweg D, Söhngen H-H (1995) *Oberflächennahe Rohstoffe – Abbau, Rekultivierung, Folgenutzung – im Spannungsfeld zwischen gesicherter Versorgung und Umweltverträglichkeit*. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart
- Umweltbundesamt (2001) *Sanierte Altlast S8 Esse, Mitterberghütten*. <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/altlasten/verzeichnisse/sanaltlasten/salzburg/s8/>. Zugegriffen: 30.08.2014

Rohstoff Wasser

Sylke Hilberg

- 10.1 Schutzgut Wasser – 172
- 10.2 Anthropogene Beeinflussung von Niederschlagswässern – 174
- 10.3 Einflüsse durch die Landwirtschaft – 175
- 10.4 Urbane Einflüsse auf Grundwasserkörper – 175
- 10.5 Verkehrsinfrastruktur – 179
- 10.6 Geogene Hintergrundbelastung – 184
- 10.7 Wasserversorgung in ariden Gebieten – 187
- Literatur – 190

Kurzfassung

Als Rohstoffe werden alle unverarbeiteten Stoffe bezeichnet, die in der Natur auftreten und vom Menschen direkt oder nach einer Aufbereitung genutzt werden. Dem Wasser, als einem der wichtigsten aller vom Menschen genutzten Rohstoffe, kommt dabei eine ganz besondere Bedeutung zu. Daher wird dem Rohstoff Wasser hier ein eigenes Kapitel gewidmet.

Wasser kann in allen globalen Umweltsystemen als gasförmige, flüssige oder feste Phase auftreten. Innerhalb des Wasserkreislaufs kann es als Niederschlagswasser, stehendes oder fließendes Oberflächengewässer, Bodenwasser oder Grundwasser auftreten.

Unbehandeltes Wasser, das aus einem Reservoir gewonnen wird, bezeichnet man entsprechend der Rohstoffdefinition als Rohwasser. Die Beschaffenheit von Rohwasser ist das Produkt geogener, biogener, häufig aber auch anthropogener Einflüsse im jeweiligen Einzugsgebiet. Da es in vielen Fällen nicht den Qualitätsanforderungen für den Verzehr durch den Menschen entspricht, ist oft eine Wasseraufbereitung erforderlich, um Rohwasser zu Trinkwasser zu machen. Zur Vorbeugung vor anthropogener Beeinträchtigungen der Wasserqualität müssen Trinkwasserreservoirs zwingend unter Schutz gestellt werden. Die Abgrenzung von Schutzgebieten setzt Kenntnisse über Herkunft und Genese des Wassers voraus. Außerdem müssen potenzielle Gefahren für Trinkwasserreservoirs erkannt und die beeinflussenden Prozesse verstanden werden. Bei der Betrachtung des Rohstoffs Wasser zeigt sich der enge Zusammenhang zwischen Umweltgeologie und Hydrogeologie besonders deutlich.

In diesem Kapitel werden einige der potenziellen Gefahren für die Qualität von Wasserreservoirs dargestellt. Dabei werden sowohl anthropogene als auch geogene Aspekte beleuchtet.

In humiden Gebieten werden Grund- und Quellwässer aber auch Oberflächenwässer, oft nach entsprechender Aufbereitung, zur Wasserversorgung herangezogen. Wie wir aus Betrachtungen zum Wasserkreislauf wissen, werden diese Wasserspeicher von Niederschlägen gespeist. Erste Gefahr für das Trinkwasser sind daher Luftschadstoffe, die vom Regen aufgenommen und mit den Niederschlagswässern bei der Grundwasserneubildung in Wasserreservoirs eingetragen werden.

Die landwirtschaftliche Nutzung von Flächen ist meist mit der Ausbringung von Stoffen zur Verbesserung des

Ertrags sowie der Schädlingsbekämpfung verbunden, die in der Folge auch in potenzielle Trinkwasserspeicher gelangen können.

In urbanen Gebieten gibt es zahlreiche potenzielle Gefahren, denen Grundwasserkörper oder Oberflächenwässer ausgesetzt sein können. Neben der Freisetzung von Schadstoffen aus einem breiten Spektrum von Siedlungs- und Produktionsaktivitäten ist auch die quantitative Beeinträchtigung durch Bodenversiegelung ein relevanter Prozess. Potentielle Auswirkungen auf Wasserreservoirs ergeben sich auch aus der Verkehrsinfrastruktur.

Aber auch natürliche Einflüsse können abträglich auf Gewässer einwirken. Geogen bedingte Anreicherungen bestimmter Stoffe in Grund- und Oberflächenwässern sind das Resultat einer speziellen geologischen Situation im Einzugsgebiet. Sie können dazu führen, dass anthropogen völlig unbeeinflusste Wässer dennoch nicht zur Trinkwassernutzung geeignet sind. Häufig führt auch eine anthropogen induzierte Veränderung des Einzugsgebiets dazu, dass die Trinkwasserreinigung von Wässern beeinträchtigt wird. Dies wird am Beispiel der Versalzung von Süßwasseraquiferen gezeigt.

Spezielle umweltgeologische Fragen wirft die Wasserversorgung in ariden Klimazonen auf. Die besonderen Herausforderungen in Gebieten, in denen die potenzielle Verdunstung größer ist als der Niederschlag, in denen damit Grundwasserneubildung zeitlich begrenzt und räumlich nur sehr punktuell und in geringem Maße stattfindet, führen dazu, dass Verfahren zur Trinkwasserbereitstellung genutzt werden, die mit erheblichen Umweltbelastungen einhergehen.

10.1 Schutzgut Wasser

Der Rohstoff Wasser ist von außerordentlicher Bedeutung, wenn es um die Befriedigung existenzieller menschlicher Bedürfnisse geht. Trinkwasser dient es als Lebensmittel, als Nutz- oder Brauchwasser wird es für viele Prozesse des täglichen Lebens, aber auch für Produktionsprozesse gebraucht. Davon abgesehen ist Wasser jedoch auch unabdingbare Voraussetzung für alle ökologischen Prozesse. Es bildet Lebensräume, bietet Nahrung und ist Medium für Stofftransporte in und zwischen den Sphären.

Exkurs 10.1 Europäische Wasserrahmenrichtlinie.

Wasser ist keine übliche Handelsware, sondern ein ererbtes Gut, das geschützt, verteidigt und entsprechend behandelt werden muss (Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates). Zum Schutz von Binnenoberflächengewässern, Küstengewässern und Grundwasserkörpern wurde auf Europäischer Ebene ein Ordnungsrahmen für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik geschaffen. Es handelt sich dabei um die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) (Richtlinie 2000/60/EG). Ziel dieses

Ordnungsrahmens ist es, mittel- bis langfristig eine Verbesserung der chemischen und ökologischen Qualität der Wasserkörper zu erreichen. In jedem Fall soll aber eine weitere Verschlechterung zukünftig vermieden werden.

Ein wichtiger Punkt, der sich aus der WRRL ergibt, ist, dass die Maßnahmen zum Schutz und der Verbesserung des Gewässerzustandes grenzübergreifend auf Wasserkörper bezogen werden, deren Abgrenzung fachlich und nicht politisch erfolgt. Jeder Mitgliedsstaat hat die Qualität der Wasserkörper im Staatsgebiet

an definierten Stellen und in definierten Intervallen zu erheben und zu dokumentieren. Die Messstellen, die Untersuchungsintervalle sowie die untersuchten Parameter (chemische und ökologische) sind in nationalen Gesetzeswerken festgeschrieben. In Deutschland regelt das Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2009), in Österreich die Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV 2006) auf der Basis des Wasserrechtsgesetzes (WRG 2009) die Einhaltung der Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie.

Da die vielfältigen Aufgaben des Wassers im globalen System von keinem anderen Rohstoff erfüllt werden können, ist es erforderlich, Wasserressourcen unter besonderen Schutz zu stellen.

Beim Wasserschutz sind sowohl quantitative als auch qualitative Aspekte zu berücksichtigen. Das als Rohwasser bezeichnete unbehandelte Wasser, wie es in den verschiedenen globalen Sphären auftritt, ist einer Vielzahl an geogenen und anthropogenen Einflüssen ausgesetzt, die sich auf die Wasserverfügbarkeit, vor allem aber auf die Wasserbeschaffenheit auswirken können. Um negative Auswirkungen anthropogener Aktivitäten auf Wasserreservoir zu vermeiden bzw. die Qualität bereits beeinflusster Wasserkörper wieder zu verbessern, wird innerhalb der Europäischen Union der Umgang mit und der Schutz des Wassers durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinien (► [Exkurs 10.1](#)) für alle Mitgliedsstaaten geregelt.

Als Schadstoffe werden solche Stoffe bezeichnet, die in einer Konzentration oder an einem Ort auftauchen, an dem sie eine Beeinträchtigung für Schutzgüter darstellen können. Sie können natürlicher oder anthropogener Herkunft sein. Natürlich in der Umwelt vorhandene Stoffe können außerdem durch die anthropogen bedingte Anreicherung oder Mobilisierung zum Schadstoff werden. Zu den Schutzgütern zählen unter anderem die menschliche Gesundheit, Pflanzen, Tiere und deren Lebensräume.

Die Bereiche Boden und Grundwasser sind wichtige Lebensräume für Pflanzen und Tiere und

werden daher als Schutzgut betrachtet. So beschreiben z. B. Schminke et al. (2007) die Grundwasserfauna Deutschlands und stellen Grundwasserkörper damit in ihrer Lebensraumfunktion dar. Stoffe, die künstlich in den Untergrund eingebracht werden und damit den Lebensraum Boden oder Grundwasser beeinträchtigen, fungieren damit als Schadstoffe. Näheres zur Definition des Schadstoffbegriffs wird im ► [Kap. 2](#) erläutert.

Eine besondere Bedeutung in der Schutzgutbetrachtung kommt den Wasserreservoir als Trinkwasserlieferanten für den Menschen zu. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wurden international hohe Qualitätsstandards für Trinkwasserversorgungen festgelegt. Die „Guidelines for Drinking-water Quality“ der World Health Organisation (WHO 2008) definieren Grenzwerte für Schadstoffkonzentrationen und begründen diese mit der humanmedizinischen Einschätzung der Gesundheitsgefahr, die vom Verzehr bestimmter Stoffe über den Trinkwasserpfad ausgeht. Dabei wird von einer lebenslangen Aufnahme von täglich 2 l Trinkwasser ausgegangen. Nationale Bestimmungen, wie das deutsche Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2009) oder das österreichische Wasserrechtsgesetz (WRG 2009) orientieren sich an dieser Richtlinie und bilden die Basis für Maßnahmen im Zusammenhang mit dem Trinkwasserschutz.

Da in Deutschland ca. 80 %, in Österreich annähernd 100 % der Trinkwasserversorgung über Grundwässer (Grundwasserbrunnen, Uferfiltrat-

brunnen und Quellen) bestritten wird und dieses Buch vorrangig den geologischen (unterirdischen) Aspekten anthropogener Aktivitäten gewidmet ist, werden hier vor allem jene umweltgeologischen Fragestellungen behandelt, die sich aus der Grundwassernutzung ergeben. Die Trinkwassernutzung von Oberflächengewässern wird nur am Rande betrachtet.

10.2 Anthropogene Beeinflussung von Niederschlagswässern

Niederschläge bilden die Basis der Trinkwasserversorgung. Sie werden in Grundwasser- oder Oberflächenwasserspeichern gesammelt und nach einer möglicherweise notwendigen Aufbereitung in die Versorgungsnetze eingespeist. Was es für die Trinkwasserversorgung bedeutet, wenn mehr Wasser benötigt wird, als im Jahresverlauf durch Niederschläge geliefert wird, kann im ► **Abschn. 10.7** dieses Kapitels gezeigt werden, der sich der Wasserversorgung in ariden Klimazonen widmet.

Der Regen ist damit die erste „Angriffsfläche“, die das Wasser gegenüber anthropogenen Einflüssen bietet. Im Rahmen von Phasenübergängen (gasförmig–flüssig) werden in der Atmosphäre vorhandene Gase im Wasser gelöst. Der Prozess der Lösung von Kohlendioxid (CO_2), das mit einer globalen Konzentration von aktuell knapp 400 ppm in der Atmosphäre vertreten ist, führt zum Beispiel dazu, dass auch nicht anthropogen beeinflusste Regenwässer mit einem pH-Wert von ca. 5,5 leicht sauer sind. Ist die Atmosphärenluft nun durch weitere säurebildende Substanzen, wie z. B. Schwefeldioxid (SO_2) oder Stickstoffoxide (NO_x) oder auch durch höhere CO_2 -Gehalte belastet, werden auch die Regenwässer mit den entsprechenden Konzentrationen angereichert (siehe ► **Kap. 4**) und werden saurer. Ein höherer Säuregehalt der Niederschlagswässer verändert in der Folge die hydrochemischen Eigenschaften der Sickerwässer in der ungesättigten Bodenzone und letztlich die Grundwasserqualität.

Spurenelemente wie Zink, Blei, Kupfer oder Cadmium bilden neben den Säurebildnern eine weitere Gruppe von Substanzen, die aus Industrieanla-

gen oder vom Verkehr emittiert werden und durch Lösungsprozesse vom Niederschlag aufgenommen und in den Wasserkreislauf eingebracht werden. Auf der Basis zahlreicher Studien aus den 1980er und 1990er Jahren haben Matschullat et al. (1997) einen globalen Vergleich der Atmosphärenkonzentrationen von Haupt- und Spurenelementen dokumentiert. Hier zeigt sich, dass europäische Stadtgebiete (hier am Beispiel Mailand) z. B. eine 500- bis 1000-mal höhere Bleikonzentration aufweisen als Reinluftgebiete wie die Arktis oder das Amazonasbecken. Arsen tritt in nachweisbarer Konzentration überhaupt nur im Bereich von industriellen Ballungszentren auf.

Neben Gasphasen enthält die Luft auch Anteile an feinsten festen Partikeln, den Aerosolteilchen. Diese bestehen aus Mineralstaub, Bodenpartikeln, Salzen, organischen Anteilen, wie Sporen oder Pollen aber auch aus Ruß, der durch Vegetationsbrände entsteht oder auch von industriellen Anlagen freigesetzt wird. Untersuchungen zur globalen Mengenabschätzung sind bisher nicht abgeschlossen und über die Reihung zwischen Meersalz, geogenen und anthropogenen Stäuben besteht in Forschungskreisen Uneinigkeit. Die Mengenabschätzungen natürlicher Aerosole liegen etwa im Bereich von 1 bis 2 Gt a^{-1} , jene für anthropogene Stäube um etwa eine Zehnerpotenz darunter (Matschullat et al. 1997). Die Hauptmasse der natürlichen Aerosole liegt in einem Größenbereich von 1 bis $10 \mu\text{m}$ und wird auch als Feinstaub bezeichnet. Anthropogene Feinstäube weisen häufig Größen von weniger als $1 \mu\text{m}$ auf. Sie werden nicht mehr gravitativ in Form einer trockenen Deposition abgelagert, sondern erst durch Auswaschen aus der Troposphäre zur Erdoberfläche zurücktransportiert. Sie sind damit also Teil des Niederschlags – man spricht auch von nasser Deposition. Die geringe Größe der Partikel führt dazu, dass sie über weite Strecken transportiert werden können und an Stellen niedergehen, die weit von den Produktionsstätten und den industriellen Ballungsräumen entfernt sein können. Es ist daher im Normalfall nicht möglich, die Emissionsquelle eines mit anthropogenen Aerosolen verunreinigten Niederschlags eindeutig zu bestimmen. Näheres zur Feinstaubproblematik ist im ► **Kap. 3** nachzulesen.

10.3 Einflüsse durch die Landwirtschaft

In Land- und Forstwirtschaft werden Stoffe, die sich auf die Wasserqualität auswirken können, einerseits im Rahmen von Düngungsmaßnahmen und andererseits zur Schädlingsbekämpfung eingesetzt.

Bei der Düngung werden Böden mit pflanzenverfügbaren Nährstoffen angereichert, um das Pflanzenwachstum anzuregen und damit den Ertrag zu erhöhen. Düngemittel können organischer oder mineralischer Natur sein. Die wichtigsten Inhaltsstoffe sind in beiden Fällen Stickstoff, Phosphor und Kalium, aber auch Schwermetalle sind zugegen. Im organischen Dünger (z. B. Gülle) wird Stickstoff in Form von Ammonium als Stoffwechselprodukt ausgebracht und im Boden zu Nitrat oxidiert (siehe dazu ► [Kap. 2](#)). Das im Boden angereicherte und pflanzenverfügbare Nitrat kann unerwünschterweise von Sickerwässern ausgewaschen und in den Grundwasserkörper oder in Oberflächengewässer transportiert werden. Eine Folge dieses Stofftransports ist z. B. die Eutrophierung von Gewässern. Ein Überangebot an Nährstoffen in lichtdurchfluteten Oberflächengewässern führt z. B. zu vermehrtem Algenwachstum. Der Eintrag in den Grundwasserkörper ist vor allem dann von Bedeutung, wenn daraus Trinkwasserversorgungen betrieben werden. Hier wirkt sich der Schadstoff dann direkt auf das Schutzgut „menschliche Gesundheit“ aus. Der Grenzwert für Nitrat im Trinkwasser liegt laut [TrinkwV \(2001\)](#) bei 50 mg l^{-1} . Dieser Wert wird in landwirtschaftlich geprägten Gebieten häufig überschritten und eigentlich verfügbare Wasserkörper können dann nicht für die Trinkwasserversorgung herangezogen werden. Erhöhte Nitratgehalte stellen in vielen Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung ein großes Hindernis bei der Erreichung der Qualitätsziele der WRRL der EU dar (siehe ► [Kap. 2](#)).

Pestizide werden in der Landwirtschaft eingesetzt, um Nutzpflanzen-Schädlinge und andere unerwünschte Pflanzen von den Nutzpflanzen fernzuhalten und damit den Ertrag zu sichern. Laut [Koš \(1997\)](#) gehen global etwa 35 % der landwirtschaftlichen Erzeugnisse durch Krankheiten, Wildkräuter oder Schädlinge verloren. Ohne den Einsatz von Pestiziden würde schätzungsweise ein

weiteres Drittel der Ernten verlorengehen. Um die Welternährung zu gewährleisten, ist der Einsatz von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln unvermeidbar. Um nachhaltige negative Folgen, wie sie bereits für die Düngung beschrieben wurden, dennoch zu vermeiden, gelten strenge internationale Regelungen zur Ausbringung derartiger Stoffe in die Umwelt. So wurde z. B. mit 01. September 2013 die Biozidprodukte-Verordnung (BPV 2012) – Verordnung der EU Nr. 528/2012 – in Kraft gesetzt und sie wird derzeit in nationalstaatliche Gesetze eingearbeitet.

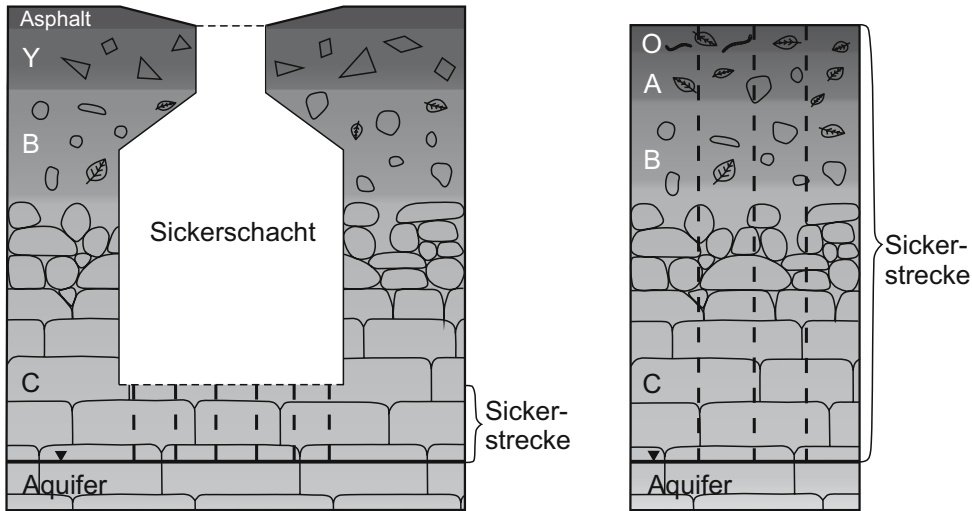
Detaillierte Beschreibungen der Wirkung von Dünger und Pestiziden in Boden und Grundwasser sowie der historischen Entwicklung verschiedener in der Land- und Forstwirtschaft verwendeter Schadstoffe werden z. B. bei [Blume et al. \(2013\)](#) oder [Wisotzky \(2011\)](#) gegeben.

10.4 Urbane Einflüsse auf Grundwasserkörper

Städtische Siedlungsräume weisen im Vergleich zu ländlichen Gebieten grundsätzlich ähnliche umwelt-geologische Problemstellungen auf, denn es kommt auch hier durch die anthropogene Einflussnahme zu qualitativen Beeinflussungen der Hydrosphäre, wobei sich die Prozesse und die Schadstoffspektren von jenen in der Landwirtschaft unterscheiden. Zusätzlich ergeben sich erhebliche Einflüsse auf die Prozesse der Grundwasserneubildung und damit auf die Grundwasserquantität. Die folgenden Abschnitte beschreiben anhand einiger Beispiele Einflüsse des urbanen Raums auf Grundwasserkörper.

10.4.1 Quantitative Auswirkungen

Bei Bautätigkeiten jeder Art, ob für Gebäude oder Straßen und Parkflächen, werden freie Flächen, auf denen bis dahin Wasser entsprechend der natürlichen Durchlässigkeit des Untergrunds versickern konnte, versiegelt. In der Vergangenheit hat diese Praxis vor allem in dicht besiedelten Gebieten, dem städtischen Raum und den Industriegebieten dazu geführt, dass die natürliche Grundwasserneubildung oft massiv reduziert wurde.



■ **Abb. 10.1** Schema einer Anlage zur Versickerung von Niederschlägen auf versiegelten Flächen im Vergleich mit der natürlichen Sickerstrecke eines nicht versiegelten Bodens. Die erhebliche Reduzierung der Sickerstrecke innerhalb der ungesättigten Zone führt zu qualitativen Veränderungen der Sicker- und damit der Grundwasserqualität. Die reinigende Wirkung der ungesättigten Bodenzone fehlt weitgehend

Wie in ► Gl. 4.2 zum Ausdruck kommt, verteilt sich der Gebietsniederschlag auf eine unterirdische und eine oberirdisch abfließende Komponente. Eine häufige Folge verringerter Versickerungsraten in einem Gebiet kann ein Anstieg des oberflächlichen Abflusses sein, verbunden mit der erhöhten Gefahr von Hochwasserereignissen im Abflussraum.

Um diesen Tendenzen entgegenzuwirken, wurden in den letzten Jahrzehnten Strategien entwickelt, um die natürliche Verteilung von Niederschlägen auf ober- und unterirdischen Abfluss wieder herzustellen. Ein wichtiger Schritt war die generelle Vorgabe, dass Niederschlagswässer, die auf versiegelten Flächen niedergehen, durch entsprechende Anlagen dennoch zur Versickerung gebracht werden müssen. Das setzt jedoch voraus, dass mit den Gegebenheiten vor Ort eine Versickerung überhaupt möglich ist. Als Grundlage zur Bemessung der Sickeranlagen werden im Vorfeld eines Bauprojektes Sickerversuche durchgeführt, bei denen ein Starkniederschlagsereignis simuliert und die Sickerfähigkeit des Bodens unter definierten Rahmenbedingungen geprüft wird. In ■ **Abb. 10.1** ist eine Sickeranlage im Vergleich mit einer natürlichen Sickerstrecke dargestellt, in der die belebte Bodenzone und die ungesättigte Zone auf die Sickerwässer

einwirken können, bevor sie in den Grundwasserkörper eintreten.

Durch die künstliche Versickerung von Niederschlagswässern ist es grundsätzlich möglich, Gleichgewichte zwischen ober- und unterirdischem Abfluss weitgehend wieder herzustellen und damit Probleme des Hochwasserschutzes zu lösen. Gleichzeitig ergeben sich jedoch neue Ungleichgewichte bzw. Veränderungen der natürlichen Situation und deren Auswirkungen stehen aktuell im Fokus der Forschung zur urbanen Hydrogeologie.

Durch die Praxis der punktuellen Versickerung von Niederschlagswässern kommt es zu Aufwölbungen der Grundwasseroberfläche und damit lokalen Veränderungen der Grundwasserfließrichtung. In vielen Fällen wird auch ein Anstieg der Grundwasseroberfläche im städtischen Bereich festgestellt, weil durch die Versickerungsanlagen insgesamt mehr Niederschlag dem unterirdischen Abfluss zugeführt wird, als dies im natürlichen ungestörten Zustand der Fall wäre. Unterirdische Einbauten, wie Schächte, Kanäle, Leitungskünetten und Tunnel erhöhen punktuell oder entlang von Linien die Wasserdurchlässigkeit. Gleichzeitig können Einbauten, die ins Grundwasser hineinreichen, den natürlichen Grundwasserfluss behindern und damit lokale Umlenkungen bzw. Aufstau bewirken.

Sharp und Hibbs (2012) beschreiben den Einfluss künstlicher Versickerungen sowie künstlicher Veränderungen der Durchlässigkeiten in städtischen Grundwasserkörpern. Sie zeigen, wie aus Stadtgebieten beabsichtigt oder unbeabsichtigt Zonen verstärkter Grundwasserneubildung werden können. Je nach Grundwasserflurabstand können bereits geringe Änderungen der mittleren Grundwasserhöhen zu Bauwerksschäden (z. B. zu zeitweise oder permanent vom Grundwasser eingestauten Fundamenten und feuchten Kellerräumen) führen.

Der nächste Schritt, im städtischen Raum die Einflüsse auf den Grundwasserhaushalt zu verringern, ist die Gestaltung der urbanen Elemente entsprechend den natürlichen Gegebenheiten des Umlands. Dazu gehört z. B. der Einsatz von Gründächern, die eine an das Umland angepasste Verdunstung ermöglichen oder auch die Entwicklung wasserdurchlässiger Flächenbeläge. Hierbei können Straßenbeläge die Rolle von Böden bei der Wasserspeicherung und Versickerung übernehmen, sofern sie mit einer entsprechenden Porosität ausgestattet sind. Die Entwicklung derartiger Flächenbeläge ist Gegenstand aktueller Forschungsprojekte in Deutschland (z. B. Göbel et al. 2012).

10.4.2 Qualitative Auswirkungen

Neben diesen quantitativen Auswirkungen der Bodenversiegelung und künstlichen Versickerung werden im städtischen Raum häufig auch nachhaltige qualitative Veränderungen des Grundwassers beobachtet. Während Niederschläge, die auf natürlichen Flächen auftreten, langsam durch die belebte Bodenzone und die anschließende ungesättigte Zone versickern, finden zahlreiche hydrochemische Prozesse statt, die zu einer Filterung oder auch Anreicherung der Wässer an bestimmten Stoffen führen. Dieser Monate bis Jahre andauernde Versickerungsprozess wird in den künstlichen Versickerungsanlagen extrem abgekürzt (■ Abb. 10.1). Eine belebte Bodenzone, in der Stoffaustausch stattfinden kann, durchlaufen diese Wässer nicht. So findet zum Beispiel die für weitere Lösungsprozesse wichtige Anreicherung der Wässer mit CO_2 nicht im natürlichen Ausmaß statt, was sich auf die weitere chemische Entwicklung der Wässer auswirken kann.

Durch das Auftreffen auf Asphalt- oder Dachflächen können dagegen andere Lösungsprozesse stattfinden. Vor allem von Straßen und Parkflächen können Mineralöl-Kohlenwasserstoffe von den Niederschlagswässern aufgenommen und auf kurzem Weg über die Versickerungsanlagen in den Grundwasserkörper transportiert werden. Während bei großen Parkflächen, Straßen oder auf Industriegelände Maßnahmen zum Wasserschutz, wie zum Beispiel Ölabscheider (■ Abb. 10.4) vorgeschrieben sind, sind derartige Maßnahmen für private Flächen meist nicht vorgesehen.

Durch Lecks in Abwasserleitungen und im Abstrom von Kläranlagen gelangen anthropogene Substanzen in den Wasserkreislauf, die die Schutzgüter „menschliche Gesundheit“ oder Ökosysteme nachhaltig beeinflussen können. Die Bedeutung, die Eigenschaften und die Wirkungen dieser oft nur in geringen Konzentrationen im ng l^{-1} - bis $\mu\text{g l}^{-1}$ -Bereich auftretenden Stoffe sind bisher nur unzureichend bekannt. Es handelt sich um eine große Zahl an verschiedensten Substanzen, die Inhaltsstoffe von Pharmazeutika, Kosmetik oder Reinigungsprodukten sind. Zur Bewertung der diffusen oder auch punktuellen Einträge in Grundwasserkörper werden Indikatorsubstanzen untersucht, die repräsentativ für bestimmte urbane Nutzungen, persistent und mobil innerhalb des Wasserkreislaufs sein sollten. Schirmer et al. (2007) geben einen Überblick über die häufigsten Indikatorsubstanzen und nennen unter anderem Carbamacepin (Antiepileptikum), Galaxolid (Bestandteil von Duftstoffen) und Gadolinium, das in medizinisch verwendeten Kontrastmitteln vorkommt.

Ein typischer Schadstoffparameter im urbanen Raum ist das Blei, das vor allem durch die jahrzehntelange, immer intensivere Verwendung verbleiter Kraftstoffe an die Atmosphäre abgegeben und über die Niederschläge in die Grundwasserkörper eingebracht wurde (siehe ► Abschn. 10.2). Ausführliche Untersuchungen zu den Auswirkungen der Bleiemissionen im städtischen Raum wurden z. B. von Mielke (1997) beschrieben.

Schadstoffausträge aus Altlasten bzw. auch aus nicht als Altlasten erkannten Altstandorten oder Altablagerungen sind ein qualitatives Problem, das nicht ausschließlich, aber verstärkt in urbanen

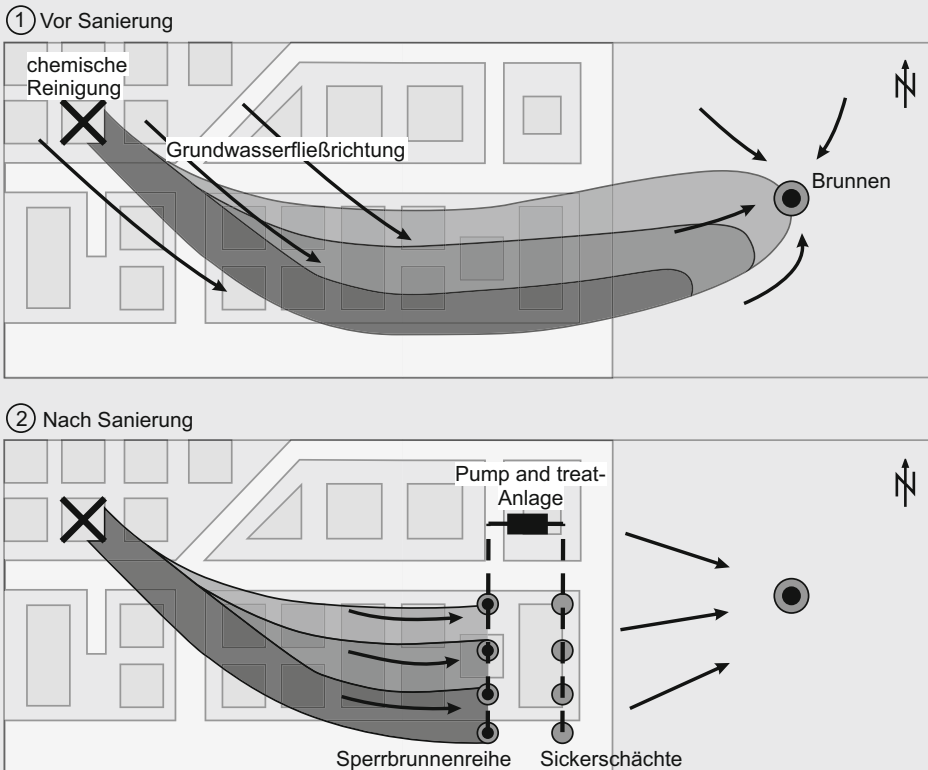
Exkurs 10.2 Fallbeispiel Urbane Gefahren für die Trinkwasserversorgung

Die Hauptwasserversorgung einer mittelgroßen deutschen Stadt wird durch einen Horizontalfilterbrunnen bestritten, der 30 m in einen quartären, fluviatil gebildeten Sedimentkörper hineinreicht. Der ca. 100 m mächtige Aquifer besteht aus sandigen Kiesen, die einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ aufweisen. Der Flurabstand beträgt ca. 10 m, es existiert keine gering durchlässige Deckschicht, die den Aquifer gegen Verunreinigungen von der Oberfläche schützt. Aus dem Brunnen können bis zu 300 Liter pro Sekunde entnommen werden. Das Brunnenbauwerk befindet sich am Stadtrand auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche, für die im Rahmen der Schutzgebietsausweisung ein Düngeverbot sowie ein Verbot für den Einsatz von Pestiziden erlassen wurden. Die nächstgele-

gene Wohnsiedlung ist ca. 500 m vom Standort entfernt und befindet sich im Anstrom des Brunnen. Im Zuge der regelmäßigen Qualitätsüberprüfung des Brunnenwassers wurden auffällige Gehalte an chlorigen Kohlenwasserstoffen (CKW) im Brunnenwasser festgestellt. Der höchste festgestellte Wert lag zwar mit $0,009 \text{ mg l}^{-1}$ knapp unter der zulässigen Höchstkonzentration ($0,01 \text{ mg l}^{-1}$ laut TrinkwV 2001), dennoch ist der Wasserversorger beunruhigt und meldet seine Beobachtungen der zuständigen Behörde. Eingeleitete historische Recherchen ergeben, dass im fraglichen Siedlungsraum bis in die frühen 1990er Jahre eine kleine chemische Reinigung betrieben worden war. Hier wurde mit Reinigungsmitteln manipuliert, die in großen Konzentrationen Tetrachlorethen

enthalten haben. Grundwasser- und Bodenluftuntersuchungen im Nahbereich des Altstandorts zeigen hohe Konzentrationen an CKW, wobei die Sättigungskonzentration für Tetrachlorethen von 151 mg l^{-1} im direkten Abstrom des Standorts nahezu erreicht wird. Aufgrund der niedrigen Viskosität der CKW konnten sie über Jahrzehnte durch den Betonboden des Reinigungsgebäudes versickern und durch die ungesättigte Bodenzone in den Grundwasserkörper absinken. Mit zunehmender Entfernung vom Schadensherd nimmt die Konzentration zwar deutlich ab, dennoch erreicht die Schadstofffahne inzwischen den 500 m stromabwärts gelegenen Entnahmehereich und beeinträchtigt die Trinkwasserqualität.

10



■ Abb. 10.2 Brunnenstandort, Kontaminationsherd und Sanierungsmaßnahme

Exkurs 10.2 (Fortsetzung) Fallbeispiel Urbane Gefahren für die Trinkwasserversorgung

Da die Brunnenanlage zur Versorgung der Stadt auf Dauer unverzichtbar ist, muss eine weitere Verschlechterung der Wasserqualität unbedingt verhindert werden. Nach umfangreichen Untersuchungen an Boden, Grundwasser und Bodenluft entscheiden sich die Experten für eine dauerhafte „pump-and-treat-Lösung“ (siehe ► [Kap. 8](#)). Das heißt, das Grundwasser wird im Anstrom des Brunnens entnommen, gereinigt und anschließend wieder

in den Untergrund eingebracht. Zur Überprüfung der Sanierungsmaßnahme werden die entnommenen Wässer in kurzen Zeitabständen auf ihre CKW-Gehalte überprüft. Parallel dazu wird eine Ersatzwasserversorgung geplant, die im Falle einer dennoch auftretenden erhöhten CKW-Konzentration kurzfristig in Betrieb genommen werden kann. Die räumliche Situation und die Lage der Sanierungsanlage sind in [Abb. 10.2](#) dargestellt.

Das Beispiel zeigt die große Herausforderung, die Trinkwasserschutz in urbanen Gebieten darstellt. Oft können kleine, schlecht verifizierbare Schadenserde der Grund für eine nachhaltige Beeinträchtigung der Qualität des Trinkwassers sein. In vielen Fällen ist die Ursachenfindung noch weit komplexer als im hier geschilderten Beispiel.

Räumen auftritt, in denen die Dichte an problematischen Standorten ungleich höher ist als im ländlichen Raum. Je nach Art des Kontaminationsherdes besteht ein großes Spektrum an Schadstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Gefährdungspotenzialen für Trinkwasserversorgungen (siehe ► [Exkurs 10.2](#)). Details zur Altlastenproblematik sind dem ► [Kap. 8](#) zu entnehmen, Informationen zu den speziellen Eigenschaften bestimmter Schadstoffe finden sich im ► [Kap. 2](#).

10.4.3 Urbane Wärmeinseln

Durch ein dichtes Netz an Wärmeproduzenten im städtischen Raum sowie dunkle, wärmeabsorbierende Asphaltflächen herrschen in Stadtgebieten meist signifikant höhere Temperaturen als in ländlichen Gebieten vergleichbarer Höhenlage. Vor allem in Gegenden, in denen die Winter generell schneereich sind, zeigt sich dieser Effekt ganz deutlich an der Schneefreiheit der Städte inmitten der sie umgebenden Winterlandschaften.

Da die Grundwassertemperatur sehr eng an die Jahresdurchschnittstemperatur eines Einzugsgebiets geknüpft ist, führt dieser Umstand bereits zu leicht erhöhten Temperaturen der städtischen Grundwässer. Zahlreiche unterirdisch verlegte Leitungen, die punktuelle Versickerung von erwärmten Wässern aus industriellen Kühlanlagen und exotherme Prozesse in Altablagerungen führen dazu, dass dieser Effekt weiter verstärkt wird. Nicht urban beeinflusste Grundwassertemperaturen liegen in Deutschland

um 10 °C bis maximal 13 °C in neutralen, also weder jahreszeitlich noch geothermisch beeinflussten Tiefenzonen. Im städtischen Raum können die Grundwassertemperaturen dagegen oft deutlich über 15 °C liegen.

Die Folgen erhöhter Grundwassertemperaturen können vielfältig sein. Da viele hydrochemische Prozesse temperaturabhängig sind, kann es zu Einflüssen auf die chemische Beschaffenheit der Wässer sowie ihr Lösungsverhalten im Untergrund kommen. Die Entwicklung von Biofilmen kann durch erhöhte Grundwassertemperaturen beeinflusst, Porengrundwasserleiter können dadurch in ihrer Durchlässigkeit beeinträchtigt werden. Nachdem Grundwasserleiter gleichzeitig auch Lebensräume sind, können Temperaturveränderungen auch zu Beeinflussungen der Grundwasserfauna beitragen.

Im Hinblick auf die energetische Nutzung von oberflächennahen Grundwasserkörpern (siehe ► [Kap. 11](#)) können sich dagegen Vorteile aus urbanen Temperaturanomalien des Grundwassers ergeben. Höhere Grundwassertemperaturen erlauben die Gewinnung größerer Energiemengen, gleichzeitig können Grundwasserwärmepumpen-Anlagen die urbanen Grundwassererwärmungen abmildern.

10.5 Verkehrsinfrastruktur

Zu den Verkehrsflächen zählt man in der Raumplanung neben Straßen auch Flächen, die für den Schienen- und Luftverkehr benötigt werden. Zusätzlich werden Flüsse, die dem Schiffsverkehr dienen, den

Verkehrsflächen im weiteren Sinne zugerechnet. Hier sollen die spezifischen Umweltfragestellungen, die sich für den Bahn-, Flug- und Schiffsverkehr ergeben, außer Acht gelassen und nur die speziellen Fragestellungen in Zusammenhang mit Straßen thematisiert werden. In diesem Bereich finden an verschiedensten Stellen Einwirkungen auf die Hydrosphäre statt.

Ein wichtiger Aspekt, der sich auf Verkehrsflächen ebenso wie auf Siedlungsflächen auswirkt, ist die Bodenversiegelung, die nachhaltige quantitative Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben kann. Technische Maßnahmen zur Versickerung von Straßenwässern sowie Untersuchungen zur Verbesserung der Wasserdurchlässigkeit von Straßenbelägen sollen dazu dienen, diese quantitative Beeinflussung von Böden und Grundwasserkörpern zu vermeiden (siehe dazu ► [Abschn. 10.4.1](#)). Die Praxis der künstlichen Versickerung von Niederschlägen auf versiegelten Flächen wirft andererseits aber Fragen der Beeinflussung der Grundwasserqualität sowie der Einbringung von Schadstoffen im Einflussbereich von Verkehrswegen auf.

10.5.1 Straßensalzung

Ein weit verbreitetes Problem in kühl-gemäßigten Klimagebieten ist die Ausbringung von Streusalz im Rahmen der Schneefreihaltung von Verkehrsflächen. In Deutschland werden im Durchschnitt etwa 1,6 Millionen Tonnen (Mittelwert aus 1992 bis 2010) Streusalz pro Jahr im höherrangigen Straßennetz ausgebracht (Statista 2014). In Österreich sind es je nach der Intensität des Winters jährlich 200.000 bis 300.000 t. Streusalz besteht im Wesentlichen (zu mehr als 98 %) aus Steinsalz, also Natriumchlorid mit geringen Mengen an Nebenbestandteilen wie Anhydrit oder anderen Chloriden. Als Rieselhilfe werden dem Streusalz Eisencyanidkomplexe (► [Kap. 2](#)) zugefügt, die vor allem im Einflussbereich von Streusalzlagern zu messbaren Cyanidkonzentrationen im Grundwasser führen können.

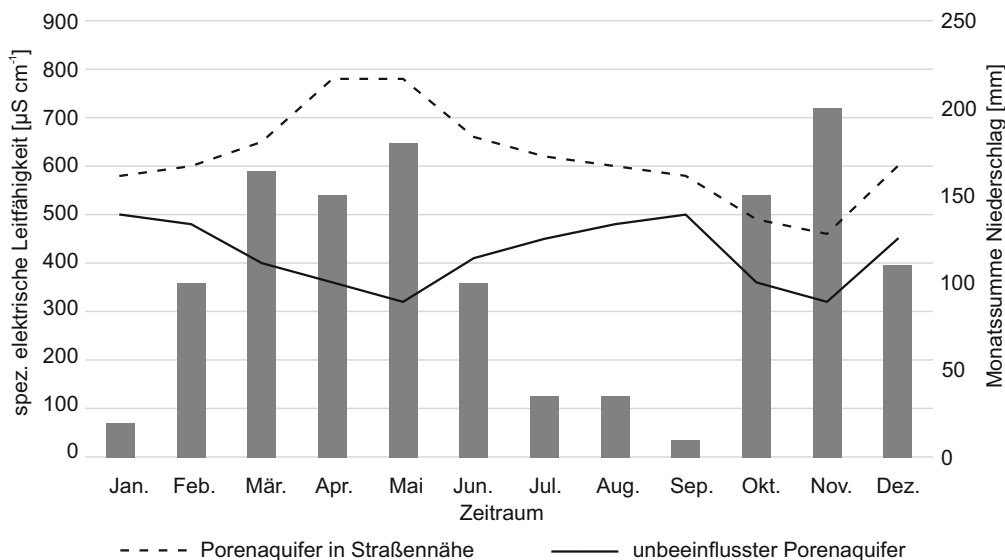
In Abhängigkeit von Witterung, Lage, Verkehrsbelastung und Gefährdungssituation werden in jeder Wintersaison bis zu 2 kg Chlorid pro Straßenkilometer ausgebracht. Die in der flüssigen Streusalzlösung gelösten Chlorid- und Natrium-

ionen gelangen entweder durch Luftverfrachtung direkt nach der Ausbringung oder durch die Sprühwirkung der Fahrzeuge in die Straßenrandbereiche oder werden mit den oberflächlich abfließenden Straßenwässern in die punkt- oder linienförmig entlang der Straßen errichteten Versickerungsanlagen eingebracht. Von dort werden sie in die Böden und straßennahen Grundwasserkörper eingeleitet.

Natriumionen werden dabei durch Ionenaustauschprozesse bevorzugt an den Bodenkörnern bei gleichzeitiger Mobilisierung anderer sorptiv gebundener Kationen (Kalium, Calcium, Magnesium) adsorbiert. Dies kann in der Folge zu nachhaltigen Veränderungen der Bodeneigenschaften und -funktionen (siehe ► [Kap. 5](#)) führen. Blume et al. (2013) klassifizieren derart anthropogen überprägte Böden aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften explizit als „Straßenrandböden“.

Die gelösten Chloridionen sind dagegen hochmobil und fließen mit der Bodenlösung dem Grundwasser zu. Ob sie hier eine nachhaltige messbare Beeinträchtigung der Grundwasserqualität (Erhöhung der Gesamtmineralisation) bewirken, hängt von der Verdünnung durch zuströmende unbelastete Grundwässer ab. Straßensalzung im Bereich eines mächtigen, gut durchlässigen und schnell fließenden Grundwasserstroms wirkt sich nicht oder nur gering aus, während sie im Bereich eines geringmächtigen Aquifers mit langsamen Fließgeschwindigkeiten zu einer deutlichen Veränderung der Wasserqualität führen kann. Dies stellt vor allem dort ein großes Problem dar, wo der belastete Aquifer gleichzeitig der Trinkwasserversorgung dient.

In ► [Abb. 10.3](#) ist die Entwicklung der Gesamtmineralisation der zur Trinkwasserversorgung genutzten Grundwässer über ein Beobachtungsjahr dargestellt. Die durchgezogene Linie zeigt einen unbeeinflussten Brunnen. Die punktierte Linie zeigt die Entwicklung eines Brunnens im Abstrom einer Schnellstraße. Während die Wässer im unbelasteten Brunnen im Frühjahr eher zu einem Rückgang der Mineralisation (Verdünnungseffekt durch Schneeschmelze) neigen, zeigt der von Straßenwässern beeinflusste Brunnen eindeutig einen saisonalen Anstieg der Mineralisation, der sich auf den Einfluss von Streusalz zurückführen lässt.



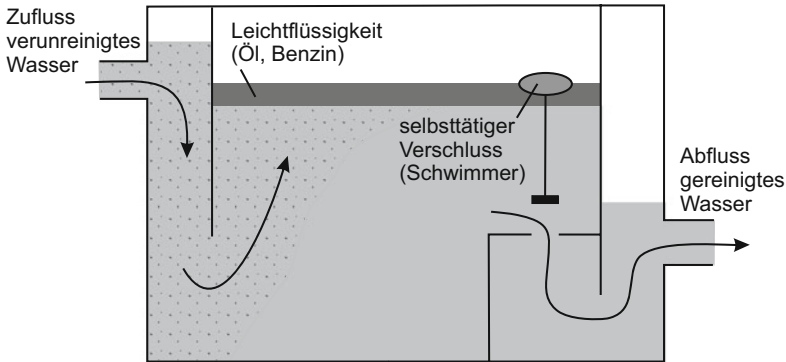
■ **Abb. 10.3** Ganglinien der Gesamtmineralisation zweier Grundwasserentnahmen ohne (durchgezogene Linie) und mit (punktierter Linie) Einfluss durch Straßensalzung

10.5.2 Tankstellen und Ölunfälle

Eine spezielle Umweltproblematik im Infrastrukturbereich stellt die Verunreinigung von Böden und Grundwässern durch Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) dar. Diese vor allem aliphatischen Kohlenwasserstoffe können in sehr verschiedenen Ausprägungen auftreten und weisen unterschiedliche chemisch-physikalische Eigenschaften auf. Eine für die Schadstoffausbreitung im Untergrund wesentliche Eigenschaft ist die Molekülgröße und daraus resultierend die Mobilität in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone (siehe ► [Kap. 2](#)). Allen Mineralölkohlenwasserstoffen gemeinsam ist aber die Eigenschaft hydrophob, also gering wasserlöslich, zu sein und eine niedrigere Dichte als Wasser aufzuweisen. Nach dem Durchlaufen der ungesättigten Zone, in der bereits je nach Viskosität eine Anlagerung der MKW an die Bodenkörner erfolgt, schwimmen diese auf dem Grundwasserspiegel auf und werden in Grundwasserfließrichtung abtransportiert.

Derartige Schadstoffbelastungen ergeben sich meist durch diffuse Freisetzungen kleiner Mengen. Auf Parkflächen, Tankstellen oder in KFZ-Betrieben kommt es häufig vor, dass Fahrzeuge Öl verlieren oder durch unsachgemäßen Umgang und

mangelnde Sorgfalt Benzin oder Diesel in geringen Mengen freigesetzt wird. Aufgrund derartiger diffuser Verschmutzungen sind KFZ-Betriebe und Tankstellen jene Branchen, die mit Abstand am häufigsten als Altstandorte, also Betriebsstandorte mit Gefährdungspotenzial, ausgewiesen wurden. In Deutschland wurde vor allem in den 1990er Jahren ein umfangreiches Sanierungsprogramm für Tankstellen ausgeführt. In Österreich entfallen von insgesamt rund 64.000 registrierten Altstandorten aktuell etwa 20.000 allein auf KFZ-Betriebe und Tankstellen (Granzin und Valtl 2014). Um diese diffuse Schadstofffreisetzung zu verhindern, sind für Parkflächen und vor allem für Tankstellenbetriebe Vorkehrungen zu treffen. Dazu gehört, dass z. B. die Niederschlagswässer gesammelt und vor der Ableitung in Versickerungsanlagen oder den Schmutzwasserkanal einem Leichtflüssigkeitsabscheider (auch Ölabscheider) zugeführt werden müssen. Die Ausgestaltung und Wartung solcher Anlagen regelt eine europäische Norm (EN 858-1, 2005), die im gesamten EU-Raum Gültigkeit hat. Von modernen, gesetzeskonform ausgestatteten Betrieben dieser Branchen geht daher heute im Routinebetrieb keine derartige Umweltgefahr mehr aus. Die Funktionsweise eines Ölabscheiders ist in ■ [Abb. 10.4](#) dargestellt.



■ **Abb. 10.4** Schematische Darstellung eines Leichtflüssigkeitsabscheiders. Der Dichteunterschied zwischen Wasser und den MKW wird genutzt, um die beiden Phasen voneinander abzutrennen. Während das Wasser abfließt, bleibt die leichtere Phase im Abscheider zurück. Eine Schwimmervorrichtung verhindert, dass bei geringer Wasserführung auch die Leichtphase abfließen kann

Zu weit größeren Problemen kann es im Fall von Unfällen mit Tankwagen oder bei Leckagen an Öl- oder Benzintanks kommen. In kurzer Zeit können große Mengen an MKW in die Umwelt gelangen. Tankwagen beliefern Tankstellen mit Benzin und Diesel und erledigen die Versorgung von Haushalten mit Heizöl. Da das zulässige Gesamtgewicht eines Lastkraftwagens auf Europäischen Straßen generell auf 40 t beschränkt ist, können nach Abzug des Eigengewichts Öl- oder Benzinmengen im Umfang von bis zu 24 t transportiert werden. Ein Unfall eines derartigen Fahrzeugs, der zum Austritt der gesamten Füllmenge führt, setzt damit punktförmig bis zu 32.000 l Benzin ($Dichte = 0,75 \text{ kg l}^{-1}$) in die Umwelt frei. Ein sandiger Boden weist einen durchschnittlichen Porenanteil von 15 % auf. In einem solchen Boden könnten damit theoretisch bei dem geschilderten Unfall in kürzester Zeit 215 m^3 Bodenmaterial vollkommen mit Benzin gesättigt werden. Um eine Ausbreitung des Schadstoffs in der ungesättigten Bodenzone und schließlich im Grundwasser zu verhindern, müssen die kontaminierten Bodenschichten nach einem Unfall schnellstmöglich abgetragen und einer Entsorgung zugeführt werden.

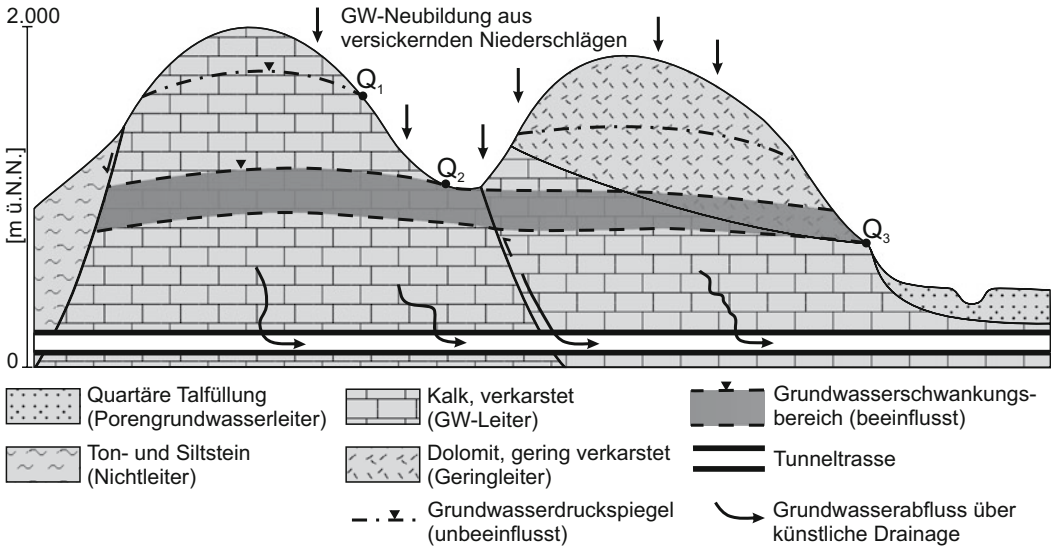
10.5.3 Tunnelbau

In Gebieten mit starkem Geländere relief, aber auch zunehmend in Hügellandschaften besteht die Tendenz, Verkehrswege unterirdisch zu errichten. Im

Gebirge sollen große Distanzen, die sich aus der Umfahrung von Gebirgszügen oder der Nutzung von Pässen ergeben, abgekürzt werden. In dicht besiedelten Hügellandschaften und Ebenen werden immer öfter Straßen und Bahnlinien unter die Erde verlegt, um damit die Anrainer vor Lärm und Abgasbelastungen zu schützen. Häufig wird bei Tunnelbauten in das bestehende Grundwassersystem eingegriffen – sowohl quantitativ als auch qualitativ.

Die qualitative Beeinträchtigung ergibt sich vor allem hinsichtlich der Bauwerkserrichtung. Je nach Tunnelvortriebsmethode werden Sprengmittel eingesetzt, Baufahrzeuge betankt und es wird bei der Tunnelsicherung Beton eingesetzt, dessen Inhaltsstoffe in das Grundwasser des Gebirges gelangen und damit die hydrochemische Situation stark verändern können.

Daneben fungiert ein Tunnelbauwerk, das unterhalb des Bergwasserspiegels vorgetrieben wird, trotz Injektions- und Dichtungsmaßnahmen häufig als Drainage. Durch sie werden je nach Lithologie und tektonischer Beanspruchung des Gebirges und damit seiner hydraulischen Durchlässigkeiten große Wassermengen gesammelt und konzentriert durch das künstliche Hohlraumbauwerk an die Oberfläche abgeführt. Eine detaillierte hydrogeologische Erkundung im Vorfeld von Tunnelplanungen ist daher von großer Bedeutung und im internationalen Tunnelbau gängige Praxis. Dabei werden die Lithologien entlang einer projektierten Tunneltrasse hydrogeologisch cha-



■ **Abb. 10.5** Schematische Darstellung der quantitativen Auswirkungen von Tunnelbauwerken in einem Gebirgszug (in Anlehnung an Gisbert et al. 2009)

rakterisiert. Verkarstungsfähigkeit und Verkarstungsrate, Kluftdichte und Kluftweiten sowie die hydraulische Verbindung zwischen den Klüften werden zur Erstellung von Wasserzutrittsprognosen herangezogen. Große Wasserzutritte können in der Bauphase ein großes technisches Problem darstellen, da die Wässer während des Baubetriebs kontinuierlich abgeleitet werden müssen. Unerwartet große Wassermengen können erheblichen Einfluss auf den Baufortschritt und damit auch auf die Baukosten eines derartigen Infrastrukturprojektes nehmen.

Aus umweltgeologischer Sicht sind jedoch andere Folgen starker Drainagewirkungen von Tunnelbauwerken relevant. Generell bildet sich aufgrund der hydrologischen Situation im Einzugsgebiet und der hydrogeologischen Verhältnisse im Gebirge ein Gleichgewicht zwischen Grundwasserneubildung durch infiltrierende Niederschlagswasser und Grundwasserabfluss über natürliche Wasseraustritte (Quellen). Ein künstliches Hohlraumbauwerk stellt eine zusätzliche Wasserwegsamkeit dar, erhöht also insgesamt die Durchlässigkeit des Gebirgskörpers. Das natürliche Gleichgewicht wird gestört und es kommt zu einer Absenkung der Grundwasserdruckfläche. Dauerhafte Veränderungen der natürlichen Bergwassersituation gehen häu-

fig mit dem Trockenfallen von Quellaustritten oder auch der Trockenlegung von landwirtschaftlichen Nutzflächen einher.

In ■ **Abb. 10.5** ist die Bergwassersituation in einem Gebirge schematisch dargestellt. Hier werden verkarstete Einheiten, aber auch nicht verkarstungsfähiges, weitgehend dichtes Gebirge vom Tunnelbauwerk durchfahren. In den verkarsteten Abschnitten kommt es zu starken Wasserzutritten in den Tunnel, verbunden mit einer massiven Absenkung des Grundwasserspiegels. Die Quelle Q₁ fällt dadurch dauerhaft trocken, die Quelle Q₂ liegt im Schwankungsbereich des abgesenkten Wasserspiegels und führt nach der Tunnelerrichtung nur mehr in Hochwasserzeiten Wasser, nur die Quelle Q₃, deren Austritt unterhalb des abgesenkten Grundwasserspiegels liegt, kann auch zukünftig weiter für die Wasserversorgung herangezogen werden oder speist im freien Abfluss ein Oberflächengewässer.

Für Quellen, die unterhalb des Stollens liegen, also im direkten Abstrom der Tunnelbaustelle, kann eine qualitative Beeinträchtigung durch die oben beschriebenen Einflussfaktoren nicht ausgeschlossen werden. Sofern sie der Trinkwasserversorgung dienen, müssen sie einer intensiven qualitativen Beobachtung unterzogen werden. Hydrogeologische

Beweissicherungsmaßnahmen werden vertiefend im ► [Kap. 12](#) besprochen.

Ein vergleichbares reales Beispiel wird von Gisbert et al. (2009) von einem Tunnelbauprojekt in Südspanien beschrieben.

10.6 Geogene Hintergrundbelastung

Neben der anthropogen bedingten Belastung von Trinkwässern, die in diesem und in den ► [Kap. 9](#) und [8](#) unter verschiedenen Aspekten thematisiert werden, kann auch die natürliche Beschaffenheit eines Grundwasserleiters dazu führen, dass ein Siedlungsgebiet nicht in der erforderlichen Qualität aus Wasserreservoirs im Nahbereich versorgt werden kann.

10.6.1 Beispiel Arsen im Trinkwasser

Ein weit verbreitetes Beispiel einer geogenen Belastung von Grundwässern ist der Parameter Arsen, der durch massive gesundheitliche Schädigungen von Teilen der Bevölkerung Westbengalens (Bangladesch, Indien) in den vergangenen Jahrzehnten weltweit besondere Beachtung gefunden hat. Arsenverbindungen werden über die Atmung sowie über die Nahrung aufgenommen. Während geringe Mengen und bestimmte Arsenverbindungen wieder ausgeschieden werden, tendieren größere Mengen zu einer Anreicherung im Körper. Eine chronische Aufnahme von Arsen, z. B. über das Trinkwasser, kann zu verschiedenen Krebs- und Herzerkrankungen führen. Typisch für chronische Arsenbelastungen ist auch die sogenannte „black-foot disease“, eine Erkrankung der Haut- und Blutgefäße, die zum Absterben von betroffenen Körperregionen führt.

In der gesamten Erdkruste befinden sich geschätzte 40.000 Gt Arsen (Römpf 2014), wobei saure magmatische Gesteine mit durchschnittlich 3 mg kg^{-1} höhere Konzentrationen aufweisen als basische Gesteine. Die höchsten Gehalte werden in Sedimentgesteinen, bevorzugt in Tonsteinen mit 13 mg kg^{-1} gemessen. Unabhängig von dieser globalen statistischen Betrachtung können in bestimmten Bereichen sowohl in magmatischen Gesteinen als auch in Sedimenten und Metamorphiten Anreicherungen stattfinden und überdurchschnittlich viel Arsen in bestimmten Mine-

ralphasen eingelagert werden. So werden z. B. im metamorphen Gebirgszug der Saualpe in Kärnten durchschnittliche As-Konzentrationen von über 100 mg kg^{-1} (Matschullat 1999) beschrieben. Im Buntsandstein Südniedersachsens wurden in Ton-Schluffstein-Horizonten As-Konzentrationen von bis zu 700 mg kg^{-1} ermittelt (Röhling und Wippermann 1999). Im Rotliegenden in Sachsen wurden Werte zwischen $0,3$ und $10.000 \text{ mg kg}^{-1}$, bei Mittelwerten um 55 mg kg^{-1} gemessen (Wendland et al. 1999). Diese Beispiele zeigen die große Varianz möglicher geogener As-Quellen innerhalb eines Aquifers. Ob sich diese As-Gehalte im Gestein auch auf jene im zirkulierenden Grundwasser auswirken, hängt von den jeweiligen chemischen Rahmenbedingungen und der Stabilität der arsenhaltigen Minerale ab. Oft reichen geringe Veränderungen der hydrochemischen Verhältnisse (pH-Wert, Redoxverhältnisse) aus, um die oft an Eisenhydroxide oder sulfidisch gebundenen Arsenphasen zu lösen und über den Grundwasserpfad zu mobilisieren.

Im Grundwasser tritt Arsen als anorganisches Arsenat(V) oder Arsenat(III) auf. Die Mobilität der generell gut löslichen Arsenverbindungen hängt von Sorptionsprozessen im Grundwasserleiter ab und kann je nach pH-Werten des Wassers sowie der Redoxverhältnisse stark variieren. Hohe geochemische Konzentrationen im Einzugsgebiet müssen daher nicht unbedingt zu erhöhten Arsenbelastungen im Grundwasser führen. Sofern aber die geochemischen Verhältnisse eine Lösung und damit Mobilisierung des Arsens begünstigen, kann es zu gesundheitsschädigenden Konzentrationen im Trinkwasser kommen. Die Trinkwasserversorgung von Siedlungen aus dem arsenbelasteten Aquifer ist damit nur nach vorheriger Wasserbehandlung, in manchen Fällen auch gar nicht möglich.

Auf der Basis medizinischer Erkenntnisse zum Gefährdungspotenzial von Arsen wurde der Grenzwert für Arsen im Trinkwasser von der WHO (2008) und in der Folge durch nationale Regelwerke von $40 \mu\text{g l}^{-1}$ auf aktuell $10 \mu\text{g l}^{-1}$ herabgesetzt. Dies hat viele Wasserversorger in geogen belasteten Gebieten vor die Aufgabe gestellt, Ersatzwasserversorgungen aus nicht belasteten Aquiferen zu errichten. Bietet sich diese Ausweichmöglichkeit nicht, müssen die Grundwässer vor der Abgabe ins Trinkwassernetz behandelt werden. Dies geschieht zum Beispiel durch Adsorption des Arsens an dafür geeignete

Exkurs 10.3 Kationenaustauschprozesse im künstennahen Aquifer

Innerhalb eines Aquiferkörpers finden neben Lösungs- und Fällungsprozessen immer auch Adsorptions- und Ionenaustauschprozesse statt (siehe auch ► Kap. 5). In einem Aquifer, in dem sich ein stationärer Zustand zwischen Grundwasserneubildung und -abfluss eingestellt hat und in dem Wasser von immer annähernd gleicher Qualität zu- und abströmen, werden die Kornoberflächen mit den für dieses Grundwasser typischen Ionen belegt. Die große Mehrheit der Süßwässer weist eine Zusammensetzung auf, die dem Ca-HCO₃-Typ entspricht. Dementsprechend sind auch die permanent oder pH-abhängig

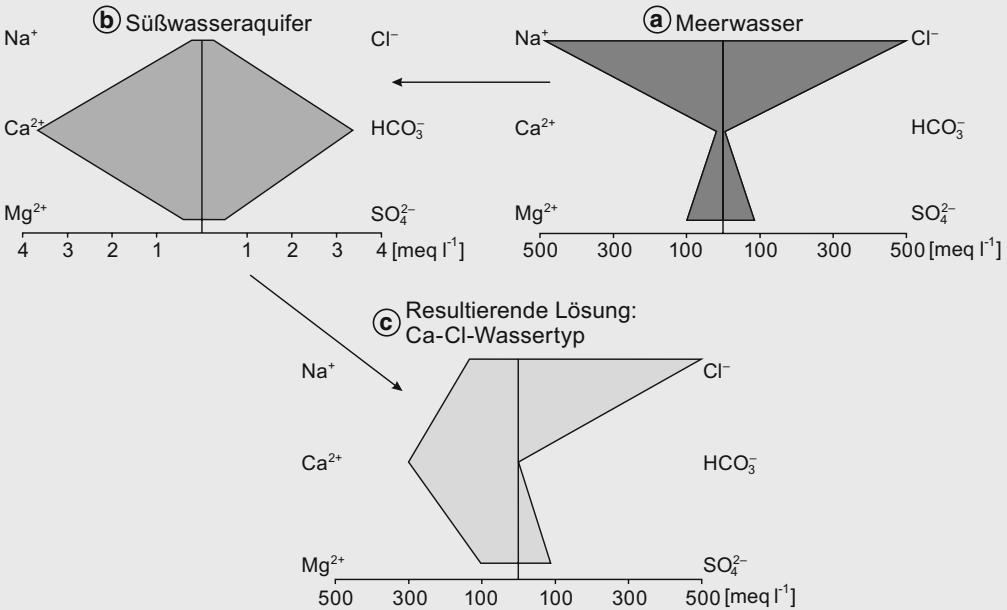
negativ geladenen Kornoberflächen vor allem mit Ca-Ionen belegt. Die typische Wasserzusammensetzung und Aquiferbelegung wird durch ein Stiff-Diagramm dargestellt, das die in ■ Abb. 10.6b gezeigte Form aufweist.

Strömt in diesen Aquifer durch Veränderungen der Grundwasserfließrichtung als Folge übermäßiger Entnahmen Meerwasser ein, so finden nicht nur Mischungsprozesse zwischen Süß- und Salzwasser statt. Es werden zusätzlich Kationenaustauschprozesse initiiert. Die Na-Ionen des Na-Cl-Typ-Meerwassers (siehe Stiff-Diagramm in ■ Abb. 10.6a) lagern sich an die

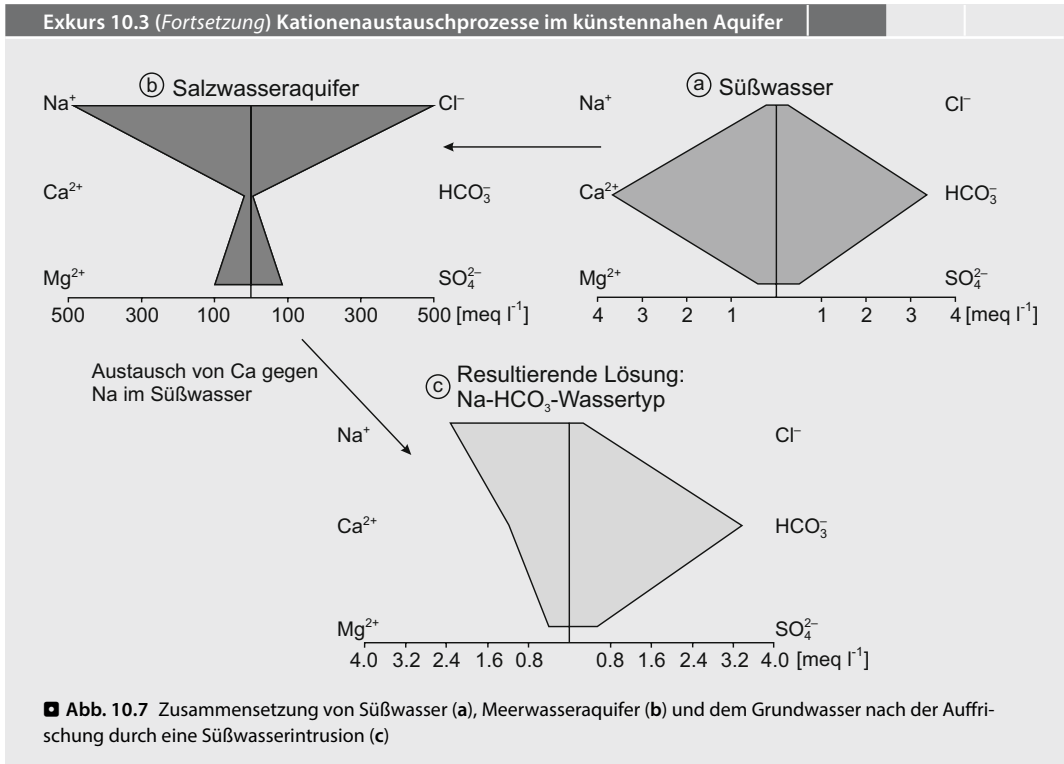
Kornoberflächen des Süßwasseraquifers an, während die Ca-Ionen in Lösung gehen. Das resultierende Wasser lässt sich als Ca-Cl-Wasser (■ Abb. 10.6c) beschreiben.

Der umgekehrte Prozess einer Süßwasserintrusion in einen durch Meerwasser geprägten Grundwasserleiter führt zur Bildung eines Na-HCO₃-Wassers, wie es in ■ Abb. 10.7 dargestellt ist.

Vertiefende theoretische Hintergründe zu Ionenaustauschprozessen im aquatischen System sind z. B. bei Appelo und Postma (2005) oder Wisotzky (2011) beschrieben.



■ Abb. 10.6 Zusammensetzung von Meerwasser (a), Süßwasseraquifer (b) und dem Grundwasser nach der Versalzung durch eine Meerwasserintrusion (c). In diesem Stiff-Diagramm werden die Konzentrationen der wichtigsten Ionen jeweils paarweise aufgetragen, wobei die üblicherweise aufgrund der Wassergenese nebeneinander vorkommenden Ionen auf einer Achse aufgetragen werden. Die Darstellung ermöglicht es, eine „ungewöhnliche“ Wassergenese anhand der Asymmetrie des Diagramms auf den ersten Blick zu erkennen



Substrate, die als arsenbelastete Schlämme zurückbleiben und entsprechend entsorgt werden müssen.

Es gibt umfangreiche Literatur zur Arsenproblematik im Grundwasser. Beispielhaft seien hier Welch und Stollenwerk (2003) genannt. Einen Einblick in die hydrochemischen Prozesse rund um das Arsen geben auch Appelo und Postma (2005). Zahlreiche Beispiele zur Arsenproblematik in Siedlungsräumen wurden von Rosenberg und Röhling (1999) zusammengeführt.

10.6.2 Beispiel Grundwasserversalzung im Küstenbereich

In küstennahen Gebieten bestehen meist Übergangsbereiche zwischen Süßwasseraquiferen (Salinitäten unter 0,1%), die von der Landseite her gespeist werden und Salzwasseraquiferen (Salinität > 1%), die im Austausch mit dem Meerwasser stehen. Aufgrund des Dichteunterschieds zwischen den schweren Salzwässern und den leichteren Süß-

wässern liegt neben einer lateralen Verteilung auch eine vertikale Schichtung innerhalb der küstennahen Aquifere vor. Wie weit die Salz- oder Brackwasser (Salinität 0,1 bis 1%) ins Land hineinreichen, hängt von der Beschaffenheit und Mächtigkeit des Aquifers, vom Fließgefälle aus dem Hinterland und von Gezeiteinflüssen ab.

Neben der Menge an gelösten Mineralen unterscheidet sich auch die Zusammensetzung typischer Süßwässer deutlich von einer Meerwasserzusammensetzung. Während Grundwässer meist dem Ca-HCO₃-Typ entsprechen (siehe ► Kap. 4), ist Meerwasser durch die dominanten Parameter Natrium und Chlorid geprägt, bildet also Wasser des Na-Cl-Typs aus.

Bei Grundwasserentnahmen in küstennahen, von Meerwasser beeinflussten Gebieten muss die Ergiebigkeit eines Brunnens vor der Inbetriebnahme besonders genau erkundet werden. Es muss sichergestellt sein, dass die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet ausreicht, um die Entnahme zu kompensieren. Eine Übernutzung der Süßwasserressource führt dazu, dass das sensible Zusammenspiel

der unterschiedlich mineralisierten Wässer gestört wird und letztendlich Salzwässer in den Süßwasseraquifer eindringen können (siehe ► **Exkurs 10.3**). Das Wasser ist dann ohne entsprechende Behandlung nicht mehr für Trinkwasserzwecke geeignet.

10.7 Wasserversorgung in ariden Gebieten

Während sich dieses Kapitel bisher der Frage gewidmet hat, welchen qualitativen Beeinträchtigungen Trinkwasserreservoir durch anthropogene oder geogene Einflüsse ausgesetzt sein können, soll abschließend noch eine emissionsseitige Betrachtung folgen. Welche Umweltbeeinträchtigungen können sich aus der Nutzung von Wasser durch den Menschen ergeben?

In Gebieten, in denen potenziell mehr Wasser verdunstet als durch Niederschläge geliefert wird, ist die Wasserversorgung über Grund- und Oberflächenwasserkörper, wie wir sie aus unseren gemäßigt humiden Klimabereichen kennen, nicht oder sehr eingeschränkt möglich. Im Folgenden werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, drei praktizierte Möglichkeiten und deren Umweltfolgen thematisiert.

10.7.1 Meerwasserentsalzung

Meerwasserentsalzung ist eine Möglichkeit, in küstennahen ariden Gebieten Trinkwasser in großen Mengen bereitzustellen. Es stehen dafür inzwischen zahlreiche Technologien zur Verfügung. Die am häufigsten im Großanlagenmaßstab eingesetzte Methode ist die mehrstufige Entspannungsverdampfung. Hierbei erfolgt die mehrfache Aufheizung und Abkühlung des Meerwassers in nacheinander geschalteten Heiz- und Kühlabschnitten. Das resultierende Destillat muss anschließend wieder aufgehärtet werden, um als Trinkwasser geeignet zu sein. Die mit Salz angereicherte Lake wird mit frisch zugeführtem Meerwasser verdünnt und erneut in den Kreislauf gebracht. Überschüssiges Salz wird ins Meer rückgeführt. Mit diesem Verfahren werden in Großanlagen, z. B. in Dubai bis zu 500.000 m³ Trinkwasser pro Tag produziert.

Eine weitere technisch ausgereifte und im Großmaßstab angewendete Methode ist die Umkehrosmose. Salzwasser wird unter hohem Druck durch

eine semipermeable Membran gepresst. Der Druck muss dabei so hoch sein, dass der osmotische Druck überwunden werden kann. Die Membran wirkt wie ein Filter, der nur bestimmte Moleküle und Ionen durchlässt. Salze oder Schwermetalle werden zurückgehalten. Das gering konzentrierte Wasser wird hier auch von Viren und Bakterien befreit. Anschließend werden zur Trinkwasseraufbereitung meist Aktivkohlefilter zur Abscheidung organischer Stoffe sowie UV-Anlagen nachgeschaltet.

Die Entsalzung mittels Membrandestillation nützt eine mikroporöse Membran, die nur Wasserdampf durchlässt und unterschiedlich warme Bereiche voneinander abtrennt. Salzwasser wird erhitzt, Dampf wechselt in den kälteren Abschnitt hinter der Membran und kondensiert hier wieder.

Einige weitere Verfahren sind aktuell in der Entwicklungsphase und kommen bisher nur in kleinen Anlagen zum Einsatz.

Gemeinsam ist allen Verfahren zur Meerwasserentsalzung ein erheblicher Energieaufwand, der für die Erhitzung bzw. zum Druckaufbau erforderlich ist. Da diese Energie in den meisten Fällen über thermische Kraftwerke und die Nutzung fossiler Brennstoffe gewonnen wird, ist die Trinkwassergewinnung mit massiver Freisetzung von CO₂ verbunden.

Darüber hinaus ergeben sich Umweltbelastungen aus dem Umgang mit den Rückständen der Entsalzung. Neben der hochkonzentrierten Salzsole sind dies Pestizide, Binde- und Fällungsmittel, Reinigungsmittel oder auch Schwermetalle, die aus Anlagenteilen herausgelöst und mit dem Restwasser ins Meer abgeführt werden. Trotz der großen Verdünnung, die diese Abwässer erfahren, kommt es in den betroffenen Küstenbereichen zu nachhaltigen Veränderungen bzw. Schädigungen der dort angesiedelten Ökosysteme. Mit den Umweltfolgen der Meerwasserentsalzung beschäftigen sich z. B. Lattemann und Höppner (2008).

Zur Lösung der Energie- und Umweltprobleme, die im Zusammenhang mit der Meerwasserentsalzung auftreten, werden inzwischen intensive Forschungsanstrengungen unternommen. Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, vor allem der Solarenergie, drängt sich in ariden Klimazonen geradezu auf. Daneben müssen Verfahren zur Verwertung der anfallenden Abfälle (Salze, Reinigungsmittel etc.) entwickelt werden, die die bisherige Praxis einer Entsorgung ins Meer ablösen müssen.

10.7.2 Nutzung fossiler Grundwässer

Ein weithin bekanntes Beispiel für die Nutzung fossiler Grundwässer ist die Anlage rund um den sogenannten „Great Man Made River“ in Libyen. Aus fünf Brunnenfeldern in der Sahara werden aus mächtigen Aquiferen, wie z. B. dem Nubian Sandstone Aquifer, große Mengen an fossilem Grundwasser gefördert und in die dicht besiedelten Küstenregionen geleitet. Aufgrund der fehlenden Grundwasserneubildung ist eine nachhaltige Bewirtschaftung dieses Aquifers nicht möglich. Es kommt stattdessen zu einer massiven Absenkung der Grundwasseroberfläche mit negativen Folgen für die Oasen im Einflussgebiet des übernutzten Aquifers. Offenbar wirken sich die Entnahmen aus dem 300 m tief liegenden Grundwasserkörper auf die mit 10 bis 60 m eher seichten oberflächennah genutzten Aquifere aus.

Neben dieser quantitativen Beeinträchtigung ergeben sich aus der Nutzung der tiefen Grundwässer auch qualitative Probleme. Wegen der langen Verweilzeiten von mehreren tausend Jahren, der erhöhten Drücke und Temperaturen im Aquifer handelt es sich teilweise um hochmineralisierte Wässer, die vor der Nutzung als Trinkwasser einer aufwändigen Behandlung unterzogen werden müssen. Vor allem die Eisen- und Mangangehalte der Wässer lassen eine Nutzung ohne Vorbehandlung nicht zu. Zudem kommt es im Bereich einiger der Brunnenanlagen durch die Druckentlastung, Abkühlung und Sauerstoffaufnahme der aufsteigenden Wässer zu Ausfällungen, die durch den Einsatz von Chemikalien wieder gelöst werden müssen.

Optimistische Schätzungen der statistischen Lebensdauer dieser nicht erneuerbaren Wasserreserven belaufen sich auf ca. 250 Jahre. Andere Berechnungen deuten jedoch darauf hin, dass die hier angezapften Aquifere in wenigen Jahrzehnten erschöpft sein werden.

Dieses größte und vermutlich bekannteste Beispiel der Nutzung fossiler Wasserreserven zeigt, dass diese Technologie auf mittlere Sicht nicht die Lösung des Wasserproblems arider Klimagebiete sein kann. Zahlreiche weniger spektakuläre Projekte dieser Art, vor allem im Nahen Osten, müssen in den nächsten Jahren bis Jahrzehnten durch andere, nachhaltigere Möglichkeiten der Wasserversorgung ersetzt werden.

10.7.3 Staubauwerke zur Retention saisonaler Niederschläge

Im Sinne eines nachhaltigen Wassermanagements werden Maßnahmen entwickelt, die dazu dienen, die vorhandenen Wasserressourcen in optimaler Weise zu nutzen. Neben der technisch hochwertigen Ausführung von Wasserwerken und Leitungssystemen gehört dazu auch die Bewusstseinsbildung für einen sparsamen Umgang mit dem verfügbaren Wasser.

Unter dem Oberbegriff des nachhaltigen Wassermanagements kann aber auch der Umgang mit den saisonal anfallenden Niederschlägen verstanden werden. Die wenigen, dafür aber oft starken Niederschläge tragen nur in geringem Maße zu einer Grundwasserneubildung bei. Sie werden stattdessen rasch über temporäre Oberflächengewässer in die größeren Vorfluter abgeführt. In diesen Fällen bietet es sich an, die Oberflächenwässer in Staubecken zurückzuhalten. Die Staubecken können dann selbst als künstliche oberirdische Wasserreservoir dienen, aus denen die Entnahme direkt erfolgt. Sie können aber auch als Versickerungsbecken angelegt werden und damit einer künstlichen Grundwasseranreicherung dienen. Die Niederschläge können auf diese Weise langsam einem Aquifer zugeführt werden, aus dem eine nachhaltige Trinkwassergewinnung erfolgen kann. Konflikt- und auswirkungsfrei ist die Technologie der Wasserspeicherung in Staubecken jedoch nur dort, wo keine Unterlieger von der Wasserentnahme betroffen sind. Das heißt, dass das Oberflächengewässer ohne Retentionsbecken ungenutzt ins Meer abfließen würde. Dieser Fall ist also nur in küstennahen Gebieten verwirklicht. Werden durch die saisonalen Niederschläge größere Flüsse gespeist, die über lange Strecken als Wasserversorger für ihre Anrainer dienen und werden zudem nationale Grenzen überschritten, birgt diese Technologie ein hohes Konfliktpotenzial.

Den politischen und sozialen Problemen, die sich aus der Wasserversorgung in ariden Klimagebieten ergeben, widmen sich Janosch und Schomaker (2008).

Rohstoff Wasser – Einiges, was man wissen sollte

- Die Grundlage fast jeder Trinkwasserversorgung bilden ausreichende und möglichst gleichmäßig verteilte Niederschläge. Über den Luftpfad sind die Niederschläge bereits verschiedensten Umwelteinflüssen ausgesetzt, die in der Folge in die Grundwasserspeicher eingebracht werden.
 - Maßnahmen zur Verbesserung der Erträge in der Landwirtschaft können zu einer nachhaltigen Beeinträchtigung von Grundwässern führen. Sofern diese der Trinkwasserversorgung dienen, müssen die Grundwasserspeicher durch geeignete Maßnahmen, wie zum Beispiel Düngeverbote in Brunnenschutzgebieten, vor einer Beeinträchtigung geschützt werden.
 - Im urbanen Raum gibt es zahlreiche Gefahrenpotenziale für das Grundwasser. Neben quantitativen Beeinträchtigungen, z. B. als Folge flächiger Oberflächenversiegelungen, bilden Schadstoffeinträge aus verschiedenen Quellen eine große und häufig diffuse Gefahr, die oft erst durch Qualitätsprobleme in den Routineuntersuchungen erkannt wird.
 - Der Bau und Betrieb von Straßennetzen, der Umgang mit wassergefährdenden Treibstoffen sowie der Tunnelbau können zu einer quantitativen und qualitativen Beeinträchtigung von Grundwasserkörpern führen.
 - Die Planung und Errichtung von Wasser-versorgungsanlagen muss die geologische Situation im Einzugsgebiet berücksichtigen. Dies gilt insbesondere in Gebieten mit geochemischen Besonderheiten, die eine Beeinträchtigung der Wasserqualität zur Folge haben. Man spricht dabei von geogener Hintergrundbelastung.
 - Geogene Hintergrundbelastungen werden oft erst durch die Wasserentnahme mobilisiert und damit anthropogen induziert. Ein Beispiel dafür ist die Versalzung von küstennahen Aquiferen.
- Die Wasserversorgung in ariden Klimagebieten kann durch Meerwasseraufbereitung, Nutzung fossiler Grundwässer oder der Bewirtschaftung saisonaler Niederschläge erfolgen. Jede Nutzung ist dabei mit Umweltproblemen verbunden, die im hohen Energieverbrauch, in der Freisetzung von Schadstoffen oder Ausbeutung nicht erneuerbarer Wasserressourcen liegen. Die Nutzung von Oberflächengewässern in großem Maßstab kann zudem politische Probleme aufwerfen.
 - Ein nachhaltiges Wasserressourcen-Management ist in ariden, aber auch in humiden Klimabereichen zur dauerhaften Sicherstellung einer qualitativ und quantitativ hochwertigen Wasserversorgung von großer Bedeutung.

? Testfragen zum Kapitel Rohstoff Wasser

1. Beschreiben Sie, warum es in städtischen Siedlungsräumen auch ohne direkte Grundwasserentnahmen zu Veränderungen des Grundwasserfließregimes kommen kann und wie man versucht, dieser Problematik zu begegnen.
2. Grundwasserkörper im urbanen Raum sind zahlreichen potenziellen Gefahren ausgesetzt. Nennen Sie Beispiele für typische Schadstoffemittenten im städtischen Raum, die zum Problem für die Trinkwasserqualität werden können.
3. Inwiefern ist das Straßennetz als Teil der Verkehrsinfrastruktur als Gefährdung für Wasserreservoir anzusehen? Überlegen Sie selbst, wie sich andere Verkehrsnetze, wie z. B. Bahnlinien oder Flughäfen auf die Hydrosphäre und damit letztlich auf die Grundwasserqualität auswirken könnten.
4. Warum muss bei der Neuerrichtung eines Trinkwasserwerks immer auch die geochemische Situation im beteiligten Aquifer berücksichtigt werden?
5. Beschreiben Sie geogene Hintergrundbelastung, die die Grundwasserbeschaffenheit in einem Einzugsgebiet beeinflussen kann.

6. Welche spezielle Problematik ergibt sich bei der Nutzung von Grundwasser in küstennahen Gebieten?
7. Welche Möglichkeiten zur Bereitstellung von ausreichenden Mengen an qualitativ geeignetem Trinkwasser in ariden Klimazonen kennen Sie? Erläutern Sie, mit welchen Umweltproblemen die jeweiligen Technologien verknüpft sind.

Literatur

- Appelo CAJ, Postma D (2005) *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2. Aufl. A. A. Balkema Publishers, Leiden
- Blume HP, Brümmer GW, Schwertmann U, Horn R, Kögel-Knabner I, Stahr K, Auerswald K, Beyer L, Hartmann A, Litz N, Scheinost A, Stanjek H, Welp G, Wilke B-M (2013) *Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, München, Wien (Neubearbeitung)
- BPV (2012). Verordnung EU Nr. 528/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2012 über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten – Europäische Union
- EN 858-1 (2005). Abscheideranlagen für Leichtflüssigkeiten (z. B. Öl und Benzin) – Teil 1 Bau- Funktions- und Prüfgrundsätze, Kennzeichnung und Güteüberwachung; Deutsche Fassung EN858-1:2002 + A1:2004. Europäische Norm
- Gisbert J, Vallejos A, Gonzalez A, Pulido-Bosch A (2009) Environmental and hydrogeological problems in karstic terrains crossed by tunnels: a case study. *Environmental Geology* 58:347–357
- Göbel P, Starke P, Röhrer S, Hollenbeck I (2012) Die Bedeutung wasserdurchlässiger Flächenbeläge im Regenwasser- und Grundwasser-Bewirtschaftungskonzept urbaner Räume SDGG, Bd. 78. *Grundwasserschutz und Grundwassernutzung*, Wiesbaden
- Granzin S, Valtl M (2014) Verdachtsflächenkataster und Altlastenatlas. Umweltbundesamt, Wien
- GZÜV (2006). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich BGBl Nr. 479/2006, Gewässerzustandsüberwachungsverordnung – GZÜV. Republik Österreich
- Janosch M, Schomaker R (2008) *Wasser im Nahen Osten und Nordafrika – Wege aus der Krise*. Waxmann, Münster
- Koß V (1997) *Umweltchemie – Eine Einführung für Studium und Praxis*. Springer Verlag, Berlin
- Lattemann S, Höppner T (2008) Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220:1–15
- Matschullat J (1999) Arsen in der Geosphäre. In: Rosenberg F, Röhling H-G (Hrsg) *Arsen in der Geosphäre*. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 6. SDGG, Wiesbaden
- Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (1997) *Geochemie und Umwelt – Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre*. Springer, Heidelberg
- Mielke HW (1997) *Urbane Geochemie: Prozesse, Muster und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit*. In: Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (Hrsg) *Geochemie und umweltrelevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre*. Springer, Heidelberg
- Schirmer M, Strauch G, Schirmer K, Reinstorf F (2007) *Urbane Hydrogeologie – Herausforderung für Forschung und Praxis*. Grundwasser 12:178–188
- Schminke H, Gad G, Ahlrichs W, Bartsch I, Christl H, Gerecke R, Martin P, Rumm P, Wägele JW (2007) *Grundwasserfauna Deutschlands, ein Bestimmungswerk*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- Sharp JM, Hibbs BJ (2012) Special Issue on Hydrogeological Impacts of Urbanization. *Environmental and Engineering Geoscience* 18:1
- Statista (2014) Statistik-Portal. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/282120/umfrage/streusalz-verbrauch-auf-deutschen-strassen/>. Zugriffen: 13.08.2014
- TrinkwV (2001). Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Bundesrepublik Deutschland
- Rosenberg F, Röhling H-G (Hrsg) (1999) *Arsen in der Geosphäre*. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 6., SDGG, Wiesbaden
- Röhling H-G, Wippermann T (1999) Untersuchungen zur geogenen Grundlast von Arsen im Buntsandstein Südniedersachsens, Nordhessens und Nordthüringens. In: Rosenberg F, Röhling H-G (Hrsg) *Arsen in der Geosphäre*. Schriftenreihe der Deutschen geologischen Gesellschaft, Bd. 6., SDGG, Wiesbaden
- Römpf (2014) Thieme Verlag, Stuttgart. <https://roempf.thieme.de>. Zugriffen: 13.08.2014
- Wendland A, Rank G, Barth A (1999) Verteilung des Arsens in den Rotliegend-Sedimenten Sachsens. In: Rosenberg F, Röhling H-G (Hrsg) *Arsen in der Geosphäre*. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 6., SDGG, Wiesbaden
- Welch AH, Stollenwerk KG (Hrsg) (2003) *Arsenic in Groundwater: Geochemistry and Occurrence*. Springer Verlag, Heidelberg, New York
- WHG (2009). Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG). Bundesrepublik Deutschland
- WHO (2008). World Health Organisation. *Guidelines for Drinking-water Quality 3rd. ed., Vol. 1. Recommendations*, Geneva
- Wisotzky F (2011) *Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrochemische Modellierung*. Springer, Heidelberg
- WRG (2009). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Wasserrechtsgesetz 1959, BGBl Nr. 215 Novelle 2009. Republik Österreich
- WRRL (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 – Wasserrahmenrichtlinie. Europäische Union, Brüssel

Energieversorgung

Sylke Hilberg

- 11.1 Erneuerbare Energie – Quellen,
Entwicklung, Perspektiven – 192
- 11.2 Wasserkraftnutzung – 196
- 11.3 Geothermie – 202
- 11.4 Energieverteilung – 209
- Literatur – 212

Kurzfassung

In den vergangenen 40 Jahren hat sich der Energieverbrauch weltweit mehr als verdoppelt. Noch immer bedient sich der Großteil der Energiegewinnung aus fossilen Quellen wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Es gibt jedoch intensive Bestrebungen, mittelfristig einen erheblichen Teil des Energiebedarfs über erneuerbare Quellen zu decken. In der Europäischen Union wurde dies mit der 2009 ratifizierten Richtlinie zur Förderung der Erneuerbaren Energien angestoßen. Dabei wurde für die Mitgliedsstaaten eine verbindliche Steigerung des Anteils regenerativer Energien am Bruttoenergieverbrauch festgesetzt, die jeweils mit nationalen Programmen bis zum Jahr 2020 umzusetzen ist.

In diesem Kapitel werden einige der verfügbaren Möglichkeiten zur Gewinnung erneuerbarer Energie unter umweltgeologischen Aspekten betrachtet. Einerseits geht es darum aufzuzeigen, welche Rolle die Geologie darin einnimmt, aber auch um die Frage, wie sich die Nutzung erneuerbarer Energieträger auf die Systeme Hydrosphäre, Pedosphäre oder Lithosphäre auswirken kann. Wasserkraft und Geothermie, die direkt mit den geologischen Verhältnissen verknüpft sind, stehen daher im Fokus dieses Kapitels.

Voraussetzung für eine Nutzung der Wasserkraft ist die Verfügbarkeit von ausreichenden und stabilen Durchflussmengen, kombiniert mit einem Potenzialgefälle, das für die jeweilige Nutzungsart geeignet ist. Weiters spielen Speichereigenschaften des Einzugsgebiets, Durchlässigkeit und Stabilität des Gebirges eine wichtige Rolle. Die Wasserkraftnutzung ist meist mit mehr oder weniger massiven Eingriffen in einen Wasserkörper verbunden. Aus Gründen der Kapazitätssteigerung und der Möglichkeit Durchflussmengen zu steuern erfolgt die Errichtung von Stau- oder Speicherbecken, in denen die Fließverhältnisse gegenüber der natürlichen Situation erheblich verändert werden. Diese Veränderung des natürlichen Fließregimes kann sich nachhaltig auf die Grundwassersituation, die Stabilität des Untergrunds und auf die chemische Beschaffenheit von Sedimenten und Gewässer auswirken.

Energie in Form von Erdwärme wird durch radioaktive Prozesse in der Erde stetig freigesetzt. Die Geothermie kann daher als erneuerbare Energieressource betrachtet werden. Dies gilt auch, wenn einzelne Lagerstätten vorübergehend, d. h. für einige Jahre oder Jahrzehnte, erschöpft sein können, weil kurzfristig mehr Wärme entzogen als nachgeliefert wird. Erdwärme ist die er-

neuerbare Energiequelle, welche am engsten mit den geologischen Verhältnissen verknüpft ist. Bezogen auf den mittleren geothermischen Gradienten von 30 °C pro km gibt es in der Erdkruste Zonen mit positiven Wärmeanomalien, also Bereichen, in denen die Temperatur mit der Tiefe deutlich schneller zunimmt. Die Anomalien sind an tektonische Strukturen gebunden. Zur Nutzung der Geothermie wurden verschiedene Technologien entwickelt, die hohe Temperaturen aus Wärmeanomalien oder aus Krustentiefen von mehreren Kilometern nutzen oder die relativ geringen Temperaturdifferenzen zwischen der Erdoberfläche und einigen zehner bis hunderte Meter Tiefe. Die mit der Nutzung verbundenen Eingriffe in den Untergrund können nachhaltige Auswirkungen haben, z. B. auf die Grundwasserqualität oder die Gebirgsstabilität.

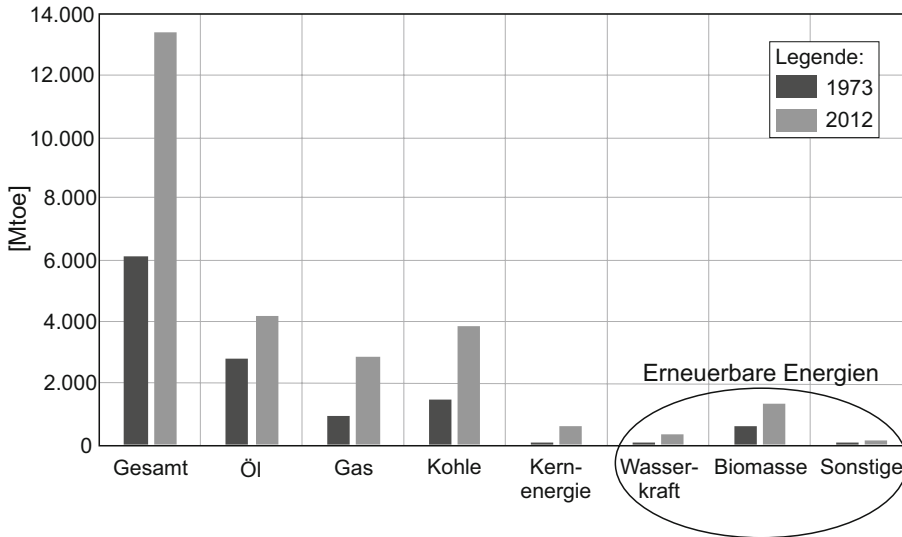
Unabhängig von der Methode, mit der Energie verfügbar gemacht wird, muss sie vom Produktionsort zum Verbraucher transportiert werden. Europaweite Hochspannungsnetze werden bisher vor allem als Freileitungen ausgeführt. Aus Gründen des Landschaftsschutzes, aber auch um gesundheitsschädliche Einflüsse elektromagnetischer Felder zu vermeiden, wird immer öfter die Verlegung von Hochspannungsleitungen in den Untergrund gefordert. Das Kapitel thematisiert die Vor- und Nachteile von Freileitung und Erdkabel aus umweltgeologischer Sicht als Beispiel dafür, dass verschiedene Umweltwissenschaften zu unterschiedlichen Bewertungen anthropogener Einflüsse kommen können.

11.1 Erneuerbare Energie – Quellen, Entwicklung, Perspektiven

Der weltweite Primärenergieverbrauch hat sich im Zeitraum 1973 bis 2012 von 6106 Mtoe (Megatonnen Öleinheiten) auf 13.371 Mtoe mehr als verdoppelt (IEA 2014). Neben der wirtschaftlichen Entwicklung von Schwellenländern wie China, Indien oder Brasilien ist dies auch auf einen kontinuierlichen Anstieg des Verbrauchs in den OECD-Ländern von 3740 auf 5273 Mtoe zurückzuführen.

In **Abb. 11.1** ist die Entwicklung der weltweiten Primärenergieversorgung getrennt nach Energieträgern dargestellt.

Der vermehrte Energiebedarf wird zu einem großen Anteil durch eine entsprechend höhere



■ **Abb. 11.1** Entwicklung der Primärenergienutzung und deren Verteilung auf die Energieträger zwischen 1973 und 2012 (Daten aus IEA 2014). Das Diagramm zeigt eine deutliche Zunahme der Primärenergiebereitstellung aus allen Energieträgern. Der Anteil an erneuerbaren Energiequellen ist in den vergangenen 40 Jahren zwar angestiegen, deckt insgesamt aber noch immer einen sehr geringen Anteil am Gesamtaufkommen

Förderung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas gedeckt. Einige der umweltgeologisch relevanten Aspekte der Nutzung fossiler Brennstoffe wurden im ► [Kap. 9](#) thematisiert. Ein wesentlicher Nachteil der fossilen Energieträger ist, dass sie bei weitem nicht in dem Maße und der Geschwindigkeit nachgebildet werden können, wie sie gefördert werden und damit irgendwann erschöpft sein werden. Der Zeitpunkt, wann die maximale Ölförderrate („Peak Oil“) erreicht wird (oder sogar bereits erreicht wurde), wird von Erdölexperten kontrovers diskutiert.

Im Zeitraum zwischen den 1980er Jahren und etwa der Jahrtausendwende wurde vor allem in den OECD-Ländern der Ausbau der Kernenergie in großem Stil vorangetrieben. Vor dem Hintergrund der Geschehnisse im japanischen Fukushima wurde im Jahr 2011 in Deutschland ein Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022 beschlossen. Die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe und der Ausstieg aus der Kernenergie-technik bedingen die Suche nach adäquaten Alternativen aus erneuerbaren Energieträgern – die Energiewende.

Die Energiewende beinhaltet Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz bei gleichzeitigem Umstieg von fossilen Energieträgern hin zu

erneuerbaren Quellen. Dazu werden europaweit nationale Strategien entwickelt.

Die Frage, ob und mit welchen Maßnahmen und Kosten die Energiewende auch praktisch umsetzbar ist, wird von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen untersucht. Dabei werden Möglichkeiten zur Energieeinsparung entwickelt, parallel dazu aber auch die Nutzung erneuerbarer Energieträger vorangetrieben. Palzer und Henning (2014) zeigen anhand von Modellrechnungen für Deutschland, dass ohne maßgebliche Kostensteigerung der Energiebedarf für Strom- und Wärmeerzeugung zu 100 % aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden kann, sofern durch verbesserte Haustechnik der Energiebedarf zu Heizzwecken (Stand 2010) um etwa 50 % reduziert, parallel dazu das Potenzial zur Wind- und Solarenergiegewinnung ausgeschöpft wird und Technologien zur Speicherung von Energie weiter ausgebaut werden.

In Österreich setzt man neben der Steigerung der Energieeffizienz zur Erreichung der Ziele der EE-Richtlinie in erster Linie auf den Ausbau des Wasserkraftpotenzials, das nach aktuellem Stand bisher zu ca. 70 % ausgeschöpft ist. Ergänzend ist eine Verdopplung der Windkraftherzeugung sowie ein erheblicher Ausbau von Photovoltaik und Bio-

masse zur Strom- und Wärmeerzeugung vorgesehen (Lebensministerium 2010). Auch hier sind Energiespeicher in Form von Pumpspeicherkraftwerken ein wesentlicher Bestandteil.

Die Nutzung regenerativer Energiequellen, wie die Verbrennung von Biomasse, inkl. Holz und Holzkohle sowie Abfall (10 % am Gesamtverbrauch 2013), oder die Wasserkraft (2,3 % des Gesamtverbrauchs 2013), erfuhren global betrachtet zwischen 1971 und dem Jahr 2013 einen langsamen, aber kontinuierlichen Anstieg. Weltweit betrachtet spielen sie jedoch, ähnlich wie die weiteren erneuerbaren Energiequellen Wind- und Sonnenenergie und auch Geothermie (gemeinsam 1 % des Gesamtverbrauchs), bisher eine vergleichsweise untergeordnete Rolle.

Einen Überblick über die aktuellen Entwicklungen und Technologien im Bereich erneuerbarer Energiequellen liefern Bürhke und Wengenmayr (2011).

Um den Anteil erneuerbarer Energieträger an der Gesamtversorgung deutlich zu steigern, wurde von der Europäischen Union die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EE-Richtlinie 2009) ratifiziert. Zielsetzung ist eine Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch von europaweit durchschnittlich 8,5 % im Jahr 2005 auf 20 % im Jahr 2020, wobei länderspezifisch unterschiedliche Ziele festgesetzt wurden.

Für Deutschland wird eine Steigerung von 5,8 % (2005) auf 18 % (2020) vorgegeben. Bis zum Jahr 2050 soll der Anteil erneuerbarer Energie an der Stromerzeugung 80 % betragen. Das Ziel Österreichs wurde in der EE-Richtlinie mit einer Steigerung von 23,3 % (2005) auf 34 % (2020) definiert. Die Umsetzung in der nationalen Gesetzgebung erfolgt in Deutschland z. B. mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG, Neufassung 2014), das die bevorzugte Einspeisung von Strom aus regenerativen Quellen und deren Vergütung zu Festpreisen regelt. Ähnliche Rechtsvorschriften sind im österreichischen Ökostromgesetz (ÖSG 2012) verankert.

Der Vergleich der Zielvorgaben für Deutschland und Österreich in der EE-Richtlinie zeigt schon einen wichtigen Aspekt bei der Betrachtung regenerativer Energiequellen: sie sind, je nach Region, in sehr unterschiedlichem Ausmaß verfügbar. Dabei spielen klimatische und geographische Faktoren

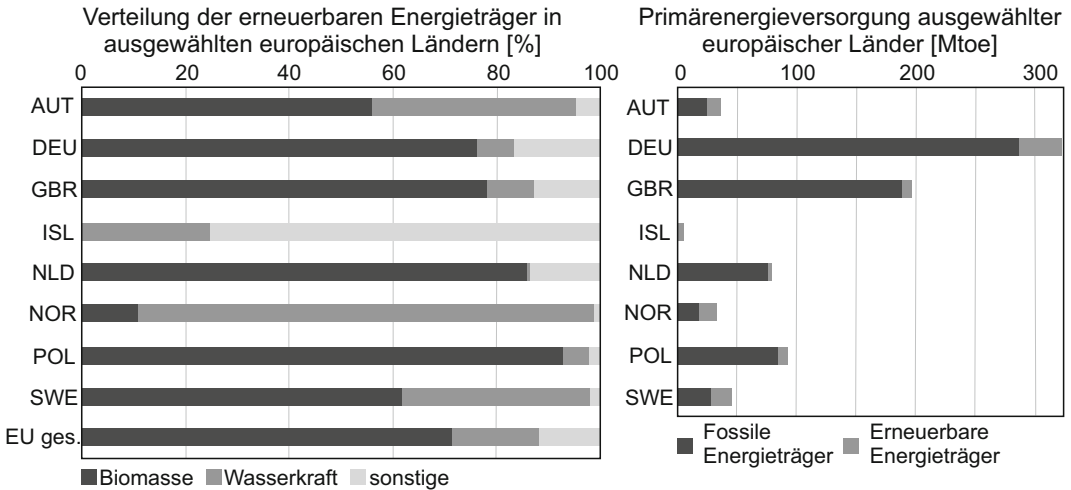
eine wichtige Rolle, aber auch geologische Aspekte wirken sich auf die Möglichkeiten, erneuerbare Energien zu gewinnen, aus.

Weite Teile Süddeutschlands, Österreichs und der Schweiz weisen mit dem Gebirgsraum der Alpen große Reliefunterschiede und vergleichsweise hohe Niederschlagsmengen auf. Beide Faktoren sind ideale Voraussetzungen zur Nutzung von Wasserkraft. Dementsprechend ist die Wasserkraft z. B. in Österreich auch mit rund 12 % des Bruttoendenergieverbrauchs und rund 60 % der Stromerzeugung ein bedeutender Faktor, während in Deutschland nur knapp 4 % des Stroms aus Wasserkraftanlagen stammen.

Die Nutzung von Biomasse zur Gewinnung von Wärmeenergie wird mit der Verbrennung von Holz seit prähistorischen Zeiten praktiziert. Fern- oder Nahwärmanlagen bilden eine modernere Variante dieser Wärmeenergiegewinnung. Die Verbrennung organischer Substanzen zur Stromgewinnung spielt sowohl weltweit als auch in Mitteleuropa bisher noch eine untergeordnete Rolle und wird erst seit dem vergangenen Jahrzehnt verstärkt umgesetzt. Biomassekraftwerke haben den Vorteil, dass sie, anders als Wasser- oder Windkraft, überall gleichermaßen umgesetzt werden können und geografische oder klimatische Faktoren keine wesentliche Rolle spielen.

Zur Nutzung von Windenergie sind weite Ebenen mit stabilen Windverhältnissen am besten geeignet. In Deutschland wurden daher 2010 bereits ca. 6 % des Strombedarfs aus Windkraftanlagen gedeckt, während diese Technologie in den kleinräumig strukturierten Gebirgsregionen Österreichs nur sehr eingeschränkt eingesetzt werden kann. Aktuell werden nur etwa 2 % des Gesamtbedarfs durch Windkraftanlagen abgedeckt, die auf den Osten des Landes konzentriert sind.

Sowohl die Energie, die aus Wind- und Wasserkraft gewonnen werden kann, als auch jene aus Biomassekraftwerken ist letztendlich auf Sonnenenergie zurückzuführen. Durch die Strahlungsenergie der Sonne werden atmosphärische Strömungen angetrieben, der globale Wasserkreislauf wird in Gang gehalten und es entsteht Biomasse. Letztendlich sind diese erneuerbaren Energiequellen im weiteren Sinne als gespeicherte Solarenergie zu bezeichnen.



■ **Abb. 11.2** Vergleich von Gesamtenergiebedarf und erneuerbarem Energiemix ausgewählter europäischer Länder. Geographische und klimatische Bedingungen führen zu einer ungleichen Verteilung auf die verschiedenen erneuerbaren Quellen. Biomasse stellt in den meisten Ländern den weitaus größten Anteil. Eine Sonderstellung nimmt Island mit einem überproportionalen Anteil an Geothermie ein, der auf die geologische Situation der Region zurückzuführen ist. Norwegen, Österreich und Schweden spiegeln mit einem vergleichsweise hohen Anteil an Wasserkraft die günstige Kombination von Reliefenergie und großen Niederschlagsmengen für diese Art der Energiegewinnung wider. In den Niederlanden ist aufgrund des fehlenden Geländereiefs keinerlei Wasserkraftnutzung möglich. (Daten aus IEA 2011)

Im engeren Sinne versteht man unter Solarenergie jedoch das Potenzial, die Energie der Sonne direkt in Wärmeenergie (Sonnenkollektoren) oder in elektrische Energie (Photovoltaikanlagen) umzusetzen. Die Technologie eignet sich für eine sehr lokale Energiegewinnung in kleinem Maßstab. Zum Betrieb von Sonnenwärmekraftwerken, die im großen Ausmaß Strom produzieren können, ist mit dem heutigen Stand der Technik eine starke direkte Sonneneinstrahlung erforderlich, die nur in Gebieten zwischen dem 35. nördlichen und dem 35. südlichen Breitengrad vorliegt.

Sehr eng mit der geologischen Situation verbunden ist die Nutzung von Erdwärme als Energieträger. Günstige Standorte für Geothermieanlagen sind Gebiete mit einer positiven Wärmeanomalie der Erdkruste, also einem hohen thermischen Gradienten, der die Gewinnung großer Wärmemengen in geringen Krustentiefen ermöglicht. Ein gutes Beispiel hierfür ist Island. Aufgrund der starken thermischen Anomalie entlang des Mittelozeanischen Rückens treten dort energetisch nutzbare heiße Wasser frei an die Oberfläche aus oder können aus flachgründigen Bohrungen gefördert werden. Die heißen Wasser werden direkt zu Heizzwecken ver-

wendet oder als Dampf in thermischen Kraftwerken zur Stromerzeugung genutzt. Geothermieanlagen decken auf der Vulkaninsel 64 % (Stand 2009) des Bruttoendenergieverbrauchs des Landes (IEA 2011).

■ **Abbildung 11.2** zeigt die Verteilung der erneuerbaren Energiequellen in einigen ausgewählten europäischen Ländern. Anhand dieses Vergleichs lassen sich die regional bedingten Unterschiede in der Verfügbarkeit spezieller erneuerbarer Energiequellen ablesen.

Die Notwendigkeit der Energiewende und die großen Vorteile, die erneuerbare im Vergleich zu den fossilen Energiequellen bieten, stehen in Europa außer Streit. Dennoch ergeben sich bei vielen Technologien zur Gewinnung erneuerbarer Energie auch Umweltrisiken oder Beeinträchtigungen von Umweltsystemen. Damit die Strategien der Energiewende langfristig nachhaltig umgesetzt werden können, müssen den Chancen neuer Technologien immer auch deren Risiken gegenübergestellt werden. Bei der Beurteilung und letztlich Vermeidung negativer Auswirkungen kann in vielen Fällen auch die Umweltgeologie eine wichtige Rolle spielen. In den folgenden Abschnitten werden beispielhaft die

Aufgaben der Umweltgeologen im Zusammenhang mit Wasserkraft und Geothermie beleuchtet.

11.2 Wasserkraftnutzung

In den Generatoren von Wasserkraftwerken wird die Primärenergie des Wassers, die sich aus der Wassermenge zusammen mit der Fallhöhe ergibt, zu Strom, d. h. zu Endenergie umgewandelt und für den Verbraucher nutzbar gemacht. Wasserkraftwerke lassen sich nach ihrem Nutzgefälle in Niederdruck- und Hochdruckanlagen unterscheiden.

Niederdruckanlagen weisen eine Fallhöhe von wenigen bis maximal 15 m auf und werden zur Deckung der Grundversorgung verwendet. Sie liefern die Strommenge, die permanent, auch zu Zeiten geringen Verbrauchs, benötigt wird (Grundlast). Es handelt sich dabei meist um Flusskraftwerke (auch Laufkraftwerke), aber auch Gezeiten- oder Wellenkraftwerke im Küstenbereich sind dieser Kategorie zuzuordnen.

Hochdruckanlagen mit Fallhöhen von 50 m und mehr werden zur Deckung der Spitzenlast herangezogen. Es handelt sich um Speicherkraftwerke, wobei der Speicher ein oberirdisch angelegter Speichersee oder eine Kaverne (z. B. ein aufgelassener Bergbaustollen) sein kann.

Pumpspeicherkraftwerke stellen eine spezielle Form des Speicherkraftwerks dar, bei dem es möglich ist, das energetisch abgearbeitete Wasser zu Zeiten geringen Stromverbrauchs wieder in den Speicherraum zurückzupumpen und damit die kinetische Energie zu speichern. Da beim Pumpvorgang die Energie verbraucht wird, die beim Abfließen durch die Turbinen gewonnen wird, produzieren Pumpspeicherkraftwerke keine Energie, sondern können sie lediglich „zwischenlagern“. Pumpspeicherkraftwerke stellen bisher eine der wenigen Möglichkeiten dar, Energie zur Stromerzeugung in großen Mengen zwischenzulagern.

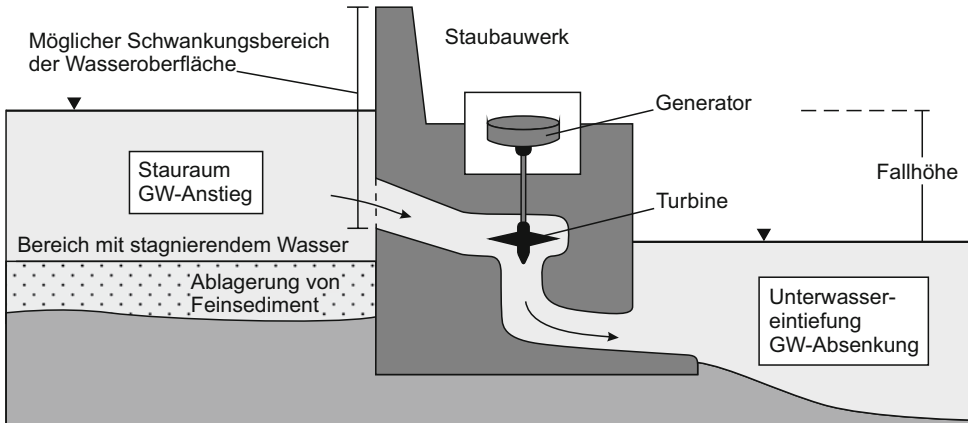
Mit Ausnahme der Niederdruckanlagen, die an langsam fließenden Gewässern mit geringem Gefälle errichtet werden, setzen Wasserkraftwerke ein ausreichendes Geländere Relief voraus und werden daher vor allem in Mittel- und Hochgebirgsregionen betrieben.

Gemäß den Dimensionen der Kraftwerke ist es häufig üblich, zwischen der „kleinen“ und der „großen Wasserkraft“ zu unterscheiden. Kleinkraftwerke an Bächen und kleineren Flüssen liefern die Energie für einige Hundert bis wenige Tausend Haushalte und sind damit ein wichtiges Mittel zur dezentralen Stromversorgung. Sie sind mit vergleichsweise geringen Eingriffen in die Umwelt verbunden. Die sogenannte „große Wasserkraft“ wird dagegen an großen Flussläufen oder an Gebirgsbächen durch große Stauwerke, verbunden mit ausgedehnten Speicherräumen, genutzt. Diese Art der Wasserkraftnutzung ist aufgrund ihrer zahlreichen Umweltprobleme inzwischen stark umstritten. Ein sehr bekanntes Beispiel für ein solches Großkraftwerk ist die Drei-Schluchten-Talsperre am Fluss Jangtse in China. Dem durch das Stauwerk entstandenen 600 km langen Stausee mussten 13 Städte und ca. 1,3 Millionen Menschen weichen. Es ist klar, dass ein derartiger Eingriff nicht ohne ökologische Schäden vonstatten geht. Chinesische Geologen warnen außerdem vor den geologischen Folgen, die sie vor allem in einer Destabilisierung der eingestauten Hangbereiche sowie in möglichen induzierten Erdbeben sehen.

11.2.1 Laufkraftwerke

Laufkraftwerke werden in langsamen Fließgewässern errichtet. Üblicherweise wird dafür das Gewässer durch ein Querbauwerk um einige Meter aufgestaut. Der Aufstau ermöglicht einen geregelten Betrieb des Kraftwerks, in dem der Zufluss zu den Turbinen in Zeiten geringen Verbrauchs gedrosselt, bei hoher Nachfrage verstärkt werden kann. Die entsprechenden Variationsmöglichkeiten sind durch das Fassungsvermögen des Stauraums begrenzt. ■ **Abb. 11.3** zeigt die schematische Darstellung eines Laufkraftwerkes.

Der Aufstau oberhalb des Stauwerks und die Eintiefung des Flussbetts in seinem Unterlauf dienen der Erhöhung des Gefälles auf kurzer Fließstrecke. Die dadurch konzentrierte kinetische Energie kann dem Wasser durch eine Turbine entzogen werden. Durch Aufstau und Unterwassereintiefung können einige Meter an Gefälle gewonnen werden. Die Leistung des Kraftwerks ergibt sich aus der Hö-



■ **Abb. 11.3** Schematische Darstellung eines Laufkraftwerkes. Das Stauwerk trennt Ober- und Unterwasserbereich. Im Oberwasserabschnitt können die Ablagerung von Feinsedimenten, die Stagnation der tieferen Wasserschichten und der Grundwasseranstieg ökologisch und umweltgeologisch relevante Probleme aufwerfen. Im Unterwasserbereich ergeben sich aus der Eintiefung der Flusssohle und der damit verbundenen Grundwasserabsenkung möglicherweise geotechnische und wasserwirtschaftliche Problemstellungen

hendifferenz zwischen Ober- und Unterwasser im Zusammenspiel mit der Durchflussmenge.

Sedimenthaushalt

Die Auswirkungen von Flusskraftwerken auf die geologisch-hydrogeologische Umwelt können vielfältig sein. Ein wesentlicher Aspekt ist die nachhaltige Veränderung der Fließdynamik und der damit verbundenen Sedimentationscharakteristik des Flusses. Durch den Aufstau kommt es zu einer deutlichen Verringerung der Fließgeschwindigkeit im Vergleich zum freifließenden Gewässer. Die abnehmende Transportkraft des Wassers führt zur Ablagerung feiner Sedimente im Stauraum und generell zur Ansammlung von Geschiebematerial, das im freien Abfluss weiter transportiert werden würde. Die geänderten Sedimentationsbedingungen können zu einer Abdichtung des Flussbettes (Kolmation), verbunden mit einer Entkopplung vom Grundwasserkörper führen. Ein Problem für die Bewirtschaftung ist die Verringerung des Speichervolumens im Stauraum, die sich mittelfristig durch die Sedimentation einstellt.

Um das unerwünschte „Zusedimentieren“ des Stauraums zu vermeiden, werden im Zuge des Kraftwerksbetriebs Stauraumpülungen durchgeführt. Dazu erfolgt bei starker Wasserführung eine Staulegung, d. h. das Stauwerk wird geöffnet und das gestaute Wasser kann ohne energetische Abarbei-

tung rasch abfließen. Die hohe Transportkraft, die dabei entsteht, führt zu einem raschen Abtransport der im Stauraum abgelagerten Feinsedimente.

Die großen Mengen an Feinmaterial, die bei einer Staulegung in kurzer Zeit im Staubecken mobilisiert werden, können ein ökologisches Problem darstellen. Qualitative Beeinträchtigungen des Gewässers durch die Trübung und mögliche geochemische Belastungen des Sediments können das Gewässer in seiner Funktion als Lebensraum nachhaltig schädigen. Eine derartige Schädigung des Gewässers steht im Widerspruch zu den Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000), wonach eine Verschlechterung des ökologischen Zustands durch Eingriffe in ein Gewässer ausdrücklich vermieden werden muss. Bei der Planung von Wasserkraftanlagen müssen daher entsprechende Maßnahmen zum Schutz der Gewässerökologie berücksichtigt werden. Die ökologischen Grundlagen, die bei der Wasserkraftnutzung berücksichtigt werden müssen, sind z. B. bei Hütte (2000) beschrieben. Die Aufgabe der Geologie ist es, in diesem Zusammenhang die potenziellen Geschiebefrachten und deren geochemische Eigenschaften zu prognostizieren.

Die Sedimentation im Stauraumbereich stellt aber nicht nur ein Problem für den Kraftwerksbetrieb dar. Vor allem an der Stauwurzel, wo es zu einem plötzlichen Abfall der Fließgeschwindigkeit

kommt, werden häufig gröbere Sedimente wie Kiese und Sande abgelagert. Die Kies- oder Sandbänke stellen im Hochwasserfall eine Barriere dar, die zu einem Austritt des Gewässers aus seinem Bett führen kann. Hochwasserschäden entlang der Flussufer können die Folge sein. Aus Gründen des Hochwasserschutzes ist deshalb eine regelmäßige Räumung des Flussbettes erforderlich, vor allem im Stauwurzelbereich.

Auswirkungen auf das Grundwasserregime

Der übliche Fall der Interaktion zwischen einem Fließgewässer und dem benachbarten Grundwasserkörper, zumindest in humiden Klimazonen, ist die sogenannte Effluenz. Das bedeutet, dass unter normalen Bedingungen Wasser aus dem Grundwasserkörper zum Fluss austritt, der als Vorfluter fungiert. Bei Hochwasser oder auch durch den künstlichen Aufstau des Fließgewässers kann sich die Fließrichtung jedoch kurzfristig ändern. Der Flusswasserspiegel ist dann höher als die Grundwasseroberfläche und es fließt Flusswasser in den Grundwasserkörper ein. In diesem Fall spricht man von influenten Verhältnissen oder Influenz. Die zum Grundwasser gerichtete Fließbewegung bleibt solange erhalten, bis sich die Oberflächenniveaus von Fluss- und Grundwasser angeglichen haben.

Im Hochwasserfall tritt diese Situation kurzfristig auf und oft sinkt der deutlich dynamischere Flusswasserspiegel bereits wieder ab, bevor es zu einem kompletten Aufspiegeln des Grundwassers kommt. Im Falle eines dauerhaften künstlichen Aufstaus, wie er bei einem Flusskraftwerk vorliegt, bedeutet dies eine nachhaltige Anhebung der Grundwasseroberfläche im Stauraumbereich. Im Unterwasserabschnitt, der ja, wie oben erwähnt, in vielen Fällen zu Erhöhung des Gefälles eingetieft wird, kommt es dagegen zu einem verstärkten Auslaufen des Aquifers und damit zum dauerhaften Absinken des Grundwassers. Zwischen Ober- und Unterwasserbereich des Kraftwerks besteht dann auch im begleitenden Grundwasserkörper ein erhebliches Gefälle. Sowohl die Erhöhung als auch die Absenkung des Grundwasserspiegels können zu Problemen führen. Einige Beispiele:

- Anhebung im Stauraum kann vor allem bei geringen Flurabständen z. B. zum Einstau oder

zumindest zur Vernässung von Fundamenten oder ganzen Kellergebäuden führen. Im Extremfall kann Grundwasser bis zur Oberfläche aufspiegeln und damit die bisherige Verwendung einer Fläche inkl. einer landwirtschaftlichen Nutzung unmöglich machen.

- Absenkung im Unterwasserbereich kann eine Destabilisierung des Untergrunds zur Folge haben, da der Porenwasserdruck verringert und das Bodengefüge verändert wird. Es kommt zu Setzungen, in der Folge auch zu Bauwerksschäden. Bestehende Grundwassernutzungen, wie Brunnen oder Grundwasserswärmenutzungen, erreichen nicht mehr die Grundwasseroberfläche und sind damit ohne Anpassung an die neuen Verhältnisse nicht mehr funktionstüchtig.

Zur Vermeidung von Auswirkungen auf flussbegleitende Grundwasserkörper ist es zunächst erforderlich, die Grundwassersituation im Kraftwerksbereich sehr genau zu analysieren. Dazu werden Messstellennetze errichtet und anhand der gewonnenen Daten über Untergrundaufbau und Fließdynamik Grundwassermodelle für die Betriebszustände des Wasserkraftwerks erstellt. Die Grundwassermodelle, die aus einem einfachen Grundwassergleichplan oder auch aus komplexen numerischen Modellen bestehen können, dienen dann zur Planung von Maßnahmen, wie z. B. uferparallele Dichtwände, Drainagegräben oder auch Pumpanlagen. Werden bei den hydrogeologischen Voruntersuchungen mögliche Beeinträchtigungen bestehender Grundwassernutzungen festgestellt, so müssen entsprechende Ersatzversorgungen geplant werden.

Qualitative Beeinträchtigung von Wasser und Sedimenten

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung von Auswirkungen durch Flusskraftwerke sind die qualitativen Beeinträchtigungen, die eine Stauhaltung auf das Fließgewässer und den damit verbundenen Grundwasserkörper ausübt, die sich aber auch in den im Stauraum abgelagerten Sedimenten niederschlägt.

Der Stauraum bildet einen Flussabschnitt mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten. Fließbewegung findet vor allem an der Oberfläche bzw.

in oberflächennahen Schichten statt, während das Wasser in tieferen Bereichen des Stauraums über längere Zeiträume stagnieren kann. Die Aktivität sauerstoffzehrender Organismen im Wasser und in den Sedimenten führt hier zu reduzierenden, also sauerstoffarmen Verhältnissen. Dies wirkt sich sowohl auf die Wasserqualität als auch auf das Stoffbindungsvermögen der Feinsedimente aus (siehe ► Kap. 5 und 6).

Wie im ► Kap. 6 beschrieben wird, sind vor allem Feinsedimente aufgrund ihrer großen Oberfläche gute Sorptionsmedien für verschiedenste Schadstoffe, wie Schwermetalle oder bestimmte Kohlenwasserstoffverbindungen. Da sich im Stauraum vor allem Feinsedimente ablagern, kommt es hier zu erhöhten Schadstoffgehalten. Die Quellen der Schadstoffe können dabei geogener oder anthropogener Herkunft sein. Details zum Zusammenhang zwischen biochemischen Prozessen, Redoxdynamik und den Konzentrationen an adsorptiv am Seesediment gebundenen Spurenstoffen beschreiben z. B. Garbe-Schönberg et al. (1997).

Aufgrund der häufig auftretenden Belastungen von Feinsedimenten in Stauräumen, müssen sie – statt bei einer Stauraumpülung unkontrolliert freigesetzt zu werden – ausgebaggert werden. Das Baggergut wird anschließend einer geochemischen Untersuchung unterzogen und je nach festgestellten Gehalten an Schadstoffen entsorgt. Die Grenzwerte für verschiedene Entsorgungs- oder Verwertungsmöglichkeiten werden in Deutschland im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2012), in Österreich durch das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002) und angeschlossene Verordnungen geregelt (siehe dazu auch ► Kap. 8). Einige generelle Informationen zum Umgang mit Baggergut aus Gewässern wird z. B. von Köthe und Bertsch (1999) beschrieben.

11.2.2 Speicherkraftwerke

Speicherkraftwerke, die als Hochdruckanlagen konzipiert sind, benötigen im Vergleich zu Laufkraftwerken weniger konstante Fließverhältnisse, dafür jedoch einen ausreichend großen Speicherraum, um Variationen in der Zuflussmenge einerseits und im Energiebedarf und damit der Abflussmenge andererseits ausgleichen zu können. Der Speicher er-

möglicht es, unabhängig von der aktuellen Wassermenge im Fließgewässer, durch einen gesteuerten Zufluss zu den Turbinen so viel Strom zu erzeugen, wie aktuell benötigt wird.

Zur Bemessung eines Speicherkraftwerks sind drei Aspekte von Bedeutung:

- die Möglichkeit, Speicherraum zu schaffen,
- das Ausmaß und die Dynamik der Zuflüsse in diesen Speicherraum und
- das Potenzial, das sich aus dem Geländereief ergibt, also die nutzbare Fallhöhe.

Das verfügbare Speichervolumen richtet sich vor allem nach der Geländeform, die die Lage, Breite und Höhe eines Stauwerks bestimmt. Die Stauwand oder der Staudamm wird dabei idealerweise in Talengen errichtet und in das anstehende Gebirge eingebunden. Wasserseitig wird der Stauraum bis zu einer definierten Maximalhöhe unter der Dammkronen befüllt. Das heißt, es wird der gesamte wasserseitige Talraum bis zu dieser Höhe eingestaut.

In alpinen Regionen werden Hochwasserabflüsse, vor allem in den Frühjahrsmonaten zur Zeit der Schneeschmelze ausgeschöpft, während im Winter die geringsten Wassermengen zufließen und viele Staueisen leerlaufen. Die Zuflussschwankungen sind stark mit der hydrogeologischen Situation im Einzugsgebiet verbunden. Aquifere mit großen Speicherkapazitäten speisen das ganze Jahr über gleichmäßig die Kraftwerksanlage, Karstaquifere mit sehr guten Durchlässigkeiten, aber sehr schlechten Speichereigenschaften, geben die Wassermenge kurzfristig ab. Die Bemessung und Betriebsführung eines Speicherkraftwerks muss daher die geologische Situation im Einzugsgebiet berücksichtigen. Meist wird ein Stauraum im Jahresrhythmus bewirtschaftet. In Zeiten hoher Zuflüsse im Frühjahr und Sommer wird er aufgefüllt, da mehr Wasser anfällt, als durch die energetische Abarbeitung abgeführt wird. Während der trockenen Monate im Herbst und Winter wird er abgesenkt, weil mehr Wasser abgearbeitet wird, als aus dem Einzugsgebiet nachfließt. Die Schwankungen des Seewasserspiegels können zehner bis hunderte Meter betragen. Bei einem Kraftwerk, das in dieser Form betrieben wird, spricht man von einem Jahresspeicher.

Ein Wasserkraftwerk dieses Typs stellt einen bedeutenden Eingriff in einen Naturraum dar. Die Er-

richtung eines großen Speichersees ist zunächst eine massive Veränderung der Landschaft, die mit dem Verbrauch von Siedlungs- oder Nutzflächen oder auch dem Verlust von Lebensraum und Ökosystemen einhergeht. Aus geologischer Sicht sind die folgenden Aspekte besonders relevant.

Sedimenthaushalt

Bäche, die einem Speichersee zufließen, weisen zu meist eine hohe Sedimentfracht auf, da sie Einzugsgebiete mit ausgeprägtem Gefälle entwässern, in denen häufig große Mengen an lockerem Material, also große Geschiebeherde, zur Verfügung stehen. Im natürlichen Fließregime werden diese Sedimente je nach Fließgeschwindigkeit transportiert oder im Bachbett abgelagert. Beim Eintritt der Gerinne in einen Speichersee kommt es zur plötzlichen Verringerung der Fließgeschwindigkeit und damit zur Sedimentation in das Becken. Es entstehen Deltaschüttungen im Bereich der Zuflüsse, während sich die feinsten Sedimente im gesamten Stauraum ablagern. Die Sedimentationsraten können in einem künstlichen Speicherbecken bei mehreren Zentimetern bis Dezimetern pro Jahr liegen. Zum Vergleich werden in natürlichen Seen Sedimentationsraten von wenigen Millimetern oder weniger beobachtet (Matschullat et al. 1994). Um eine mittelfristige Volumenverringerung des Stauraums zu verhindern, müssen Speicherseen in regelmäßigen Intervallen (meist einige Jahre) gespült werden, indem das gespeicherte Wasser an der Sohle des Sees rasch abgelassen wird. Mithilfe der großen Transportkraft im Unterlauf des Stauwerks werden die Feinsedimente fortgerissen.

Bei der Stauraumspülung ergeben sich hinsichtlich der chemischen Beschaffenheit der Sedimente und des Wassers im Stausee ähnliche Probleme, wie sie im ► [Abschn. 11.2.1](#) für Laufkraftwerke beschrieben wurden.

Die Betriebsführung eines Speicherkraftwerks bedingt eine stetige bedarfsorientierte Änderung der Wassermengen, die über die Turbinen abgearbeitet und anschließend an das Fließgewässer abgeführt werden. Während in Zeiten geringen Bedarfs die Stromproduktion zurückgefahren und nur geringe Wassermengen aus dem Speicher abgegeben werden (Sunk), werden beim Hochfahren der Produktion rasch große Schüttungsmengen an das

Oberflächengewässer abgegeben (Schwall). Die Bewirtschaftung in einem Schwall-Sunk-Betrieb führt zu unnatürlich starken Schwankungen der Wassermengen und Fließgeschwindigkeiten im Unterlauf des Kraftwerks. Während bei Sunk Bereiche des Bach- oder Flussbettes trockenfallen, werden diese bei Schwall stark und turbulent durchströmt. Von Schwall und Sunk betroffene Fließgewässer können kaum von Organismen besiedelt werden. Dies ist eher ein ökologisches als ein umweltgeologisches Problem, soll aber an dieser Stelle dennoch angeführt werden, da die Schwall-Sunk-Problematik ein zentrales Problem der Wasserkraftnutzung darstellt.

Der Ausbau von Speicherkraftwerken zu Pumpspeicherkraftwerken (siehe ► [Abschn. 11.2.3](#)) soll unter anderem dazu beitragen, das Schwall-Sunk-Problem zukünftig in den Griff zu bekommen.

Interaktion mit dem Grundwasser

Auch im Stauraumbereich eines Speicherkraftwerks gibt es üblicherweise eine Kommunikation mit dem Grundwasserregime. Der betroffene Grundwasserleiter ist meist ein Festgesteinsaquifer. Grundwasser fließt hier nicht in Porenräumen zwischen den Körnern eines Lockersediments, sondern in den Trennflächen innerhalb des Festgesteins. Auch kommuniziert über diese Hohlräume das Grundwasser mit dem im Stausee gespeicherten Wasser. Offene Trennflächen werden bis zur Höhe des Seespiegels mit Wasser gefüllt und laufen aus, wenn der Wasserspiegel abgesenkt wird.

Da in Speicherseen der Stauspiegel oft mehrere Zehnermeter über dem natürlichen Niveau liegt, werden Klüfte, Schicht- oder Schieferungsflächen oder durchlässige Störungszonen mit Wasser gefüllt, die unter unbeeinflussten Bedingungen nur von Sickerwässern durchflossen würden oder überhaupt trocken wären. Da Wasser die Reibungskräfte zwischen Gesteinspaketen herabsetzt, können durch den Einstau der Hohlräume Gleitbahnen aktiviert werden. Es kann zu einer Destabilisierung des Gebirges kommen, die im schlimmsten Fall mit Fels- oder Bergsturzereignissen endet.

Bei einem raschen Absinken des Speichers besteht zusätzlich die Gefahr, dass das Auslaufen des Aquifers nicht in der gleichen Geschwindigkeit erfolgen kann. Dem Porenwasserdruck im Gebirge wird dann kein Gegendruck der Wassermassen im

Exkurs 11.1 Fallbeispiel Vajont-Stausee

Die Staumauer im oberitalienischen Vajonttal wurde in den späten 1950er und frühen 1960er Jahren errichtet. Mit einer Stauhöhe von über 260 m wurde sie am oberen Ende einer engen Schlucht errichtet und damit ein Stauraum für 152 Millionen m³ Wasser geschaffen. Bereits in der Bauphase wurden immer wieder kleinere Bergstürze durch die Erschütterungen im Baustellenbetrieb registriert. Während der ersten Aufstapphasen wurde wiederholt von kleineren Erdbeben berichtet. Bei einer ersten Teilfüllung des Staubeckens ereignete sich schließlich ein Felssturz im Ausmaß von ca. 700.000 m³. Die Felsmassen luden sich im Stauraum ab, es kam jedoch zu keinen größeren Schäden in der Umgebung. Um künftige Schäden auszuschließen, wurden daraufhin zahlreiche Untersuchungen zum maximalen Ausmaß von Massenbewegungen und deren Folgen im Einzugsgebiet des Staubeckens durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der geologisch-geotechnischen Untersuchung, wurde zwischen 1961 und 1963 immer wieder phasenweise aufgestaut und abgesenkt, um aufgelockerte Gebirgsbereiche kon-

trolliert zum Abbrechen zu bringen. Die dabei beobachteten zahlreichen kleinen Beben und auch die Messdaten über Hangbewegungen gaben den Verantwortlichen keinen Grund zur Annahme, dass ein größeres Sturzereignis zu erwarten wäre. Am 09.10.1963, im Zuge eines Vollstaus, riss der orographisch linke Hangbereich auf einer Länge von 3 km ab und 270 Millionen m³ Material, also annähernd das doppelte Stauraumvolumen, stürzten mit hoher Geschwindigkeit in den Stauraum. Dadurch wurden etwa 25 Millionen m³ Wasser über die Staumauer talauswärts katapultiert und vernichteten die am Talaustritt gelegene Ortschaft Longarone. Etwa die gleiche Menge Wasser wurde taleinwärts und auf die gegenüberliegende Hangseite verdrängt und richtete auch dort schwere Schäden an Siedlungen an. Insgesamt fielen dieser Katastrophe nach offiziellen Angaben fast 2000 Menschen zum Opfer. Welche geologisch-hydrogeologischen Prozesse haben zu dieser Katastrophe geführt? In den triassischen und kretazischen Karbonaten waren Hangbewegungen aufgrund einer mächtigen

Schicht dünnplattiger Malmkalke mit tonigen Zwischenlagen auch vor der anthropogenen Einflussnahme bereits aktiv. Die Bewegung erfolgte jedoch mit sehr geringen Geschwindigkeiten. Der untere Hangbereich war bis zum Einstau relativ stabil und konnte den oberen instabilen Bereich stützen. Durch den Einstau des Hangfußes wurde die Reibung innerhalb dieser stabileren Einheiten deutlich herabgesetzt. Eine den Projektgeologen nicht bekannte, nur wenige Zentimeter mächtige quellende Tonschicht wurde durch den Einstau zum Gleithorizont, auf dem der gesamte Berg „aufschwamm“ und schließlich zu Tal rutschte. Es ist heute schwer zu beurteilen, ob mit einer intensiveren geologischen Erkundung der Berghänge entlang des Stauraumes diese Katastrophe hätte verhindert werden können. Das Ereignis war jedoch der Auslöser für verschärfte Vorschriften bezüglich der geologisch-geotechnischen Erkundungsintensität sowie für die Einrichtung nationaler Staubeckenkommissionen, die mit Experten aller betroffenen Teildisziplinen besetzt sind und die geogenen Risiken derartiger Bauwerke vor deren Errichtung überprüfen.

Speicher mehr entgegengesetzt. Der Prozess des Hangversagens entlang von Schichtflächen oder Klüften wird dadurch verstärkt. Näheres über die Rolle des Wassers beim Hangversagen ist z. B. bei Prinz und Strauss (2011) nachzulesen.

Die Destabilisierung eines eigentlich trockenen Gebirges durch eindringende Stauwässer kann seismische Aktivitäten in Form kleinerer lokaler Erdbeben hervorrufen. Derartige Prozesse werden immer wieder im Umfeld großer Stauseen beobachtet. Eine detaillierte geologische Erkundung der Hangbereiche von Stauräumen ist unverzichtbar, um die Gefahr schwerer Schäden am Bauwerk und an den unterhalb des Kraftwerks liegenden Siedlungen zu vermeiden. Im ► [Exkurs 11.1](#) ist ein katastrophales Ereignis aus den 1960er Jahren beschrieben, bei dem die Interaktion zwischen Grundwasser und

dem Stausee einen gigantischen Bergsturz zur Folge hatte.

11.2.3 Pumpspeicherkraftwerke

Ein Pumpspeicherkraftwerk unterscheidet sich von einem Speicherkraftwerk dahingehend, dass Wasser in zwei Richtungen fließen kann und entweder Energie freigibt oder Energie aufnimmt. Zum Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks benötigt man zwei Speicherräume. Ein Oberwasserbecken, von dem aus Wasser nach unten fließt und dabei energetisch abgearbeitet wird, und ein Unterwasserbecken, welches das abfließende Wasser aufnimmt und von dem aus es wieder zurückgepumpt werden kann. Die Energie, die durch das abfließende Wasser in

den Turbinen erzeugt wird, wird in Zeiten geringen Strombedarfs durch das Hinaufpumpen wieder verbraucht.

In einem Pumpspeicherkraftwerk wird folglich keinerlei Energie gewonnen, sondern Energie gespeichert, die bei Bedarf abgerufen werden kann und zur Stromversorgung in Spitzenverbrauchszeiten zur Verfügung steht. Pumpspeicherkraftwerke erfüllen damit eine wichtige Voraussetzung zum Erreichen der Energiewende – die Möglichkeit, erneuerbare Energie bei überschüssigem Angebot in großen Mengen zu speichern, um damit die schwer steuerbaren Energieträger wie Wind- oder Solarkraft auch dann nutzen zu können, wenn das Stromangebot die Nachfrage deutlich unterschreitet.

Die umweltgeologisch relevanten Aspekte von Pumpspeicherkraftwerken sind mit jenen, die für Speicherkraftwerke beschrieben wurden, weitgehend vergleichbar. Ein Vorteil gegenüber dem Speicherkraftwerk ist die Tatsache, dass das Nutzwasser in beide Richtungen in einem künstlichen Gerinne fließt. Es ergeben sich keine durch Schwall und Sunk bedingten Beeinträchtigungen von natürlichen Oberflächengewässern, die nach Ausbau eines Pumpspeicherkraftwerks von einer stabilen, allerdings auch nur mehr von einer deutlich geringeren Restwassermenge gespeist werden.

Ein geologisch möglicherweise auch problematischer Unterschied zum Speicherkraftwerk ist die große Dynamik der Wasserspiegellhöhen in den beiden Speicherbecken. Während ein Speicherkraftwerk meist im Jahresrhythmus betrieben wird, können Pumpspeicherbecken im Wochen- oder sogar Tagesrhythmus befüllt und abgesenkt werden. Es kommt dabei kurzfristig zu Wasserspiegelschwankungen von mehreren Zehner Metern. Probleme der Hangstabilität, wie sie im ► [Abschn. 11.2.2](#) beschrieben wurden, können sich mit dieser Betriebsweise erheblich verschärfen.

11.3 Geothermie

Die Geothermie ist unter den erneuerbaren Energiequellen die einzige, die nicht auf Sonnenenergie zurückführbar ist, sondern die aus thermischen Prozessen im Inneren der Erde gespeist wird. Dabei spielen einerseits die noch immer hohen Tem-

peraturen aus den Entstehungszeiten der Erde eine Rolle, andererseits wird durch radioaktive Prozesse im Erdkörper stetig Energie in Form von Wärme freigesetzt. Die Wärmeenergie aus dem Erdinneren wird durch einen kontinuierlichen Wärmestrom zur Erdoberfläche transportiert.

Da die aus der Tiefe nachströmende Wärmemenge global betrachtet wesentlich größer ist als durch lokale Entnahmen abgebaut werden könnte, zählt die Geothermie zu den regenerativen Energiequellen, auch wenn es in einzelnen Lagerstätten vorübergehend zu einer Erschöpfung der nutzbaren Energiemengen kommen kann.

In den obersten ca. 20 m der Erdkruste spielt die Wärmeenergie aus der Sonneneinstrahlung die wichtigere Rolle für den Wärmehaushalt des Bodens. In dieser Tiefenzone richtet sich die Temperatur nach den jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur. Mit zunehmender Tiefe werden die Schwankungen gedämpft und es stellt sich eine Bodentemperatur ein, die der atmosphärischen Jahresmitteltemperatur entspricht. Die Nutzung der in den obersten Horizonten gespeicherten Wärmemengen wird als oberflächennahe Geothermie bezeichnet, obwohl es sich genau genommen in erster Linie um Solarenergie handelt, die im obersten Krustenniveau gespeichert ist.

Unterhalb des atmosphärisch beeinflussten Tiefenbereichs gewinnt der Wärmefluss aus dem Erdinneren größere Bedeutung. Der geothermische Einfluss nimmt mit der Tiefe deutlich zu und führt zu einem durchschnittlichen Temperaturgradienten von 30 °C pro Kilometer Tiefe. Ausgehend von einer Durchschnittstemperatur von 10 °C an der Erdoberfläche ist in 2000 m mit einer Gebirgstemperatur von 70 °C zu rechnen. Da zur Gewinnung dieser Wärmeenergie tiefe Untergrundaufschlüsse erforderlich sind, wird die Technologie als tiefe Geothermie bezeichnet.

In manchen Gebieten der Erde ist der Temperaturgradient erheblich höher als die genannten 30 °C pro Kilometer. Dies ist vor allem an Schwächezonen der Erdkruste, wie z. B. an Plattengrenzen der Fall, an denen die Erdkruste ausgedünnt ist bzw. heiße Lithosphärenanteile mit Konvektionsströmen näher an die Erdoberfläche transportiert werden. In ► [Abschn. 11.1](#) wurde bereits Island als Beispiel hierfür genannt. Aber auch tiefreichende Störungszonen,

an denen heiße Wässer rasch aufsteigen können, bewirken einen überdurchschnittlichen Wärmefluss und erhöhte Krustentemperaturen. In Deutschland wird dies z. B. entlang der kontinentalen Riftzone des Oberrheingrabens mit einem geothermischen Gradienten von 80 °C oder mehr pro Kilometer beobachtet. Derartige Gebiete werden als Hochenthalpiefelder bezeichnet und sind häufig das Ziel der geothermischen Lagerstättensuche.

11.3.1 Oberflächennahe Geothermie


Oberflächennahe geothermische Anlagen nutzen zu einem großen Anteil die im Boden gespeicherte Sonnenenergie und erst in tieferen Abschnitten die Wärmeenergie aus dem Erdinneren. Mit Bohrungen werden Bereiche von einigen Zehnermetern bis maximal 400 Metern und damit Temperaturen zwischen 10 und 25 °C erschlossen. In einem elektrisch angetriebenen Kreislaufsystem wird dem Untergrund die Wärmeenergie durch ein Wärmeträgermedium entzogen und an einen Wärmetauscher abgegeben. Wärmeträger kann das Grundwasser aus einem durch die Anlage erschlossenen Aquifer sein (Grundwasserwärmepumpenanlage). Es kann aber auch eine andere Wärmeträgersubstanz in einem geschlossenen System zwischen wärmerem Untergrund und Wärmetauscheranlage zirkulieren (Erdwärmesonde). Im Wärmetauscher kühlt der Wärmeträger um einige °C ab. Die dabei frei werdende Energie wird zur Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung genutzt. Dabei werden einzelne Anlagen aufgrund der geringen Energieausbeute im Normalfall für einzelne Gebäude errichtet, also sehr lokal genutzt.

Die oberflächennahe Geothermie kann unabhängig von der vorherrschenden geologischen Situation so gut wie überall eingesetzt werden. Aufgrund der geringen Temperaturunterschiede vor und nach dem Energieentzug ist eine Erschöpfung des Energiedargebots im Umfeld einer Anlage nicht zu erwarten. Unter Beachtung des Wärmeflusses können Anlagen auch in geringen Abständen zueinander, z. B. auf benachbarten Grundstücken, positioniert werden. Oberflächennahe Geothermie bildet damit ein großes Potenzial für eine kleinräumig strukturierte Wärmeenergie-

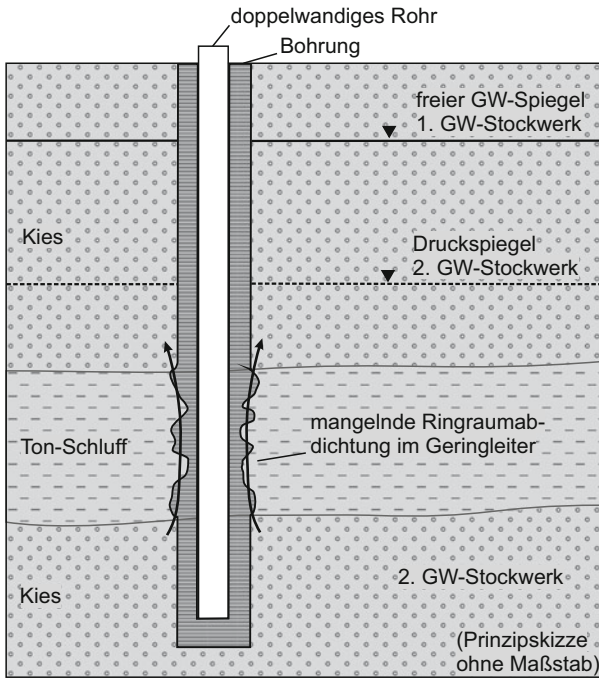
versorgung. Sie spielt jedoch trotz großer Wachstumsraten bisher noch eine untergeordnete Rolle. So lag z. B. der Anteil der Energie aus oberflächennaher Geothermie in Österreich bezogen auf alle erneuerbaren Energieträger im Jahr 2012 bei 2,2 % (BMWFV 2014).

Erdwärmesonden

Oberflächennahe Erdwärmesonden erschließen Tiefen von maximal 400 m und nutzen damit Temperaturen im Bereich bis ca. 25 °C. In die Bohrungen werden dazu entweder doppelwandige Rohre oder U-Rohre eingebracht, in denen das Wärmeträgermedium in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert. Bei technisch einwandfreier Ausführung der Bohrungen, des Bohrlochausbaus und der Ringraumverfüllung wirkt sich eine solche Anlage weder auf das Gebirge noch auf die durchörterten Grundwasserleiter aus. Der Wärmeentzug ist im Vergleich zum großen Wärmedargebot im Untergrund vernachlässigbar gering.

Umweltgeologisch relevante Probleme ergeben sich aus Erdwärmesonden dann, wenn bei der Errichtung die geologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen nicht in ausreichender Weise berücksichtigt wurden. Bohrungen, vor allem für private Haushalte, werden in vielen Fällen aus Kostengründen ohne Kerngewinn und ohne fachgeologische Begleitung errichtet. Spezielle geologische Bedingungen, wie das Durchörtern mehrerer Grundwasserstockwerke, bleiben dadurch oft unbeachtet. Erfolgt in dieser Situation ein unsachgemäßer Ausbau der Bohrung, z. B. ein nicht ausreichend abgedichteter Ringraum, wie in  Abb. 11.4 dargestellt, kann es zum hydraulischen Kurzschluss von Grundwasserstockwerken kommen.

Durch einen derartigen Kurzschluss können die meist gespannten Grundwässer aus tieferen Stockwerken in höhere eindringen. Es kommt zu einer Druckentlastung und unkontrolliertem Auslaufen des tieferen Grundwasserstockwerks. In ungünstigen Fällen können Schadstoffe in das tiefere Stockwerk eindringen und damit gut geschützte Grundwässer mit langen Verweilzeiten und geringen Neubildungsraten nachhaltig qualitativ beeinträchtigen. Die geschilderten Probleme können vermieden werden, wenn der Errichtung von Erd-



■ **Abb. 11.4** Schematische Darstellung eines hydraulischen Kurzschlusses zwischen zwei Grundwasserstockwerken über den Ringraum zwischen Bohrlochwand und Verrohrung einer Erdwärmesonde

wärmesonden eine geologisch-hydrogeologische Erkundung vorausgeht.

Ein Beispiel für die großen Probleme, die mitunter bei der Errichtung von Erdwärmesonden aufgrund der bestehenden geologischen Situation entstehen können, schildern Sass und Burbaum (2010).

Grundwasserwärmepumpen

Über Grundwasserwärmepumpen (GWP) werden oberflächennahe Aquifere als Wärmeträger genutzt. Je nach Flurabstand werden wenige Meter bis Zehnermeter tiefe Brunnen errichtet, aus denen Grundwasser entnommen wird. In Abhängigkeit von der Tiefenlage ist dieses Grundwasser durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen beeinflusst oder liegt unterhalb der Einflussgrenze der Atmosphäre in Tiefenbereichen, die bereits durch den geothermischen Gradienten beeinflusst sein können. Es wird eine Brunnendublette errichtet, um Wasser zu entnehmen, im Wärmetauscher abzukühlen und anschließend über einen Injektionsbrunnen wieder in den Untergrund einzubringen. Der umgekehrte Effekt der Energieableitung durch Grundwasser wird zur Kühlung bei Produktionsprozessen im industriellen Maßstab herangezogen.

Dabei wird das entnommene Grundwasser im Produktionsprozess aufgeheizt und das wärmere Wasser anschließend wieder in den Aquifer zurückgeführt.

Der Einsatz von Grundwasserwärmepumpen setzt natürlich die Existenz eines geeigneten Aquifers voraus. Vor der Errichtung müssen hydrogeologische Untersuchungen Informationen über hydraulische Leitfähigkeit und Mächtigkeit und damit über die Ergiebigkeit des Aquifers liefern. Basierend auf diesen Ergebnissen kann die Anlage bemessen werden. Die gewinnbare Energiemenge wird von der Entnahmemenge und vom maximal möglichen Wärmeentzug gesteuert.

Zur Beheizung eines Einfamilienhauses werden üblicherweise Entnahmemengen von weniger als 1 l s^{-1} und einer Abkühlung des Wassers um maximal 5°C (Temperaturspreizung) realisiert. Bei industriell genutzten Anlagen können aber auch Entnahmemengen von 10 l s^{-1} oder mehr erforderlich sein. In diesen Fällen ist die hydrogeologische Vorerkundung von besonderer Bedeutung und dient auch dazu, nachteilige Einflüsse auf den Grundwasserkörper oder benachbarte Nutzungen zu vermeiden.

Möglicherweise konkurrierende geothermische Nutzungen eines Aquifers oder Beeinträchtigung von Trinkwasserentnahmen müssen vor der Errichtung einer GWP beurteilt werden. In der Praxis werden dazu Temperaturfahnen berechnet, die die Wärmeleitung im Gestein und im Wasser sowie den konvektiven Wärmetransport und die Dispersion berücksichtigen. Bei industriellen Anlagen können sich messbare Temperatureinflüsse über mehrere hundert Meter im Grundwasserabstrom erstrecken. Zur Abschätzung möglicher Auswirkungen wurden analytische Näherungsverfahren z. B. von Ingerle (1988) oder Rauch (1992) entwickelt. Den Einfluss der spezifischen Durchlässigkeit eines Aquifers auf seine effektive Wärmeleitfähigkeit als Input für detailliertere numerische Lösungsansätze diskutieren Huber et al. (2014).

Neben den Auswirkungen, die die thermische Nutzung von oberflächennahen Grundwässern auf benachbarte Nutzungen hat, stellt sich zusätzlich die Frage, wie sich Temperaturveränderungen auf das Gesamtsystem des Aquifers auswirken. Untersuchungen zum Einfluss der Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Aquifer wurden z. B. von Arning et al. (2006) beschrieben. Sie zeigen, dass sich die Durchlässigkeit der Aquifere in den meisten Fällen durch die Lösung von Silikaten langfristig geringfügig erhöht.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden umfangreiche Erkenntnisse über die Grundwasserfauna gewonnen. Detailliert wird die Grundwasserfauna von Deutschland z. B. von Schminke et al. (2007) beschrieben. Auswirkungen von anthropogen bedingten Temperaturanomalien auf die Grundwasserfauna in Porengrundwasserleitern wurden bisher aber nicht umfassend untersucht.

11.3.2 Tiefe Geothermie

Grundlage für den Wärmestrom aus dem Erdinneren zur Oberfläche ist die Wärmeleitung im Gestein und die darin zirkulierenden fluiden Phasen. Die Wärme breitet sich darin diffusiv in Richtung geringerer Temperatur sowie konvektiv mit zirkulierenden Grundwässern aus.

Bestimmend für die Wärmestromdichte, also den Wärmefluss bezogen auf einen bestimmten

Querschnitt in einer definierten Zeit, ist die Wärmeleitfähigkeit. Die spezifische Wärmeleitfähigkeit ist eine temperaturabhängige Materialeigenschaft und beschreibt die Wärmemenge, die in einer Sekunde durch eine 1 m dicke Schicht und einer Fläche von 1 m² fließt, wenn dabei ein Temperaturunterschied von 1 K besteht. Sie wird angegeben in [W (m K)⁻¹].

Wärmestromdichte:

$$q = \frac{Q}{A \cdot \Delta t} [\text{W m}^{-2}] \quad (11.1)$$

Q = Änderung der thermischen Energie

A = Fläche

t = Zeit

Die Wärmestromdichte (Gl. 11.1) in der Erdkruste wird mit einem globalen Mittel von 70 mW m⁻² angegeben und ergibt sich aus der gemittelten Wärmeleitfähigkeit der unterschiedlichen Krustenmaterialien. Sie lässt sich aus dem beobachtbaren mittleren geothermischen Gradienten von 30°C pro Kilometer ableiten.

In Zonen, die keinen signifikant erhöhten geothermischen Gradienten aufweisen, können wirtschaftlich nutzbare Energiemengen gewonnen werden, sofern mit Bohrungen ausreichend große Tiefen erschlossen werden. Unter Ansatz des mittleren geothermischen Gradienten von 30°C pro Kilometer werden in einer Tiefe von 3 km, ausgehend von einer oberflächennahen Bodentemperatur von 10°C, ca. 100°C erreicht. Positive Wärmeanomalien können sich entlang von tiefreichenden Störungszonen durch aufsteigende Grundwässer ergeben. Durch sie erfolgt, zusätzlich zur Wärmediffusion, ein konvektiver Wärmetransport in oberflächennahe Krustenschichten bzw. in Form von Thermalquellen sogar bis zur Erdoberfläche.

Generell können drei unterschiedliche Ansätze zur Nutzung der Erdwärme in einigen Kilometern Tiefe unterschieden werden. Eine Technologie sieht die Bewirtschaftung eines tiefen Aquifers vor (Hydro-Geothermie), ein weiterer Ansatz ist es, Wasser als Wärmeträgermedium zunächst in einen nicht wasserführenden Horizont einzubringen und das dort erhitzte Wasser wieder hinaufzufördern (Enhanced Geothermal System). Eine dritte technolo-

gische Alternative lässt ein Wärmeträgermedium in einem geschlossenen Kreislauf in der Bohrung zirkulieren, ohne direkten Kontakt zum Gestein oder zum darin zirkulierenden Grundwasser (tiefe Erdwärmesonde).

Hydro-Geothermie

Hierbei handelt es sich um die bisher am häufigsten angewendete Methode der tiefen Geothermie. Die Nutzung von frei ausfließenden Thermalquellen zu Heizzwecken wurde bereits in der Antike praktiziert und stellt quasi eine Frühform der Hydro-Geothermie dar. Eine umfassendere und besser steuerbare Nutzung zur Wärme- und Stromproduktion wird aktuell durch die Erschließung tiefliegender Aquifere durch Bohrungen erreicht.

Die Geothermie im Kontext heißer Grundwasser setzt die Existenz eines ausreichend wasserführenden und wasserdurchlässigen Horizonts in genügend großer Tiefe voraus. Die Erkundung geothermischer Potenziale zur hydrogeothermischen Nutzung konzentriert sich daher auf das Auffinden solcher tiefen Aquifere. Zur Abschätzung des geothermischen Potenzials sind Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und Ergiebigkeit des Aquifers von großer Bedeutung. Um derartige Aussagen treffen zu können, sind detaillierte Kenntnisse der geologischen und hydrogeologischen Situation erforderlich. Während Aussagen zu Tiefe, Mächtigkeit und lateraler Ausdehnung von potenziell geeigneten Formationen aufgrund der regionalgeologischen Kenntnisse getroffen werden können, bestehen meist große Unsicherheiten bezüglich der hydrogeologischen Eigenschaften der Zielhorizonte.

Angemar et al. (2012) haben auf der Basis der regionalgeologischen Situation ein Modell des hydrogeothermischen Potenzials Deutschlands erarbeitet. Es konnten z. B. Gebiete abgegrenzt werden, die einen leicht erhöhten geothermischen Gradienten von etwa 35 bis 40 °C pro Kilometer aufweisen und ergiebige Aquifere in ausreichend großer Tiefe erwarten lassen. Es handelt sich um das Norddeutsche Becken, in dem vor allem poröse Sandsteine (Buntsandstein und Keuper) als geeignete Aquifere ausgewiesen sind. Die tiefliegenden verkarsteten Malmkalke im süddeutschen Molassebecken beinhalten ein vielversprechendes Potenzial. Die bisher abgeteufte Bohrungen im Molassebecken errei-

chen Tiefen von mehr als 3000 m, teilweise sogar über 4000 m, und fördern Wässer mit Temperaturen im Bereich von 100 bis 140 °C. Die aktuell in Deutschland betriebenen Anlagen zur Nutzung tiefer Geothermie werden auf der Plattform Geothermische Informationssysteme für Deutschland (GeotIS 2014) dokumentiert. Hier werden auch die Erkenntnisse über das geothermische Potenzial Deutschlands dokumentiert.

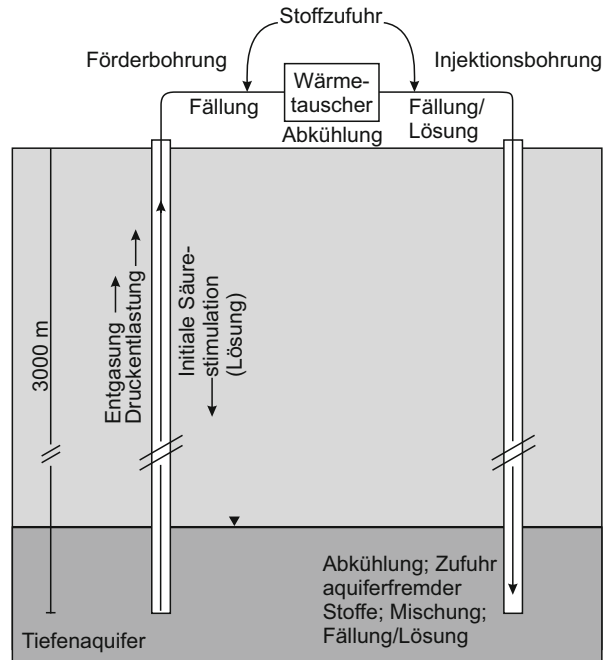
Das geothermische Potenzial der Molassezone erstreckt sich bis in den österreichischen Teil hinein, wo seit 1978 Thermalwässer zu balneologischen Zwecken genutzt werden. Weitere Nutzungen wurden in den vergangenen Jahrzehnten im Wiener Becken und im Alpenraum erschlossen. Im alpinen Deckenbau wurde vor allem der Hauptdolomit als hydrogeologisch geeigneter Zielhorizont erkannt.

Die heißen Grundwässer werden durch Pumpen an die Oberfläche gefördert. Nach der energetischen Nutzung zu Heizzwecken oder zur Stromerzeugung werden die Wässer über eine Injektionsbohrung wieder in den Aquifer zurückgeführt. Förder- und Injektionsbohrung werden zusammenfassend als Dublette bezeichnet. Bei der räumlichen Anordnung der Dublette muss ein ausreichender Abstand zwischen den Bohrungen eingehalten werden, um einen thermischen Kurzschluss und damit mittel- bis langfristig die Förderung bereits abgekühlter Wässer aus der Lagerstätte zu vermeiden. In **Abb. 11.5** ist der schematische Aufbau einer hydrogeothermischen Anlage dargestellt.

Die Rückführung der Wässer hat vor allem zum Ziel, eine nachhaltige Bewirtschaftung des Aquifers zu gewährleisten, denn häufig handelt es sich bei den tiefen Grundwasserleitern um solche, die aktuell keine Grundwasserneubildung erfahren. Die Wässer können mittlere Wasseralter von mehreren tausend Jahren aufweisen – in Bezug auf den Zeitraum der Nutzung gelten sie daher als nicht erneuerbar. Eine künstliche Grundwasserneubildung durch die Reinjektion der Wässer ist deshalb zwingend erforderlich.

Ein weiterer Grund für die Notwendigkeit der Rückgabe der Wässer in den Aquifer ist deren hydrochemische Beschaffenheit. Lange Verweilzeiten, große Einzugsgebiete, hohe Temperaturen und hoher Druck führen zu hoher Mineralisation dieser Wässer. Zum Vergleich: oberflächennahe Grund-

■ **Abb. 11.5** Darstellung von Förder- und Injektionsbohrung mit zwischengeschalteter energetischer Nutzung. Im Förderbrunnen, im Wärmetauscher und im Injektionsbereich können hydrochemische Reaktionen, die durch Abkühlung, Druckentlastung und Mischung verschiedener Wässer angeregt werden, zu Fällungs- und Lösungsprozessen führen



wässer weisen je nach Lithologie im Einzugsgebiet Gesamtlösungsinhalte im Bereich von 500 bis 1500 mg l^{-1} auf. Die für Tiefenwässer relativ gering mineralisierten Malmkarstwässer der Molassezone weisen im Mittel Gesamtgehalte von ca. 2500 mg l^{-1} auf. Für Tiefenwässer aus anderen Zielhorizonten werden aber auch Lösungsinhalte beschrieben, die im Bereich von 10^4 bis 10^5 mg l^{-1} liegen. Eine Einleitung in oberflächennahe Grundwasserleiter oder Oberflächenngewässer wäre aus Gründen des Wasserschutzes ökologisch und juristisch unangemessen.

Die erhöhte Mineralisation der Tiefenwässer kann auch für den Betrieb einer Geothermieanlage ein Problem darstellen. In der Lagerstätte herrschen hohe Temperaturen und hoher Druck. Beim Aufstieg der Wässer an die Oberfläche kühlen diese zwar relativ langsam ab, die Druckentlastung erfolgt allerdings sehr rasch. Da in den Wässern meist auch große Mengen an Gasen gelöst sind, führt die Druckentlastung zur Freisetzung dieser Gase (siehe ► [Exkurs 4.2](#)). Wässer, die in der Lagerstätte im Gleichgewicht mit dem sie umgebenden Gestein waren, sind an der Oberfläche bei stark verringertem Druck deshalb massiv übersättigt an bestimmten Mineralphasen.

Der Zusammenhang lässt sich beispielsweise am Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht nachvollziehen: Große Mengen im Wasser gelöster Kohlensäure (CO_2) werden durch die Druckentlastung freigesetzt. Je weniger CO_2 in der Lösung vorliegt, umso weniger Kalzit kann im Wasser gelöst sein. Das entgaste Tiefenwasser ist übersättigt und Kalzit fällt rasch und in großen Mengen in den Systemen der Geothermieanlage aus.

Um derartige Prozesse zu vermeiden, werden die Anlagen in geschlossenen Kreisläufen und soweit möglich, unter Überdruck betrieben. Zur Lösung von Fällungsprodukten werden häufig verschiedene Fremdstoffe zugegeben. Neben Fällungsreaktionen können die Wässer aber auch Lösungsprozesse im Bereich der Anlage oder im Reinjektionsbereich in Gang setzen. Bei der Abschätzung des geothermisch nutzbaren Potenzials einer Region muss daher auch die hydrochemische Charakteristik der Tiefenwässer berücksichtigt werden.

Enhanced Geothermal System (EGS)

Unter diesem Begriff werden petrothermale Systeme zusammengefasst, die injiziertes Wasser als Wärmeträgermedium nutzen. Die Technologie ist auch unter den Bezeichnungen Hot-Dry-Rock-

System (HDR) oder Deep-Heat-Mining (DHM) bekannt.

Bei dieser Technologie wird direkt die im Gestein gespeicherte Wärme entnommen, indem Wasser in das Gebirge eingebracht wird, sich hier erhitzt und dann wieder zur Oberfläche befördert wird. Das Gebirge wirkt dabei quasi als Wärmetauscher.

Im Vergleich zu hydrogeothermalen Anlagen haben EGS den Vorteil, dass sie nicht an die Existenz eines tiefen Aquifers gebunden sind. Ein großer Risikofaktor bei der Erschließung, nämlich die tatsächliche Wasserführung des Zielhorizonts, fällt dadurch weg.

Auch bei diesem System wird eine Dublette bestehend aus Produktions- und Injektionsbohrung errichtet. Da die tiefen, nicht wasserführenden Horizonte, die durch die Bohrungen erschlossen werden, meist nur geringe hydraulische Leitfähigkeiten aufweisen, muss zwischen den beiden Bohrungen meist eine künstliche Wasserwegsamkeit geschaffen bzw. die vorhandene Durchlässigkeit des Gebirges erhöht werden, indem vorhandene Klüfte erweitert, verheilte oder auch neue Klüfte geöffnet werden. Dies erfolgt durch Säurestimulation oder hydraulische Rissbildung. Die Problematik des „hydraulic fracturing“ wurde im ► **Exkurs 9.3** bereits diskutiert. Anders als bei der Kohlenwasserstoffexploration wird in der Geothermie jedoch meist auf den Zusatz von Fremdstoffen zum Frackingfluid verzichtet.

Das Einbringen von Wasser unter hohem Druck in eigentlich mehr oder weniger trockene Gebirgsbereiche birgt die Gefahr der induzierte Seismizität. Durch die Auflockerung des Gebirges erfolgt bereits eine Destabilisierung, die häufig mit Mikrobeben einhergeht. Klüftkörper werden gegeneinander versetzt, Hohlräume öffnen sich, werden an anderer Stelle geschlossen. Klüfte, die sich aufgrund von Scherspannungen im Gebirge bilden, werden mit Wasser gefüllt, wodurch die Reibung zwischen den Klüftflächen stark herabgesetzt wird. Die plötzliche Entlastung entlang von ausgedehnten Klüftflächen kann Erdbeben auslösen, die sich auch bis zur Oberfläche auswirken können. Zang et al. (2014) stellen den Zusammenhang zwischen vorhandenen geologischen Strukturen, der initialen und kontinuierlichen Injektion von Wässern in EGS-Anlagen und den dabei gemessenen seismischen Aktivitäten dar. Sie zeigen auf, wie strukturgeologische Erkundung

und seismische Messungen während der Injektion dazu beitragen können, Schäden durch induzierte Erdbeben, die in der Vergangenheit immer wieder zu Problemen geführt haben, zu vermeiden.

Erdwärmesonden

Erdwärmesonden werden, ähnlich wie oben für oberflächennahe Systeme beschrieben, auch in der tiefen Geothermie zur Wärmegewinnung eingesetzt. Es handelt sich ebenfalls um eine petrothermale Technologie. Das Wärmeträgermedium wird in einem geschlossenen Kreislauf geführt, ohne direkten Kontakt zum Gestein im Untergrund. Bisher wurden Erdwärmesonden bis in ca. 3000 m Tiefe errichtet. Als Wärmeträger dient z.B. Ammoniak. Das Wärmeträgermedium wird im äußeren Bereich eines doppelwandigen Rohrs in die Tiefe geleitet, nimmt dabei Wärmeenergie auf und steigt aufgeheizt im inneren isolierten Rohr wieder auf. Die aufgeheizte Flüssigkeit wird in einem Wärmetauscher an der Oberfläche abgekühlt und anschließend wieder in den Kreislauf eingebracht.

Der große Vorteil dieses Verfahrens im Vergleich zu EGS ist, dass kein direkter Kontakt mit dem Gebirge stattfindet und das oben beschriebene Problem der induzierten Seismizität vermieden wird. Auch kommt es bei korrekter Ausführung der Anlage nicht zu den hydrochemischen Auswirkungen, die bei hydrogeothermischen Systemen auftreten können, da kein Stoffaustausch erfolgt. Die Technologie ist unabhängig von der Wasserführung im Gebirge, kann also sowohl innerhalb von Aquiferen als auch in weitgehend trockenen Gebirgen ausgeführt werden. Sofern jedoch Grundwasser im Zuge der Errichtung von Tiefenbohrungen angetroffen wird, kommt der Abdichtung dieser wasserführenden Schichten im Ringraum eine große Bedeutung zu.

Je nach geologisch-hydrogeologischer Situation können sich Auswirkungen auf Hydrogeologie und Gebirgsverhalten jedoch auch bei der Errichtung von Erdwärmesonden ergeben. Dies zeigen z.B. Grimm et al. (2014) anhand einer Schadensfallanalyse an Anlagen in Baden-Württemberg. Die Gefährdung des Grundwassers durch den Austritt von Wärmeträgerflüssigkeit aus schadhaften Erdwärmesonden stellt ein weiteres mögliches Problem dieser Technologie dar (Ilieva et al. 2014). Die Probleme

gelten gleichermaßen für oberflächennahe wie für tiefe geothermische Anlagen.

11.3.3 Geothermische Nutzung von Hochenthalpiefeldern

Global betrachtet, werden die meisten geothermischen Anlagen zur Wärme-, vor allem aber jene zur Stromgewinnung in Gebieten betrieben, die aufgrund der geologischen Situation einen deutlich erhöhten geothermischen Gradienten aufweisen und damit große Energiemengen aus vergleichsweise geringer Tiefe gewonnen werden können. Man spricht bei derartigen Gebieten von Hochenthalpiefeldern. Sie treten im Bereich von aktiven Plattengrenzen auf, die sich auch durch vulkanische Aktivitäten auszeichnen. Beispiele finden sich im Westen der USA sowie generell entlang des sogenannten „Pazifischen Feuerrings“. In Europa sind Hochenthalpiegebiete in Italien und Griechenland und natürlich auf Island verbreitet, das seinen Energiebedarf zu mehr als 60 % (IEA 2011) aus derartigen Anlagen deckt.

In Deutschland ist der Bereich des Oberrheingrabens das Gebiet mit den höchsten geothermischen Gradienten, die allerdings auch innerhalb der Region stark schwanken können, da sie vornehmlich auf die Zirkulation heißer Wässer entlang von Störungszonen zurückzuführen sind. An dieser interkontinentalen Riftzone werden maximale geothermische Gradienten von ca. 80 °C erreicht (Zang et al. 2014), die z. B. in Geothermieanlagen wie jener in Landau in der Pfalz zur Stromerzeugung und Fernwärmeversorgung genutzt werden. Hier wird mit einer knapp 3300 m tiefen Bohrung ein Buntsandsteinaquifer erschlossen, aus dem ca. 40 l s⁻¹ Wasser mit 159 °C gewonnen werden (GeotIS 2014).

Wird heißer Wasserdampf in einem offenen System genutzt, bedeutet dies, dass – anders als bei den bisher beschriebenen Verfahren – das entnommene Wasser nicht oder nur teilweise in die Lagerstätte zurückinjiziert werden kann. Die Folge ist eine Reduktion des Dampfdrucks in der Lagerstätte, die zu einem Rückgang der Produktivität der Lagerstätte führen kann, die im Nachhinein nur schwer durch Reinjektionen wieder herzustellen ist. Stober und Bucher (2014) beschreiben diesen Prozess der Alte-

rung eines Hochenthalpiefeldes anhand eines Beispiels aus Kalifornien (USA).

Einen allgemeinen Überblick über die Geothermie geben Stober und Bucher (2014); spezielle Themen der tiefen Geothermie werden z. B. bei Bauer et al. (2014) behandelt. Generelle Informationen zum aktuellen Stand der Geothermie in Deutschland werden von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2009) gegeben und sind über die Internetplattform GeotIS (2014) abrufbar.

11.4 Energieverteilung

Unabhängig davon, aus welchen Energiequellen und mit welcher Technologie Strom produziert wurde, besteht immer die Notwendigkeit, ihn vom Produktionsort zum Verbraucher zu transportieren. Dazu bedarf es eines entsprechenden Verteilungssystems, das umso weitläufiger sein muss, je größer die Anlagen zur Stromerzeugung sind und je zentraler die Stromproduktion stattfindet. Stromtransport ist ein Problemfeld, das in den vergangenen Jahren immer größere Bedeutung erlangt hat. Dichte Siedlungsstrukturen und eine erhöhte Sensibilität der Bevölkerung machen eine Trassenfindung für Hochspannungsfreileitungen in Mitteleuropa zunehmend schwierig.

Ein erster Lösungsansatz könnte in einer dezentralen Stromproduktion, verbunden mit der Verteilung in einem lokalen bis maximal regionalen Netz, zu finden sein. Kleine Anlagen mit geringen Kapazitäten, wie z. B. Kleinkraftwerke an Bächen, einzelne Windkraftanlagen, Biomassekraftwerke etc. produzieren Strom für ihr direktes Umfeld. Die Verteilung erfolgt über ein regionales Erdkabel- oder Freileitungsnetz, das mit Niederspannung betrieben werden kann. Unter der Voraussetzung, dass der Strom tatsächlich im Nahbereich der Produktionsanlagen verbraucht wird, ergeben sich dann sowohl durch die Stromerzeugung als auch durch die Verteilung nur kleinräumige Eingriffe in die Umwelt, verbunden mit vergleichsweise geringen Auswirkungen. Pläne, Strom aus dezentralen Anlagen wiederum über überregionale Netze landes- oder sogar europaweit zu verteilen, können zwar einige umweltgeologisch relevante Probleme großer Kraftwerksanla-

gen lösen, werfen jedoch neuerlich die Probleme des Energietransports auf.

In vielen Gebieten in Europa gibt es bereits Bestrebungen „energieautarke Gemeinden“ zu bilden, die ihren Strombedarf aus eigenen Anlagen decken. Nachteil einer ausschließlich dezentral betriebenen Stromversorgung wäre jedoch eine mangelnde Absicherung gegen Störungen in Produktionsanlagen oder Verteilungssystemen. Zudem können Produktionsüberschüsse oder -defizite, die sich aus Schwankungen von Produktion und Verbrauch ergeben, in einem derartigen System nicht ausgeglichen werden.

Um die Versorgung permanent sicherzustellen, werden daher vermutlich auch zukünftig überregionale Verteilungsnetze erforderlich sein. Diese Hochspannungs-Gleichstromnetze (HGÜ) können als Freileitungen oberirdisch oder als Erdkabel unterirdisch verlegt sein. Aus beiden Varianten können sich umweltgeologisch relevante Probleme ergeben.

Freileitungen werden an Masten aufgehängt und über viele hunderte Kilometer von Kraftwerken zu Umspannwerken gespannt. Bei den Masten, die in Abständen von ca. 300 m entlang einer Freileitungstrasse errichtet werden müssen, handelt es sich um Bauwerke, auf die große Kräfte einwirken. Sie müssen daher mit massiven Fundamenten im Untergrund verankert sein. Der Bau jedes Mastfundaments ist mit dem Einsatz entsprechender schwerer Baugeräte verbunden und es kommt zu erheblichen Eingriffen in den Untergrund. Die räumliche Anordnung der Masten richtet sich danach, wo eine Leitungsführung aufgrund der bestehenden Nutzungen möglich ist und sollte gleichzeitig möglichst geradlinig durch die Landschaft führen, um die Distanzen und damit die Anzahl der Masten und die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes gering zu halten. Dementsprechend sind die Standorte oft weit von Straßen entfernt, so dass neben dem punktuellen Eingriff am Standort selbst auch erhebliche Eingriffe durch Baustraßen entstehen. Je nach Grundwassersituation können von diesen Eingriffen Grundwasserkörper direkt betroffen sein, wenn zum Beispiel im Fundamentbereich temporäre Wasserhaltungsmaßnahmen erforderlich sind. Bei einer fachgerechten Ausführung und einer anschließenden Rekultivierung der im Bau genutzten Flächen stellen Freileitungen nach ihrer Fertigstellung aus umweltgeologischer Sicht eine geringe Beeinträchtigung dar.

Zum Schutz der Landschaft, aber auch aufgrund der bisher nur unzureichend erforschten gesundheitsschädlichen Wirkung elektromagnetischer Felder, die von einer Hochspannungsfreileitung ausgehen, wird immer öfter die Verlegung der Hochspannungsnetze unter die Erde verlangt. Die Verlegung eines Hochspannungserdkabels erfordert eine durchgehende Künette, die einige Zehnermeter breit und mehrere Meter tief ist und hunderte Kilometer lang sein kann. Anders als bei den punktuellen Eingriffen für Maststandorte sind auf der gesamten Leitungslänge durchgehende Eingriffe in den Untergrund erforderlich. Dabei können die unterschiedlichsten geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse angetroffen werden. Da mit jedem Eingriff in einen Grundwasserkörper eine potenzielle Gefährdung der Grundwasserqualität einhergeht, müssen zum Beispiel Wasserschutzgebiete umfahren werden. Aber auch in nicht als Wasserschutzgebiet ausgewiesenen Bereichen müssen strenge Maßnahmen zum Schutz der oberflächennahen Grundwasserkörper umgesetzt werden.

Während bei Freileitungen vor allem die Errichtung umweltgeologisch relevante Probleme aufwirft, können Erdkabel auch nach ihrer Fertigstellung und der sorgfältigen Rekultivierung der Bauflächen Auswirkungen auf den Untergrund haben. Dies ist dann der Fall, wenn sie unterhalb des Grundwasserschwankungsbereichs liegen und als Querbauwerke die Grundwasserströmung beeinflussen. Auch eine Grundwassererwärmung durch die höheren Temperaturen des Erdkabels ist eine mögliche Auswirkung und kann sich sowohl auf bestehende Nutzungen als auch auf die Grundwasserfauna auswirken. Aus geotechnischer Sicht sind außerdem Leitungsstrecken, die durch geologisch instabile Gebiete (Massenbewegungen) verlaufen, als Problembereiche zu betrachten. Dieses Problem stellt sich bevorzugt in Gebirgsräumen.

In der öffentlichen Diskussion zum Thema überregionale Stromverteilungsnetze werden erhebliche Nachteile der Freileitung genannt, die sich auf den Eingriff in Ökosysteme, die Zerschneidung von Vogelflugrouten, das Landschaftsbild und vor allem auf den Einfluss auf die menschliche Gesundheit beziehen. Diese berechtigten Bedenken müssen jeweils den Vorteilen, die sich aus einer Freileitung ergeben, gegenübergestellt werden. Aus umweltgeologischer

Sicht fällt der Vergleich zwischen Freileitung und Erdkabel in den allermeisten Fällen zugunsten der Freileitung aus.

Dieses Beispiel zeigt, dass Umweltbetrachtungen aus vielen verschiedenen Perspektiven erfolgen sollen und Vorteile für ein Umweltsystem gleichzeitig Nachteile für ein anderes darstellen können. Die Umweltgeologie ist wie Ökologie, Landschaftschutz oder Immissionsschutz eine zusätzliche Facette eines vielschichtigen Problems.

Energieversorgung – Einiges, was man wissen sollte

- Um den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch von europaweit durchschnittlich 8,5 % im Jahr 2005 auf 20 % im Jahr 2020 zu steigern, wurde von der Europäischen Union die Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und Rates zur Förderung der erneuerbaren Energien in der Europäischen Union in Kraft gesetzt.
- Konzepte zum Ausbau erneuerbarer Energiequellen müssen sich an den klimatischen, geographischen und geologischen Verhältnissen eines Landes orientieren. Während Österreich und die Schweiz als Gebirgsländer mit hohen Niederschlagsmengen auf die Wasserkraft setzen können, hat in weiten Gebieten Deutschlands die Windenergie größeres Potenzial. Die Nutzung der Geothermie bietet sich in geologischen Schwächezonen mit positiven Wärmeanomalien an, kann aber mit erhöhtem Aufwand auch in Regionen mit mittleren geothermischen Gradienten angewendet werden.
- Probleme der Wasserkraftnutzung ergeben sich z. B. durch die erforderlichen Stau- oder Speicherräume, die bestehende Ökosysteme aber auch begleitende Grundwasserkörper beeinträchtigen können. Die unnatürlichen Fließverhältnisse mit Stauzonen im Anstrom und die stark schwankenden Fließgeschwindigkeiten in den Unterläufen der Kraftwerke führen zu quantitativen, aber auch qualitativen Beeinträchtigungen von Sediment und Gewässer.

- Die oberflächennahe Geothermie nutzt die Solarenergie, die in den obersten ca. 20 m der Erdkruste gespeichert ist sowie die geothermale Energie, die in den oberen wenigen hundert Metern der Erdkruste gegeben ist. Die Wärmeenergie wird entweder mit dem Grundwasser aus Aquiferen oder mittels Wärmeträgermedium an die Oberfläche transportiert. Die energetische Nutzung oberflächennaher Aquifere kann zu Beeinträchtigungen benachbarter Grundwässer, damit auch Trinkwasserversorgungen, führen.
- Tiefe Geothermie erschließt die Energie heißer Krustenstockwerke in mehreren tausend Metern Tiefe. Die Wärmeenergie kann entweder mit dem dort gespeicherten Grundwasser (Hydro-Geothermie) oder über Wärmeträgermedien (Petro-Geothermie) transportiert werden. Hydrochemische Prozesse stellen vor allem in der hydrothermalen Geothermie eine Herausforderung dar. In der petrothermalen Geothermie kann die induzierte Seismizität mitunter ein Problem darstellen.
- Unabhängig von der Art, wie Strom produziert wird, muss er von der Produktionsstätte zum Verbraucher transportiert werden. Hochspannungsleitungen können als Freileitungen oberirdisch oder als Erdkabel unterirdisch über lange Distanzen geführt werden. Während Freileitungen durch punktuelle Eingriffe in den Untergrund errichtet werden können, ergeben sich aus Linienbauwerken wie dem Erdkabel aus umweltgeologischer Sicht möglicherweise geotechnische oder hydrogeologische Probleme.

? Testfragen zum Kapitel Energieversorgung

1. Nennen Sie die Ihnen bekannten Quellen erneuerbarer Energie. Welche davon sind Ihrer Meinung nach aus umweltgeologischer Sicht von besonderer Relevanz?
2. Wie wirken sich Klima, Morphologie und Geologie eines Landes auf dessen Konzept zur Steigerung des Anteils an erneuerbarer Energie aus?

3. Beschreiben Sie die generellen Unterschiede zwischen einem Lauf- und einem Speicherkraftwerk hinsichtlich Voraussetzungen, Bauart und Nutzungsart.
4. Welche Auswirkungen für die geologische Umwelt können sich aus Bau und Betrieb eines Laufkraftwerks ergeben?
5. Welche Auswirkungen für die geologische Umwelt können sich aus Bau und Betrieb eines Speicherkraftwerks ergeben?
6. Beschreiben Sie die Prozesse, die im Stauraum und im Unterwasser eines Laufkraftwerks negativ auf Sedimenthaushalt, Wasserqualität und Grundwasser einwirken können.
7. Erläutern Sie die Unterschiede zwischen einem Speicherkraftwerk und einem Pumpspeicherkraftwerk. Wieso spielen Pumpspeicherkraftwerke für das Gelingen der Energiewende eine wichtige Rolle?
8. Erläutern Sie das Problem der konkurrierenden Nutzungen im Zusammenhang mit Grundwasser-Wärmepumpenanlagen?
9. Welche umweltgeologischen Probleme können sich aus dem Betrieb einer hydrogeothermischen Anlage ergeben?
10. Was versteht man in der Geothermie unter EGS? Welche Vor- und Nachteile ergeben sich hier im Vergleich zur hydrogeothermischen Nutzung?
11. Erläutern Sie das Prinzip der Erdwärmesonden. Welchen grundsätzlichen Vorteil haben diese sowohl in der tiefen als auch in der oberflächennahen Geothermie im Vergleich zu den anderen Systemen?
12. Hochspannungsnetze – als Freileitung oder Erdkabel? Stellen Sie hierzu Überlegungen aus umweltgeologischer Sicht an.

Literatur

Angemar T, Schnellschmidt R, Schulz R (2012) Subsurface temperature distribution in Germany. *Geothermics* 44:65–77

Arning E, Kölling M, Panteleit B, Reichling J, Schulz HD (2006) Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. *Grundwasser* 11(1):27–39

AWG (2002). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, Abfallwirtschaftsgesetz BGBl Nr. 102/2002. Republik Österreich

Bauer M, Freeden W, Jakobi H, Neu T (2014) Handbuch tiefe Geothermie. Springer Spektrum, Heidelberg

BGR (2009) Energierohstoffe 2009: Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

BMWi (2014) Energiestatus Österreich 2014 – Entwicklung bis 2012. Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Republik Österreich

Bührke T, Wengenmayr R (Hrsg) (2011) Erneuerbare Energie – Konzepte für die Energiewende, 3. Aufl. Wiley-VCH Verlag, Weinheim

EEG (2014) Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Bundesrepublik Deutschland

EE-Richtlinie (2009) Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. Europäische Union

Garbe-Schönberg C-D, Zeiler M, Stoffers P (1997) Geochemische Stoffkreisläufe in Binnenseen: Akkumulation versus Remobilisierung von Spurenelementen. In: Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (Hrsg) *Geochemie und umweltrelevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre*. Springer, Heidelberg

GeotIS (2014) Geothermische Informationssysteme für Deutschland. www.geotis.de. Zugegriffen: 26.12.2014

Grimm M, Stober I, Kohl T, Blum P (2014) Schadensfallanalyse von Erdwärmehohlräumen in Baden-Württemberg. *Grundwasser* 19(4):275–286

Huber H, Arslan U, Sass I (2014) Einfluss der Filtergeschwindigkeit des Grundwassers auf die effektive Wärmeleitfähigkeit. *Grundwasser* 19:173–179

Hütte M (2000) *Ökologie und Wasserbau*. Parey Buchverlag, Berlin

Ilieva D, Haderlein SB, Morasch B (2014) Grundwassergefährdungspotenzial von Additiven in Wärmeträgerflüssigkeiten aus Erdwärmesonden. *Grundwasser* 19(4):263–274

Ingerle K (1988) Beitrag zur Berechnung und Abkühlung des Grundwasserkörpers durch Wärmepumpen. *Österreichische Wasserwirtschaft* 40(11):12

International Energy Agency (IEA) (2011) *Energy statistics division* Bd. 8. IEA Paris, Paris

International Energy Agency (IAE) (2014) *Key world energy statistics*. IEA. IEA Paris,

Köthe H, Bertsch W (1999) Der Umgang mit Baggergut in Deutschland. In: Huch M, Geldmacher H (1999), *Ressourcen-Umwelt-Management, Wasser, Boden, Sedimente*. Springer Verlag, Heidelberg

KrWG (2012) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG). Bundesrepublik Deutschland, Berlin

Literatur

- Lebensministerium (2010) Energiestrategie Österreich – Maßnahmenvorschläge. Republik Österreich
- Matschullat J, Heirichs H, Schneider J, Ulrich B (Hrsg) (1994) Gefahr für Ökosysteme und Wasserqualität – Ergebnisse interdisziplinärer Forschung im Harz. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (1997) Geochemie und umweltrelevante Prozesse in Atmo-, Pedo- und Hydrosphäre. Springer, Heidelberg
- ÖSG (2012). Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern, BGBl I Nr. 75/2011 (Ökostromgesetz). Republik Österreich
- Palzer A, Henning H-M (2014) A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies – Part II: Results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30:1019–1034
- Prinz H, Strauss R (2011) Ingenieurgeologie. Springer Spektrum, Heidelberg
- Rauch R (1992) Ausbreitung von Temperaturanomalien im Grundwasser. Universität Innsbruck, Innsbruck
- Sass I, Burbaum U (2010) Damage to the historic town of Staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations. *Acta Carsologica* 39(2):233–245 (Postojna)
- Schminke H, Gad G, Ahlrichs W, Bartsch I, Christl H, Gerecke R, Martin P, Rumm P, Wägele JW (2007) Grundwasserfauna Deutschlands, ein Bestimmungswerk. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, S 628
- Stober I, Bucher K (2014) Geothermie, 2. Aufl. Springer Spektrum, Heidelberg
- WRRL (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 – Wasserrahmenrichtlinie. Europäische Union
- Zang A, Qye V, Jousset P, Deichmann N, Gritto R, McGarr A, Majer E, Bruhn D (2014) Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs – An overview. *Geothermics* 52:6–21

Geologie in der Umweltverträglichkeits- prüfung

Sylke Hilberg

- 12.1 Fläche, eine begrenzte Ressource – 216
 - 12.2 Die Umweltverträglichkeitsprüfung – 217
 - 12.3 Inhalte der Umweltverträglichkeitserklärung (UVE) – 218
- Literatur – 226

Kurzfassung

Jede anthropogene Aktivität ist mit einer Beanspruchung von natürlichen Ressourcen verbunden. Fast immer wird dabei die begrenzte Ressource „Fläche“ beansprucht. Die Nutzung von Flächen bedeutet im weitesten Sinne immer auch einen Eingriff in die oder eine Konfrontation mit der geologischen Situation. Deshalb müssen Flächennutzungen aller Art stets unter Berücksichtigung von geologischen Aspekten und möglicher Naturgefahren geplant werden.

Vor allem bei Großprojekten, z. B. Infrastrukturprojekte, Kraftwerksbauten, Produktionsstätten oder Anlagen zur Rohstoffgewinnung, die mit einem entsprechend großen Eingriff in die natürliche Umwelt einhergehen, ist eine systematische Beurteilung der Umweltauswirkungen von großer Bedeutung. Einerseits müssen mögliche nachhaltige Beeinträchtigungen der Umwelt bewertet werden, andererseits mögliche Projektbeeinträchtigungen durch die bestehenden natürlichen Verhältnisse betrachtet und durch Gegenmaßnahmen vermieden werden.

Ein wichtiges Werkzeug zur umweltverträglichen Planung von Großprojekten wurde mit der europäischen Gesetzgebung zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) geschaffen. Herzstück der UVP bildet die Umweltverträglichkeitsstudie oder auch Umweltverträglichkeitserklärung (UVE). Anhand der beispielhaften Vorgehensweise zur Erstellung des UVE-Fachbeitrags Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren zeigt dieses Kapitel, welche Rolle die Umweltgeologie in diesem Zusammenhang einnimmt und wie umweltgeologische Aspekte auf die Planung und Gestaltung von Großprojekten Einfluss nehmen können. Da diese Großprojekte aus allen, in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Themengebieten kommen können, ist das folgende Kapitel auch als zusammenfassende Betrachtung der umweltgeologischen Behandlung dieser Themen in der praktischen Umsetzung zu verstehen.

12.1 Fläche, eine begrenzte Ressource

Der Anteil an Festland beträgt etwa 29,3 % der gesamten Erdoberfläche, das sind knapp 150 Millionen km². Davon sind etwa 133 Millionen km² frei von Eis und liegen unter einer Meereshöhe von

5000 m. Diese Flächen sind damit grundsätzlich als Lebensraum geeignet. Dies trifft natürlich nur mit teilweise sehr großen Einschränkungen zu. Verfügbare Fläche ist eine begrenzte Ressource, die je nach Bevölkerungszahl und dem Lebensstandard der sie nutzenden Bevölkerung unterschiedlich stark beansprucht wird. Global betrachtet stand im Jahre 1800 bei einer Erdbevölkerung von ca. einer Milliarde Menschen eine nutzbare Fläche von 133.000 m² pro Person zur Verfügung. Dies entspricht einer Bevölkerungsdichte von durchschnittlich 7,5 Personen pro Quadratkilometer. Im Jahr 2014 und einer Weltbevölkerung von 7,2 Milliarden Menschen hat sich die verfügbare Fläche nicht wesentlich verändert, muss jedoch auf mehr als die siebenfache Bevölkerungszahl verteilt werden. Für jede Person steht damit nur noch eine Fläche von 18.000 m² zur Verfügung. Jeden Quadratkilometer grundsätzlich besiedelbarer Landfläche müssen sich im weltweiten Durchschnitt knapp 55 Personen teilen. Die genannten 18.000 m² pro Person müssen sowohl deren Bedarf an Lebensraum als auch an Produktionsflächen für Nahrungsmittel oder andere Güter sowie für die notwendige Infrastruktur decken.

Eine derartige globale statistische Betrachtung der Flächenressourcen kann natürlich nur dazu dienen, grundsätzliche Entwicklungen der Flächenverknappung zu beschreiben. Die großen Variationen von Bevölkerungsdichte und Lebensstandard der Bevölkerung einerseits und der Relief- und Klimaverhältnisse andererseits führen dazu, dass Flächenverfügbarkeit immer einer regionalen Betrachtung unterzogen werden muss. So sind z. B. große Teile Afrikas, Asiens, Nord- und Südamerikas Wüsten oder Halbwüsten, die keine dauerhafte Besiedlung und Nutzung zulassen. Europa ist dagegen aufgrund seiner geographischen Lage nahezu flächig besiedelbar, dafür jedoch auch mit etwa 65 Einwohnern pro km² überdurchschnittlich dicht besiedelt.

Eine Sonderrolle innerhalb Europas bezüglich der Flächenressourcen nimmt der Alpenraum ein, welcher sich über die Länder Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich, Schweiz und Slowenien erstreckt. Aufgrund des Geländereiefs und der klimatischen Situation in den höheren Lagen ist die nutzbare Landfläche stark eingeschränkt. So liegen z. B. in Österreich bei einer gesamten Landfläche von knapp 84.000 km² nur 40 % im Bereich von

Tief- und Hügelländern, die ganzjährig bewohnbar sind, während 60 % der Landesfläche als Gebirgsregionen klassifiziert werden. Hier sind nur die Talräume ganzjährig besiedelbar, während die höher gelegenen Flächen nur im Sommer genutzt werden können. Bei einer Bevölkerungsdichte von ca. 100 Einwohnern pro km², bezogen auf die gesamte Landfläche, müssen ca. 250 Einwohner auf einem Quadratkilometer ganzjährig besiedelbarem Land Platz finden. In der Schweiz, die in ihrer Gesamtfläche nur etwa halb so groß ist wie Österreich, bei annähernd gleicher Bevölkerungszahl und einem ähnlichen Verhältnis zwischen Tief- und Bergland, müssen sich ca. 500 Einwohner einen Quadratkilometer Landfläche teilen.

Eine Folge dieses Siedlungsdrucks in den Gebirgsländern ist die Ausweitung von Siedlungsflächen in Gebiete, die aufgrund der hier herrschenden Naturgefahren wie Steinschlag, Fels- oder Bergsturz oder auch Lawinen eigentlich für eine Besiedelung nicht geeignet sind. Häufig werden derartige Flächen auf der Basis von geologischen Erkundungen mit technischen Maßnahmen gesichert, um sie dennoch zu Siedlungsräumen umzuwandeln.

Die Entstehung zusätzlicher Naturgefahrengebiete wird in den letzten Jahrzehnten in vielen Alpentälern beobachtet, weil ursprünglich vom Permafrost stabilisierte Hochgebirgsregionen aufgrund höherer Durchschnittstemperaturen infolge des Klimawandels auftauen. Es entstehen Steinschlag- und Felssturzgebiete dort, wo bisher über Jahrhunderte gefahrlose Siedlungstätigkeit möglich war.

Maßnahmen zur Ausweitung von Siedlungsräumen und die Errichtung von Infrastruktur oder Produktionsstätten in bis dahin unbesiedelten Gebieten gehen meist zu Lasten von Naturräumen und stehen häufig im Widerspruch zu Umwelt- und Naturschutz. Dies ist ein wesentlicher Grund dafür, dass bei der Planung von Projekten die Umweltsituation detailliert betrachtet werden muss. Im ► [Kap. 1](#) wurde bereits darauf hingewiesen, dass Auswirkungen der Geologie auf den Menschen über die Naturgefahrenbetrachtung (Immission) bereits seit Beginn der Menschheitsgeschichte eine große Rolle spielen, während die emissionsseitige Betrachtung ein vergleichsweise neuer Ansatz ist.

Eine systematische Untersuchung von Umweltauswirkungen durch Projekte ermöglicht die Um-

weltverträglichkeitsprüfung (UVP), die von einer Bewilligungsbehörde auf der Basis der Umweltverträglichkeitserklärung des Projektbetreibers durchgeführt wird. Das durch nationalstaatliche Gesetze verankerte Werkzeug zur Prüfung der Umweltauswirkungen vor der Bewilligung von Projekten berücksichtigt natürlich auch geologische Aspekte. Es behandelt sehr viele der Fragestellungen, die in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert worden sind. Die Rolle der Geologie in der Umweltverträglichkeitsprüfung steht daher am Ende unserer Betrachtungen zur Umweltgeologie in der Praxis. Das Kapitel soll einen Überblick darüber geben, wie Geologen bei einer umweltgerechten Gestaltung von Großprojekten mitwirken können.

12.2 Die Umweltverträglichkeitsprüfung

Die Umweltverträglichkeitsprüfung dient dazu, umweltrelevante Projekte vor ihrer Umsetzung auf potenzielle schädliche Auswirkungen hin zu überprüfen und gegebenenfalls im Sinne der Umweltverträglichkeit zu modifizieren. Nach der Feststellung der Umweltverträglichkeitspflicht eines Projekts erfolgt die Definition der Untersuchungsinhalte (Fachbereiche, Untersuchungsraum, Untersuchungstiefe), die dann im Herzstück der UVP, in der Umweltverträglichkeitserklärung oder Umweltverträglichkeitsstudie des Projektbetreibers, dargestellt werden. Ein wesentlicher Aspekt des UVP-Verfahrens ist einerseits die Beteiligung der Öffentlichkeit, beispielsweise von Umweltschutzorganisationen. Die Tatsache, dass alle Rechtsthemen (z. B. Naturschutzrecht, Wasserrecht, Umweltrecht, Baurecht, Forstrecht etc.) in einem Verfahren zusammengefasst abgehandelt werden, ist vor allem bei komplexen Projekten eine wesentliche Verfahrenserleichterung für den Projektbetreiber und für die Bewilligungsbehörden.

Vertiefende Informationen zur UVP, unabhängig von Fachbereich und nationaler Gesetzgebung, sind z. B. bei Lawrence (2013) nachzulesen. Eine Übersicht über die Geschichte der UVP sowie eine vergleichende Darstellung US-amerikanischer und europäischer Ansätze gibt Runge (1998). Einen umfassenden und häufig aktualisierten Überblick über die rechtliche Situation in Deutschland geben Storm

Exkurs 12.1 Gesetzgebung zur Umweltverträglichkeitsprüfung

Basis für die nationalen Gesetze zur Umweltverträglichkeitsprüfung in Europa ist die Richtlinie 1985/337/EWG des Rates der Europäischen Union vom 27.06.1985 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten. Sie liegt in ihrer aktuellen Fassung seit dem 13. Dezember 2011 als Richtlinie 2011/92/EU (UVP-Richtlinie 2011) vor. Mit dieser Richtlinie wird die Genehmigung eines Projekts an eine Prüfung der Auswirkungen auf die Faktoren Mensch, Flora, Fauna, Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft, Sachgüter und kulturelles Erbe durch staatliche Behörden gebunden. Vorteil für den Projektbetreiber ist, dass alle rechtlichen Aspekte in einem komprimierten Verfahren behandelt werden. Als Nachteil werden der oft erhebliche Umfang und die lange Dauer von UVP-Verfahren kritisiert.

Welche Projekte einer UVP-Pflicht unterliegen, wird zum Teil bereits in der Richtlinie festgelegt, zum Teil von den Mitgliedsstaaten definiert. Es handelt sich zum Beispiel um potenziell riskante Industrieanlagen, etwa Raffinerien oder Chemiefabriken, um Kernkraftwerke, Verkehrsinfrastruktur, Abfallbehandlungsanlagen, Anlagen zur Rohstoffgewinnung etc. Ziel einer umfangreichen Überarbeitung der Richtlinie im Jahr 2003 war

eine verstärkte Öffentlichkeitsbeteiligung an UVP-Verfahren, um den Bürgern in Europa die Möglichkeit zu geben, in Fällen, in denen ihre Umwelt betroffen ist, in die Entscheidungsprozesse eingebunden zu werden.

Die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union, aber auch Nicht-EU-Mitglieder wie die Schweiz, haben diese Richtlinie in nationale Gesetze umgesetzt. In Deutschland ist dies das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG 1990, in der Fassung von 2010), in Österreich das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVP-G 2000). In der Schweiz wurde die Umweltverträglichkeit mit der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV 1988, in der Fassung von 2013) gesetzlich verankert. In den nationalstaatlichen Gesetzeswerken wird geregelt, welche Projekte im Detail von einer UVP-Pflicht betroffen sind (s. ■ Tab. 12.1). Bei der Entscheidung, ob UVP-Pflicht oder nicht, spielen häufig Schwellenwerte, wie Kapazitätsgrenzen oder die räumliche Ausdehnung eines Projekts, eine Rolle. Die Schwellenwerte und deren Auslegung werden häufig kontrovers diskutiert. Die Entscheidung über die UVP-Pflicht eines Projekts kann in manchen Fällen Gegenstand langer juristischer Auseinandersetzung sein, bevor

das eigentliche Prüfungsverfahren eingeleitet werden kann.

Im UVP-Gesetz ist u. a. geregelt, welche Informationen ein Antragsteller zur Prüfung vorzulegen hat (Umweltverträglichkeitsstudie oder Umweltverträglichkeitserklärung – UVE), welche Behörden mit dem Genehmigungsverfahren betraut werden, wer in welcher Form Parteienstellung im Verfahren hat, welche Veröffentlichungspflichten bestehen und welche Fristen im Verfahren einzuhalten sind.

Zur Unterstützung der Projektbetreiber werden von den nationalen UVP-Behörden Leitfäden zur Erstellung von UVE herausgegeben (z. B. in Österreich: Umweltbundesamt 2012 und in der Schweiz: Bundesamt für Umwelt 2009). In Deutschland hat die UVP-Gesellschaft e. V. verschiedenste auf bestimmte Projekte zugeschnittene Arbeitshilfen, Kommentare und Handbücher (z. B. Gassner et al. 2005; UVP-Gesellschaft 2006a und 2006b) verfügbar gemacht. International sind UVP-Schaffende in der International Association for Impact Assessment organisiert. Vertiefende Erläuterungen und Kommentare zur UVP-Gesetzgebung sind z. B. bei Kluth und Smeddinck (2013), Storm und Bunge (2011) oder Schwartmann (2006) nachlesbar.

und Bunge (2011). Die folgenden Darstellungen betrachten die UVP im deutschsprachigen Raum sowie die speziellen Anforderungen bezüglich geologischer Aspekte (siehe ► Exkurs 12.1).

12.3 Inhalte der Umweltverträglichkeitserklärung (UVE)

Die Umweltverträglichkeitserklärung (Umweltverträglichkeitsstudie) wird vom Projektbetreiber erstellt und umfasst alle Informationen über das

Projekt, die erforderlich sind, um eine Prüfung der Umweltverträglichkeit durch die Behörde zu ermöglichen. Dazu zählt eine Beschreibung des Vorhabens nach Standort, Art und Umfang des Projekts. Daneben müssen alternative Lösungsmöglichkeiten thematisiert und nachvollziehbar erläutert werden, warum genau die vorgelegte Variante zur Umsetzung gewählt wurde. Es muss klar werden, welche ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile die Variante hat und welche Auswirkungen eine Nichtumsetzung eines Projekts (Nullvariante) zur Folge hätte.

Wichtiger Inhalt der Erklärung ist die Darstellung der möglicherweise durch das Projekt beeinträchtigt-

■ **Tab. 12.1** Beispiele für UVP-pflichtige Projekte nach dem österreichischen UVP-G (2000), Anhang 1 (ähnliche Auflistungen finden sich auch in der deutschen und der schweizer Gesetzgebung)

Projekttyp	Beispiele, Schwellenwerte
Projekte der Abfallwirtschaft	Deponien, Behandlungsanlagen, Müllverbrennung
Energiewirtschaft	Thermische Kraftwerke, Kernkraftwerke, Windenergieanlagen ab 20 MW
Umgang mit radioaktiven Stoffen	Anreicherungsanlagen, Aufbereitungsanlagen, Endlager
Infrastrukturprojekte	Schnellstraßen mit mind. 10 km Länge, Eisenbahnfernverkehrsstrecken, Seilbahnen, Pipelines ab 40 km Länge, Flugplätze, Bahnhöfe, Häfen, Starkstromfreileitungen ab 15 km Länge und 220 kV, Beherbergungsbetriebe mit mind. 500 Betten oder einer Flächeninanspruchnahme von mind. 5 ha
Bergbauprojekte	Tagebau auf einer Fläche von mind. 10 ha, Förderanlagen für Erdöl mit einer Kapazität von 500 t d ⁻¹
Wasserwirtschaft	Wasserkraftanlagen ab 15 MW, Nutzung von Wasserressourcen von mehr als 100 Mio. m ³ a ⁻¹ , Anlagen in Kraftwerksketten ab 2 MW, Anlagen zur Bodenentwässerung mit einer Fläche von mind. 300 ha
Landwirtschaft	Betriebe ab 70 ha Nutzfläche, Betriebe ab 48.000 Legehennen, Betriebe ab 2500 Mastschweinen etc., Rodung auf einer Fläche von mind. 20 ha

ten Umwelt, die sogenannte Ist-Zustandsbeschreibung. Aufbauend auf dieser Darstellung werden dann mögliche Auswirkungen auf die Umwelt und Maßnahmen zur Vermeidung sowie erforderliche Beweissicherungsmaßnahmen dargelegt. Ist-Zustandsbeschreibung, Auswirkungsanalyse sowie Maßnahmen und Beweissicherungsvorschläge müssen dabei detailliert für alle möglicherweise betroffenen Umweltbereiche dargestellt werden. Das heißt, alle im ► [Exkurs 12.1](#) aufgeführten Faktoren müssen gesondert von den jeweiligen Fachexperten betrachtet werden. Es ist üblich, das Projekt in sinnvolle Fachbereiche zu unterteilen. Die Faktoren Boden und Wasser fallen teilweise in die Zuständigkeit der Geologie und werden daher meist in einem Fachbeitrag „Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren“ bearbeitet.

12.3.1 Der Fachbeitrag Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren in der UVE

Umweltgeologische Fragestellungen spielen bei vielen Projekten eine wichtige Rolle. Dabei sind sowohl Fragen der Auswirkung der geologischen Umwelt auf ein Projekt (Projektmissionen) als auch der

Folgen eines Projekts auf die geologische Umwelt (Projektmissionen) von Bedeutung. Häufig werden derartige Fragestellungen im Rahmen einer Projektplanung berücksichtigt, ohne tatsächlich als Umweltverträglichkeitsprüfung deklariert zu sein.

Um eine systematische Auswirkungsanalyse gewährleisten zu können, wird die Geologie bei der Prüfung der Umweltverträglichkeit intensiv eingebunden. Der Fachbeitrag soll alle geologisch und hydrogeologisch relevanten Aspekte eines UVP-pflichtigen Projekts so detailliert abhandeln, dass eine Beurteilung durch die Sachverständigen der Genehmigungsbehörde möglich ist.

Dazu ist zunächst der Untersuchungsraum, also jene räumliche Abgrenzung zu definieren, innerhalb welcher Auswirkungen erwartet werden oder zumindest nicht auszuschließen sind und für die relevante Aussagen getroffen werden müssen. Der Untersuchungsraum erstreckt sich in der Regel auf den eigentlichen Manipulationsbereich der Bauphase (Bauwerksstandorte, Baustellenflächen, Lagerflächen, Zufahrten etc.). Darüber hinaus muss definiert werden, ob über die Wirkungspfade Grundwasser oder Luft weitere Bereiche betroffen sein können, die demzufolge in den Untersuchungsraum zu integrieren sind. Sofern eine Grundwasser-

beeinflussung vorliegt, ist es häufig der Fall, dass sich diese über den eigentlichen Manipulationsraum hinaus erstreckt. Baumaßnahmen können sich unter Umständen auf die Stabilität (z. B. bei Bauwerken in Hangbereichen) in Gebieten auswirken, die in großer Distanz zu den eigentlichen Eingriffsbereichen liegen. Betroffene Gebiete, in denen infolge des Projekts Naturgefahren (Massenbewegungen wie Rutschungen, Steinschlag, Felssturz etc.) auftreten könnten, müssen dann ebenfalls in den Untersuchungsraum einbezogen werden. Anhand von zwei Beispielen beschreibt der ► [Exkurs 12.2](#) die Rolle der Geologie in der UVE.

Ist-Zustandsbeschreibung

Die Ist-Zustandsbeschreibung für den Fachbeitrag Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren umfasst meist die unten aufgelisteten Aspekte. Im Einzelfall können weitere projekt- oder standortspezifische Faktoren eine Rolle spielen. Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll einen allgemein gültigen Überblick über die zu betrachtenden Faktoren liefern.

- Geologie und geologische Naturgefahren:
 - Regionale geologische Einordnung
 - Tektonische Verhältnisse
 - Erdbebensituation
 - Geologische Naturgefahren
 - Standortbezogene geologische Detailbeurteilung (z. B. anhand von Detailkartierungen und Bohrungen)
 - Baugeologisch-geotechnische Aspekte (z. B. Standsicherheitsbetrachtungen von Böschungen)
 - Verdachtsflächen und Altlasten
 - Nutzungsrechte (z. B. Bergbaubewilligungen)
 - Bestehende Bebauung, die durch das Projekt beeinträchtigt werden könnte
- Hydrogeologie:
 - Regionale hydrogeologische Situation
 - Standortbezogene hydrogeologische Verhältnisse
 - Beschreibung der betroffenen Grundwasserkörper (Grundwasserfließrichtung und Gefälle, Flurabstände, Charakteristik und Abgrenzung des hydrogeologischen Einzugsgebiets)
 - Grundwasserqualität

- Wassernutzungen, Wasserschutz- und Schongebiete

Alle genannten Faktoren müssen nachvollziehbar ermittelt und bewertet werden. Neben der Erhebung von Daten gehört dazu meist auch ein umfangreiches Untersuchungsprogramm, das speziell auf die Fragestellungen des Projekts zugeschnitten ist. Es kann z. B. geologisch-geotechnische und hydrogeologische Kartierungen, Bohrungen, Messungen und Laboruntersuchungen umfassen.

Basierend auf den Ergebnissen aller Erhebungen und Untersuchungen wird der Ist-Zustand einer Sensibilitätsanalyse unterzogen, die das Ziel hat, die oben genannten Faktoren unabhängig vom Projekt dahingehend zu betrachten, ob sich durch sie besondere Gefährdungspotenziale ergeben könnten, auf die in der anschließenden Auswirkungsanalyse des Projekts besonders geachtet werden muss. ■ [Tab. 12.2](#) stellt beispielhaft eine derartige Sensibilitätsmatrix dar.

Auswirkungsanalyse

Die Beurteilung der möglichen Auswirkungen eines Projekts erfolgt üblicherweise getrennt nach Projektphasen. Vor allem werden die Bau- und die Betriebsphase eines Projekts unterschieden, da in diesen beiden Phasen ganz unterschiedliche Belastungen der Umwelt auftreten können. Zusätzlich werden die Nachsorgephase und mögliche Störfälle bei Bau- und Betrieb einer Anlage diskutiert.

In der Bauphase sind aus geologischer Sicht vor allem die Eingriffe in den Untergrund relevant. Es ist zum Beispiel zu klären, ob durch die Errichtung von Baustraßen oder Baustelleneinrichtungsflächen Erosionsflächen entstehen können, die in der Folge ein Potenzial für geologisch bedingte Naturgefahren bilden. Vor allem in Gebieten mit Hanglagen ist die Destabilisierung von Hängen durch Baumaßnahmen ein wichtiger Aspekt. Die Auswirkungen von erschütterungsreichen Baumaßnahmen (z. B. das Rammen von Spundwänden) auf benachbarte Gebäude müssen prognostiziert werden. Es ist darzustellen, ob Wasserhaltungsmaßnahmen für Baugruben erforderlich sind und wie sie sich auf den umliegenden Grundwasserkörper auswirken. Die Manipulation mit wassergefährdenden Baustoffen und die Ge-

■ Tab. 12.2 Beispiel für eine geologisch-hydrogeologische Sensibilitätsmatrix.

Teilgebiet	Kriterium/Sensibilität	Keine bis gering	Mittel	Hoch
Geologie und Naturgefahren	Geotechnische Eigenschaften des Untergrunds	Dichte Lagerung, halbfeste bis feste Konsistenz	Mitteldichte Lagerung, steife Konsistenz	Lockere Lagerung, weiche bis breiige Konsistenz
	Massenbewegungen	Keine Gefahr von Massenbewegungen	Massenbewegungen in Bauphase durch technische Maßnahmen beherrschbar	Großflächige Massenbewegungen, technisch schwer beherrschbar
	Erdbebenzone (nach EN 1998-1 2010)	Zone 0–2	Zone 3	Zone 4
	Verdachtsflächen, Altlasten, Deponien	Keine im erweiterten Untersuchungsraum	Innerhalb des erweiterten Untersuchungsraums	Innerhalb der Bau- oder Manipulationsbereiche
	Bergbaubewilligungen	Keine im erweiterten Untersuchungsraum	Innerhalb des erweiterten Untersuchungsraumes	Innerhalb der Bau- oder Manipulationsbereiche
Hydrogeologie	Grundwasserflurabstand	Flurabstand des obersten GW-Stockwerks > 20 m	Flurabstand des obersten GW-Stockwerks zwischen 10 und 20 m	Flurabstand < 10 m
	Deckschichten	Undurchlässige Deckschichten flächig vorhanden	Gering durchlässige Deckschichten in Bauwerksbereichen	Fehlen gering durchlässiger Deckschichten
	Wassernutzung	Keine Wassernutzungen im erweiterten Untersuchungsraum	Einzelwasserversorgung oder Nutzwasserversorgung innerhalb des erweiterten Untersuchungsraums	Kommunale Trinkwasserversorgungen innerhalb des erweiterten Untersuchungsraums
	Wasserqualität	Keine geogen oder anthropogen belasteten Wässer	Baustoffaggressive oder geogen bzw. anthropogen belastete Wässer im Rahmen der Grenzwerte zur Einleitung	Baustoffaggressive oder geogen bzw. anthropogen belastete Wässer Grenzwertüberschreitung zur Einleitung

fahr der Freisetzung von Mineralölkohlenwasserstoffen im Baustellenbereich sind zu thematisieren.

Bei der Beurteilung der Betriebsphase sind häufig andere Fragestellungen relevant. Zum Beispiel sind hier Auswirkungen der Bodenversiegelung durch das Projekt auf die Grundwasserneubildung oder auch Beeinträchtigungen der Hangstabilität durch dauerhafte Rodungen zu erörtern. Je nach

Art des Projekts ist auch für die Betriebsphase die Frage nach dem Umgang mit wassergefährdenden Stoffen zu behandeln. Daneben sind Auswirkungen der Geologie auf das Projekt relevant, wie z. B. die Gefahr von Massenbewegungen oder Erdbeben.

Ergänzend wird in vielen Projekten in der Auswirkungenanalyse auch die Nachsorgephase betrachtet. Dabei handelt es sich um die Aktivitäten im

Exkurs 12.2 Fallbeispiele zur Geologie im UVP-Verfahren

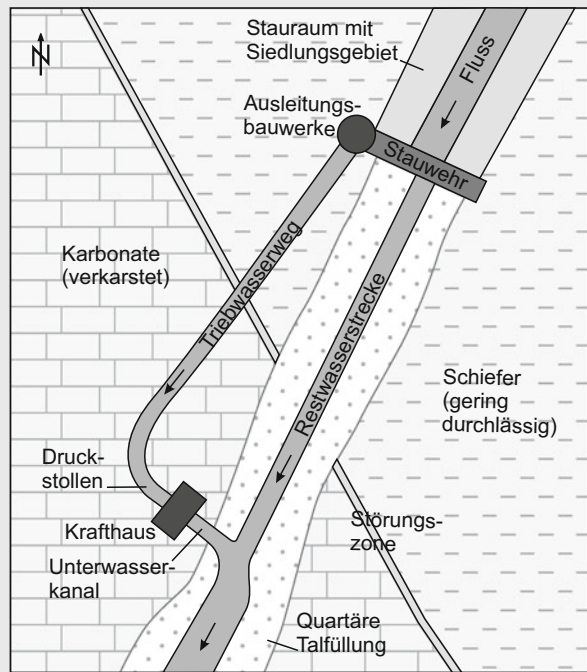
Fallbeispiel 1: Ausleitungskraftwerk in einem Gebirgsfluss

Situation: An einem wichtigen alpinen Vorfluter in Österreich soll ein Wasserkraftwerk zur energetischen Nutzung einer bisher ungenutzten Fließstrecke errichtet werden. Aufgrund der Ausbaukapazität besteht gemäß UVP-G (2000) für das geplante Kraftwerk UVP-Pflicht. Das Kraftwerk besteht aus einer

Wehranlage, gekoppelt mit einem Auslaufbauwerk, von dem aus ein Teil des Flusswassers über einen ca. 20 km langen Stollen (Triebwasserweg) talparallel mit geringem Gefälle flussabwärts transportiert werden soll. Am unteren Ende des Stollens soll das Wasser über einen

Druckstollen mit ca. 100 m Fallhöhe in ein Krafthaus geleitet werden. Dort erfolgt die energetische Transformation, bevor das Wasser über einen Unterwasserkanal wieder in das Flussbett zurückgeführt wird. In **Abb. 12.1** ist die Situation schematisch dargestellt.

Abb. 12.1 Schematische Darstellung der wesentlichen Anlagenteile des UVP-pflichtigen Kraftwerksprojekts



Nach der Durchführung eines umfangreichen Untersuchungsprogramms, bestehend aus geologisch-hydrogeologischen Kartierungen, Bohrungen und hydrogeologischen Messungen, haben sich aus umweltgeologischer Sicht folgende Aspekte herausgestellt, die die Umweltverträglichkeit des Projektes in Frage stellen könnten:

- Im Stauraum oberhalb der Wehranlage kommt es zu einem

Anstieg von Fluss- und Grundwasserspiegel, der sich einerseits auf die Hangstabilität, andererseits auch auf die bestehende Bebauung auswirken könnte.

- Der Stollen durchörtert mehrere hydrogeologisch unterschiedliche Lithologien. In verkarstungsfähigen Gebirgsbereichen ist mit großen Wasserzutritten, einer signifikanten Drainagewirkung im Gebirge

und der Beeinträchtigung von Quellen zu rechnen. Die nicht verkarstungsfähigen Stollenabschnitte werden von Schiefen und Phylliten gebildet. Hier sind nur geringe Beeinträchtigungen der Grundwassersituation im Berg zu erwarten. Die beiden Hauptlithologien sind durch eine Störungszone getrennt.

- Auf der Restwasserstrecke fließt zukünftig weniger Wasser. Dies

Exkurs 12.2 (Fortsetzung) Fallbeispiele zur Geologie im UVP-Verfahren

wirkt sich auch auf den Grundwasserbegleitstrom aus. Der Wasserspiegel im Tal sinkt nachhaltig um einige Dezimeter, was sich auf seichte Grundwassernutzungen auswirken kann.

- Die Hanganschnitte für das Stollenbauwerk liegen in steinschlaggefährdeten Bereichen.

Maßnahmenvorschläge im UVE-Fachbeitrag Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren:

- Abdichtung des Stauraums und Errichtung seitlicher Drainagekanäle, um einen Anstieg des Grundwasserspiegels zu verhindern.

- Es dürfen auf jedem Stollenkilometer nur wenige Liter Wasser pro Sekunde zufließen. Angefahrene wasserführende Klüfte oder Karsthohlräume müssen schnellstmöglich durch Injektionen verschlossen werden. Für Quellanutzungen, die dennoch beeinträchtigt werden könnten, muss vorab eine Ersatzmaßnahme geplant werden, um sicherzustellen, dass die Quellanutzer jederzeit mit Trinkwasser versorgt werden können.

- Die Grundwassersituation im Talboden wird durch ein dichtes Netz an Grundwassermessstellen beweisgesichert. Sollten

durch eine Grundwasserabsenkung entlang der Restwasserstrecke Nachteile für Brunnenbesitzer entstehen, muss der Projektbetreiber die Brunnen ertüchtigen bzw. neue gleichwertige Anlagen errichten.

- Im Bereich der Hanganschnitte zur Stollenerichtung werden Steinschlagschutzmaßnahmen ausgearbeitet.

Unter Einhaltung der Maßnahmenvorschläge kann das Projekt als umweltverträglich eingestuft werden.

Fallbeispiel 2: Errichtung einer Massenabfall- und Reststoffdeponie

Situation: In einem ausgedehnten Flusstal nahe einer mittelgroßen deutschen Stadt ist die Errichtung einer Deponie nach Deponieklasse II geplant. Sie soll eine Aufnahmekapazität von einer Million Kubikmetern haben und ist damit gemäß UVP-G (1990) UVP-pflichtig.

Aus der Ist-Zustandsanalyse, basierend auf erhobenen Daten und Erkundungsergebnissen, ergeben sich folgende umweltgeologisch relevante Aspekte:

- Der Deponiestandort liegt im Bereich einer ca. 100 m mächtigen fluviatilen Füllung eines ausgedehnten Talraumes. Bis zur Felslinie liegen ausschließlich Kiese und Sande vor. Beim unterlagernden Festgestein

handelt es sich um Kalke der Germanischen Trias.

- Es befinden sich unterstromig des geplanten Deponiestandorts einige kleinere Brunnen, die der Trinkwasserversorgung dienen.
- Der Grundwasserkörper kommuniziert mit dem Vorfluter. Dieser fließt zwar auf Höhe des Deponiestandorts frei ab, wird aber wenige Kilometer unterhalb des geplanten Projektgebiets an einem Laufkraftwerk aufgestaut.

Beurteilung der Bewilligungsfähigkeit aus Sicht der Fachexperten für Geologie und Hydrogeologie im UVP-Verfahren: Das gänzliche

Fehlen der geologischen Barriere mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von $k_f <= 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ kann nicht durch technische Maßnahmen kompensiert werden. Da das Multibarrierenkonzept (siehe ► Kap. 8) am geplanten Standort nicht umsetzbar ist, ist die Bewilligung der Anlage aufgrund der Vorschriften der DepV (2009) nicht möglich. Weitere Aspekte, wie eine mögliche qualitative Beeinträchtigung von Grundwassernutzungen oder auch des Oberflächengewässers, sind damit für die Beurteilung nicht mehr relevant. Das Projekt kann am vorgesehenen Standort nicht umweltverträglich umgesetzt werden. Maßnahmenvorschläge müssten eine Standortalternative vorsehen.

Zusammenhang mit der Einstellung des Betriebs und dem Rückbau der zu beurteilenden Anlagen. In der Regel werden Baumaßnahmen zum Abriss sowie die Entsorgung der Anlagen nach aktuellem Stand der Technik und Gesetzeslage bewertet. Da die meisten UVP-pflichtigen Projekte auf Laufzeiten von Jahrzehnten angelegt sind, ist eine derartige Betrachtung eher hypothetischer Natur, da die tatsächliche Vorgangsweise ja meist nicht bekannt ist. Die Beschreibung der Nachsorgephase ist jedoch

geeignet nachzuweisen, dass ein umweltverträglicher Rückbau der Projektbestandteile nach heutigem Stand der Technik und Gesetzgebung ohne umweltschädigende Wirkung möglich wäre.

Ebenfalls als eigene Projektphase werden sogenannte Störfälle in die Betrachtungen einbezogen. Dazu muss zunächst definiert werden, welche projektspezifischen Störfälle überhaupt denkbar sind. Störfälle sind z. B. ein Gebäudebrand und damit verbunden die Freisetzung von kontaminierten Lösch-

wässern oder anderen wassergefährdenden Stoffen. Auch die Beschädigung von Leitungssystemen, in denen wassergefährdende Stoffe transportiert werden, oder Ölfälle könnten als Störfälle behandelt werden. Naturkatastrophen, wie Erdbeben oder Massenbewegungen, die auf die Anlagen einwirken sowie deren Auswirkungen, können ebenfalls Teil einer Störfallbetrachtung sein. Ein umweltverträgliches Projekt muss hier mögliche „worst-case“-Szenarien betrachten und Lösungsvorschläge anbieten.

Maßnahmenvorschläge

Zur Planung eines umweltverträglichen Projekts müssen der Darstellung möglicher Auswirkungen in allen Projektphasen natürlich Lösungsvorschläge folgen, um die geschilderten Auswirkungen zu vermeiden oder zumindest auf ein umweltverträgliches Ausmaß zu reduzieren. Diese Maßnahmenvorschläge umfassen alle thematisierten Auswirkungen und fließen als Projektbestandteile in die Planung ein. Damit dokumentieren Auswirkungsanalyse und Maßnahmenvorschläge auch einen Entwicklungsprozess, der letztendlich zur Umweltverträglichkeit führen soll.

Beweissicherung

Zur Überprüfung der Einschätzungen im Rahmen der Auswirkungsanalyse sowie der Funktionsfähigkeit von Maßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen ist es häufig üblich, ein an Ist-Zustand und Auswirkungsanalyse angepasstes Beweissicherungsprogramm zu entwickeln. Dabei kann es sich zum Beispiel um die hydrogeologische Beweissicherung von Grundwassernutzungen, Quellen oder Oberflächengewässern handeln. Eine Beeinträchtigung der hydrogeologischen Faktoren kann quantitativ oder qualitativ erfolgen, so dass auch die Beweissicherung sowohl quantitative (Schüttungsmessungen, Abstichmessungen) als auch qualitative Aspekte (Hydrochemie, Bakteriologie, Isotopenanalysen) umfassen muss.

Die Beweissicherung von Gebäuden im Nahbereich von Baustellen erfolgt in Hinblick darauf, ob durch die Baumaßnahmen Schäden, z. B. durch Setzungen oder Erschütterungen, auftreten können. Setzungen sind häufig die Folge von Wasserhaltungsmaßnahmen oder der Destabilisierung des Untergrunds im Bereich von Baugruben oder

Hanganschnitten. Erschütterungen treten während des Baus durch den Maschineneinsatz auf und können die Bausubstanz direkt schädigen. Neben einer Bestandsaufnahme vor Baubeginn und nach Bauabschluss sind häufig auch kontinuierliche Erschütterungsmessungen Teil von Beweissicherungsmaßnahmen.

Innerhalb eines UVP-Verfahrens ist die UVE des Projektbetreibers das Kernstück auf dem Weg zur Bewilligung. Sie bildet die Beurteilungsgrundlage für die Sachverständigen der Bewilligungsbehörde. Der hier beispielhaft vorgestellte Fachbeitrag Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren ist dabei ein Teilgebiet eines Gesamtpaketes an Umweltbetrachtungen. Weitere Fachbereiche sind z. B. Wasserbau, Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Luft- und Klimabegutachtungen, Schall- und Verkehrsanalysen, Pflanzen, Tiere und deren Lebensräume, Raumplanung und nicht zuletzt natürlich die Humanmedizin. Jeder dieser Fachbereiche stellt eigene fachspezifische Überlegungen zum Projekt an und macht Maßnahmenvorschläge zur Optimierung der Planung. In jedem Fachgebiet erfolgt meist bereits während der Projektentwicklung eine Abstimmung mit den jeweiligen Sachverständigen der Bewilligungsbehörde, die damit ebenfalls in die umweltverträgliche Projektplanung eingebunden sind.

Projekte, die nach dem UVP-Gesetz zu bewilligen sind, sind interdisziplinär angelegt und oft sehr komplex. Die technischen Planer arbeiten eng mit den Fachexperten der einzelnen Umweltfaktoren zusammen und entwickeln in einem iterativen Prozess ein aus Sicht des Betreibers und der Umwelt optimiertes Projekt.

Geologie in der Umweltverträglichkeitsprüfung – Einiges, was man wissen sollte

- Die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen erfordert generell den umweltschonenden Umgang mit ihnen. Vor allem bei der Ressource „Fläche“ bezieht sich dieser umweltschonende Ansatz auch auf viele geologische und hydrogeologische Aspekte, da gerade mit der Nutzung von Flächen immer auch in das geologische Umfeld eingegriffen wird.

- Die Berücksichtigung von Umweltfragen bei der Umsetzung von Großprojekten wird europaweit durch die Richtlinie 2011/92/EU des Rates der Europäischen Union vom 13.12.2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten (UVP-Richtlinie 2011) und deren Umsetzung in nationalen Gesetzen sichergestellt.
- Die UVP-Pflicht eines Projekts richtet sich meist nach Schwellenwerten, etwa Kapazitätsgrenzen oder der räumlichen Ausdehnung einer Anlage. Die Schwellenwerte sind in der Richtlinie oder den nationalstaatlichen Gesetzen zur UVP definiert.
- Zur Prüfung der Umweltverträglichkeit wird der zuständigen UVP-Behörde eine Umweltverträglichkeitserklärung (UVE) des Projektbetreibers vorgelegt. Diese beinhaltet neben der Beschreibung des Vorhabens auch die Betrachtung der möglicherweise vom Projekt beeinträchtigten Umwelt. Aus Sicht verschiedener Fachbereiche werden Ist-Zustandsbeschreibung, Auswirkungsanalyse und Maßnahmenvorschläge zur Erreichung der Umweltverträglichkeit erarbeitet. Diese fließen in die Projektplanung ein.
- Im Fachbereich Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren werden sowohl Auswirkungen des Projekts auf die geologischen Verhältnisse (Projektmissionen) als auch Auswirkungen der Geologie auf das Projekt (Projektmissionen) betrachtet.
- Die Ist-Zustandsbeschreibung muss alle fachspezifischen Aspekte erfassen und hat eine zunächst projektunabhängige Sensibilitätsbewertung des Standorts zum Ziel. Sie ist die Grundlage für eine Auswirkungsanalyse und darauf aufbauende Maßnahmenvorschläge zur Vermeidung von Auswirkungen durch das Projekt.
- Die Bewertung der Umweltverträglichkeit muss sich auf alle Projektphasen (Bauphase, Betriebsphase, Nachsorgephase und Störfälle) beziehen. Das Projekt muss dementsprechend auch in allen Projektphasen umweltverträglich sein.

- Die UVP-Gesetzgebung ermöglicht es Fachexperten aus verschiedensten Disziplinen, an der umweltverträglichen Gestaltung von Großprojekten mitzuwirken.

? Testfragen zum Kapitel Geologie in der Umweltverträglichkeitsprüfung

1. Was versteht man unter dem Begriff Flächenressource? Erläutern Sie das Spannungsfeld Flächennutzung und Umwelt. Warum ist die Nutzung von Flächen immer auch mit geologischen Fragen verknüpft?
2. Erläutern Sie den Grundgedanken hinter der gesetzlichen Verankerung der Umweltverträglichkeitsprüfung.
3. Welche Teilbereiche werden bei der Umweltverträglichkeitsprüfung generell betrachtet? Wie erfolgt die praktische Umsetzung im UVP-Verfahren?
4. Was ist der Unterschied zwischen UVE und UVP?
5. Welche fachlichen Aspekte werden bei der Ist-Zustandsbeschreibung im Fachbeitrag Geologie, Hydrogeologie und Naturgefahren einer Umweltverträglichkeitserklärung zum Beispiel behandelt?
6. Beschreiben Sie, gern auch anhand eines Beispiels, wie die Ergebnisse einer Auswirkungsanalyse in die Planung eines UVP-pflichtigen Projekts einfließen.
7. Was versteht man unter Beweissicherung im geologisch-hydrogeologischen Sinne?
8. In welche Phasen wird ein Projekt unterteilt, um dessen unterschiedliche mögliche Umweltauswirkungen beurteilen zu können?
9. Warum ist die Deponie, wie sie im [Exkurs 12.2](#) im Fallbeispiel 2 beschrieben wurde, aus geologischer Sicht nicht bewilligungsfähig? Welche Maßnahme würde eine Bewilligung nach UVP-Gesetzgebung möglich machen?

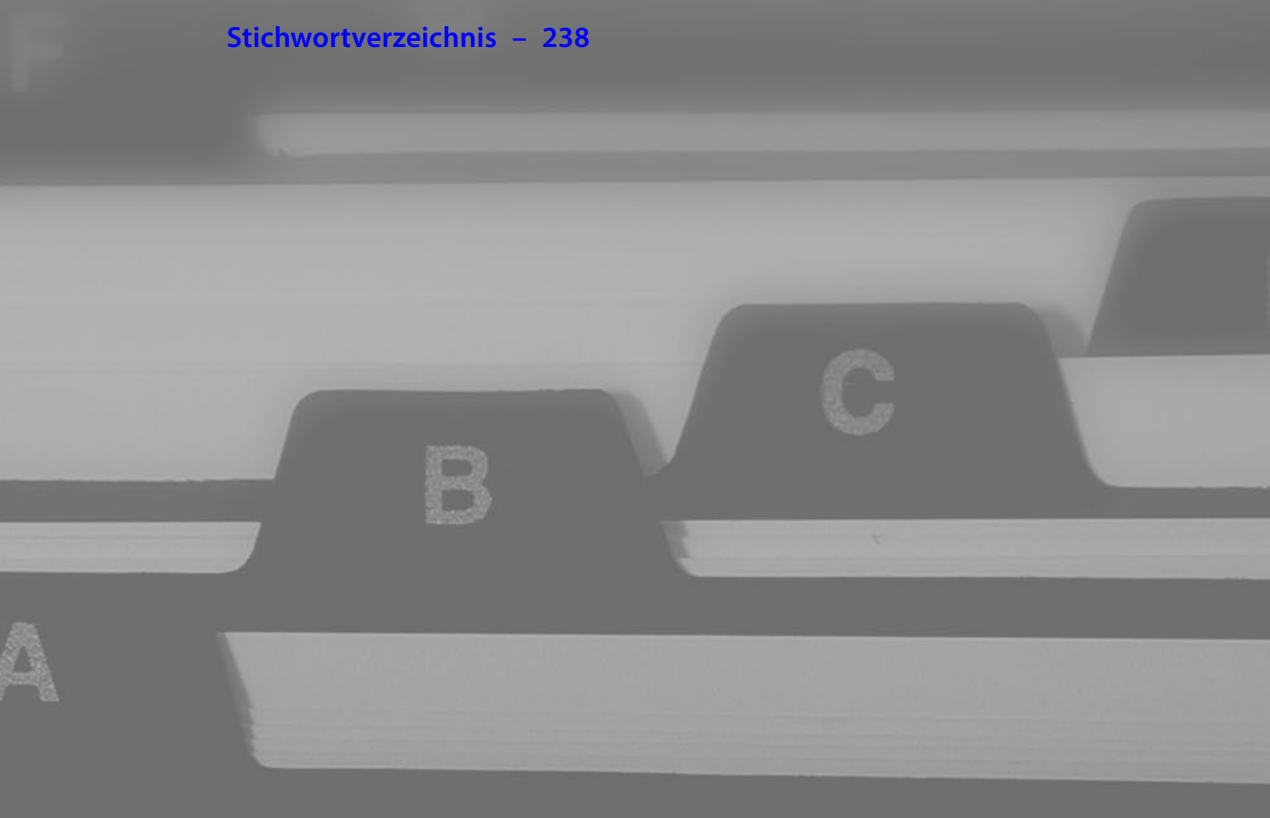
Literatur

- Bundesamt für Umwelt (2009) UVP-Handbuch, Richtlinie des Bundes für die Umweltverträglichkeitsprüfung. Schweizer Eidgenossenschaft, Bern
- DepV (2009) Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung). Bundesrepublik Deutschland
- EN 1998-1 (2010) Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, Deutsche Fassung EN 1998-1 + AC:2009. Europäische Norm
- Gassner E, Winkelbrand A, Bernotat D (2005) UVP – Rechtliche und fachliche Anleitung für die Umweltverträglichkeitsprüfung. C. F. Müller Verlag, Heidelberg
- Kluth W, Smeddinck U (Hrsg) (2013) Umweltrecht – ein Lehrbuch. Springer Spektrum, Heidelberg
- Lawrence DP (2013) Impact assessment, 2. Aufl. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey
- Runge K (1998) Die Umweltverträglichkeitsuntersuchung – Internationale Entwicklungstendenzen und Planungsstrategien. Springer, Heidelberg
- Schwartmann R (2006) Umweltrecht. C. F. Müller Verlag, Heidelberg
- Storm P-C, Bunge T (Hrsg) (2011) Handbuch der Umweltverträglichkeitsprüfung. Erich Schmidt, Berlin
- Umweltbundesamt (2012) UVE-Leitfaden – Eine Information zur Umweltverträglichkeitserklärung, REP-0396. Bundesministerium für Umwelt, Wien
- UVP-Gesellschaft e. V. (Hrsg) (2006a) Umweltverträglichkeitsprüfung für die interessierte Öffentlichkeit. UVP-Gesellschaft e.V., Hamm/Westfalen
- UVP-Gesellschaft e. V. (Hrsg) (2006b) AG Qualitätsmanagement – Leitlinien für eine gute UVP-Qualität. UVP-Gesellschaft e.V., Hamm/Westfalen
- UVP-Richtlinie (2011) Richtlinie 2011/92/EU des Rates der Europäischen Union vom 13.12.2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten. Europäische Union, Brüssel
- UVPG (1990) Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung, i. d. Fassung von 2010. Bundesrepublik Deutschland
- UVP-G (2000) Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz, BGBl. Nr. 697/1993. Republik Österreich
- UVPV (1988) Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung i. d. Fassung von 2013, gestützt auf Umweltschutzgesetz (USG 1983). Schweizerischer Bundesrat

Service teil

Glossar – 228

Stichwortverzeichnis – 238



Glossar

Abfall Material, das nach Gebrauch nutzlos geworden ist und dessen sich sein Besitzer entledigen will oder muss. *Siedlungsabfall* entsteht in Haushalten, wird von der öffentlichen Hand gesammelt und entsprechend den gesetzlichen Vorgaben verwertet oder entsorgt. *Industrieabfall* oder auch *medizinische Abfälle* können gefährlich sein und müssen daher zum Schutz der Umwelt einer gesonderten Behandlung unterzogen werden.

Absorption Aufnahme eines Ions oder Moleküls (► Sorbat) in das Kristallgitter eines Feststoffes (► Sorbens).

Abstich Höhendifferenz zwischen Messpunkt und Wasseroberfläche. Bei der Messung der Grundwasseroberfläche kann aus der Höhendifferenz zwischen Messpunkt und Geländeoberfläche der ► Grundwasserflurabstand, d. h. die Tiefe der Grundwasseroberfläche unter der Geländeoberfläche bestimmt werden.

Acid Mine Drainage Saure Minenwässer oder AMD gehören ebenfalls zu den Grund-, Sicker- oder Oberflächenwässern, die durch hydrogeochemische Prozesse im Einflussbereich von Bergbauanlagen beeinflusst werden. Vor allem durch die Oxidation von Sulfiden in den Gruben bzw. auf Bergbauhalden entstehen unter Mitwirkung von Mikroorganismen sulfatreiche, sehr saure Wässer. Der Prozess geht mit Ausfällungen von Metalloxiden einher. AMD werden unter bestimmten Umständen auch in natürlichen Regimen beobachtet.

Adsorption Reversible Anlagerung von Gasen oder gelösten Stoffen (► Sorbate) an der Oberfläche von Feststoffen (► Sorbens).

Adsorptionswasser Wasser, das an geladenen Kornoberflächen angelagert ist und daher nicht an der Wasserbewegung im Boden teilnimmt. Es wird gemeinsam mit dem ► Porenwasser auch als ► Haftwasser bezeichnet.

Advektion Stofftransport in strömenden Fluiden (Flüssigkeiten oder Gasen). Die Bewegung wird ausschließlich vom Transportmedium bewirkt und ergibt sich aufgrund eines Potenzialgefälles.

Aerosol Gemisch aus festen oder flüssigen Schwebstoffen und einem Gas, z. B. der atmosphärischen Luft. Die Schwebstoffe werden als Aerosolpartikel bezeichnet.

Akkumulation Ansammlung von Stoffen in abgrenzbaren Umweltbereichen. Bezogen auf geologische Prozesse können das z. B. Sedimentablagerungen in Stillwasserzonen sein. *Bioakkumulation* bezeichnet die Ansammlung von Substanzen in lebenden Organismen. Die A. von Schadstoffen kann beispielsweise durch die ► Adsorption an Kornoberflächen erfolgen.

Aktivkohle Hochporöse Substanz, die zu mehr als 90 % aus Kohlenstoff besteht und eine innerer Oberfläche von bis zu $2.000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ aufweist. Sie wird z. B. aus Steinkohle, Braunkohle oder Torf hergestellt. Aufgrund der großen Oberfläche (3 bis 4 g ergeben die Fläche eines Fußballfeldes), die vor allem durch die Mikroporen gebildet wird, können große Stoffmengen adsorbiert werden. A. wird z. B. in der Altlastenpraxis zur Reinigung kontaminierter Wässer oder Gase verwendet.

Altablagerung Fläche, auf der in früheren Zeiten Abfälle legal oder illegal abgelagert wurden.

Altlast Grundstück, von dem bekannt ist, dass auf ihm in früheren Zeiten Abfälle abgelagert (► Altablagerung) wurden oder mit umweltgefährdeten Stoffen manipuliert wurde (► Altstandort) und von dem eine Gefährdung der Umwelt ausgeht, die im Rahmen von Erkundungsmaßnahmen nachgewiesen wurde.

Altlastenverdachtsfläche Grundstück, von dem bekannt ist, dass auf ihm in früheren Zeiten Abfälle abgelagert (► Altablagerung) wurden oder mit umweltgefährdeten Stoffen manipuliert wurde (► Altstandort) und von dem möglicherweise eine Gefährdung der Umwelt ausgehen könnte.

Altstandort Fläche, auf der in früheren Zeiten mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen wurde. Es besteht die Vermutung, dass diese Stoffe an die Umwelt freigesetzt wurden und aktuell eine Gefährdung für Schutzgüter darstellen können.

AMD ► Acid Mine Drainage

Ammonifikation Reduktion von elementarem Stickstoff zu Ammoniak oder Ammonium im Zuge von Stoffwechselprozessen von Mikroorganismen; biotische ► Stickstofffixierung.

Anthroposphäre Vom Menschen geprägtes Umweltsystem. Lebensraum, in dem technische Prozesse, aber auch künstlich beeinflusste biologische Prozesse, prägend sind. Die A. kann auch als ein Teilbereich der ► Biosphäre betrachtet werden.

Atmosphäre Gasförmige Hülle der Erde, die als eines der grundlegenden globalen Systeme betrachtet wird.

bergmännischer Abbau Abbau von Rohstoffen in Stollensystemen unter Tage, im Gegensatz zum ► Tagebau, der den Abbau einer Lagerstätte an der Erdoberfläche beschreibt.

Beweissicherung Im umweltgeologischen Sinne dient die Beweissicherung der Schaffung einer Datengrundlage, um Auswirkungen einer Maßnahme auf die Umwelt nachvollziehen zu können. Dazu wird die Situation vor, während und nach der Maßnahme durch angepasste Messungen doku-

Glossar

mentiert. Es kann sich z. B. um hydrogeologische Messungen, aber auch um die Dokumentation von Gebäudesubstanz handeln.

Biosphäre Bereich des globalen Systems, in dem Leben in jeglicher Form vorkommt. Die B. erstreckt sich über alle anderen Umweltsysteme, da ► Atmosphäre, ► Hydrosphäre, ► Pedosphäre sowie zumindest die oberen Bereiche der ► Lithosphäre von Organismen besiedelt sind.

Bodenaushubdeponie Ablagerungsplatz für Material, das durch Ausheben oder Abräumen von natürlich gewachsenem Boden oder Untergrund anfällt. Der Anteil an bodenfremdem Material darf nicht mehr als 5 Vol.-% betragen.

Bodenhorizont Bereich im Boden mit nahezu gleichen Eigenschaften, wie Korngrößenverteilung, organischer Anteil, Farbe, Mineralbestand. Eine schematische Unterteilung in Haupthorizonte (O, A, B, C) richtet sich vor allem nach der Verteilung zwischen mineralischen und organischen Anteilen und dem Grad der Verwitterung des Ausgangsgesteins.

Bodenluft Die in den nicht mit Wasser gefüllten Hohlräumen des Untergrundes zirkulierende Gasphase. B. weicht in ihrer Zusammensetzung von der atmosphärischen Luft ab, da Prozesse des ► Edaphons einwirken.

Bodenwasser Die in den nicht mit Luft gefüllten Hohlräumen des Untergrundes zirkulierenden Wasser der ► ungesättigten Zone. Neben den vertikal durchströmenden Sickerwässern zählt dazu auch das ► Adsorptionswasser.

Cyanidlaugung Methode zur Gewinnung von Edelmetallen aus ► Seifenlagerstätten. Es werden zunächst Cyanid-Metallkomplexe gebildet, um das Edelmetall vom Sediment zu trennen. Die Methode wird bei der industriellen Gold- und Silbergewinnung eingesetzt.

Dampfdruck Druck, der sich im thermodynamischen Gleichgewichtszustand im geschlossenen System über einer Flüssigkeit einstellt. Die Anzahl der aus der Flüssigkeit verdunstenden Moleküle ist gleich groß wie die aus dem Dampf kondensierenden.

Darcy Französischer Wasserbauer, der 1856 den Zusammenhang zwischen Durchflussmenge und den Filtereigenschaften eines porösen Mediums formulierte, nach dem bis heute die Eigenschaften von Grundwasserleitern quantifiziert werden. Darcy-Gesetz: $Q = k_f \cdot A \cdot (h \text{ l}^{-1})$ – die Durchflussmenge Q durch eine Fläche A ist abhängig vom Fließgefälle $(h \text{ l}^{-1})$ und dem materialabhängigen Durchlässigkeitsbeiwert k_f .

Denitrifikation Reduktion von Nitrat zu elementarem Stickstoff. Die D. ist ein Teil des Stickstoffkreislaufs und erfolgt in sauerstofffreien Milieus beim oxidativen Abbau von organischem Kohlenstoff.

Deponiegas Gase, die durch mikrobiellen Abbau organischer Substanz unter Sauerstoffabschluss in Deponien entstehen. D. besteht vor allem aus Methan und Kohlendioxid. In diesem Milieu können sich aber auch relevante Mengen an Schwefelwasserstoff bilden.

Desorption Ablösung von Atomen oder Molekülen, die als ► Sorbate an Oberflächen angelagert waren. Die D. ist der gegenläufige Prozess zur ► Ad- oder ► Absorption.

Diffusion Bewegung von Molekülen aufgrund von Konzentrationsunterschieden innerhalb eines Transportmediums. Im Unterschied zur ► Advektion muss keine strömende Bewegung des Transportmediums selbst stattfinden.

direct push-Technologie Methode zur Untersuchung und räumlichen Abgrenzung von Grundwasserkontaminationen, bei der mittels Rammsondierung tiefenorientierte Wasserproben entnommen werden. Die rasche Analyse mit mobilen Geräten direkt im Feld ermöglicht eine gezielte Auswahl weiterer Probenahmestellen.

Dispersion Räumliche und zeitliche Konzentrationsunterschiede einer Substanz innerhalb des Transportmediums. Im Grundwassersystem ergibt sich die D. aufgrund unterschiedlicher Bahngeschwindigkeiten der einzelnen Wassermoleküle und der mit dem Wasser transportierten Stoffe.

DNAPL Abkürzung für „dense non aqueous phase liquids“, bezeichnet flüssige Kohlenwasserstoffphasen, die nicht in Wasser löslich sind und – da sie eine höher Dichte als Wasser aufweisen – im Wasserkörper absinken.

Edaphon Gesamtheit der im Boden lebenden Organismen. Dazu zählen gleichermaßen pflanzliche und tierische Organismen, aber auch Pilze. Die Bandbreite reicht von Mikroorganismen bis zu Säugetieren.

Effluenz Austritt von Grundwasser aus dem Grundwasserleiter in den ► Vorfluter (auch effluenter Abfluss). E. steht im Gegensatz zur ► Influenz.

Eluat Gemisch aus Lösungsmittel und einer aus einer anderen Phase gelösten Substanz. Der Lösungsprozess wird als *Elution* bezeichnet. In der Altlastenpraxis stellt das E. aus Wasser und den darin aus einem Boden herausgelösten Schadstoffen den mobilen Anteil einer Schadstoffkonzentration im Untergrund dar.

Emissionsbetrachtung Unter Emission wird die Freisetzung von negativen Faktoren (z. B. Schadstoffe, Lärm, Licht) an die Umwelt bezeichnet. Die E. im umweltgeologischen Sinne dient dazu, mögliche Auswirkungen anthropogener Aktivitäten auf die geologische Umwelt zu bewerten. Im Gegensatz dazu steht die ► Immissionsbetrachtung.

Endlager Der Begriff bezeichnet einen Ort zur Entsorgung von gefährlichen Abfällen. Vom E. aus darf keinerlei Austausch von Stoffen oder Energie mit der Umwelt möglich sein. Die Isolierung muss solange gewährleistet sein, bis die Gefahr, die von dem Abfall ausgeht, zur Gänze abgebaut ist. Das E. steht damit im Gegensatz zur ► Reaktordeponie.

Erz Mineral oder Mineralgemenge mit metallhaltigen Anteilen. Vor einer Nutzung dieser Rohstoffe muss eine Rohstoffaufbereitung in Form einer Trennung des Metalls vom Gestein erfolgen.

ETI-Konzept Konzept aus dem Bereich der Altlastenpraxis zur Bewertung und Sanierungsplanung von Schadensfällen. Dabei werden ► Emissions-, ► Transmissions- und ► Immissionsbetrachtungen der Schadstoffausbreitung angestellt und die Gefährdungsabschätzung sowie die nachfolgende Sanierung auf diese drei Faktoren abgestimmt.

Eutrophierung Anreicherung von Nährstoffen in einem Ökosystem.

Evaporit Chemisches Sedimentgestein, das sich bei der verdunstungsbedingten Übersättigung des Wassers aus den darin gelösten Mineralphasen bildet. Typische Evaporite sind Steinsalz und Gips.

Ex-situ-Verfahren Bedeutet „außerhalb“ und wird in der Umweltgeologie verwendet, um Sanierungsmaßnahmen zu beschreiben, bei denen das kontaminierte Material vom Ort des Schadens entfernt und erst nach der Entnahme behandelt wird. Es steht im Gegensatz zu ► In-situ-Verfahren.

FCKW Fluorchlorkohlenwasserstoffe sind Kohlenwasserstoffe, bei denen Wasserstoffatome teilweise oder komplett durch die Halogene Chlor und Fluor ersetzt wurden. Sie kommen in der Natur so gut wie nicht vor, werden aber seit den 1930er Jahren technisch hergestellt. Seit ihre Freisetzung an die Atmosphäre als Ursache für das ► Ozonloch erkannt wurde, kam es zum weltweiten Verbot dieser Substanzen.

Feldkapazität Maximale Wassermenge, die ein Boden nach seiner Sättigung durch infiltrierende Niederschläge halten kann, die also nicht schwerkraftbedingt versickert. Sie ist vor allem für landwirtschaftliche Fragen von Interesse, da dieses im Boden zurückgehaltene Wasser den Pflanzen zur Verfügung steht.

Flurabstand ► Grundwasserflurabstand

fracking ► hydraulische Rissbildung

Gashydrat Als Feststoff vorliegende Einschlussverbindungen von Gasen und Wasser. Bei den vom Hydrat eingeschlossenen Gasen kann es sich um Methan, größere Kohlenwasserstoffmoleküle oder Kohlendioxid handeln. Methanhydrat ist z. B. in

Permafrostböden gebunden und ist als nicht-konventionelles Erdgas ein potenzieller Energieträger.

Geoakkumulations-Index Index zur Bewertung von Stoffanreicherungen in einem Kompartiment im Vergleich zum natürlichen Hintergrundwert des Stoffes. Basierend auf den durchschnittlichen Gehalten von Schwermetallen in Tonsteinen wird damit z. B. die anthropogen oder geogen bedingte Schwermetallbelastung von Flusssedimenten bewertet.

gesättigte Zone Bereich im Boden, Locker- oder Festgestein, dessen Hohlräume vollständig mit Wasser gefüllt sind und der unterhalb der ► Grundwasseroberfläche liegen.

Geschiebe Lockergesteinsmaterial, das auf der Sohle in einem Fließgewässer transportiert wird.

Gley Von Grundwasser beeinflusster Bodentyp in Gebieten mit sehr geringem ► Grundwasserflurabstand; bildet eigene Bodenklasse mit drei weiteren Gleytypen. Nahe verwandt sind die Marschböden. Wasserbeeinflusste Böden, die nicht vom Grundwasser, sondern von temporärem Stauwasser geprägt sind, werden als *Pseudogleye* bezeichnet.

Great Pacific garbage patch Derzeit größte bekannte Ansammlung von Plastikmüll in Form feinsten Partikel (► Mikroplastik), die sich im Nordpazifik befindet und eine Größe aufweist, die annähernd der Fläche Europas entspricht. Derartige Akkumulationen von Mikroplastik sind aber auch aus dem Südpazifik, dem Atlantik und dem Indischen Ozean bekannt.

Grundluft ► Bodenluft

Grundwasserflurabstand Höhendifferenz zwischen einem Punkt auf der Geländeoberfläche und dem darunter liegenden Punkt der Grundwasseroberfläche.

Grundwassergleichenplan Darstellung der Potenziallinien einer Grundwasserdruckfläche. Ihr Verlauf lässt sich in einem homogenen Grundwasserleiter anhand von mindestens drei Messpunkten mit unterschiedlichem Potenzial bestimmen (► hydrologisches Dreieck).

Grundwasserneubildung Zugang von Wasser zum Grundwasser durch Infiltration von Niederschlägen, Versickerung oder Versinkung von Oberflächengewässern oder künstliche Versickerungsmaßnahmen.

Grundwasseroberfläche Obere Begrenzungsfläche des von Grundwasser erfüllten Untergrunds.

Guano Exkrememente von Vögeln, die auf Kalken oder kalkreichen Böden ein feinkörniges Gemenge verschiedener Phosphate (Calciumphosphat, Calciumhydrogenphosphat, Apatit) und Nitrate bilden. Es wird seit dem 19. Jahrhundert als Dünger verwendet. Auch heute noch bilden konzentrierte Guanoablagerungen Phosphatlagerstätten.

Gyttja An Organismen reicher Schlamm Boden, der sich unter ständiger Wasserüberdeckung (subhydrisch) am Boden nähr- und sauerstoffreicher Gewässer bildet.

Haftwasser Summe aus ► Adsorptionswasser und ► Porenwinkelwasser, die gegen das gravitative Absinken von Sickerwasser im Korngerüst der ungesättigten Bodenzone gehalten werden.

Hubbert-Modell Nach dem amerikanischen Erdölgeologen und Geophysiker Marion King Hubbert benanntes Modell zur Abschätzung der Reichweite einzelner Erdöllagerstätten wie des gesamten Erdöls. Hubbert ging davon aus, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt, dem Höhepunkt der Förderung, die jährliche Ölförderate zurückgehen wird, auch wenn noch Reserven vorhanden sind. Er begründete dies mit dem abnehmenden Grad der Entölungsfähigkeit und der Verteuerung der immer schwieriger zu erschließenden Reserven. Hubbert prognostiziert im Jahr 1974 das Erreichen der maximalen Ölförderate (► Peak Oil) für das Jahr 1995. Seine damaligen Abschätzungen berücksichtigten naturgemäß nicht in vollem Umfang die heutigen Möglichkeiten der nicht konventionellen Erdölgewinnung.

hydraulic fracturing ► hydraulische Rissbildung

hydraulische Rissbildung (hydraulic fracturing). Maßnahme zur künstlichen Verbesserung der Durchlässigkeiten gering permeabler Gesteinsformationen durch Hochdruckinjektion von Wasser, das in vielen Fällen mit Stützmitteln und Chemikalien versetzt ist. Die Technologie ist auch als „hydraulic fracturing“ oder „Fracking“ bekannt.

hydrologisches Dreieck Methode zur Ermittlung der Raumlage der Grundwasserdruckfläche durch lineare Interpolation der Höhen zwischen drei in einem Dreieck zueinander angeordneten Grundwassermessstellen.

Hydrolyse Spaltung einer chemischen Verbindung (z. B. Mineral) durch die Reaktion mit Wasser.

Hydrosphäre Gesamtheit des Wassers, das auf der Erde zirkuliert. Die Hydrosphäre ist eines der grundlegenden globalen Systeme und erstreckt sich räumlich auf die Systeme ► Atmosphäre, ► Pedosphäre, ► Lithosphäre. ► Biosphärenprozesse stehen in starker Abhängigkeit von der Hydrosphäre.

Immissionsbetrachtung Immission bezeichnet den Eintrag von Störfaktoren in ein Umweltsystem. Die Immissionsbetrachtung im umweltgeologischen Sinne stellt mögliche Auswirkungen, die die vorherrschenden geologischen Verhältnisse auf den Menschen haben können, in den Fokus. Sie steht damit im Gegensatz zur ► Emissionsbetrachtung.

Industriemineral Mineralische Rohstoffe, die ohne weitere Bearbeitung für industrielle Zwecke herangezogen werden

können. Eine Aufbereitung oder Separation, wie für ► Erze, ist nicht erforderlich.

Influenz Versickerung von Wasser aus einem Oberflächen-gewässer in einen Grundwasserkörper (influente Abflussverhältnisse). I. steht im Gegensatz zur meistens vorliegenden ► Effluenz.

In-situ-Verfahren Bedeutet „am Ort“ und wird in der Umweltgeologie verwendet, um Sanierungsverfahren zu beschreiben, bei denen das kontaminierte Material nicht aus dem Schadensherd entnommen, sondern an Ort und Stelle so behandelt wird, dass keine Umweltgefährdung mehr davon ausgeht. Es steht im Gegensatz zu ► Ex-situ-Verfahren.

Kerogen Organisches Ausgangsmaterial, aus dem durch Druck- und Temperatureinfluss in der Erdkruste fossile Brennstoffe gebildet werden.

Kohlebrand Brand in einem Kohleflöz oder in kohlehaltigen Abrauhalden im Kohlebergbau. Er kann durch Selbstentzündung beim exothermen Vorgang der Oxidation von Kohlenstoff entstehen, wenn Luft in ein Flöz eindringt oder die Abrauhalden durchströmt.

Kolmation Verringerung der Durchlässigkeit eines Gewässerbettes durch Ablagerung feiner Sedimente, die den durchflusswirksamen Porenraum füllen. Durch K. wird die Kommunikation zwischen Oberflächengewässer und begleitendem Grundwasserstrom eingeschränkt. K. kann bis zur völligen Abdichtung des Gewässerbettes und damit zur Abkopplung des Oberflächengewässers vom Grundwasserleiter führen.

Konvektion Bewegung fluider Phasen, die von Potenzialdifferenzen angetrieben wird. Dabei können Druck-, Temperatur- und Dichteunterschiede oder gravitative Differenzen ausschlaggebend sein. Die K. beschreibt die Bewegung des Transportmediums selbst.

Lagerstätte Natürliche Anreicherung von Rohstoffen in erschließbaren Bereichen der Erdkruste. Die Anreicherung muss in einer wirtschaftlich abbauwürdigen Konzentration vorliegen und zudem ein ausreichendes Volumen aufweisen.

Laufkraftwerk Wasserkraftwerk zur Erzeugung elektrischer Energie aus dem kinetischen Potenzial des fließenden Wassers. Zufluss und Abfluss zum Kraftwerk sind im Regelbetrieb gleich groß. Durch ein Stauwerk wird im Fließgewässer eine Fallhöhe von einigen Metern erzeugt, um die Energie, die sich aus dem Fließgefälle ergibt, punktuell gewinnen zu können. L. liefern Grundlaststrom, d. h. permanent in gleicher Höhe.

LCKW Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe sind kettenförmige aliphatische Kohlenwasserstoffe, in denen Wasserstoffatome gegen Chloratome ersetzt sind. Aufgrund ihres hohen ► Dampfdrucks gehen sie leicht in die Gasphase über.

Sie treten als Spurenparameter in der Bodenluft von KW-kontaminierten Altstandorten auf.

Lithosphäre Äußerste Schicht der Erde, die aus Erdkruste und dem oberen Teil des Erdmantels gebildet wird. In der Umweltgeologie spielen vor allem die oberflächennahen Anteile der L. eine wichtige Rolle, da hier Wechselwirkungen mit der ► Anthroposphäre stattfinden.

LNAPL Abkürzung für „light non aqueous phase liquids“, bezeichnet flüssige Kohlenwasserstoffphasen, die nicht in Wasser löslich sind und, da sie eine geringere Dichte als Wasser aufweisen, auf der Wasseroberfläche aufschwimmen.

Lysimeter Anlage zur Bestimmung von hydrologischen Kenngrößen wie Verdunstung und ► Grundwasserneubildung über Versickerungsraten. Sie dienen auch zur ► In-situ-Gewinnung von ► Bodenwasser aus der ► ungesättigten Zone.

Massenrohstoffe Mineralische Lagerstätten, aus denen Material in großen Mengen entnommen wird. Sie kommen überall auf der Erde großräumig vor, so dass eine Anreicherung, wie bei ► Industriemineralen oder ► Erzen, für ihre Wirtschaftlichkeit nicht erforderlich ist. Es handelt sich um Lockergesteine wie Kies, Sand, Silt und Ton, die in Gruben abgebaut werden oder um Festgesteine, die als Bausteine in Steinbrüchen gewonnen werden.

Mikroplastik Kleinste Kunststoffpartikel im Mikro- bis Nanometerbereich, die durch mechanischen Abrieb und chemische Zersetzung von Kunststoffprodukten entstehen. Sie sind auch Inhaltsstoffe von Kosmetikprodukten. Sie werden entweder als Feststoffe in Form von Abfällen oder über Abwässer in die Umwelt freigesetzt.

Mineralölkohlenwasserstoffe In dieser Gruppe werden organische Kohlenwasserstoffverbindungen zusammengefasst, die in der Petrochemie eine Rolle spielen. Sie entstehen bei der Raffination von Rohöl.

Multibarrierenkonzept System voneinander unabhängiger Maßnahmen zum Schutz vor Schadstofffreisetzungen im Bereich der Deponietechnik. Neben verschiedenen Schichten, die ein unkontrolliertes Austreten fluiden Phasen aus einem Deponiekörper verhindern sollen, gehören dazu auch Maßnahmen wie die Vorsortierung der Abfälle, die Deponie-Eingangskontrolle und die Deponie-Nachsorge nach deren Schließung.

Multilevel-Messstelle Grundwassermessstelle zur Gewinnung von Proben aus verschiedenen Stockwerken eines Grundwasserkörpers. Meist werden dazu nebeneinander mehrere Bohrungen in verschiedene Tiefen abgeteuft und jeweils nur einer der betreffenden Abschnitte mit einem Messstellenausbau erschlossen.

Muttergestein Ausgangsgestein, in dem Kohlenwasserstoffe gebildet werden, bevor sie aufgrund von Dichteunterschie-

den in das *Speichergestein* migrieren, in welchem sie zu einer Lagerstätte angereichert werden können.

Nachsorgephase Zeitraum nach der Stilllegung einer Produktionsstätte oder einer Deponie, indem von Anlagenteilen noch eine Umweltgefährdung ausgehen kann. Um Emissionen aus einer stillgelegten Anlage zu vermeiden, müssen für einen vorab definierten oder flexiblen Zeitraum Beobachtungen und Untersuchungen im Umfeld durchgeführt werden. Die Funktionsfähigkeit von Schutzmaßnahmen muss überwacht werden.

NAPL Abkürzung für „non-aqueous phase liquids“, bezeichnet flüssige organische Kohlenwasserstoffe, die nicht in Wasser löslich sind. Man unterscheidet nach ihrer Dichte zwischen ► LNAPL und ► DNAPL.

Nassbaggerung Abbau von ► Massenrohstoffen wie Kies und Sand in Tiefenbereichen, die unterhalb der Grundwasseroberfläche liegen. Es wird dadurch ein großflächiger Grundwasseraufschluss geschaffen, was zu Einflüssen auf Grundwasserfließverhältnisse und Wasserqualität führen kann.

Natural Attenuation Natürliche „Alterung“ einer Untergrundkontamination durch biochemische Prozesse. In der Altlastenpraxis wird N. A. als eine mögliche Variante zur Sanierung von Schadensfällen angesehen, sofern die Abschätzung des Gefährdungspotenzials es zulässt. Häufig werden Maßnahmen gesetzt, um die natürlichen Alterungsprozesse zu beschleunigen. Man spricht dann von „enhanced natural attenuation“.

Nitrifikation Schrittweise Oxidation von Ammonium zu Nitrit und schließlich zu Nitrat. N. ist ein Teil des Stickstoffkreislaufs und erfolgt unter Sauerstoffeinfluss.

Nullvariante Bezeichnung aus der Planung von Altlastensanierungen. Im Rahmen von Variantenstudien zur Bestimmung der besten Sanierungsmaßnahme wird auch der Fall betrachtet, dass keinerlei Sicherungs- oder Dekontaminierungsmaßnahmen gesetzt werden. Die N. wird anderen Sanierungsvarianten hinsichtlich Zielerreichung und Aufwand gegenübergestellt.

OECD Organisation for Economic Co-operation and Development – Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, der 34 Länder aus Europa, Nord- und Südamerika, Ozeanien und Japan angehören.

Off-site-Sanierung Beschreibt im Bereich der Altlastensanierung die Entnahme und den Abtransport kontaminierten Materials, um es andernorts zu behandeln bzw. gesetzeskonform zu deponieren.

On-site-Sanierung Beschreibt im Bereich der Altlastensanierung die Entnahme kontaminierten Materials und dessen Behandlung mit mobilen Anlagen an Ort und Stelle. Das vom Schadstoff befreite, feste oder flüssige Material wird am Entnahmeort wieder in den Untergrund eingebracht.

organoleptisch Mit den menschlichen Sinnen wahrnehmbare Eigenschaften einer Substanz. Dazu zählen Farbe, Trübung, Geruch, Geschmack. Der o. Befund einer Probe kann wertvolle Hinweise zur Interpretation von Feststoff-, Wasser- oder Bodenluftanalysen bieten.

Ozonloch Starke Ausdünnung der Ozonschicht in der Stratosphäre. Die Ausdünnung ist vor allem über der Antarktis besonders ausgeprägt. Das Ozonloch wird seit den 1980er Jahren beobachtet. Für den Ozonabbau sind vor allem freie Chlor- und Fluor-Radikale verantwortlich, die aus anthropogen freigesetzten ► FCKW stammen. Seit Jahren in Rückbildung.

Partialdruck Druck einer Komponente in einem Gasgemisch. Bezeichnet den Gesamtdruck, den die Komponente bei alleinigem Ausfüllen des Volumens ausüben würde.

Peak Oil Maximale Ölförderrate, die auf der Basis der bereits abgebauten Erdölmengen und der immer schwerer zu erschließenden Reserven zu erwarten ist. Die Bestimmung des Wertes beruht auf dem ► Hubbert-Modell. Ähnliche Überlegungen zur Reichweite können auch für andere nicht erneuerbare Rohstoffe angestellt werden.

Pedologie Synonym für Bodenkunde, beschäftigt sich mit der Entstehung, Entwicklung, den Inhalten, den Eigenschaften und der Klassifizierung von Böden.

Pedosphäre Der von Böden im Sinne der ► Pedologie eingenommene oberste Bereich der Erdkruste, der aus mineralischem, mehr oder weniger verwittertem Gestein und organischer Substanz gebildet wird und in Wechselwirkung mit ► Lithosphäre, ► Hydrosphäre und ► Atmosphäre steht. Als Lebensraum steht die P. auch für die ► Biosphäre zur Verfügung. Sie ist der natürliche Standort der terrestrischen Pflanzendecke.

Permeabilität Materialspezifischer Parameter zur Beschreibung der Durchlässigkeit von Hohlraumssystemen.

Persistenz Widerstandsfähigkeit eines Stoffes gegen seinen Abbau aufgrund von biologischen oder chemischen Prozessen. Persistente Stoffe verbleiben lange unverändert in den Umweltsystemen, in die sie freigesetzt wurden.

Pestizid Sammelbegriff für Schädlingsbekämpfungsmittel wie z. B. Herbizide (zur Unkrautvernichtung), Insektizide (zur Insektenvernichtung) oder Fungizide (zur Pilzvernichtung).

pH-Wert Negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenaktivität (vereinfacht auch H^+ -Ionen-Konzentration) einer Lösung. Liegen in der Lösung $10^{-7} \text{ mol l}^{-1} H^+$ -Ionen vor, so beträgt der pH-Wert 7, die Lösung ist neutral. Steigt aufgrund chemischer Prozesse die H^+ -Ionen-Konzentration der Lösung auf $10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$, so sinkt der pH-Wert auf 3, die Lösung ist sauer.

Piper-Diagramm Doppeldiagramm zur Darstellung von Wasseranalysen. In zwei Dreiecksdiagrammen wird die prozentuale Verteilung der wichtigsten Kationen und Anionen dargestellt. Die beiden Diagramme werden in einem *Rautendiagramm* kombiniert. Die Verteilung der Hauptparameter ermöglicht eine Zuordnung von Grundwässern zu bestimmten Wassertypen. Diese lassen wiederum Rückschlüsse auf die Lithologie der beteiligten Aquifere zu.

Podsol Bezeichnung eines Bodentyps der feuchtkalten bis feuchtgemäßigten Klimate. Es handelt sich um saure, nährstoffarme Böden, die sich aus quarzreichen Ausgangsgesteinen bilden und einen mächtigen Rohhumus tragen.

Porenwinkelwasser Wasser, das in den Berührungswinkeln von Bodenpartikeln eines porösen Gesteins festgehalten wird. Es bildet gemeinsam mit dem ► Adsorptionswasser das ► Haftwasser.

Primärenergie Bezeichnet die in ihrer natürlichen Form gespeicherte Energie, die zur Nutzung in ► Sekundärenergie umgewandelt werden muss. So ist in fossilen Brennstoffen oder im fließenden Wasser Primärenergie gebunden. Erst durch Verbrennung bzw. den Betrieb einer Turbine wird sie in Wärmeenergie oder Elektrizität umgewandelt und kann dann genutzt werden.

pump-and-treat Begriff aus dem Bereich der Altlastensanierung. Zur Reinigung kontaminierter Grundwässer werden diese über Brunnen aus dem Grundwasserleiter entnommen, in einer an den jeweiligen Schadstoff angepassten Anlage gereinigt und anschließend wieder in den Aquifer zurückgeführt.

Pyritverwitterung Oxidation des Eisensulfidminerals Pyrit unter Mitwirkung von Mikroorganismen. Die Pyritverwitterung steht stellvertretend für Prozesse der Verwitterung von Metallsulfiden unter Sauerstoffeinfluss, die im Kohle- und Erzbergbau zum Problem der Versauerung von Grund- und Oberflächenwässern führen können (► Acid Mine Drainage).

Pyrolyse Thermochemische Spaltung organischer Verbindungen, wobei im Unterschied zur Verbrennung ausschließlich die Temperatur reaktionsbestimmend ist. Es kommt nicht zu Oxidationsreaktionen. Das Verfahren wird z. B. genutzt, um bei Temperaturen bis 500 °C Öl aus Ölschiefern zu gewinnen.

Quellschutzgebiet Ein Bereich, in dem zum Schutz des Trinkwassers vor Verunreinigungen wassergefährdende Aktivitäten verboten sind. Die Abgrenzung erfolgt aufgrund hydrogeologischer Erkundungen und ist gesetzlich über das Wasserhaushaltsgesetz (Deutschland) bzw. das Wasserrechtsgesetz (Österreich) geregelt.

Quelltuff (Kalksinter). Kalzitauafällungen im Bereich von Quellaustritten aus karbonathaltigen Aquiferen. Infolge der Entgasung von Kohlendioxid aus dem Quellwasser kommt es

zu einer Übersättigung des Wassers an gelöstem Kalzium und Hydrogenkarbonat. Kalziumkarbonat (Kalzit) fällt dadurch aus und bildet Kalklagen unterhalb des Austrittsbereichs. Da diese Lagen oft die Pflanzendecke überziehen, bildet sich eine poröse Struktur aus.

Ranker Bodentyp aus der Bodenklasse der Rohböden. Es handelt sich um einen schwach entwickelten flachgründigen Boden, der sich aus saurem Ausgangsgestein wie Sandstein oder Granit entwickelt.

Reaktordeponie Anlage zur Lagerung von Abfällen, in der Reaktionen, vor allem der Abbau organischer Substanz, stattfinden. Da diese Reaktionen mit Phasenumwandlungen fest-flüssig-gasförmig und mit Temperatur- und Druckveränderungen verbunden sind, findet meist auch ein Austausch mit der Umgebung statt. In einer geordneten Deponie nach heutigem Stand der Technik muss dieser Austausch kontrolliert erfolgen. Austretende Substanzen müssen gesammelt und vor einer Freisetzung in die Umwelt behandelt werden. Die R. ist ein Gegenstück zum ► Endlager.

Rendzina Bodentyp aus der Bodenklasse der Rohböden. Es handelt sich um einen schwach entwickelten flachgründigen Boden, der sich aus karbonat- oder gipsreichem Ausgangsgestein entwickelt.

Reserve Begriff aus der Rohstoffwirtschaft, der die Menge eines Rohstoffs bezeichnet, die aufgrund von Konzentration und Volumen der Anreicherungen mit der verfügbaren Technologie und bei der aktuellen Marktlage wirtschaftlich abbaubar ist. Die R. stellen damit einen Teil der ► Ressourcen dar.

Ressource Begriff aus der Rohstoffwirtschaft, der die Menge aller bekannten und vermuteten Vorkommen eines Rohstoffes beschreibt. Dabei wird die aktuelle Abbauwürdigkeit einzelner Lagerstätten nicht berücksichtigt.

Restsee Vertiefung in der Erdoberfläche als Folge des Abbaus mineralischer Rohstoffe, die im ► Tagebau gewonnen wurden. Sofern dafür eine Wasserhaltung erforderlich war, wird die Geländevertiefung nach Ende des Abbaus mit Grundwasser geflutet. Im entstehenden See können hydrochemische Prozesse zur Verunreinigung von Grund- und Oberflächengewässern führen (► Acid Mine Drainage).

Ringraum Bereich zwischen Bohrlochwand und Bohrstange bzw. dem nach Fertigstellung der Bohrung eingebrachten Brunnenrohr einer Grundwassermessstelle oder eines Brunnens. Der R. muss gegen Zustrom von Sickerwässern von der Oberfläche abgedichtet werden. In Bereichen, in denen Grundwasser dem Brunnen zuströmt, muss er mit Filtermaterial passender Körnung ausgestattet sein, um eine ideale Zuströmung zu gewährleisten und gleichzeitig den Eintrag von Feinmaterial in den Brunnen zu verhindern.

Rohstoff Sammelbegriff für unverarbeitete Stoffe, die in der Natur vorkommen und nach ihrer Gewinnung entweder direkt verbraucht oder als Ausgangsmaterial in Produktionsprozessen oder bei der Energiegewinnung verwendet werden können.

Salinität Gesamtgehalt eines Wassers an gelösten Ionen, auch als Mineralisation des Wassers bezeichnet. Die Angabe erfolgt in mg kg^{-1} bzw. mg l^{-1} . Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung dieses Summenparameters ist die ► spezifische elektrische Leitfähigkeit, die proportional zur S. ist.

Sanierungsziel Begriff aus der Altlastenpraxis, der definiert, was mit einer Sanierungsmaßnahme erreicht werden soll. Das S. berücksichtigt aktuelle oder geplante Nutzungen einer Altlastenfläche und ihres Einflussbereichs, gesetzliche Grenzwerte für Schadstoffbelastungen, aber auch bestehende Hintergrundbelastungen, die nicht der Altlast zuzuschreiben sind. Das S. bildet die Grundlage für die Sanierungsplanung und kann mit zunehmendem Erkundungs- und Planungsstand immer weiter präzisiert werden.

Sapropel (Faulschlamm). S. entsteht am Grund nährstoffreicher stehender Gewässer durch den Abbau organischer Substanz unter Sauerstoffabschluss. In der Pedologie wird S. der Bodenklasse der Unterwasserböden zugeordnet. S. bildet bei ausreichender Überlagerung das Ausgangsmaterial fossiler Brennstoffe.

Sättigungskonzentration Maximale Menge einer Substanz, die in einem Lösungsmittel gelöst werden kann. Die Löslichkeit von Mineralphasen beeinflusst die hydrochemische Beschaffenheit von Grund- und Oberflächenwässern und ist für geologisch bedeutende Lösungs- und Fällungsprozesse verantwortlich, beispielsweise für Verkarstung oder Tropfsteinbildung.

saure Minenwässer ► Acid Mine Drainage

Säurestimulation Maßnahme zur Verbesserung der Durchlässigkeit eines Grundwasserleiters, aus dem Wasser über Brunnen entnommen werden soll. Die Säure, die in eine Bohrung injiziert wird, dient dazu, durch Minerallösung vorhandene Wasserwegsamkeiten aufzuweiten oder zusätzliche zu schaffen. S. wird vor allem im Bereich der Geothermie in tiefliegenden Aquiferen angewendet.

Schadstoff Substanz, die auf das System, ein Kompartiment, einen Organismus, schädigend einwirkt. Dies kann entweder aufgrund der Substanzeigenschaften oder aufgrund der Stoffmengenkonzentration der Fall sein.

Schadstoffmobilität Eigenschaft von ► Schadstoffen, sich innerhalb eines Umweltkompartiments oder über Systemgrenzen hinweg auszubreiten. Schadstoffe, die an einem Ort fixiert sind, weisen ein geringeres Gefährdungspotenzial auf, als solche, die sehr mobil sind und sich daher rasch und

unkontrolliert ausbreiten können. Ziel einer ► Sicherung in der Altlastenpraxis ist die Einschränkung der Mobilität von Schadstoffen.

Schiefergas Erdgasvorkommen, die in ihrem gering durchlässigen schieferigen Muttergestein gebunden sind und nur durch spezielle technische Maßnahmen zur Schaffung künstlicher Durchlässigkeiten, der ► hydraulischen Rissbildung, gewonnen werden können.

Schieferöl Erdölvorkommen, die in ihrem gering durchlässigen schieferigen Muttergestein gebunden sind und nur durch spezielle technische Maßnahmen zur Schaffung künstlicher Durchlässigkeiten, der ► hydraulischen Rissbildung, gewonnen werden können.

Schlitzwand Wand aus Dichtungsmaterial, die vertikal in den Untergrund eingebaut wird, um Baugruben zu sichern und den Grundwasserstrom zu unterbrechen. Der Bodenschlitz, der mit einem Schlitzwandbagger erstellt wird, wird zunächst mit einer Stützsuspension verfüllt, die anschließend von der Dichtmasse verdrängt wird. Im Altlastenbereich werden Sch. errichtet, um die Mobilität von Schadstoffen zu unterbinden (► Sicherung).

Schutzgut Bezeichnung für einen Umweltbereich, der vor negativen Auswirkungen durch die Freisetzung schädlicher Einflüsse geschützt werden soll. Als Sch. gelten z. B. die menschliche Gesundheit, Tiere, Pflanzen, Boden und Oberflächen- und Grundwässer.

Schwermetalle Metalle mit einer Dichte von über 5 g cm^{-3} .

Sekundärenergie Durch Umwandlung von ► Primärenergie natürlicher Energieträger verfügbar gemachte Energieform. Beispielsweise die Elektrizität, die aus der Primärenergie des fließenden Wassers in Wasserkraftwerken gewonnen wird.

Seifenlagerstätte Sekundäre abbauwürdige Anreicherung von Mineral- oder Metallpartikeln in Lockersedimenten, wie alluvialen Kies-, Sand-, Silt- oder Tonablagerungen.

Sensibilitätsanalyse Bewertung der Empfindlichkeit von Umweltsystemen, um mögliche negative Auswirkungen durch anthropogene Aktivitäten abschätzen zu können. Die systematische S. wird bei der ► Umweltverträglichkeitsprüfung angewendet.

Sicherung Maßnahme aus dem Bereich der Altlastensanierung, bei der der Schadstoff an Ort und Stelle verbleibt, mögliche Emissionswege jedoch unterbrochen werden. Die Einschränkung der ► Schadstoffmobilität führt zum Abbau des Gefährdungspotenzials.

Siedlungsabfall ► Abfall

Sorbens Feststoff, an dessen Oberfläche (► Adsorption) oder in dessen Molekülgitter (► Absorption) Ionen oder Moleküle (► Sorbate) an- bzw. eingelagert werden.

Sorbat Ionen oder Moleküle, die an Oberflächen von Feststoffen (► Sorbens) angelagert werden oder in die Gitterstruktur des Feststoffes eingebaut werden.

Sorption Sammelbezeichnung für den chemischen Prozess der Bindung von Stoffen an Grenzflächen (► Adsorption) oder in Kristallgittern (► Absorption).

Speicherkraftwerk Wasserkraftwerk, dem ein Speicherraum vorgelagert ist, aus welchem bedarfsorientiert Wasser über eine Turbine geleitet und dessen kinetische Energie in elektrischen Strom umgewandelt wird. Speicherkraftwerke arbeiten häufig mit großen Fallhöhen von einigen zehner bis hunderte Meter und werden zur Deckung des Spitzenbedarfs eingesetzt.

spezifische elektrische Leitfähigkeit Fähigkeit eines Stoffes, elektrischen Strom zu leiten. Sie ist ein wichtiger Summenparameter der Wasseranalyse, da sie in direktem Verhältnis zur Gesamtmineralisation des Wassers steht. Als temperaturabhängige Größe wird die s. e. L. des Wassers für eine Temperatur von 25°C angegeben. Die Angabe erfolgt in der Einheit Siemens pro Zentimeter (S cm^{-1}). Natürliche Wässer weisen s. e. L. von wenigen $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Regenwasser) bis einige tausend $\mu\text{S cm}^{-1}$ auf.

spezifischer Durchfluss (Filtergeschwindigkeit). Er gibt den Volumenstrom pro Filterfläche nach ► Darcy an und quantifiziert die Durchlässigkeit eines porösen Mediums für eine Flüssigkeit mit definierten Eigenschaften (k_f -Wert, Durchlässigkeitsbeiwert) unter Berücksichtigung des herrschenden Fließgefälles. Der s. D. wird zur Charakterisierung von Grundwasserleitern herangezogen und in der Einheit m s^{-1} angegeben.

Stauhorizont Bodenschicht mit sehr geringer Durchlässigkeit für Wasser. Es kann sich dabei entweder um Lockergesteine handeln, die aufgrund eines hohen Anteils der Schluff- und Tonfraktion gering durchlässig sind oder um Festgesteine, die keinen effektiven Porenraum oder offene Trennflächen aufweisen. Ein S. stellt die untere Begrenzung eines Grundwasserkörpers dar. Befindet sich die stauende Schicht an der Oberfläche, verhindert sie die Infiltration von Niederschlägen und schränkt dadurch die ► Grundwasserneubildung ein.

Stickstofffixierung Umwandlung elementaren Stickstoffs durch Mikroorganismen (biotisch), durch Verbrennung oder Blitzschlag (abiotisch) oder technisch im sogenannten Haber-Bosch-Verfahren.

Störfall Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs einer Anlage. Im Sinne der Umweltverträglichkeit von Anlagen werden mögliche S. auf ihre Auswirkungen auf die Umwelt untersucht.

Straßenrandböden Böden, die durch die Einflüsse aus dem Verkehr und der Straßenerhaltung geprägt sind. Charakteristisch für S. ist beispielsweise ein hoher Natriumgehalt im Substrat, während die Bodenlösung hohe Chloridgehalte aufweist. Beide Parameter stammen aus der Straßensalzung der Winterdienste. Weitere Parameter wie Schwermetalle werden durch Verbrennungsmotoren, Katalysatoren (Platin) und Reifenabrieb (Cadmium) freigesetzt und im Straßenrandbereich adsorptiv im Boden gebunden.

Stripp-Verfahren Verfahren zur Abtrennung von Stoffen aus einer flüssigen Phase durch Desorption. Die kontaminierte Flüssigkeit wird durch Düsen fein verteilt. Durch die Verrieselung geht der im Wasser gebundene Schadstoff in die Gasphase über und kann dann an ein ► Sorbens (z. B. ► Aktivkohle) angelagert werden. Im Bereich der Altlastensanierung werden S. zur Reinigung kontaminierter Grundwässer eingesetzt.

Systemabgrenzung Abgrenzung eines Untersuchungsbereichs (räumlich, zeitlich, inhaltlich) zur Lösung einer Fragestellung. Die Abgrenzung muss so erfolgen, dass alle relevanten Einflüsse, die mit der Fragestellung im Zusammenhang stehen, berücksichtigt werden. Nicht relevante Faktoren müssen erkannt und von der Betrachtung ausgeschlossen werden, um eine effiziente Bearbeitung zu ermöglichen.

Tagebau Abbau von Rohstoffen an der Erdoberfläche. Es werden dazu Erhebungen im Gelände abgetragen oder es wird von einer ebenen Geländeoberfläche aus in die Tiefe gegraben. T. steht im Gegensatz zum ► bergmännischen Abbau, bei dem Stollen in das Gebirge getrieben werden.

Temperaturspreizung Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur bei Wärmepumpenanlagen. Die T. ist aus umweltgeologischer Sicht relevant zur Beurteilung von Auswirkungen, die eine Grundwasserwärmepumpen-Anlage auf benachbarte Nutzungen oder die Beschaffenheit des Grundwasserkörpers haben kann.

Tight Gas, Tight Oil Erdgas- bzw. Erdölvorkommen in gering permeablen Speichergesteinen, die nur durch spezielle technische Maßnahmen (► hydraulische Rissbildung) zur Verbesserung der Durchlässigkeit erschlossen werden können. T. G. bzw. T. O. wird zu den nicht konventionellen fossilen Brennstoffen gezählt.

Transmissionsbetrachtung Transport und Übertragung von Stoffen zwischen verschiedenen Umweltkompartimenten. Die T. in der Altlastenpraxis umfasst das Transportmedium (z. B. Grundwasser oder Bodenluft), den ► Wirkungspfad und mögliche Transportbarrieren.

Treibhausgas Sammelbegriff für spezielle Gase, die in der Atmosphäre vorkommen und einen Teil der von der Erdoberfläche reflektierten Sonnenenergie absorbieren. Die gespeicherte Energie geben sie als Wärmestrahlung an die Erde

zurück. T. kommen natürlich in der Atmosphäre vor, werden aber zusätzlich durch anthropogene Aktivitäten freigesetzt. Die bedeutendsten Treibhausgase sind Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid (N₂O), halogenierte Kohlenwasserstoffe (CKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆).

ubiquitär Im umweltgeologischen Bezug werden damit Stoffe bezeichnet, die auf der ganzen Erde allgegenwärtig vorkommen, unabhängig davon, wo sie entstehen und freigesetzt werden.

Uferfiltratbrunnen Grundwasserbrunnen im Einflussbereich eines nahen Oberflächengewässers. Durch die mit dem Pumpbetrieb verbundene Absenkung der Grundwasseroberfläche stellt sich ein Fließgefälle vom Oberflächengewässer zum flussnahen Grundwasserkörper ein (► Infiltration). Der Zufluss aus dem Oberflächengewässer erhöht die Ergiebigkeit des Brunnens. Die kurze Grundwasserfließstrecke dient als Filter und trennt Schwebstoffe des Oberflächengewässers vor der Entnahme im Brunnen ab.

Ultimate recoverable resource (URR) Maximal förderbare Menge eines nicht erneuerbaren Rohstoffes. Aufgrund des steigenden Aufwands, der zur Gewinnung eines Rohstoffs mit fortschreitender Förderung betrieben werden muss, lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von Förderrate und Gesamtfördermenge herstellen und daraus jener Zeitpunkt ableiten, zu dem die Förderung gänzlich eingestellt werden wird. Der Ansatz basiert auf dem ► Hubbert-Modell.

Umweltverträglichkeit Maß für mögliche Auswirkungen anthropogener Aktivitäten auf die gesamte Umwelt, die in ► Schutzgüter untergliedert werden kann. Nur wenn negative Auswirkungen ausgeschlossen werden können, kann einem Projekt die U. bescheinigt werden. Für definierte Projekte ist die umfassende Prüfung der U. zwingend vorgeschrieben. Basis für nationale Gesetze bildet die UVP-Richtlinie der Europäischen Union.

ungesättigte Zone Bereich im Locker- oder Festgestein, dessen Hohlräume nicht vollständig mit Wasser gefüllt sind sondern die stattdessen von einer Gasphase, der ► Bodenluft erfüllt werden. Aufgrund des Dichteunterschieds zwischen Wasser und Luft liegt die u. Z. immer oberhalb der ► gesättigten Zone.

Ungleichförmigkeit Der Begriff bezeichnet die Breite des Korngrößenspektrums in einem Lockergestein und damit seine Sortierung. Ein ungleichförmiges, also schlecht sortiertes Lockergestein, z. B. eine Grundmoräne, weist ein breit gestreutes Korngrößenspektrum von Ton bis Kies auf. Die Korngrößenverteilung ist ein wichtiger Parameter zur Bestimmung hydrogeologischer Eigenschaften.

Untertagedeponie Stollenanlage, in der gefährliche Abfälle gelagert werden. Es kann sich um speziell zu Deponiezwecken angelegte Stollensysteme handeln oder um aufgelassene

Bergbauanlagen. Die Stollen werden mit Abfällen verfüllt, die aufgrund ihres Gefährdungspotenzials nicht für eine Ablagerung an der Oberfläche geeignet sind.

Variantenstudie Vergleichende Betrachtung von Kosten, Umsetzbarkeit und Nutzen verschiedener möglicher Maßnahmen, um ein Ziel zu erreichen. Im Bereich der Altlastenpraxis werden V. durchgeführt, um diejenige Sanierungsvariante herauszufiltern, die aus Sicht der Kosten, möglicherweise auftretender Belastungen oder Einschränkungen und in Hinblick auf die Erreichung des Sanierungszieles die beste Lösung darstellt.

Verweilzeit Begriff aus der Hydrogeologie, der den Zeitraum zwischen der Versickerung von Niederschlägen und dem freien Wiederaustritt des Wassers an einer Quelle bzw. der Entnahme an einem Brunnen bezeichnet. Sehr kurze V. von wenigen Stunden werden mitunter in Karstgrundwasserleitern beobachtet. Der Aufenthalt von Wasser im Gebirge kann aber auch Jahre bis Jahrzehnte dauern. Tiefengrundwässer, die in der Hydro-Geothermie gefördert werden, können mehrere tausend Jahre alt sein. Die V. spielt vor allem im Trinkwasserschutz eine wichtige Rolle.

Volatilität Bezeichnung für das Ausmaß von Schwankungen in Zeitreihen. In der Rohstoffwirtschaft spielen Schwankungen in der Preisentwicklung und der Förderrate eine wichtige Rolle bei der Bewertung von ► Reserven, ► Ressourcen oder der Abschätzung des Zeitraumes, für den der Rohstoff noch zur Verfügung steht (► URR).

Vorfluter Oberirdisches Gewässer, in das Grundwasser, dem Fließgefälle folgend, abfließen kann.

Wasserhaushaltsbilanz Gegenüberstellung von Zufluss- und Abflusskomponenten in einem Einzugsgebiet und einem definierten Zeitraum. Die Niederschlagsmenge wird dabei mit den hydrologischen Kenngrößen Verdunstung und ober- und unterirdischen Abfluss verglichen und daraus Rücklage oder Aufbrauch ermittelt.

Wirkungspfad Begriff aus der Altlastenpraxis, der den Weg eines Schadstoffes vom Schadstoffherd zum betroffenen ► Schutzgut beschreibt. Er kann über kontaminierte Böden, bodenfremde Feststoffe, Grundwasser, Oberflächengewässer oder die Bodenluft erfolgen.

Stichwortverzeichnis

A

Abbaureaktion 79
 Abbauverhalten 27
 Abfall 122, 125, 126, 144
 – gefährlicher 126
 – organischer 125
 – radioaktiver 125
 Abfallansprache 131
 Abfallbegriff 122
 – objektiver 122
 – subjektiver 122
 Abfallrahmenrichtlinie 122, 144
 Abfallvermeidung 144
 Abfallverzeichnisverordnung 122
 Abfallvorbehandlung 124
 Abfallwirtschaft 15
 Abfallwirtschaftsgesetz 199
 Ablagerungsbedingung 85
 Ablagerungszeitraum 130
 Abstandsgeschwindigkeit 56
 Acid Mine Drainage 152
 Adsorptionsvermögen 65, 75
 Adsorptionswand 141
 Adsorptionswasser 77
 Advektion 16
 aerob 27, 78, 79
 Aerosol 32, 37, 51, 154, 174
 Aerosolpartikel 17, 19, 37
 Aerosolteilchen 174
 Agrarrohstoff 148
 Akkumulationsgebiet 88
 Aktinolith 40
 Aktivkohle 102, 187
 Aktivkohle-Adsorptions-Verfahren 156
 Alkane 21
 Alkene 21
 Alkine 21
 Altablagerung 127, 130, 145
 Altlast 113, 114, 127, 128, 134, 135, 136, 137, 142
 Altlastenerkundung 100
 Altlastenkataster 113
 Altlastenklassifizierung 129
 Altlastenpraxis 19, 23, 126, 167
 Altlastensanierungsgesetz 135
 Altlastenverdachtsfläche 128, 133, 145
 Altstandort 23, 127, 130, 132, 145, 181
 Aluminiumoxid 68
 Amalgam 19, 156
 AMD 152, 163

Ammoniak 13, 79
 Ammonifikation 13
 Ammonium 13, 175
 Amphibol 40
 anaerob 27, 79
 Anhydrit 157, 158
 anisotrop 80
 Anreicherung 17
 Anreicherungsfaktor 149
 anthropogen 14, 39, 65, 68, 173, 184, 216
 anthropomorph 69
 Anthropozän 14
 Aquifer 9, 55, 59, 65
 Aquifuge 65
 äquimolar 78
 Aquitarde 55
 Arsen 8, 19, 88, 154, 184
 Arsenat 19, 184
 Arsenik 19
 Arsenit 19
 Arsensulfid 19
 Asbest 40
 Asbestminerale 40, 41
 Asbestose 40
 Atmosphäre 8, 32, 33, 51
 Auripigment 19
 Ausfällung 53
 Ausgangsgestein 69, 75
 Auslaugverhalten 123
 Auswaschung 76
 Auswirkungsanalyse 219, 220

B

Baggerschurf 115, 116, 131
 Bahngeschwindigkeit 56
 Basisabdichtung 133, 139, 141
 Bauphase 220
 Bauschutt 116
 Bedarf 216
 Begleitscheinwesen 124
 Behandlungsanlagen 123
 Benzin 21
 Benzo(a) pyren 24
 Benzol 22
 Benzolemission 22
 Betriebsphase 221
 Bevölkerungsdichte 216
 Bevölkerungszahl 216
 Beweissniveau 128, 130, 133
 Beweissicherung 224
 Bioaktivität 78
 Bioindikator 130
 Biolaugung 167
 Biomasse 194
 Biomassekraftwerk 194
 Biosphäre 9, 11, 39, 123, 126
 Biozidprodukte-Verordnung 175
 Bitumen 21
 black-food disease 184
 Blausäure 19, 156
 Blei 17, 18, 154
 Bleiakкумулятор 18
 Bleiexposition 18
 Bleikontamination 18
 Bleiproduktion 18
 Bleiverbindung 18
 Blei-Zink-Vererzung 154
 Blockwerk 85
 Boden 18, 25, 54, 64, 65, 66, 68, 72, 75, 79, 80, 98, 114, 123
 Bodenaufbau 66, 68
 Bodenaushubdeponie 124
 Bodenaustauscher 75
 Bodenazidität 65, 70, 75, 76
 Bodenbeschaffenheit 77
 Bodenbestandteil 66, 68
 Bodenbildung 68
 Bodenchemie 70, 72
 Bodenfunktionen 70
 Bodengefüge 66, 68
 – Aggregatgefüge 66
 – Einzelkorngefüge 66
 – Kohärentgefüge 66
 Bodengenetik 64
 Bodengesellschaften 71
 Bodenhorizont 65, 66, 67, 68
 – A-Horizont 66, 68
 – B-Horizont 66, 68
 – C1-Horizont 67
 – O-Horizont 66
 – Y- und R-Horizont 67
 Bodeninventur 64
 Bodenklasse 69
 Bodenklassifikation 70
 Bodenkomponente 66
 Bodenkörper 65, 66, 68
 Bodenkunde 64
 Bodenlösung 54, 74, 75, 77, 104
 Bodenluft 54, 65, 78, 100, 123, 127
 Bodenluftabsaugversuch 102
 Bodenluftmessstelle 100, 101, 131
 Bodenluftparameter 100
 Bodenluftsonde 130

Stichwortverzeichnis

Bodenlufttransport 79
 – diffusiver 79
 – konvektiver 79
 Bodenluftuntersuchung 100
 Bodenluftwegigkeit 101
 Bodenluftzusammensetzung 100
 Bodenprobennahme 114
 Bodenproduktivität 18
 Bodenschutzprotokoll 72
 Bodensystematik 68, 70
 Bodentemperatur 79
 Bodentyp 69
 Bodenverdichtung 80
 Bodenversalzung 74
 Bodenversiegelung 175, 180
 Bodenwasser 53, 54, 77
 Bodenwasserprobe 106
 Bodenwasserqualität 104
 Bodenzone 54, 55, 65, 100
 – gesättigte 55, 65
 – ungesättigte 54, 65, 100
 Bodenzustand 113
 Bodenzustandsinventur 113
 Bohrlochausbau 203
 Bohrstock 115
 Brom 24
 Brunnendublette 204, 206, 208
 Bruttoendenergieverbrauch 192, 194
 BTEX 22
 Bundesbodenschutzgesetz 72, 135
 Buntmetall 17, 153, 154

C

Cadmium 17, 18, 154
 Carbonat 10, 11
 Carbozyklen 24
 Chalkopyrit 152
 Chlor 24
 Chloralkane 24
 Chloralkene 24
 Chlorbenzol 25
 Chlorethene 24
 Chloridion 180
 Chloroform 24
 Chrom 17
 Chrysotil 40
 CKW 24
 Cluster 46
 CO₂ 11, 12
 CO₂-Anstieg 35
 CO₂-Ausstoß 36, 162
 CO₂-Entgasung 52
 CO₂-Konzentration 51, 54
 Cobalt 17
 Coriolis-Kraft 34

Cyanid 8, 19, 20, 156
 Cyanidkomplexe 19
 Cyanidlaugung 19, 156

D

Dampfdruck 100
 Darcy-Gesetz 55, 56
 Datensammler 110
 DDT 25
 Deep-Heat-Mining 208
 Dekontamination 135, 136, 137, 139, 145
 Denitrifikation 13
 Deponie 124, 125, 130
 Deponiebasisabdichtung 125
 Deponieeingangskontrolle 124
 Deponiegas 79, 103, 125, 131, 134
 Deponiegasentwicklung 100
 Deponiegaserrfassung 133
 Deponieklasse 124
 Deponiesickerwasser 18, 125
 Deponiestandort 124
 Deponietechnik 124, 125
 Deponieverordnung 124
 Deposition 37, 114
 – nasse 37, 114
 – trockene 37, 114
 Destillat 187
 dezentrale Stromproduktion 209
 dezentrale Stromversorgung 196
 Dichlordiphenyltrichlorethan 25
 Dichlorethen 27
 Dichteanomalie 47
 Diffusion 16, 79
 Dipolcharakter 46, 73, 77
 Dipolmolekül 46, 74
 direct push 111, 131
 Dispersion 16
 Dissoziationskonstante 47
 Distickstoffmonoxid 13
 DNAPL 21, 24, 111
 Dolomit 157
 Doppelprobe 117
 Drainage 105, 182
 Drei-Schluchten-Talsperre 196
 Düngung 13, 175
 Durchlässigkeitsbeiwert 55, 140, 178

E

Edaphon 64, 68, 73, 78, 104, 127
 Edelgas 39, 79
 Edelmetall 156
 Effluenz 198
 Eigendissoziation 47

Einkapselung 139
 Einringaromaten 22, 100
 Einzelprobe 117
 Eisen 17, 153
 Eisencyanid-Komplexe 19, 20
 Eisenerz 154
 Eisenhydroxid 152
 Eisenoxid 68
 Eisensulfid 76
 Eiskern 34
 elektrische Leitfähigkeit 51, 57
 Elektronenübergang 73
 Eluat 104
 Eluatgehalt 131
 Emissionsbetrachtung 2, 4
 Emittent 37
 Endenergie 196
 Endlager 123, 125, 126, 144
 endogen 10
 Energie 194, 196
 – erneuerbare 194
 – kinetische 196
 energieautarke Gemeinde 210
 Energiemix 195
 Energiequelle 194, 195
 – erneuerbare 195
 – regenerative 194
 Energierohstoff 148, 162
 Energieverteilung 209
 Energiewende 193
 Enhanced Geothermal System 205, 207
 Entgasung 52
 Spannungsverdampfung 187
 Entwässerungsschicht 125
 EPA 23
 Erdellipsoid 34
 Erdkabel 210
 Erdschiefe 34
 Erdumlaufbahn 34
 Erdwärme 162, 195
 Erdwärmesonde 203, 204, 206, 208
 Erkundungsprogramm 131
 Erneuerbare-Energien-Gesetz 194
 erneuerbare Energiequellen 15
 Erosion 85, 87
 Erosionsprozess 84
 Erz 149, 151
 Erzberg 151
 Ethylbenzol 22
 E-T-I-Konzept 127, 135, 139
 Europäische Bodencharta 72
 Europäische Wasserrahmenrichtlinie 89, 108
 Eutrophierung 175
 Evaporation 49, 53
 Evaporit 149, 157

evaporitisch 68
 Evaporitlagerstätte 157
 Evapotranspiration 53
 exogen 10
 exotherm 79
 Ex-situ 136
 Exzentrizität 34

F

FAO-UNESCO 71
 FCKW 25, 38, 51
 Feinstaub 37
 Feinstaubfraktion 40
 Feldkapazität 77, 78, 80
 Feldsensorik 102
 Feststoff 112, 134
 Feststoffeinheit 117
 Filterfunktion 70
 Filtergeschwindigkeit 56
 Filterkies 101, 107
 Filterkuchen 124
 Filterrohr 107
 Filterstrecke 107, 112
 Flächenbelag 177
 Flächenressourcen 216
 Flächenverfügbarkeit 216
 Fließdynamik 197
 Fließgefälle 55
 Fließgeschwindigkeit 123
 Flözgas 165
 Fluor 24
 Fluorchlorkohlenwasserstoffe 25, 38, 51
 Flusskraftwerk 196
 Flusssedimente 88, 117
 Förderbohrung 206
 fossile Brennstoffe 10, 17, 22
 fossiles Grundwasser 188
 Frackingfluid 166
 Freileitung 210
 Freileitungstrasse 210
 funnel and gate 141

G

Gärung 12
 Gasbeutel 102
 Gasdrainage 125
 Gashydrat 165
 Gefährdungspotential 39, 101, 116, 122, 123, 124, 128, 130, 132, 134
 Gefrierkernverfahren 118
 Geoakkumulations-Index 89
 geogene Arsenbelastung 19
 geologische Barriere 124, 125

Geothermie 194, 202, 203, 205, 207
 – oberflächennahe 202, 203
 – petrothermale 207
 – tiefe 202, 205
 Gesamtmineralisation 51, 158, 180
 Gesamtporenvolumen 66
 Gesamtpotential 77
 Geschiebe 197
 Geschiebeherd 200
 Gesteinsfragmente 88
 Gips 157
 Gley 66
 globale Kohlenstoffmenge 10
 Gold 153, 156
 Great Man Made River 188
 Great Pacific Garbage Patch 15
 Greiferbohrung 115, 116, 131
 Grobstaub 37
 Grundluft 78
 Grundwasser 55, 69, 106, 123, 127, 134
 Grundwasserabstrom 111
 Grundwasseraufschluss 106
 Grundwasseraustritt 106
 Grundwasserboden 69
 Grundwasserfauna 179, 205
 Grundwasserfließrichtung 55
 Grundwasserflurabstand 110
 Grundwassergeringleiter 55
 Grundwassergleichenplan 161, 198
 Grundwasserhaltung 154
 Grundwasserhemmer 55
 Grundwasserhorizont 107
 Grundwasserleiter 55, 65, 184
 Grundwassermessnetz 108
 Grundwassermessstelle 106, 107, 130
 Grundwassermodell 110
 Grundwasserneubildung 80, 175, 183, 206
 Grundwasseroberfläche 55, 188, 198
 Grundwasserregime 154
 Grundwasserspeicher 65
 Grundwasserstauer 65
 Grundwasserstockwerk 107
 Grundwassertemperatur 57, 179
 Grundwasserwärmepumpe 203, 204
 Guano 158

H

Haber-Bosch-Verfahren 13
 Hadley-Zellen 34
 Haftwasser 54, 65, 73, 75, 77
 Halbwertszeit 39
 Haldenschüttung 127
 Halit 157

Halogenaromaten 25
 Halogene 25
 Hämatit 154
 Hangversagen 201
 Harvester 87
 Haselgebirge 157
 Hauptparameter 57
 Hausmüll 116, 123
 Headspaceglas 102
 Henry-Gesetz 52
 Henry-Koeffizient 52
 Heterozyklen 24
 Hintergrundbelastung 22, 113, 141, 184
 Hintergrundwert 90
 historische Recherche 128, 130, 132, 178
 Historische Recherche 113
 Hochdruckanlage 196
 Hochenthalpiefeld 203, 209
 Hochspannungserdkabel 210
 Hochspannungsfreileitung 209
 Hohlraumbauwerk 182
 Holzvollernter 87
 Hot-Dry-Rock-System 208
 Hubbert-Modell 150
 hydraulic fracturing 165
 hydraulische Durchlässigkeit 55, 70, 80, 123, 136, 140
 Hydrogencarbonat 11, 76
 Hydrogeologie 55
 hydrogeologische Beweissicherung 224
 Hydro-Geothermie 206
 hydrologische Grundgleichung 48, 50
 Hydrolyse 46
 hydromorph 69
 hydromorphe Böden 76
 hydrophil 46
 hydrophob 21, 114, 181
 Hydrosphäre 8, 15, 77
 hydrothermal 39

I

Illit 75
 Immissionsbetrachtung 2
 Immissionspfad 114
 Immissionsschutz 211
 Immobilisierungsverfahren 141
 Industriemineral 151
 Industrierohstoff 148
 induzierte Seismizität 208
 Influenz 198
 Injektionsbohrung 206
 Injektionsbrunnen 204

Stichwortverzeichnis

Insektizid 23, 25
 In-situ 135, 136
 In-situ-Laugung 158
 In-situ-Methoden 137
 Interzeption 53
 Ionenaktivität 157
 Ionenaustausch 72, 73
 Ionenaustauschkapazität 73
 Ionenaustauschprozess 73, 74
 Ionenkonzentration 75
 Ionenspezies 74
 isomorpher Ersatz 74, 75
 Isotop 39, 48
 Isotopenhydrologie 48
 Ist-Zustandsbeschreibung 219, 220

J

Jahresspeicher 199
 Jod 24
 juveniles Wasser 48

K

Kalialz 157
 Kaliumcyanid 19
 Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht 76, 207
 Kalzit 157
 Kalzitlösung 12
 Kaolinit 75
 Kapillarwasser 77
 Kationenaustausch 13
 Kationenaustauschkapazität 73
 Keeling-Kurve 35
 Kerngewinn 107
 Kerogen 165
 Kies 85
 Klassifikation 59
 Klassifizierung 68, 69, 70, 71
 – funktionale 68, 70
 – morphogenetische 68, 69
 – regionale 71
 Kleinbohrverfahren 115
 Klima 34
 Klimaeinfluss 68
 Klimaerwärmung 36
 Klimafaktoren 35
 Klimagipfel 36
 Klimarahmenkonvention 36
 Klimaschwankung 2, 34, 35
 klimatomorph 69
 Klimaveränderungen 34
 Kluftdichte 183
 Kluftporosität 126
 Kluftweiten 183

Kohlebrand 163
 Kohlendioxid 11, 32
 Kohlenmonoxid 11
 Kohlensäure 52, 76, 207
 Kohlenstoff 10
 – anorganischer 10
 – organischer 10
 Kohlenstoffatom 20
 Kohlenstoffdioxid 12
 Kohlenstoffkreislauf 8, 10, 11, 12
 – kurzfristiger 11
 – langfristiger 12
 Kohlenstoffquelle 10
 Kohlenstoffspeicher 10, 12
 Kohlenwasserstoff 8, 21, 22, 23, 24, 51, 90, 149, 181
 – aliphatischer 21, 90, 181
 – aromatischer 22
 – biogener 90
 – gesättigter 21
 – halogenerter 24, 51
 – polyzyklisch aromatischer 23
 – ungesättigter 21
 Kohlenwasserstofflagerstätte 12
 Kohlenwasserstoffverbindung 20
 Kolmation 197
 Komponenten 66, 88
 – dendritische 88
 – mineralische 66
 – organische 66, 88
 Konstruktive Bohrpfehlwand 140
 Konvektion 16, 79
 Konvektionsstrom 33, 35
 Kornform 66
 Korngröße 55
 Korngrößenverteilung 25, 55, 65, 66, 69, 73, 75, 85
 Korngrößenzusammensetzung 65
 Körnung 70
 kovalente Bindung 73
 Kreislauf 10, 14, 15
 – anthropogener 14, 15
 – geologischer 10
 – natürlicher 10
 Kreislaufwirtschaft 15
 Kreislaufwirtschaftsgesetz 199
 Kristallgitter 74
 Kristallstruktur 75
 Kunststoff 14, 15, 24
 Kunststoffpartikel 15
 Kupfer 17, 154
 Kyotoprotokoll 36

L

Lachgas 79
 Ladungsausgleich 76
 Ladungsüberschuss 75
 Lagerstätte 149, 206, 207, 209
 Lagerungsdichte 70, 80, 123
 Landboden 69
 Landfläche 216
 Laufkraftwerk 196
 LCKW 24, 25, 26, 100
 Lebensdauer 15, 149
 Lebensraum 216
 Lebensraumfunktion 70
 Legierung 19
 leichtflüchtig 24
 Leichtflüssigkeitsabscheider 181
 Liefergebiet 85
 lipophil 24
 lithomorph 69
 Lithosphäre 8, 84
 LNAPL 21, 111
 Lockergestein 84, 101, 159, 160
 Löslichkeit 56
 Luft 78
 Luftbildaufnahmen 130
 Luftfeuchtigkeit 79
 Luftschadstoff 38
 Luftverunreinigung 37
 Luftvolumen 78
 Luftzusammensetzung 32
 lungengängig 40
 Lysimeter 54, 105, 106

M

Magnetit 153
 Mangan 17
 Massenrohstoff 71, 151, 159
 Materialklassifizierung 136
 Matrixporosität 126
 Meeresströmung 35
 Meerwasserentsalzung 187
 Mehringaromaten 22
 Membrandestillation 187
 Merrill-Crowe-Verfahren 156
 Messstelle 107
 – unvollkommene 107
 – vollkommene 107
 Messstellennetz 108, 109, 131
 Metadaten 99
 Metall 153
 Metallarsenid 19
 Methan 11, 79
 Methylchlorid 24
 Mikroplastik 15

Milankovic-Zyklen 34
 Mineralbestand 65, 69
 Mineralisierung 56
 Mineralölkohlenwasserstoffe 21, 177, 181
 Mineralölprodukte 22
 Mischprobe 99, 117
 Mitteldestillat 21
 MKW 21, 25
 Mobilisierung 17, 20
 Mobilität 25
 Molybdän 17
 Monitoring 89
 monomikt 86
 Montmorillonit 75
 Moor 69, 79
 Muldenschüttung 127
 Müllverbrennungsanlage 123
 Multibarrierenkonzept 124, 126
 Multilevel-Messstelle 101, 107, 108

N

Nachhaltigkeit 15, 16, 36, 151
 Nachsorge 125, 135
 Nachsorgephase 221
 Naphtalin 23
 NAPL 21
 Nassbaggerung 160
 nasse Deposition 51
 Natriumchlorid 180
 Natriumcyanid 19
 Natural Attenuation 137
 Naturgefahrengebiete 217
 neutrale Tiefenzone 179
 Nickel 17
 Niederdruckanlage 196
 Niederschlag 51, 76
 Niederschlagswasser 77
 Nitrat 13, 175
 Nitratbelastung 13
 Nitratmessnetz 13, 109
 Nitrifikation 13, 76
 Nitrit 13
 NOx 13
 Nullvariante 218
 Nutzungsfunktion 71

O

Oberflächenladung 74
 Oberflächenspannung 46
 Oberflächenversiegelung 125
 Oberflächenwasser 69
 Oberwasser 197
 Oberwasserbecken 201

OECD-Länder 193
 off-shore-Förderung 164
 off-site 136
 Ökosphäre 70
 Ökostromgesetz 194
 Oktaederschicht 75
 Oktanzahl 22
 Ölabscheider 181
 Ölphase 26
 Ölsand 165
 Ölschiefer 165
 on-site 136
 organoleptisch 116
 Oxidation 76
 Oxidationsstufen 12
 Ozonloch 38
 Ozonschicht 13

P

Packer 101
 PAK 23, 25
 PAKEPA 23
 Partialdruck 52, 79
 Partikel 15, 37
 Peak Oil 163
 Pedogenese 65, 73, 75
 Pedologie 64
 Pedon 66
 Pedosphäre 8, 77
 PER 24
 Perkolatation 53
 Permafrost 217
 Permeabilität 55
 Persistenz 17, 25, 38, 123
 Pestizide 175
 Pflanzenschutzmittel 24, 175
 Phasenübergang 125
 Phenol 23
 Phosphat 158
 Photosynthese 11
 Photovoltaikanlage 195
 pH-Wert 47, 51, 57, 73, 74, 75, 77
 Phytomining 167
 Piper-Diagramm 58, 59
 Planktonfiltrierer 15
 Plastik 14
 Plastikinsel 15
 Plastizität 65, 75, 125, 126
 Platin 17, 156
 Podsol 66
 Polyethylen 14
 Polyhalit 157
 Polymerverbindung 14
 polymikt 86
 Polypropylen 14

Polyvinylchlorid 14
 Porenraum 54, 65, 77
 Porenvolumen 78
 Porenwasserdruck 198
 Porosität 25, 55, 65
 Potentialdifferenz 16, 33, 48
 Präzession 34
 Primärenergie 196
 Prioritätenfolge 123, 144
 Probenheber 112
 Probennahmeprotokoll 99
 Probennahmestrategie 112
 Produktionsfläche 216
 Projektemissionen 219
 Projektmissionen 219
 Protonenübergang 73
 Pufferkapazität 76
 Puffersubstanz 76
 Puffersystem 76
 pump-and-treat 138
 Pumpspeicherkraftwerk 196, 201
 Pyren 23
 Pyrit 19, 154
 Pyritverwitterung 152
 Pyrolyse 138

Q

Qualifier 68
 Quecksilber 17, 18, 100, 156
 Quecksilberbelastung 19
 Quelle 106, 174, 183, 224
 Quellfähigkeit 75, 125
 Quelltuff 52

R

Radioaktivität 39
 radiogen 39
 Radon 39, 88
 Raffinerie 22
 Rammkernsondierung 131
 Rammsondierung 101
 Rammverfahren 107
 Rauchgas 17, 154
 Raumlufmessung 133
 Reaktivität 17
 Reaktordeponie 124, 125, 144
 Realgar 19
 Recycling 15, 168
 Redox 76
 Redoxpaar 77
 Redoxpotential 77
 Redoxreaktion 73, 77
 Reduktion 76
 Referenzmessstelle 110

Stichwortverzeichnis

- Referenzprobe 117
 Regelungsfunktion 70
 Regenwasser 51
 Reichweite 150
 Reinjektion 206
 Reinluftgebiet 37
 Relief 216
 Repräsentative Probennahme 98
 Reserve 149, 164
 Ressource 10, 149, 164
 Restsee 163
 Retardationsfaktor 25
 reversibel 74
 Ringraum 101, 107, 111, 203
 Ringraumfüllung 107, 203
 Rio Tinto 152
 Rohöl 18, 21
 Rohstoff 15, 148
 Rohstoffversorgung 150
 Rotationsbohrverfahren 107
 Rückhaltevermögen 21
 Rücklage 50
 Rückstellprobe 117
 Rundungsgrad 85
- S**
- Salinität 186
 Salpetersäure 38
 Salzbergbau 126
 Salzwasser 69
 Sand 85
 Sanierung 135
 Sanierungserfolg 137
 Sanierungserkundung 135
 Sanierungsplanung 135
 Sanierungsziel 137, 142
 – endgültiges 142
 – übergeordnetes 142
 – vorläufiges 142
 Sanierungszielwert 136
 Sättigung 52, 53, 56
 Sättigungskonzentration 157
 Sauerstoff 20
 Saugkerze 54, 105, 106
 Säulenelution 105
 Säurebildner 13, 38, 174
 saure Minenwässer 152, 163
 Säureneutralisationskapazität 76
 Säurestimulation 166
 Schadensherd 100
 Schädlingsbekämpfungsmittel 175
 Schadstoff 8, 10, 17, 20, 88, 124, 173
 – anorganischer 17
 – hydrophober 88
 Schadstoffausbreitungsmedium 65
 Schadstoffbindung 72, 75
 Schadstoffbindungsvermögen 70, 73
 Schadstofffahne 27
 Schadstoffgruppe 20
 Schadstoffherd 139
 Schadstoffimmobilisierung 141
 Schadstoffpotential 102, 123, 124
 Schadstofftransport 65
 Schadwirkung 38
 – klimawirksame 38
 – reaktive 38
 – toxische 38
 Schichtsilikat 74
 Schiefergas 165
 Schlitzwand 140
 Schluff 85
 Schluffsedimente 88
 Schneckenbohrverfahren 115
 Schöpfprobe 112
 Schutzgut 37, 72, 127, 130, 133, 173
 Schwall 200
 Schwall-Sunk-Betrieb 200
 Schwefel 13, 20
 Schwefeldioxid 14, 18, 38, 154
 Schwefelemissionen 51
 Schwefelkreislauf 13, 14
 Schwefelsäure 14, 38
 Schwefelwasserstoff 13
 schwerflüchtig 24
 Schwermetall 8, 17, 18, 88, 152
 Schwermetallsulfide 14
 Schwermetallvererzungen 17
 Sedimentation 10, 197
 Sedimentationsdynamik 117
 Sedimentationsprozess 84
 Sedimentationsrate 117, 200
 Sedimente 85, 86
 – äolische 85
 – biogene 85
 – chemische 85
 – fluviatile 85
 – glaziale 85
 – gravitative 86
 – klastische 85, 86
 – limnische 85
 Sedimentfracht 88, 200
 Sedimenthaushalt 197, 200
 Sedimentkörper 85
 Sedimentologie 86
 Sedimenttransport 85
 Sedimentzusammensetzung 88
 Seesediment 34
 Seifenlagerstätte 156
 Selen 17
 semiterrestrisch 69
 Sensibilitätsanalyse 220
 Sensibilitätsmatrix 220
 Serpentin 40
 Sicherung 135, 145
 Sicherungsverfahren 139
 Sickeranlage 176
 Sickerfähigkeit 176
 Sickerversuch 176
 Sickerwasser 65, 77, 104, 123
 Sickerwasserfassung 133
 Siderit 154
 Siedlungsabfall 162
 Siedlungsdruck 217
 Silber 156
 Silikat 12, 40
 SO₂-Emissionen 14
 Solarenergie 194
 Sole 158
 Sondermülldeponie 126
 Sonnenenergie 194
 Sonnenkollektor 195
 Sonnenwärmekraftwerk 195
 Sorbat 73
 Sorbent 73
 Sorption 72, 73
 – Absorption 73
 – Adsorption 73
 – Desorption 73
 Speicherfunktion 70
 Speicherkapazität 70
 Speicherkraftwerk 199
 Speichermedium 11
 Speicherraum 199
 spezifische Oberfläche 65, 73, 75
 spezifischer Durchfluss 56
 Sphären 8
 Spurenelemente 174
 Stahl 153
 Stahlpundwand 140
 Stahlveredler 153
 Standardpotential 77
 Standortmodell 128, 131, 132
 Staub 32, 37
 Stauhaltung 198
 Stauhorizont 107
 Staulegung 197
 Staumauer 199
 Stauraum 197
 Stauraumspülung 197
 Stauwasser 77
 Stauwasserbildung 77
 Stauwurzel 197
 Stechzylinder 118
 Stein 85
 Steine und Erden 159
 Steinsalz 157
 Stichprobe 99
 Stickstoff 12, 20, 79

Stickstofffixierung 13
 – abiotische 13
 – biotische 13
 – technische 13
 Stickstoffkreislauf 12, 79
 Stickstoffoxid 13, 38
 Stilllegung 125
 Stoff 15
 – synthetischer 15
 Stoffaustausch 85
 Stoffbilanz 135
 Stoffkreislauf 8, 10, 16, 20, 84
 – anthropogener 16
 – geologischer 84
 Stoffkreisläufe 126
 Stoffmengenkonzentration 17
 Stofftransportmodell 110
 Störfall 223
 Straßenrandboden 180
 Straßensalzung 180
 Streusalz 180
 Stripp-Verfahren 139
 Stromtransport 209
 subhydrisch 69
 Substrattyp 69
 Sulfat 14
 Sulfhydryl-Gruppen 14
 Sulfid 13
 sulfidische Minerale 19
 Sumpfrohr 107
 Sunk 200
 Sylvin 157
 synthetische organische Verbindun-
 gen 20
 System 9, 10
 – geschlossenes 9
 – isoliertes 9
 – offenes 10
 – terrestrisches 10
 Systemabgrenzung 8
 Systemkonzept 8, 9

T

Temperaturanomalien 205
 Temperaturgradient 202
 Temperaturspreizung 204
 terrestrisch 69
 Tetrachlorethen 24, 27
 Tetraeder-Schicht 75
 thermische Behandlung 15
 thermische Behandlungsanlagen 123
 thermischer Gradient 195
 thermohaline Strömung 35
 Tiefenlager 126, 144
 Tight Gas 165

Tochterisotop 39
 Toluol 22
 Ton 85
 Tonfraktion 75
 Tonminerale 75, 125
 – Dreischicht 75
 – Zweischicht 75
 Tonmineralogie 75
 Tonsedimente 88
 Transformatorfunktion 70
 Transportkraft 88
 Transportmechanismus 85
 Transportweite 85
 Treibgas 38
 Treibhauseffekt 35
 Treibhausgas 13, 35
 Tremolith 40
 TRI 24
 Trichlorethen 24, 27
 Tropfstein 52
 Troposphäre 37
 Tunnelbau 182

U

Überflurmessstelle 107
 Übernutzung 186
 ubiquitär 15, 23, 37
 Ultimate Recoverable Resource 150
 Umkehrosiose 187
 Umschließung 139
 Umweltschadstoffe 124
 Umweltverträglichkeit 124, 219
 Umweltverträglichkeitserklärung 217,
 218
 Umweltverträglichkeitspflicht 217
 Umweltverträglichkeitsprüfung 217
 Ungleichförmigkeit 55
 Unterflurmessstelle 107
 Untertagedeponie 124, 126
 Unterwasser 197
 Unterwasserbecken 201
 Unterwassereintiefung 196
 Uran 39
 Uran-Radium-Reihe 39
 URR 163
 Ursprungsgebiet 86

V

Vakuum Gasöl 21
 Vanadium 17
 Variantenstudium 141
 Vegetation 69
 Verbrauch 50
 Verdachtsfläche 128, 130

Verdrängungsverfahren 105
 Verdünnungseffekt 180
 Verdunstung 51, 53
 Verdunstungsrate 53
 Vererzung 39, 154, 167
 Verhüttung 154
 Verhüttungsanlagen 17
 Verkarstung 183
 Verkehrsflächen 179
 Verknappung 216
 Vermiculit 75
 Verrohrung 107
 Versalzung 185
 Versauerung 76
 Versickerung 53, 176, 177
 Versickerungsanlage 180
 versiegelte Oberfläche 53
 Verweilzeit 37, 38, 49
 Verwertung 122, 123, 144, 187
 Verwitterung 12
 – chemische 12
 – mechanische 12
 Verwitterungsprodukt 75
 Vinylchlorid 27
 viskos 114
 Viskosität 24, 55, 181
 Volalität 150
 Vollrohr 107
 Vorfluter 55, 133, 154, 158, 160, 188,
 198, 222

W

Wärmeanomalie 195, 205
 Wärmeinsel 179
 Wärmekapazität 47
 Wärmeleitfähigkeit 205
 Wärmestromdichte 205
 Wärmetauscher 208
 Wärmeträgermedium 205
 Wasserbilanz 135
 Wasserdampfsättigung 79
 Wasserdargebot 77
 Wasserhaltung 160
 Wasserhaushaltsbilanz 49, 50
 Wasserkapazität 77
 Wasserkörper 108
 Wasserkraft 194, 196
 Wasserkraftnutzung 196
 Wasserkraftwerk 196
 Wasserkreislauf 10, 48, 70, 77
 Wassermanagement 188
 Wassermolekül 46
 Wassersättigung 77
 Wasserstoffionen 75
 Wasserüberschuss 79

Stichwortverzeichnis

Wasserumsatz [48, 49](#)
Wasserwegigkeit [134, 183, 208](#)
Wasserzusammensetzung [54](#)
Wasserzutrittsprognose [183](#)
Weltbodenkarte [71](#)
Wetter [34](#)
Wiederverwendung [144](#)
Windenergie [194](#)
Wirkungspfad [123, 124, 139, 219](#)
World Reference Base [70](#)
worst-case-Szenario [224](#)
WRRL [89, 109](#)
Wurzelatmung [76, 78](#)

X

Xylol [22](#)

Z

Zechstein [157](#)
Zentralatom [74](#)
Zentrifugieren [105](#)
Zerfallsreihe [39](#)
Zink [17, 154](#)
Zinkvererzung [18](#)
Zinn [17](#)
Zinnober [18](#)