

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autorenverzeichnis	VII
Einführung	1
<i>Literatur</i>	3
<b>TEIL I Eigenschaften und Funktionen von Böden</b>	<b>5</b>
<b>1 Böden als Naturkörper</b>	<b>5</b>
1.1 Boden und Böden	5
1.2 Eigenschaften von Böden	7
1.2.1 Ausgangsgestein und Mineralkörper	7
1.2.2 Humuskörper	11
1.2.3 Bodengefüge	13
1.2.4 Bodenluft, Bodenlösung und Austauschsystem	17
1.3 Wärme-, Wasser-, Luft- und Stoffdynamik von Böden	18
1.4 Entwicklung von Böden	20
1.5 Systematik von Bodenhorizonten und Böden	23
1.5.1 Horizontsystematik	23
1.5.2 Bodensystematik	24
1.6 Schutzbedürftigkeit und -würdigkeit	25
<i>Literatur</i>	25
<b>2 Böden als Filter, Puffer und Transformatoren</b>	<b>26</b>
2.1 Einführung und Definitionen	26
2.2 Mechanismen	26
2.2.1 Filterung grobdispenser Stoffe	26
2.2.2 Filterung kolloiddispenser Stoffe	27
2.2.3 Pufferung gelöster Stoffe	28
2.2.4 Transformation von Stoffen	34
2.3 Ermittlung und Bewertung des Filter-, Puffer- und Transformationsvermögens	34
2.4 Schutzbedürftigkeit und Schutzwürdigkeit	35
<i>Literatur</i>	36
<b>3 Modellierung des Chemikalienverhaltens in Boden und Grundwasser</b>	<b>38</b>
3.1 Transport gelöster Chemikalien im Sicker- und Grundwasser	38
3.1.1 Boden-, Hang- und Grundwasser als Transportmedien	38
3.1.1.1 Meso- und makroskalige Modelle der Wasserbewegung in Böden und Lockergesteinen	38
3.1.1.2 Präferenzieller Fluss und <i>piping</i>	39
3.1.1.3 Mehrphasenfließen	40
3.1.2 Stofftransport in der Boden- und Belüftungszone	40
3.1.2.1 Eindimensionale Basismodelle des Chemikalien-transportes	40
3.1.2.2 Kompartimentmodelle	41
3.1.3 Stofftransport in der gesättigten Bodenzone und im Aquifer	41
3.1.4 Ausgewählte Stofftransportmodelle	42
3.1.4.1 Historischer Rückblick	42
3.1.4.2 Ausgewählte Boden- und Grundwassermodelle	42
3.1.4.3 Modellsysteme für die Landschaftsplanung	44
3.2 Gleichgewichts- und Speziationsmodelle	46
3.3 Schätzmodelle	47
3.4 Human- und ökotoxikologische Expositionmodelle	48

3.4.1	Multikompartimentmodelle zur Abschätzung des Expositionsrisikos .....	48
3.4.2	Ökotoxikologische Chemikalienprüfung .....	48
3.5	Verifizierung, Kalibrierung und Validierung von Modellen .....	51
	<i>Literatur</i> .....	53
<b>4</b>	<b>Boden- und Landschaftswasserhaushalt</b> .....	<b>57</b>
4.1	Wasserkreislauf und Wasserbilanz .....	57
4.2	Gebietswasserhaushalt und Einzugsgebiet .....	59
4.3	Komponenten der Wasserbilanz .....	60
4.3.1	Niederschlag .....	60
4.3.2	Verdunstung .....	62
4.3.3	Abfluss und Abflussbildungsprozesse .....	64
4.4	Stoffpfade in der Landschaft .....	68
4.5	Bodenwasserhaushalt .....	70
4.5.1	Wasserbindungskräfte und Wassergehalt in Böden .....	71
4.5.1.1	Adsorptionswasser .....	71
4.5.1.2	Kapillarkräfte und Bodenwasserpotenzial .....	71
4.5.1.3	Wasserretentionsfunktion .....	72
4.5.1.4	Messung von Bodenwassergehalt und Porenwasserdruck .....	75
4.5.2	Wasserbewegung in Böden .....	76
4.5.3	Infiltration .....	78
4.6	Stoffverlagerung auf und in Böden .....	82
4.6.1	Stofftransport und -vermischung .....	83
4.6.1.1	Lateraler Oberflächenstofftransport (erosiver Stofftransport) .....	83
4.6.1.2	Vertikaler Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone .....	84
4.6.2	Bevorzugte Stoffverlagerung .....	84
4.6.2.1	Fingerfluss und das Mobil/immobil-Konzept .....	84
4.6.2.2	Makroporenfluss und präferenzzieller Stofftransport .....	86
	<i>Literatur</i> .....	88
<b>5</b>	<b>Böden als Landschaftssegmente</b> .....	<b>92</b>
5.1	Bodenvariabilität in Forschung und Lehre .....	92
5.2	Einheiten, Dimensionen und Methoden .....	92
5.2.1	Topische Einheiten .....	93
5.2.2	Chorische Einheiten .....	93
5.2.3	Regionische und globale Einheiten .....	94
5.2.4	Methodik .....	95
5.3	Bodenlandschaften Deutschlands und ihr Schutzbedarf .....	95
5.3.1	Böden holozäner Wattenküsten und großer Flusstäler .....	97
5.3.2	Böden pleistozäner Glaziallandschaften .....	97
5.3.3	Böden der Lösshügellandschaften .....	98
5.3.4	Böden der Schicht- und Bruchstufenlandschaften mesozoischer Gesteine .....	99
5.3.5	Böden magmatisch-metamorpher Mittelgebirge .....	99
5.3.6	Böden des Hochgebirges .....	100
5.3.7	Böden städtisch-industrieller Verdichtungsräume und anthropogener Umlagerungsregionen .....	100
	<i>Literatur</i> .....	101
<b>6</b>	<b>Böden als Lebensraum von Organismen</b> .....	<b>102</b>
6.1	Einführung .....	102
6.2	Lebensformen im Boden .....	102
6.2.1	Bindung an den Boden .....	102
6.2.2	Klassifizierung der Bodenorganismen .....	102
6.2.2.1	Morphologische Anpassungen an den Lebensraum Boden .....	103
6.2.2.2	Größenklassen .....	103
6.2.2.3	Ernährungstypen .....	103
6.2.3	Biologisch-systematische Übersicht über das Edaphon .....	103
6.2.3.1	Viren .....	104
6.2.3.2	Prokaryota .....	104
6.2.3.3	Eukaryota .....	104
6.3	Standortanforderungen der Bodenorganismen .....	104

6.3.1	Lebensraum .....	106
6.3.2	Bodenwasser .....	106
6.3.3	Bodenluft .....	107
6.3.4	Bodentemperatur .....	107
6.3.5	Bodenreaktion .....	107
6.4	Biodiversität im Boden .....	107
6.5	Funktionell bedeutende Bodenorganismen .....	110
6.6	Funktionen der Bodenorganismen .....	110
6.6.1	Bodenfruchtbarkeit .....	111
6.7	Schutzbedürftigkeit und Schutzwürdigkeit der Bodenorganismen .....	112
	<i>Literatur</i> .....	112
<b>7</b>	<b>Böden als Pflanzenstandorte</b> .....	<b>115</b>
7.1	Standortanforderungen der Pflanzen .....	115
7.1.1	Einführung .....	115
7.1.2	Durchwurzelbarkeit .....	115
7.1.3	Wasserversorgung der Pflanzen .....	117
7.1.4	Luftversorgung der Pflanzen .....	120
7.1.5	Wärmeversorgung der Pflanzen .....	122
7.1.6	Bedeutung mechanischer Belastungen für Pflanzenstandorte .....	124
7.1.7	Nährstoffversorgung der Pflanzen .....	125
	<i>Literatur</i> .....	129
7.2	Böden und Pflanzengesellschaften .....	130
7.2.1	Böden und ihre Pflanzengesellschaften .....	130
	<i>Literatur</i> .....	133
7.3	Böden als Nutzpflanzenstandorte .....	134
7.3.1	Ackerstandorte .....	134
7.3.2	Grünlandstandorte .....	136
7.3.3	Waldstandorte .....	137
7.3.4	Obststandorte .....	137
7.3.5	Rebstandorte .....	137
7.3.6	Fazit .....	138
	<i>Literatur</i> .....	138
<b>8</b>	<b>Böden als erd- und landschaftsgeschichtliche Urkunden</b> .....	<b>139</b>
8.1	Gliederung von Böden unterschiedlichen Alters .....	139
8.2	Holozäne Böden .....	139
8.3	Paläoböden .....	140
8.3.1	Pleistozäne Paläoböden .....	140
8.3.2	Präpleistozäne Paläoböden .....	141
8.4	Schutzwürdigkeit .....	142
	<i>Literatur</i> .....	142
<b>9</b>	<b>Böden als Rohstofflieferanten</b> .....	<b>144</b>
	<i>Literatur</i> .....	146
<b>10</b>	<b>Böden als Standorte für Siedlung und Verkehr</b> .....	<b>147</b>
	<i>Literatur</i> .....	151
<b>TEIL II</b>	<b>Veränderungen und Belastungen von Böden</b> .....	<b>153</b>
<b>11</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>153</b>
	<i>Literatur</i> .....	154
<b>12</b>	<b>Bodenüberformung und Versiegelung</b> .....	<b>155</b>
12.1	Einführung .....	155
12.2	Definitionen zum Thema .....	155
12.3	Ausmaß von Bodenüberformung und Versiegelung .....	156
12.4	Ermittlung von Versiegelungsgraden .....	157

12.5	Ökologische Eigenschaften versiegelter Standorte.....	158
12.5.1	Physikalisch-hydraulische Eigenschaften.....	158
12.5.2	Wasserhaushalt.....	159
12.5.3	Wärmehaushalt und Klima.....	162
12.5.4	Chemische Eigenschaften versiegelter Böden – Belastungen und Stofftransport.....	164
12.5.5	Biologische Funktionen versiegelter Böden.....	165
12.5.5.1	Wirkungen auf die Fauna.....	167
12.5.5.2	Wirkungen auf Mikroorganismen.....	167
	<i>Literatur</i> .....	168
<b>13</b>	<b>Bearbeitung und Verdichtung von Böden</b> .....	170
13.1	Bodenbearbeitung.....	170
13.1.1	Gründe und Ziele.....	170
13.1.2	Bearbeitungsverfahren.....	172
13.1.3	Bedeutung der Standorteigenschaften und des Bodenzustandes für die Bodenbearbeitung.....	174
13.2	Bodenverdichtung.....	175
13.2.1	Ungewollte Veränderungen des Bodengefüges durch mechanische Belastungen.....	175
13.2.2	Ursachen mechanischer Veränderungen.....	175
13.2.3	Folgen der Bodendeformation durch Kompression und Scherung für Bodeneigenschaften, -organismen und -funktionen.....	181
13.2.3.1	Porenvolumen und Porengrößenverteilung.....	181
13.2.3.2	Auswirkungen auf die Bodenfauna.....	182
13.2.3.3	Einige Hinweise auf Erträge.....	183
13.2.3.4	Auswirkung auf Bodenerosion.....	183
13.2.3.5	Auswirkung auf Oberflächenabfluss, Grundwasserbildung und -qualität sowie den Landschaftswasserhaushalt.....	183
13.2.3.6	Auswirkung auf weitere umweltrelevante Prozesse.....	184
13.3	Ausmaß der Bodenverdichtungen.....	186
13.4	Prognose der mechanischen Belastbarkeit von Ackerflächen.....	187
13.4.1	Gegenwärtige Ansätze zur Prognose der mechanischen Belastbarkeit.....	187
13.4.1.1	Das Verfahren: Vorbelastung/Druckfortpflanzung.....	188
13.4.1.2	Das Verfahren: Belastungsquotient.....	188
13.4.1.3	Das Verfahren: Verdichtungsgefährdungsklassen.....	189
13.4.2	Vergleich der vorhandenen Berechnungsansätze.....	189
13.5	Modellierung von Bodendeformationen und Folgen.....	191
13.6	Kombination der bodenmechanischen Kennwerte mit den im Bundesbodenschutz-Gesetz definierten Vorsorge- und Maßnahmewerten.....	191
13.7	Schlussfolgerungen.....	194
	<i>Literatur</i> .....	196
<b>14</b>	<b>Abtrag von Böden</b> .....	199
14.1	Bodenerosion durch Wasser.....	199
14.1.1	Der Wassererosionsprozess.....	199
14.1.1.1	Partikelablösung durch Regentropfen ( <i>splash, rainsplash erosion</i> ).....	200
14.1.1.2	Destabilisierung der Bodenaggregate durch Befeuchtungswirkungen.....	200
14.1.1.3	Infiltration und Oberflächenabfluss.....	202
14.1.1.4	Partikelablösung durch Oberflächenabfluss.....	202
14.1.1.5	Partikeltransport im Oberflächenabfluss.....	203
14.1.2	Erscheinungsformen der Wassererosion.....	203
14.1.3	Folgen der Wassererosion.....	204
14.1.4	Faktoren der Wassererosion.....	206
14.1.4.1	Faktoren der Wassererosion in der Übersicht.....	206
14.1.5	Richtgrößen zur Bewertung der Bodenerosionsgefährdung und der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit.....	207
14.1.6	Mess- und Kartiermethoden zur Wassererosion.....	209
14.1.7	Risikoabschätzung.....	210
	<i>Literatur</i> .....	213
14.2	Winderosion.....	215
14.2.1	Ausmaß und globale Bedeutung der Winderosion.....	215
14.2.2	Prozesse der Winderosion.....	215

14.2.3	Erosivität des Klimas .....	218
14.2.4	Erodierbarkeit des Bodens .....	219
14.2.5	Ausmaß der Winderosion in Europa und in Deutschland .....	220
14.2.6	Modellierung und Bewertung der Winderosion .....	220
14.2.7	Messung der Winderosion .....	220
14.2.8	Kartierung .....	222
14.2.9	Staubemissionen durch Bodenbearbeitung .....	222
14.2.10	Winderosion und Klimawandel .....	222
	<i>Literatur</i> .....	223
14.3	Massenversatz am Hang .....	224
14.3.1	Erscheinungsformen .....	224
14.3.2	Ursachen und Einflussfaktoren .....	225
14.3.3	Folgen .....	226
14.3.4	Erhebungen zum Vorkommen .....	226
	<i>Literatur</i> .....	227
<b>15</b>	<b>Bewässerung und Entwässerung von Böden</b> .....	<b>228</b>
15.1	Bewässerung von Böden .....	228
15.1.1	Bewässerungsverfahren .....	228
15.1.1.1	Oberflächenbewässerung .....	228
15.1.1.2	Mikrobewässerung .....	230
15.1.1.3	Unterflurbewässerung .....	230
15.1.2	Bewässerungswasser .....	231
15.1.2.1	Herkunft des Bewässerungswassers .....	231
15.1.2.2	Ausmaß der Wasserentnahme .....	231
15.1.2.3	Wasserqualitätsanforderungen .....	232
15.1.3	Bewässerungseffizienz und -management .....	232
15.2	Entwässerung von Böden .....	233
15.2.1	Geschichte und Verbreitung .....	233
15.2.2	Verfahren der Entwässerung .....	233
15.2.2.1	Grabenentwässerung .....	233
15.2.2.2	Unterirdische Entwässerung .....	234
15.2.3	Wirkungsweise der Entwässerung .....	235
15.2.3.1	Wirkung auf bodenphysikalische Eigenschaften .....	235
15.2.3.2	Bodenchemische und bodenbiologische Wirkung .....	236
15.2.4	Ökologische Relevanz .....	236
15.2.4.1	Austrag von Agrochemikalien in Fließgewässer .....	236
15.2.4.2	Sackung organischer Böden .....	237
15.2.5	Dränmanagement .....	237
15.2.5.1	Bedarfsgerechte Steuerung von Dränanlagen .....	237
	<i>Literatur</i> .....	240
<b>16</b>	<b>Düngung von Böden</b> .....	<b>242</b>
16.1	Gründe für die Düngung .....	242
16.2	Düngerformen .....	243
16.2.1	Mineraldünger .....	243
16.2.2	Organische Dünger .....	244
16.3	Verhalten in Böden .....	246
16.3.1	Umsetzungen und Immobilisierung .....	246
16.3.1.1	Stickstoff .....	246
16.3.1.2	Phosphor .....	247
16.3.1.3	Kalium .....	248
16.3.2	Verlagerung .....	248
16.3.2.1	Nitrat .....	248
16.3.2.2	Phosphat .....	252
16.3.2.3	Kalium .....	254
16.3.3	Gasförmige Stickstoffverluste .....	254
16.3.3.1	NH <sub>3</sub> -Verflüchtigung .....	254
16.3.3.2	Denitrifikation .....	255
16.3.3.3	Nitrifikation .....	255

16.4	Austräge durch Erosion .....	256
16.5	Ökologische Relevanz .....	257
16.5.1	Nitrat-Auswaschung .....	257
16.5.2	Denitrifikation und Nitrifikation .....	258
16.5.3	NH <sub>3</sub> -Verflüchtigung .....	258
16.5.4	Phosphat .....	258
16.6	Auswirkungen auf Bodenorganismen .....	259
16.6.1	Bodenreaktion .....	259
16.6.2	Eintrag organischer Substanz .....	260
16.6.3	Nährstoffe .....	261
16.7	Nachweismethoden .....	261
16.7.1	Nitrat-Auswaschung .....	261
16.7.1.1	Lysimeter .....	261
16.7.1.2	Saugkerzen .....	262
16.7.2	Gasförmige N-Verluste .....	262
16.7.2.1	NH <sub>3</sub> -Verflüchtigung .....	262
16.7.2.2	Denitrifikation und Nitrifikation .....	263
	<i>Literatur</i> .....	263
<b>17</b>	<b>Kontamination von Böden</b> .....	<b>268</b>
17.1	Kontamination mit Stäuben .....	268
17.1.1	Staubarten und Staubquellen .....	268
17.1.2	Verhalten und Wirken in Böden .....	269
	<i>Literatur</i> .....	270
17.2	Säurebelastung .....	270
17.2.1	Versauerung und Bodenacidität .....	270
17.2.2	Ursachen .....	271
17.2.2.1	Chemie der Bodenlösung und Veränderungen biogeochemischer Kreisläufe .....	271
17.2.2.2	Atmosphärische Deposition .....	272
17.2.3	Bodenacidität und Puffer .....	273
17.2.4	Bedeutungen für Ökosysteme .....	275
17.2.4.1	Struktur- und Leistungsveränderungen .....	276
17.2.4.2	Waldschäden .....	277
17.2.5	Ausmaß der potenziellen Säurebelastung .....	278
17.2.6	Säure- und Basenzustand der Böden .....	278
17.2.7	Gewässerversauerung .....	279
17.2.8	Verfahren zur Erfassung depositionsbedingter Versauerungspotenziale und wichtiger Kenn- größen der Bodenversauerung .....	280
17.2.8.1	Gesamtdeposition und Teilflüsse .....	280
17.2.8.2	Säurewirksamkeit der Deposition .....	281
17.2.8.3	Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads .....	281
17.2.8.4	Wichtige Bodenkennwerte und Analysemethoden .....	282
	<i>Literatur</i> .....	283
17.3	Metalle .....	287
17.3.1	Einleitung .....	287
17.3.2	Definitionen, Eigenschaften und Bindungsformen .....	287
17.3.3	Vorkommen von Metallen in Gesteinen und Böden .....	290
17.3.4	Quellen und Wege von Metallen .....	293
17.3.5	Verhalten von Metallen in Böden .....	297
17.3.6	Folgen von Metallbelastungen in Böden .....	302
17.3.7	Ausmaß der Belastung .....	307
17.3.8	Nachweis von Metallbelastungen .....	309
	<i>Literatur</i> .....	310
17.4	Salze .....	313
17.4.1	Gründe einer Salzzufuhr .....	313
17.4.2	Veränderung von Bodeneigenschaften .....	315
17.4.3	Wirkung auf Pflanzen .....	316
17.4.4	Wirkung auf Bodenorganismen .....	317
17.4.5	Salzbelastung des Grundwassers .....	317
17.4.6	Meliorationen salzhaltiger Böden .....	318

	<i>Literatur</i> .....	319
17.5	Pflanzenschutzmittel .....	319
17.5.1	Bedeutung und Ausmaß der Anwendung .....	321
17.5.2	Eigenschaften, Formulierungen und Ausbringungsformen .....	322
17.5.2.1	Herbizide .....	322
17.5.2.2	Insektizide .....	324
17.5.2.3	Fungizide .....	324
17.5.2.4	Pflanzenwachstumsregulatoren .....	324
17.5.2.5	Formulierung und Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln .....	324
17.5.3	Verhalten in Böden .....	325
17.5.3.1	Bindung .....	325
17.5.3.2	Chemische und mikrobielle Umwandlung .....	329
17.5.3.3	Winderosion und Verflüchtigung .....	332
17.5.3.4	Mobilität .....	334
17.5.3.5	Anreicherung .....	336
17.5.4	Nebenwirkungen von Pflanzenschutzmitteln .....	337
17.5.4.1	Bodenorganismen und deren Leistung .....	338
17.5.4.2	Grundwasser- und Gewässerkontaminationen .....	339
	<i>Literatur</i> .....	341
17.6	Weitere organische Chemikalien .....	344
17.6.1	Einleitung .....	344
17.6.2	Wichtige Verbindungen, Quellen und Pfade .....	348
17.6.3	Belastungssituation .....	357
17.6.4	Immobilisierung .....	359
17.6.4.1	Substanzeigenschaften .....	360
17.6.4.2	Bodeneigenschaften .....	361
17.6.4.3	Bindungsmechanismen .....	362
17.6.4.4	Nicht extrahierbare Rückstände .....	363
17.6.4.5	Kompetitive Adsorption, Cosolventen, NAPL .....	363
17.6.4.6	Kinetik .....	364
17.6.5	Verlagerung .....	364
17.6.5.1	Wassertransport .....	364
17.6.5.2	Gasförmiger Transport .....	366
17.6.5.3	Verlagerung durch Turbationsprozesse .....	367
17.6.5.4	Verlagerung durch Erosion und Oberflächenabfluss .....	367
17.6.6	Verflüchtigung .....	367
17.6.7	Abbau .....	368
17.6.7.1	Chemischer Abbau .....	369
17.6.7.2	Fotochemischer Abbau .....	369
17.6.7.3	Biochemischer Abbau .....	370
17.6.7.4	Physikochemische Eigenschaften .....	372
17.6.7.5	Rahmenbedingungen .....	373
17.6.7.6	Testmethoden und Schätzmodelle .....	373
17.6.8	Bioverfügbarkeit und Bioakkumulation .....	374
17.6.9	Pflanzenaufnahme .....	375
17.6.10	Wirkung .....	377
17.6.10.1	Mikroorganismen .....	380
17.6.10.2	Bodentiere .....	380
17.6.10.3	Pflanzen .....	380
	<i>Literatur</i> .....	385
17.7	Cyanide .....	394
17.7.1	Eigenschaften, Eintragspfade, Gehalte in Böden .....	394
17.7.2	Prozesse und Verhalten im Boden .....	395
17.7.3	Analytik und Bodenschutz .....	396
	<i>Literatur</i> .....	396
17.8	Radionuklide .....	397
17.8.1	Natürliche Gehalte .....	398
17.8.2	Einträge .....	400
17.8.2.1	Natürliche Radionuklide .....	400
17.8.2.2	Einträge durch den Betrieb kerntechnischer Anlagen .....	400

17.8.2.3	Kernwaffenexplosionen .....	402
17.8.3	Bodenstrahlung und Strahlenexposition .....	403
17.8.4	Verhalten in Böden .....	403
17.8.4.1	Strontium .....	405
17.8.4.2	Cäsium .....	406
17.8.4.3	Uran .....	407
17.8.4.4	Plutonium .....	407
17.8.4.5	Radon .....	408
17.8.4.6	Radium .....	409
17.8.4.7	Iod .....	409
17.8.4.8	Tritium .....	409
17.8.4.9	Radiokohlenstoff .....	410
17.8.5	Übergang von Radionukliden in die Pflanze .....	411
17.8.6	Auswirkungen auf die belebte Umwelt .....	412
17.8.7	Böden als Quelle und Senke für Radionuklide .....	412
	<i>Literatur</i> .....	416
17.9	Pathogene Agenzien und gentechnisch veränderte Organismen .....	416
17.9.1	Einführung und Definitionen .....	416
17.9.2	Quellen und Verbleib in Böden .....	416
17.9.3	Nematoden .....	417
17.9.4	Bakterien .....	417
17.9.5	Viren .....	417
17.9.6	Prionen .....	419
17.9.7	Gentechnisch veränderte Organismen (GVO) .....	419
	<i>Literatur</i> .....	420
<b>18</b>	<b>Verwertung und Deponierung von Abfällen</b> .....	<b>422</b>
18.1	Abfallstoffe – Art und Mengen .....	422
	<i>Literatur</i> .....	424
18.2	Abfalldeponien .....	425
18.2.1	Grundsätzliches .....	425
18.2.2	Deponierung von Abfall .....	425
18.2.3	Prozesse nach der Abfallablagerung .....	430
18.2.4	Belastungen durch Sickerwässer und Gase .....	431
18.2.5	<i>Literatur</i> .....	432
18.3	Bioabfallkompostanwendung .....	433
	<i>Literatur</i> .....	435
18.4	Abwasserverwertung .....	436
18.4.1	Abwasserbehandlung und -nutzung .....	437
18.4.2	Vorbehandlung und Ausbringung .....	437
18.4.3	Wirkungen auf den Boden .....	439
18.4.4	Wirkungen auf Kulturpflanzen .....	442
18.4.5	Eignung der Böden .....	443
18.4.6	Ausmaß landwirtschaftlicher Abwasserverwertung in Deutschland .....	443
	<i>Literatur</i> .....	445
18.5	Klärschlammasbringung .....	446
18.5.1	Vorbehandlung, Anfall, Zusammensetzung von Klärschlamm .....	446
18.5.1.1	Vorbehandlung .....	446
18.5.1.2	Anfall .....	447
18.5.1.3	Zusammensetzung .....	447
18.5.2	Klärschlamminsatz in der Landwirtschaft .....	451
18.5.2.1	Ausbringetechnik und -menge .....	451
18.5.2.2	Wirkung auf Bodeneigenschaften und -fruchtbarkeit .....	451
18.5.3	Klärschlamminsatz im Landschaftsbau .....	452
	<i>Literatur</i> .....	453
<b>19</b>	<b>Gase und Wärme</b> .....	<b>455</b>
19.1	Einführung .....	455
19.2	Gaskontaminationen der Böden .....	455
19.2.1	Ursachen .....	455

19.2.2	Verhalten in Böden .....	455
19.2.3	Wirkungen auf Böden und Bodenorganismen .....	455
19.2.4	Nachweis der Bodengase und Lecksuche .....	457
19.2.5	Leckagegase und Baumsterben .....	457
19.3	Anthropogene Bodenerwärmung .....	458
19.3.1	Ursachen .....	458
19.3.2	Wärmeverhalten im Boden .....	460
19.3.3	Wärmewirkungen auf Böden und Bodenorganismen .....	460
19.4	Anthropogene Bodenkühlung .....	462
19.4.1	Ursachen .....	462
19.4.2	Kältewirkungen in Böden .....	463
	<i>Literatur</i> .....	464
<b>20</b>	<b>Anthropogene Böden</b> .....	465
20.1	Einführung .....	465
20.2	Anthropogene Substrate .....	465
20.2.1	Umgelagertes Substrat natürlicher Lithogenese .....	465
20.2.2	Technogene Substrate .....	467
20.3	Böden unter forstwirtschaftlicher Nutzung .....	469
20.4	Böden unter Acker- und Grünlandnutzung .....	470
20.5	Böden des Garten- und Weinbaus .....	473
20.6	Böden entlang der Verkehrswege .....	473
20.7	Böden städtisch-industrieller Verdichtungsräume .....	474
20.7.1	Standort- und Bodeneigenschaften .....	474
20.7.2	Bodenentwicklung .....	477
20.8	Böden von Militärstandorten .....	478
20.9	Bodenklassifikation .....	479
	<i>Literatur</i> .....	482
<b>21</b>	<b>Wirkungen globaler Klimaveränderung</b> .....	485
21.1	Einführung .....	485
21.2	Wirkung auf Landböden .....	486
21.3	Wirkung auf Küstenböden .....	487
21.4	Wirkung auf Permafrostböden .....	488
	<i>Literatur</i> .....	488
<b>TEIL III Bodeninventur als Grundlage des Bodenschutzes</b> .....		489
<b>22</b>	<b>Einführung</b> .....	489
	<i>Literatur</i> .....	489
<b>23</b>	<b>Bodeninformationssysteme</b> .....	490
23.1	Warum benötigen wir Informationen zu Böden? .....	490
23.2	Ziele des Aufbaus und der Verwendung von Bodeninformationssystemen .....	491
23.3	Informationsgrundlagen .....	491
23.3.1	Bodenkundlich-geowissenschaftliche Grundlagen .....	491
23.3.2	Bodenkarten .....	491
23.3.3	Daten der Bodenschätzung .....	494
23.3.4	Kataster .....	494
23.3.5	Stoffdaten .....	494
23.3.6	Bodenuntersuchungen .....	494
23.3.7	Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) .....	494
23.3.8	Messkampagnen .....	495
23.4	Methoden der Auswertungen .....	495
23.4.1	Statistik, Geostatistik, Klassenbildung .....	495
23.4.2	Methodenbanken .....	496
23.4.3	Auswertungen in Form von Karten .....	496
23.5	Technik in Bodeninformationssystemen .....	496
23.5.1	Interne Nutzung .....	496

23.5.2	Öffentliche Nutzung .....	496
23.5.3	Datenbanken .....	496
23.5.4	GIS-orientierte Systeme .....	497
23.5.5	Web-orientierte Systeme .....	497
23.5.6	Portale .....	497
23.5.7	Portal U .....	497
23.5.8	EUGRIS .....	497
23.6	Datenaustausch und Berichterstattung .....	497
23.6.1	National .....	497
23.6.2	Europäische Union .....	498
23.6.3	Netzwerke .....	498
23.7	Ausblick .....	498
	<i>Literatur</i> .....	498
<b>24</b>	<b>Bodenkartierung und Auswertung von Bodenkarten</b> .....	<b>500</b>
24.1	Einführung .....	500
24.2	Grundlagen der Bodenkartierung .....	500
24.3	Flächeninventur, Bodenkarte und Bodenvergesellschaftung .....	501
24.4	Arbeitsschritte der Bodenkartierung .....	503
24.5	Technische Durchführung von Bohrungen und Anlage von Schürfgruben .....	505
24.6	Arbeitsgeräte und Unterlagen der Bodenkartierung .....	505
24.7	Auswertungs- und Anwendungsmöglichkeiten von Bodenkarten .....	506
	<i>Literatur</i> .....	507
<b>25</b>	<b>Precision Farming</b> .....	<b>509</b>
25.1	Precision Farming – standortangepasste teilschlagspezifische Bewirtschaftung .....	509
25.2	Geodaten zur Beschreibung der Bodenheterogenität .....	509
25.2.1	Vorhandene Geodaten .....	509
25.2.2	Fern- und Naherkundung .....	511
25.3	On site-Erhebungen .....	512
25.4	Geodateninfrastrukturbasierte Datenerhebung .....	513
	<i>Literatur</i> .....	514
<b>TEIL IV Schutz von Böden</b> .....		<b>515</b>
<b>26</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>515</b>
	<i>Literatur</i> .....	516
<b>27</b>	<b>Bodenschutzrecht</b> .....	<b>517</b>
27.1	Einführung .....	517
27.2	Europarecht .....	519
27.3	Bodenschutz im Völkerrecht .....	520
27.4	Deutschland .....	521
27.4.1	Überblick über die gesetzlichen Regelungen des Bodenschutzes .....	521
27.4.2	Verfassungsrecht .....	522
27.4.3	Qualitativer Bodenschutz nach Bundes-Bodenschutzgesetz .....	522
27.4.3.1	Grundlagen .....	522
27.4.3.2	Behördliche Eingriffsermächtigungen .....	523
27.4.3.3	Vermeidung und Begrenzung von Bodenbelastungen .....	524
27.4.3.4	Sanierung .....	524
27.4.3.5	Altlasten .....	524
27.4.3.6	Gefährdungsabschätzung und Untersuchung .....	524
27.4.3.7	Nutzungsabhängigkeit der Sanierung .....	525
27.4.3.8	Verhältnismäßigkeit und Prioritätensetzung .....	525
27.4.3.9	Adressaten .....	525
27.4.3.10	Adressatenauswahl .....	526
27.4.3.11	Kosten von Sanierungs- und Untersuchungsmaßnahmen .....	527
27.4.3.12	Ausgleich zwischen Verantwortlichen .....	527
27.4.3.13	Wertausgleich .....	527

27.4.3.14	Sanierung durch Behörden	527
27.4.3.15	Bodenschutzrechtliche Anordnungen und Vorhabenzulassungsrecht	527
27.4.3.16	Bodensanierung bei Bauvorhaben	528
27.4.3.17	Sanierungsplan	528
27.4.3.18	Überwachung	528
27.4.3.19	Amtshaftung	528
27.4.3.20	Planung	528
27.4.4	Qualitativer Bodenschutz außerhalb des BBodSchG	528
27.4.4.1	Immissionsschutzrecht	528
27.4.4.2	Fachplanungsrecht	529
27.4.4.3	Umweltverträglichkeitsprüfung	529
27.4.4.4	Stoffrecht (Pflanzenschutz, Chemikalien, Düngemittel)	529
27.4.5	Quantitativer Bodenschutz	530
27.4.5.1	Naturschutz	530
27.4.5.2	Planungsrecht (Raumordnung/Bauleitplanung)	530
27.4.5.3	Bauleitplanung	530
27.4.5.4	Entsiegelung	531
27.5	Österreich	531
27.5.1	Überblick über die gesetzlichen Regelungen des Bodenschutzes	531
27.5.2	Altlasten	531
27.5.3	Andere Bodenbelastungen	531
27.5.4	Quantitativer Bodenschutz	532
27.5.5	Weitere Vorschriften mit Bedeutung für den Bodenschutz	532
27.6	Schweiz	532
27.6.1	Überblick über die gesetzlichen Regelungen des Bodenschutzes	532
27.6.2	Belastete Standorte	532
27.6.3	Bodenbelastungen	533
27.6.4	Quantitativer Bodenschutz	533
27.6.5	Weitere Vorschriften mit Bedeutung für den Bodenschutz	533
	<i>Literatur</i>	533
<b>28</b>	<b>Bodenschutzrelevante Planungen</b>	535
28.1	Einführung	535
28.2	Vorsorgeorientierte Planungsinstrumente	535
28.2.1	Landschaftsplanung	535
28.2.2	Räumliche Gesamtplanung	538
28.3	Bodenschutz im Rahmen von Verträglichkeitsprüfungen	539
28.3.1	Strategische Umweltprüfung SUP	540
28.3.2	Umweltverträglichkeitsprüfung UVP	540
28.4	Naturschutzrechtliche Eingriffsregelung und landschaftspflegerische Begleitplanung	541
28.5	Bodenrelevante landwirtschaftliche Fachplanungen	542
	<i>Literatur</i>	542
<b>29</b>	<b>Bodenschutzrelevante Planungen im urbanindustriellen und suburbanen Raum</b>	544
29.1	Einleitung	544
29.2	Generelle Regelung des Bodenschutzes	544
29.3	Spezieller Bodenschutz in der Stadtplanung	544
29.3.1	Bedarf bodenkundlicher Daten in der urbanen Planung	544
29.3.2	Aufgaben der Stadtplanung	545
29.3.2.1	Stadtentwicklungsplanung	545
29.3.2.2	Bauleitplanung	545
29.3.2.3	Flächennutzungsplan (vorbereitender Bauleitplan)	547
29.3.2.4	Bebauungsplan (verbindlicher Bauleitplan)	547
29.3.2.5	Zulässigkeit von Vorhaben und das Bauen im Außenbereich	548
29.4	Datenbedarf zum Bodenschutz für Fachplanungen	548
29.5	Anforderungsprofil an Bodendaten	549
29.6	Probleme der Funktionsbewertung	550
29.7	Klassifizierung von Bodenfunktionen	551
29.8	Zielsysteme des Bodenschutzes	551
29.9	Umsetzung im urbanen und suburbanen Bereich	553

29.10	Bodenschutzplanung – eine Fallstudie .....	554
29.10.1	Ziel und Gebietsauswahl .....	554
29.10.2	Datensituation .....	554
29.10.3	Bodenformenkarte von Eckernförde .....	554
29.10.4	Nutzungsentwicklung, anthropogene Überformung und relative Naturnähe .....	555
29.10.5	Oberflächennaher Bodenwasserhaushalt .....	557
29.10.6	Zielsystem des Bodenschutzes für die Stadt Eckernförde .....	558
29.10.7	Die kartografische Umsetzung der Bewertung .....	558
29.10.8	Zusammenfassende planerische Empfehlungen .....	561
	<i>Literatur</i> .....	563
<b>30</b>	<b>Schutz vor Versiegelung</b> .....	<b>565</b>
30.1	Einführung .....	565
30.2	Gesetzliche Regelungen .....	565
30.2.1	Bundesbodenschutzgesetz .....	565
30.2.2	Raumordnung und Bauleitplanung .....	565
30.2.3	Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) und -prüfung (UVP) .....	566
30.3	Beispiele für die Vermeidung von Versiegelung auf kommunaler Ebene .....	566
30.3.1	Planungsvorgaben .....	566
30.3.2	Bodenversiegelungsausgleichsverordnung .....	566
30.3.3	Biotopflächenfaktor .....	566
30.4	Finanzielle Anreize .....	567
	<i>Literatur</i> .....	567
<b>31</b>	<b>Schutz vor Verdichtung und negativen Bearbeitungsfolgen</b> .....	<b>568</b>
31.1	Schutz vor Verdichtung und deren Folgen .....	568
31.1.1	Technische Maßnahmen .....	568
31.1.2	Betriebswirtschaftliche und pflanzenbauliche Maßnahmen .....	570
31.2	Vermeidung und Verminderung negativer Folgen der Bodenbearbeitung .....	571
31.3	Möglichkeit der Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit .....	573
	<i>Literatur</i> .....	574
<b>32</b>	<b>Schutz vor Bodenabtrag und dessen Folgen</b> .....	<b>575</b>
32.1	Schutz vor Wassererosion .....	575
	<i>Literatur</i> .....	578
32.2	Schutz vor Winderosion .....	578
32.2.1	Maßnahmen zur Reduzierung der bodennahen Windgeschwindigkeit .....	578
32.2.2	Maßnahmen zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Bodenoberfläche .....	580
	<i>Literatur</i> .....	581
32.3	Schutz vor Massenversatz am Hang .....	582
32.3.1	Einleitung .....	582
32.3.2	Lebendverbau .....	582
32.3.3	Maßnahmen mit technogenen Baustoffen .....	584
32.3.4	Kombinierte Bauweisen .....	585
	<i>Literatur</i> .....	585
<b>33</b>	<b>Schutz vor stofflichen Belastungen und deren Folgen</b> .....	<b>586</b>
33.1	Schutz vor Überdüngung .....	586
33.1.1	Düngebedarfsermittlung .....	586
33.1.2	Maßnahmen zur Verminderung von Überdüngung .....	587
33.1.2.1	Bemessung der Stickstoffgabe .....	587
33.1.2.2	Administrative Maßnahmen .....	590
	<i>Literatur</i> .....	590
33.2	Schutz der Böden vor verstärkter Versauerung .....	591
33.2.1	Prinzipielles .....	591
33.2.2	Umsetzung der Umweltpolitik zur Reinhaltung der Luft .....	591
33.2.3	Eingriffe in Stoffkreisläufe .....	591
33.2.4	Kalkung von Wäldern .....	591
33.2.5	Düngung und Kalkung von Agrarstandorten .....	592
	<i>Literatur</i> .....	593
		594

33.3	Schutz vor Metallen und deren Folgen .....	595
33.3.1	Einleitung .....	595
33.3.2	Vermeidung des Metalleintrags .....	595
33.3.3	Nutzungsbeschränkungen bei stärkerer Belastung .....	595
33.3.4	Prognose der Empfindlichkeit von Böden gegenüber Metallbelastungen .....	596
33.3.5	Verbesserung der Bodenpufferung .....	600
	<i>Literatur</i> .....	600
33.4	Schutz vor Salzen und Sanierung .....	601
33.4.1	Einleitung .....	601
33.4.2	Grundwasserregulation durch Dränage und Vorflut .....	601
33.4.3	Salzauswaschung mit salzarmem Bewässerungswasser .....	602
33.4.4	Meliorationsdüngung .....	603
33.4.5	Bodenlockerung .....	603
33.4.6	Chemomelioration .....	604
33.4.7	Biomelioration .....	604
33.4.8	Vermeidung von Streusalzschäden in Böden arider und humider Klimate .....	604
	<i>Literatur</i> .....	605
33.5	Schutz vor Pflanzenschutzmittelbelastung .....	606
33.5.1	Gesetzliche Normen für umweltschonenden Einsatz .....	606
33.5.2	Umweltschonender Einsatz .....	608
33.5.3	Alternative Maßnahmen gegen Verunkrautung .....	612
33.5.3.1	Vorbeugende Maßnahmen .....	612
33.5.3.2	Thermische Unkrautbekämpfung .....	612
33.5.3.3	Mechanische Unkrautbekämpfung .....	612
33.5.3.4	Einsatz von Düngemitteln mit herbizider Wirkung .....	614
33.5.4	Biotechnische Verfahren der Schädlingsbekämpfung .....	614
33.5.5	Biologische Maßnahmen der Schädlingsbekämpfung .....	614
33.5.6	Konzept des integrierten Pflanzenbaus .....	616
	<i>Literatur</i> .....	617
33.6	Schutz vor weiteren anthropogenen Organika-Einträgen .....	618
33.6.1	Einleitung .....	618
33.6.2	Vorsorge durch Überwachung und Bewertung von Schadstoffbelastungen .....	619
33.6.3	Vorsorge durch Abschätzen der Bodenempfindlichkeit .....	619
33.6.4	Vorsorge-, Richt- oder Grenzwerte .....	619
	<i>Literatur</i> .....	622
33.7	Schutz vor Kontaminationen durch Deponien .....	624
	<i>Literatur</i> .....	625
33.8	Schutz vor Kontaminationen bei Reststoffverwertung .....	625
33.8.1	Einführung .....	625
33.8.2	Gesetzliche Grundlagen .....	625
33.8.2.1	Abfallrecht .....	625
33.8.2.2	Klärschlammverordnung .....	626
33.8.2.3	Bioabfallverordnung .....	626
33.8.2.4	Bodenschutzgesetzgebung .....	628
33.8.3	Verbringung von Abfällen auf Böden .....	628
33.8.4	Grundsätzlicher Schutz vor Kontamination .....	630
	<i>Literatur</i> .....	630
<b>34</b>	<b>Schutz durch Erziehung</b> .....	632
34.1	Notwendigkeit, Schwierigkeiten und Möglichkeiten .....	632
34.1.1	Notwendigkeit .....	632
34.1.2	Schwierigkeiten .....	632
34.1.3	Möglichkeiten .....	633
34.2	Bodenschutz im Schul- und Hochschulbereich .....	634
34.3	Bodenschutz in der außerschulischen Bildungsarbeit .....	636
34.4	Unterrichtsmaterialien zum Bodenschutz .....	637
34.4.1	Bücher, Artikel und Arbeitshilfen .....	638
34.4.2	Diaserien, Filme, Videos und Multimediaerzeugnisse .....	638
34.4.3	Internet .....	639
	<i>Literatur</i> .....	639

<b>TEIL V Sanierung, Sicherung und Renaturierung von Böden</b> .....	643
<b>35 Einführung</b> .....	643
<i>Literatur</i> .....	644
<b>36 Entsiegelungspotenziale und Entsiegelung von Böden</b> .....	645
36.1 Einleitung .....	645
36.2 Nutzen und Risiko von Entsiegelungsmaßnahmen .....	645
36.3 Erfassung von Entsiegelungspotenzialen .....	646
36.4 Entsiegelungstechniken .....	646
36.4.1 Teilversiegelung und Belagsänderung .....	647
36.4.2 Versickerung von Regenwasser .....	647
<i>Literatur</i> .....	648
<b>37 Kultivierung aufgetragener Böden</b> .....	649
37.1 Kultivierung von Abgrabungsflächen am Beispiel der drei Braunkohlentagebaureviere Rheinisches Revier, Mitteldeutsches Revier und Lausitzer Revier .....	649
37.2 Kultivierung von Hafenschlick-Spülflächen am Beispiel Emden .....	651
37.3 Kultivierung von Deponieflächen .....	651
<i>Literatur</i> .....	653
<b>38 Renaturierung von Feuchtgebieten</b> .....	654
38.1 Definition und Bedeutung der Feuchtgebiete .....	654
38.2 Verluste an Feuchtgebieten .....	654
38.3 Begriffe, Ziele, Strategien .....	655
38.4 Einzelne Feuchtgebiete .....	655
38.4.1 Moore .....	655
38.4.2 Bach- und Flussauen .....	657
38.4.3 Kleine Stillgewässer .....	658
38.4.4 Quellen .....	658
38.4.5 Weitere stau- und grundwasservernässte Flächen .....	659
38.4.6 Salzwiesen .....	659
<i>Literatur</i> .....	660
<b>39 Sanierung verdichteter Böden</b> .....	662
39.1 Behebung von Verdichtungen in der Krume .....	662
39.2 Beseitigung von Unterbodenverdichtungen und -verfestigungen .....	663
39.3 Auflockerung von Verdichtungen durch natürliche Faktoren und Prozesse .....	665
39.4 Dauer der Auflockerung .....	665
<i>Literatur</i> .....	666
<b>40 Sanierung und Sicherung kontaminierter Böden und Substrate</b> .....	667
40.1 Einleitung .....	667
40.2 Dekontaminationsverfahren .....	668
40.2.1 Ex situ-Sanierungsverfahren (Substratsanierungen) .....	670
40.2.2 In situ-Sanierungsverfahren .....	672
40.2.2.1 Verfahren zum physikalischen Schadstoffaustrag .....	673
40.2.2.2 Verfahren mit hydraulischem Wirkprinzip .....	676
40.2.2.3 Verfahren mit chemischem Wirkprinzip .....	679
40.2.2.4 Verfahren mit biologischem Wirkprinzip .....	681
40.3 Sicherungsverfahren .....	684
40.3.1 Verfahren gegen äußere Einflüsse, die eine Ausbreitung der Schadstoffe bewirken können .....	685
40.3.2 Verfahren, die unmittelbar einer Ausbreitung der Schadstoffe entgegenwirken .....	685
40.3.3 Reaktive Wände, Funnel und Gates .....	686
40.3.4 Biologische Reinigungswände .....	687
40.4 Monitored Natural Attenuation .....	687
40.5 Sanierung versalzter Böden und nach Belastung mit Radionukliden .....	688
<i>Literatur</i> .....	689

<b>TEIL VI Farbtafeln und Anhänge</b> .....	691
<b>Farbtafeln</b> .....	691
<b>Anhang A: Abkürzungen</b> .....	717
<b>Anhang B: Maßeinheiten</b> .....	718
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	719