

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung: Böden – die Haut der Erde	1
1.1	Böden als Naturkörper in Ökosystemen	2
1.2	Funktionen von Böden in der Ökosphäre	5
1.3	Böden als offene und schützenswerte Systeme	7
	Literatur	8
2	Anorganische Komponenten der Böden – Minerale und Gesteine	11
2.1	Der Kreislauf der Gesteine	12
2.2	Minerale	12
2.2.1	Allgemeines	12
2.2.2	Struktur der Silicate	14
2.2.3	Primäre (lithogene, pyrogene) Silicate	16
2.2.3.1	Feldspäte	16
2.2.3.2	Glimmer und Chlorite	16
2.2.3.3	Pyroxene, Amphibole und Olivine	19
2.2.3.4	Seltene Silicate	19
2.2.4	Tonminerale	20
2.2.4.1	Allgemeine Eigenschaften	20
2.2.4.2	Kristallstruktur und Einteilung	20
2.2.4.3	Kaolinit und Halloysit	21
2.2.4.4	Illite und Glaukonite	22
2.2.4.5	Vermiculite und Smectite	23
2.2.4.6	Pedogene Chlorite	24
2.2.4.7	Palygorskit und Sepiolit	25
2.2.4.8	Allophan, Imogolit und Hisingerit	25
2.2.4.9	Wechselagerungsminerale	26
2.2.5	Bildung und Umwandlung der Tonminerale	27
2.2.5.1	Veränderung der Zwischenschicht-Besetzung	27
2.2.5.2	Neubildung aus Zerfallsprodukten von Silicaten	27
2.2.5.3	Tonmineralumwandlung	28
2.2.6	Oxide und Hydroxide	28
2.2.6.1	Siliciumoxide	29
2.2.6.2	Aluminiumoxide	30
2.2.6.3	Eisenoxide	31
2.2.6.4	Titanoxide	35
2.2.6.5	Manganoxide	36
2.2.7	Carbonate, Sulfate, Sulfide und Phosphate	36
2.3	Gesteine	37
2.3.1	Magmatite	37
2.3.2	Sedimente und Sedimentite	38
2.3.2.1	Allgemeines	38
2.3.2.2	Grobkörnige Sedimente (Psephite)	43

2.3.2.3	Sande und Sandsteine (Psammite)	43
2.3.2.4	Schluffe und Schluffsteine (Silte), Tone und Tonsteine (Pelite)	43
2.3.2.5	Carbonatgesteine und Mergel	43
2.3.2.6	Quartäre Sedimente	44
2.3.3	Metamorphite	45
2.3.4	Anthropogene Substrate	46
2.4	Verwitterung	48
2.4.1	Physikalische Verwitterung	48
2.4.2	Chemische Verwitterung	50
2.4.2.1	Auflösung durch Hydratation	50
2.4.2.2	Hydrolyse und Protolyse	51
2.4.2.3	Oxidation und Komplexierung	53
2.4.3	Rolle der Biota	54
2.4.4	Verwitterungsstabilität	54
2.4.4.1	Thermodynamische Stabilitätsverhältnisse	55
2.4.4.2	Kinetik der chemischen Verwitterung	57
2.4.4.3	Verwitterungsgrad	58
2.5	Mineralbestand von Böden	59
	Literatur	61
3	Organische Bodensubstanz	63
3.1	Art und Menge der organischen Reste	66
3.1.1	Zusammensetzung der Pflanzenreste	67
3.1.2	Zusammensetzung der mikrobiellen Reste	70
3.2	Abbau- und Umwandlungsreaktionen im Boden	70
3.2.1	Abbauwege verschiedener Stoffgruppen	71
3.2.2	Festlegung der organischen Substanz im Mineralboden	74
3.2.2.1	Stabilisierung durch Wechselwirkungen mit der Mineralphase	74
3.2.2.2	Stabilisierung durch räumliche Trennung	77
3.2.2.3	Anteile von Pflanzenresten und organo-mineralischen Verbindungen	79
3.3	Zusammensetzung und Eigenschaften der organischen Substanz in Böden	80
3.3.1	Bindungsformen von C, N, P und S in der organischen Bodensubstanz	80
3.3.2	Eigenschaften der organischen Bodensubstanz	84
3.4	Gehalte und Mengen der organischen Substanz in Böden	85
3.5	Dynamik der organischen Substanz im Boden	89
3.5.1	Umsetzungsraten und Verweilzeit der organischen Substanz im Boden	89
3.5.2	Abschätzung der Umsatzzeit	91
3.5.3	Modelle des Kohlenstoffumsatzes	94
3.5.4	Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz: Böden als Quelle und Senke für Kohlenstoff	95
	Literatur	99
4	Bodenorganismen und ihr Lebensraum	103
4.1	Bodenorganismen	105
4.1.1	Bakterien, Archaeen und Viren	105
4.1.2	Pilze	108
4.1.3	Protisten	109

4.1.4	Bodentiere (Mikro-, Meso-, Makro- und Megafauna)	111
4.1.5	Anzahl, Biomasse und Diversität von Bodenorganismen	116
4.1.5.1	Abundanz und Biomasse von Organismen	116
4.1.5.2	Diversität von Organismen	118
4.1.5.3	Räumliche und zeitliche Variabilität von Bodenorganismen	119
4.1.6	Bodenorganismen als Lebensgemeinschaft	121
4.1.6.1	Wechselbeziehungen zwischen Bodenorganismen	121
4.1.6.2	Wechselwirkung zwischen Bodenmikroorganismen und Pflanzen in der Rhizosphäre	122
4.1.6.3	Symbiosen zwischen Mikroorganismen und Pflanzen	124
4.1.6.4	Wechselwirkungen zwischen Bodenmikroorganismen und Bodentieren	126
4.2	Lebensbedingungen	127
4.2.1	Die Böden als Nährstoff- und Energiequelle für Bodenorganismen	127
4.2.2	Wasser und Atmosphäre (Sauerstoff)	129
4.2.3	pH-Wert und Redoxpotenzial	130
4.2.4	Temperatur	131
4.3	Funktionen von Bodenorganismen	132
4.3.1	Funktion von Bodenorganismen in Stoffkreisläufen	132
4.3.1.1	Nahrungsnetze	132
4.3.1.2	Kohlenstoffkreislauf	133
4.3.1.3	Stickstoffkreislauf	135
4.3.2	Funktion von Bodenorganismen bei Redoxreaktionen	139
4.3.3	Funktion von Bodenorganismen bei der Stabilisierung des Bodengefüges	140
4.4	Bodenorganismen als Bioindikatoren	141
4.4.1	Einfluss von Kulturmaßnahmen auf Bodenorganismen	141
4.4.1.1	Mineralische und organische Düngung	141
4.4.1.2	Bodenbearbeitung	143
4.4.1.3	Fruchtfolge	144
4.4.1.4	Biologische Schädlingsbekämpfung	144
4.4.1.5	Nebenwirkungen von Pflanzenschutzmitteln	145
4.4.2	Einfluss von Schadstoffen	145
4.4.2.1	Schwermetalle	145
4.4.2.2	Organische Schadstoffe	146
4.4.3	Klimawandel	147
	Literatur	148
5	Chemische Eigenschaften und Prozesse	151
5.1	Bodenlösung	153
5.1.1	Gelöste Stoffe im Regenwasser	153
5.1.2	Zusammensetzung der Bodenlösung	154
5.1.2.1	Gelöste anorganische Stoffe	154
5.1.2.2	Gelöste organische Substanzen (DOM)	156
5.2	Gasgleichgewichte	157
5.3	Komplexbildung und Spezierung	158
5.3.1	Ionenstärke, Konzentration und Aktivität	158
5.3.2	Lösungsspezierung	160
5.3.2.1	Gelöste Komplexe und Ionenpaare	160
5.3.2.2	Massenwirkungsgesetz und Stabilitätskonstanten	162

5.3.2.3	Massenbilanzgleichungen	162
5.3.2.4	Computerprogramme für Speziierungsrechnungen	162
5.4	Löslichkeit und Lösungskinetik.	162
5.4.1	Löslichkeitskonstante, Ionenaktivitätsprodukt und Sättigungsindex.	163
5.4.2	Stabilitätsdiagramme	163
5.4.3	Kinetik von Lösungs- und Fällungsreaktionen	166
5.5	Sorption.	167
5.5.1	Reaktive Oberflächen und Oberflächenladung	168
5.5.1.1	Spezifische Oberfläche.	169
5.5.1.2	Bedeutung der Oberflächenladung	170
5.5.1.3	Permanente Oberflächenladung	170
5.5.1.4	Variable Oberflächenladung und Ladungsnullpunkt	170
5.5.1.5	Oberflächenladung einzelner Bodenkomponenten.	171
5.5.1.6	Ladungsverhältnisse in Böden.	173
5.5.2	Ionenaustausch	174
5.5.2.1	Kationenaustauschkapazität (KAK).	174
5.5.2.2	Kationenaustausch	176
5.5.3	Oberflächenkomplexierung von Kationen und Anionen	178
5.5.4	Sorption organischer Substanzen an Mineraloberflächen	180
5.5.5	Sorptionskinetik.	181
5.5.6	Modellierung von Sorptionsprozessen	182
5.5.6.1	Sorptionsisothermen	182
5.5.6.2	Modellierung des Kationenaustausches.	184
5.5.6.3	Modellierung der diffusen Doppelschicht	185
5.5.6.4	Modellierung der Oberflächenkomplexierung an Mineraloberflächen	187
5.5.6.5	Modellierung der Kationenbindung an organischen Substanzen	187
5.6	Bodenreaktion und pH-Pufferung	188
5.6.1	Bodenreaktion	188
5.6.1.1	Alkalische Böden	188
5.6.1.2	Saure Böden	189
5.6.1.3	Bodenversauerung und Kationenbelag	190
5.6.2	Bodenacidität und Basenneutralisationskapazität (BNK)	191
5.6.3	H ⁺ -Quellen	192
5.6.3.1	Eintrag durch Niederschläge	192
5.6.3.2	Bildung von Kohlensäure durch Bodenatmung	192
5.6.3.3	Abgabe von organischen Säuren	193
5.6.3.4	Abgabe von H ⁺ durch Pflanzenwurzeln	193
5.6.3.5	Oxidation von NH ₄ ⁺ zu NO ₃ ⁻	194
5.6.3.6	Oxidation von löslichen Fe ²⁺ - und Mn ²⁺ -Ionen und von Fe-Sulfiden	194
5.6.4	pH-Pufferung, Bodenversauerung und Säureneutralisationskapazität (SNK).	195
5.6.4.1	Pufferung durch Carbonate	195
5.6.4.2	Pufferung durch Oberflächen mit permanenter Ladung	197
5.6.4.3	Pufferung durch Oberflächen mit variabler Ladung.	197
5.6.4.4	Pufferung durch Silicatverwitterung	197
5.6.5	Kalkung saurer Böden	199
5.6.5.1	Optimaler pH-Wert landwirtschaftlich genutzter Böden	199
5.6.5.2	Kalkung und Kalkbedarf	199

5.7	Redoxreaktionen und Redoxdynamik	201
5.7.1	Redoxreaktionen und Redoxpotenzial	201
5.7.1.1	Redoxreaktionen	201
5.7.1.2	Redoxpotenzial	202
5.7.2	pe-pH-Diagramme	203
5.7.3	Kinetik von Redoxreaktionen	206
5.7.4	Redoxprozesse in Böden	207
5.7.5	Redoxpotenziale von Böden	208
	Literatur	209
6	Physikalische Eigenschaften und Prozesse	213
6.1	Körnung und Lagerung	215
6.1.1	Entstehung der Körner	215
6.1.2	Größe der Körner	216
6.1.3	Einteilung der Körner	217
6.1.3.1	Korngrößenfraktionen	217
6.1.3.2	Mischungen, Korngrößenverteilungen	218
6.1.3.3	Bestimmung der Korngrößenverteilung	219
6.1.4	Eigenschaften der Körner	221
6.1.4.1	Zusammensetzung und Form	221
6.1.4.2	Oberflächen	221
6.1.5	Häufige Verteilung der Körner	222
6.1.5.1	Ursachen	222
6.1.5.2	Landschaftsbezogene Vorkommen	223
6.1.6	Lagerung der Primärteilchen	224
6.1.6.1	Abstützung und Berührung	224
6.1.6.2	Kennziffern der Lagerung	225
6.1.6.3	Porenanteile in Böden	226
6.1.6.4	Porenformen	227
6.1.6.5	Porengrößenverteilung	228
6.1.7	Zeitlich bedingte Veränderungen	230
6.1.7.1	Veränderungen der Körnung	230
6.1.7.2	Veränderungen der Lagerung	230
6.2	Wechselwirkungen zwischen fester und flüssiger Phase	232
6.2.1	Flockung und Peptisation	232
6.2.1.1	Energetische Wechselwirkung zwischen Bodenkolloiden	233
6.2.1.2	Einfluss von Kationenbelag und Wertigkeit auf die Flockung	235
6.2.1.3	Einfluss von Polymeren auf Flockung und Dispergierung	235
6.2.1.4	Aufbau der Flocken	237
6.2.1.5	Einfluss des elektrokinetischen Potenzials	238
6.2.2	Schrumpfung und Quellung	238
6.2.2.1	Schrumpfung	239
6.2.2.2	Quellung	241
6.2.3	Benetzbarkeit	243
6.2.4	Kohäsion, Konsistenz und Strömungsdruck	245
6.3	Bodengefüge	246
6.3.1	Gefügemorphologie	247
6.3.1.1	Makrogefüge	247

6.3.1.2	Mikrogefüge	251
6.3.1.3	Riss- und Röhrensysteme	252
6.3.2	Spannungen und Verformungen	252
6.3.2.1	Kräfte am Korn	252
6.3.2.2	Kräfte und Spannungen im Bodenverband	254
6.3.2.3	Einfluss des Wassers	258
6.3.3	Stabilität des Bodengefüges	260
6.3.3.1	Stabilisierende Stoffe	262
6.3.3.2	Verschlämmung, Verknnetung und Verkrustung.	264
6.3.3.3	Strömungsdruck, Erdfließen.	265
6.3.4	Biologische, klimatische und anthropogene Einflüsse auf das Bodengefüge	266
6.3.4.1	Gefüge eines Bodenprofils als Gleichgewichtslage	266
6.3.4.2	Natürliche Bodenentwicklung	267
6.3.4.3	Anthropogene Einflüsse	273
6.3.5	Beurteilung des Bodengefüges für den Pflanzenbau.	274
6.4	Bodenwasser	275
6.4.1	Einteilung der Bindungsarten	276
6.4.1.1	Grund- und Stauwasser	276
6.4.1.2	Adsorptions- und Kapillarwasser	276
6.4.1.3	Bestimmung des Wassergehalts	278
6.4.2	Intensität der Wasserbindung	279
6.4.2.1	Potenziale.	279
6.4.2.2	Potenzialgleichgewicht	282
6.4.2.3	Beziehung zwischen Matrixpotenzial und Wassergehalt	282
6.4.3	Wasserbewegung in flüssiger Phase	286
6.4.3.1	Einfluss von Körnung und Gefüge	290
6.4.3.2	Einfluss des Wassergehalts	292
6.4.3.3	Bestimmung der Wasserleitfähigkeit.	293
6.4.3.4	Wasseraufnahme – Wasserabgabe	294
6.4.4	Wasserbewegung in dampfförmiger Phase	298
6.4.4.1	Wasserdampfbewegung im Boden	299
6.4.4.2	Evaporation aus dem Boden	300
6.4.4.3	Kondensation im Boden	301
6.4.5	Wasserhaushalt der Böden	302
6.4.5.1	Bodenkennwerte	302
6.4.5.2	Jahreszeitlicher Gang des Wasserhaushalts	304
6.4.6	Wasserhaushalt von Landschaften	307
6.4.6.1	Einzugsgebiete.	308
6.4.6.2	Einfluss von Topographie und lithologischer Situation auf den Wasserhaushalt ...	308
6.4.6.3	Auswirkungen der Wasserbewegung auf die Bodenentwicklung	309
6.4.6.4	Berechnungen	310
6.5	Bodenluft	311
6.5.1	Zusammensetzung und Herkunft der Komponenten	311
6.5.2	Transportmechanismen.	314
6.5.3	Gashaushalt.	316
6.5.3.1	Gashaushalt und Umwelt	316
6.6	Bodentemperatur	317
6.6.1	Bedeutung thermischer Phänomene	318

6.6.2	Energiegewinn und -verlust	318
6.6.3	Thermische Eigenschaften	320
6.6.4	Wärmebewegungen	322
6.6.5	Wärmehaushalt	323
6.6.5.1	Natürlicher Wärmehaushalt	323
6.6.5.2	Anthropogene Eingriffe	326
6.7	Transportvorgänge und Verlagerungen	328
6.7.1	Transport im Boden in der flüssigen Phase	329
6.7.2	Transport im Boden in der Gasphase	333
6.8	Bodenfarbe	333
6.8.1	Farbansprache	334
6.8.2	Farbgebende Komponenten	335
6.8.3	Zusammenhänge zwischen Farbe und Bodeneigenschaften sowie Prozessen	336
	Literatur	336
7	Bodenentwicklung und Bodensystematik	341
7.1	Faktoren der Bodenentwicklung	344
7.1.1	Ausgangsgestein	344
7.1.2	Klima	346
7.1.3	Schwerkraft und Relief	348
7.1.4	Wasser	349
7.1.5	Fauna und Flora	350
7.1.6	Menschliche Tätigkeit	351
7.1.7	Zeit	352
7.2	Prozesse der Bodenentwicklung	354
7.2.1	Umwandlungen und Verarmungen des Mineralkörpers	355
7.2.1.1	Frost-, Temperatur- und Salzsprengung	355
7.2.1.2	Verbraunung und Verlehmung	356
7.2.1.3	Ferrallitisierung und Desilifizierung	357
7.2.2	Humusanreicherung – Bildung von Humusformen	358
7.2.2.1	Terrestrische Humusformen	358
7.2.2.2	Hydromorphe Humusformen	360
7.2.3	Gefügebildung	361
7.2.4	Umlagerungen	362
7.2.4.1	Tonverlagerung	362
7.2.4.2	Podsolierung	363
7.2.4.3	Entkalkung und Carbonatisierung	364
7.2.4.4	Verkieselung	365
7.2.4.5	Versalzung	366
7.2.5	Redoximorphose	368
7.2.6	Turbationen	370
7.2.6.1	Bioturbation	370
7.2.6.2	Kryoturbation	371
7.2.6.3	Peloturbation	372
7.2.6.4	Spaltenakkumulation	372
7.2.7	Bodenlandschaftsprozesse	373
7.2.7.1	Massenversatz am Hang	373
7.2.7.2	Bodenerosion durch Wasser und Wind	375

7.2.7.3	Hangzugwassertransport	376
7.2.8	Profildifferenzierung.....	377
7.3	Horizontsystematik	379
7.3.1	Definitionen von Horizontsymbolen	379
7.3.1.1	Bodenlagen	380
7.3.1.2	Horizontmerkmale	382
7.3.1.3	Bodenhorizonte	384
7.3.2	Diagnostische Horizonte, Eigenschaften und Materialien	384
7.4	Bodensystematik	384
7.4.1	Klassifikationssysteme in Deutschland	392
7.4.2	Internationale Bodensystematik (WRB)	395
7.4.3	Klassifikationssysteme in den USA	401
7.5	Böden Mitteleuropas	403
7.5.1	Landböden (Terrestrische Böden)	403
7.5.1.1	Syrosem	403
7.5.1.2	Lockersyrosem	404
7.5.1.3	O/C-Boden (Humusboden).....	405
7.5.1.4	Ranker	406
7.5.1.5	Regosol	406
7.5.1.6	Rendzina.....	408
7.5.1.7	Pararendzina.....	409
7.5.1.8	Tschernosem (Schwarzerde)	410
7.5.1.9	Braunerde.....	411
7.5.1.10	Terra fusca	413
7.5.1.11	Parabraunerde und Fahlerde.....	414
7.5.1.12	Podsol	416
7.5.1.13	Pelosol.....	419
7.5.1.14	Pseudogley	420
7.5.1.15	Stagnogley.....	422
7.5.1.16	Reduktosol.....	423
7.5.2	Grundwasserböden (semiterrestrische Böden)	424
7.5.2.1	Gleye	424
7.5.2.2	Auenböden	427
7.5.2.3	Marschen, Strände und Watten.....	429
7.5.2.4	Solonchake	435
7.5.2.5	Solonetze	436
7.5.3	Unterwasserböden (subhydrische Böden).....	437
7.5.4	Moore	439
7.5.5	Anthropogene Böden.....	443
7.6	Wichtige Böden außerhalb Mitteleuropas	446
7.6.1	Vertisole	446
7.6.2	Ferralsole	448
7.6.3	Nitisole	449
7.6.4	Acrisole, Alisole und Lixisole	450
7.6.5	Kastanozeme.....	450
7.6.6	Arenosole und Yermosole (Wüstenböden)	451
7.6.7	Calcisole und Gypsisole	454
7.6.8	Durisole.....	456

7.6.9	Planosole	456
7.6.10	Plinthosole.....	457
7.6.11	Andosole	457
7.6.12	Cryosole und andere Böden mit Permafrost	458
7.6.13	Redoximorphe Anthrosole (Reisböden)	458
7.6.14	Zoosole	460
7.6.14.1	Von Pinguinen und Webervögeln geformte Böden	460
7.6.14.2	Von Regenwürmern und Bodensäugern geformte Böden	461
7.6.14.3	Von Termiten geformte Böden	461
7.6.14.4	Von Pierwürmern geformte Böden	461
7.6.15	Paläoböden von Erde, Mars und Titan	462
7.6.15.1	Paläosole der Erde	462
7.6.15.2	Paläosole von Mars und Titan	463
	Literatur	465
8	Bodenverbreitung	469
8.1	Die Pedosphäre.....	470
8.2	Paradigmen der Bodenverbreitung und Bodengenese	470
8.2.1	Grundsätze der Bodenvergesellschaftung.....	471
8.3	Bodengesellschaftssystematik und die Bodenregionen Mitteleuropas	475
8.3.1	Bodenregionen Mitteleuropas.....	475
8.3.2	Bodenregionen städtisch-industrieller Verdichtungsräume	477
8.4	Bodenzonen der Erde	479
8.4.1	Ferralsol-Gleysol-Fluvisol-Bodenzone der inneren (feuchten) Tropen	479
8.4.2	Acrisol-(Luvisol-Plinthosol)-Nitisol-Vertisol-Bodenzonen der wechselfeuchten Tropen (Savanne).....	481
8.4.3	Regosol-Calciisol-Solonchak-Bodenzone der Halbwüste.....	482
8.4.4	Arenosol-(Leptosol)-Gypsisol-Solonchak-Bodenzone der Vollwüste	484
8.4.5	Planosol-Luvisol-(Acrisol)-Cambisol-Zone der mediterranen Gebiete	484
8.4.6	Chernozem-Kastanozem-Solonetz-Zone der Steppen.....	485
8.4.7	Cambisol-Luvisol-Gleysol-Zone der gemäßigt-humiden Breiten	487
8.4.8	Podzol-Cambisol-Histosol-Zone der borealen Wälder (Taiga).....	488
8.4.9	Leptosol-Regosol-Gleysol-Histosol-Zone der Tundren	488
8.4.10	Leptosol-Gelic Regosol-Cryosol-Zone der Kältewüsten.....	489
	Literatur	489
9	Böden als Pflanzenstandorte	491
9.1	Durchwurzelbarkeit und Gründigkeit.....	493
9.1.1	Durchwurzelbarkeit	493
9.1.2	Gründigkeit	494
9.2	Wasserversorgung der Pflanzen	495
9.2.1	Pflanzenverfügbares Wasser	495
9.2.2	Wasserbewegung zur und in der Pflanzenwurzel	499
9.2.3	Wasserverbrauch und Pflanzenenertrag	500
9.3	Bodenluft und Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln.....	502
9.3.1	Lufthaushalt der Böden	503
9.3.2	Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln	503
9.4	Bodenwärmehaushalt, Bodentemperatur und Pflanzenwachstum.....	504

9.5	Nährstoffversorgung der Pflanzen	505
9.5.1	Nährstoffgehalte, -bindung und -bilanzen	507
9.5.1.1	Nährstoffeinträge	509
9.5.1.2	Nährstoffausträge	509
9.5.2	Nährstoffverfügbarkeit und Nährstoffversorgung der Böden	511
9.5.3	Aufnahme von Nährstoffen aus dem Unterboden	515
9.5.4	Versorgungsbereiche für Nährelemente in Böden	516
9.5.5	Nährstoffdüngung	516
9.6	Makronährelemente	518
9.6.1	Stickstoff	518
9.6.1.1	N-Einträge in den Boden	519
9.6.1.2	N-Verbindungen und N-Gehalte	521
9.6.1.3	Mikrobielle und abiotische N-Transformationen im Boden	523
9.6.1.4	N-Austräge	527
9.6.1.5	N-Bilanzen und Bemessung der N-Düngung	532
9.6.1.6	Folgen des intensiven N-Einsatzes für Mensch und Umwelt	534
9.6.1.7	Erfassung der N-Dynamik in Praxis und Forschung	534
9.6.2	Phosphor	536
9.6.2.1	P-Gehalte von Gesteinen und Böden	538
9.6.2.2	P-Formen und P-Mineralen in Böden	538
9.6.2.3	P-Mobilisierung und P-Dynamik mit zunehmender Ökosystementwicklung	543
9.6.2.4	P-Mobilisierung unter reduzierenden Bedingungen	544
9.6.2.5	P-Versorgung der Pflanzen, P-Düngung und P-Bilanz	545
9.6.2.6	Gewässerbelastungen durch P-Austräge	546
9.6.3	Schwefel	547
9.6.3.1	S-Gehalte von Gesteinen und Böden	548
9.6.3.2	S-Formen und -Mineralen in Böden	548
9.6.3.3	S-Mobilisierung	549
9.6.3.4	S-Versorgung der Pflanzen und S-Düngung	550
9.6.4	Kalium	551
9.6.4.1	K-Gehalte von Gesteinen und Böden	551
9.6.4.2	K-Mineralen und -Formen in Böden	551
9.6.4.3	Beziehungen zwischen austauschbarem und gelöstem K	553
9.6.4.4	K-Versorgung der Pflanzen, K-Düngung und K-Auswaschung	554
9.6.5	Calcium	555
9.6.5.1	Ca-Gehalte, -Mineralen und -Formen in Böden	556
9.6.5.2	Versorgung der Pflanzen mit Ca aus dem Boden	556
9.6.5.3	Ca-Bilanz und Düngung	557
9.6.6	Magnesium	558
9.6.6.1	Mg-Gehalte, -Mineralen und -Formen in Böden	558
9.6.6.2	Mg-Versorgung der Pflanzen, Mg-Düngung und Mg-Auswaschung	559
9.6.7	Natrium	560
9.7	Mikronährelemente	560
9.7.1	Mangan	561
9.7.1.1	Mn-Gehalte, -Mineralen und -Formen in Böden	561
9.7.1.2	Mn-Versorgung der Pflanzen, Mn-Entzüge und -Auswaschung	563
9.7.2	Eisen	565
9.7.2.1	Fe-Gehalte, -Mineralen und -Formen in Böden	565

9.7.2.2	Mobilisierung von Fe durch Mikroorganismen und Pflanzen	566
9.7.3	Kupfer	567
9.7.3.1	Cu-Gehalte, -Minerale und -Formen in Böden	567
9.7.3.2	Cu-Versorgung der Pflanzen, Cu-Entzüge und -Auswaschung, Cu-Düngung	568
9.7.4	Zink	569
9.7.4.1	Zn-Gehalte, -Minerale und -Formen in Böden	570
9.7.4.2	Zn-Versorgung der Pflanzen, Zn-Entzüge und -Auswaschung, Zn-Düngung	571
9.7.5	Bor	572
9.7.6	Molybdän	574
9.7.7	Chlor	576
9.8	Nützliche Elemente	577
9.8.1	Silicium	577
9.8.2	Cobalt	578
9.8.3	Selen	579
	Literatur	580
10	Gefährdung der Bodenfunktionen	583
10.1	Gefährdungen der Bodenfunktionen durch stoffliche Belastungen	586
10.1.1	Eintragspfade von Schadstoffen in Böden	587
10.2	Anorganische Stoffe	588
10.2.1	Schwefeldioxid und Stickstoffverbindungen – Waldschäden	588
10.2.2	Fluor	594
10.2.3	Cyanide	595
10.2.4	Schwermetalle	597
10.2.4.1	Quellen und Eintragspfade	598
10.2.4.2	Gehalte in Böden	602
10.2.4.3	Bindungsformen, Löslichkeit- und Verlagerbarkeit	603
10.2.4.4	Verlagerung, Austrag	605
10.2.4.5	Schwermetallaufnahme und Wirkungen auf Pflanzen	606
10.2.4.6	Wirkungen auf Bodenorganismen	608
10.2.5	Salze	613
10.2.6	Radionuklide	614
10.2.6.1	Geogene Radioaktivität von Böden und Gesteinen	616
10.2.6.2	Einträge, Bodenstrahlung, Strahlenexposition	617
10.2.6.3	Verhalten in Böden	619
10.2.6.4	Uran	619
10.2.6.5	Cäsium	620
10.2.6.6	Strontium	621
10.2.6.7	Übergang in die Pflanzen	621
10.3	Nanomaterialien	622
10.3.1	Eintragspfade – Gehalte in Böden	625
10.3.2	Verhalten in Böden	628
10.3.3	Sorption von Schadstoffen	629
10.3.4	Aufnahme in und Wirkung auf Organismen	629
10.4	Organische Schadstoffe	631
10.4.1	Einteilung, Verwendung, Eintrag und Gehalte in Böden	631
10.4.2	Prozesse auf der Bodenoberfläche	640
10.4.3	Festlegung im Boden	641

10.4.4	Abbau und Verlagerung	646
10.4.5	Aufnahme in und Wirkungen auf Organismen.....	649
10.5	Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdünger, Baggergut	652
10.6	Toxikologische/Ökotoxikologische Bewertung stofflicher Bodenbelastungen	656
10.7	Sanierung stofflicher Belastungen	666
10.8	Gefährdung der Bodenfunktionen durch nichtstoffliche Belastungen	668
10.8.1	Bodenerosion	668
10.8.1.1	Wesentliche Ursachen für den Bodenabtrag	669
10.8.1.2	Wassererosion.....	669
10.8.1.3	Winderosion	673
10.8.1.4	Bearbeitungserosion	674
10.8.1.5	Ausmaß des Bodenabtrags durch Wasser und Wind	675
10.8.1.6	Schäden	676
10.8.1.7	Erosionsschutz	677
10.8.2	Mechanische Bodenverformung.....	677
10.8.2.1	Definition der Bodenverformung.....	677
10.8.2.2	Stabilität im Wieder- und Erstverdichtungsbereich	678
10.8.2.3	Folgen der Bodenverformung für Bodenkenngrößen	681
10.8.2.4	Gegenmaßnahmen und deren Grenzen.....	682
	Literatur	684
11	Bodenbewertung und Bodenschutz.....	687
11.1	Prinzipien der Bodenbewertung	688
11.2	Bewertung für Besteuerung und landwirtschaftliche Nutzung	692
11.2.1	Bodenschätzung – Ackerschätzungsrahmen	693
11.2.2	Bodenschätzung – Grünlandschätzungsrahmen.....	696
11.2.3	Bewertung für Sonderkulturen	696
11.3	Bewertung für die forstliche Nutzung	697
11.4	Bewertung für zivilisatorische Ansprüche ohne Nutzung der Primärproduktion.....	703
11.5	International übliche Verfahren der Bodenbewertung	705
11.5.1	Storie Index Rating (SIR)	705
11.5.2	Fertility Capability Classification (FCC)	706
11.5.3	Land Capability Classification (LCC).....	707
11.5.4	Land Suitability Classification (LSC)	708
11.5.5	Agro-Ecological Zones.....	709
11.5.6	Soil Quality Assessment.....	710
11.6	Bodeninformationssysteme	711
11.7	Bodenschutz.....	712
11.7.1	Gründe für Bodenschutz	712
11.7.2	Schutz des Naturkörpers	713
11.7.3	Bodenfunktionen und -potenziale.....	714
11.7.4	Bundes-Bodenschutzgesetz	715
	Literatur	717

12	Anhang	719
12.1	Gliederung geologischer Formationen	720
12.2	Symbole, Umrechnungsfaktoren	723
12.2.1	Abkürzungen	723
12.2.2	Umrechnungsfaktoren für Düngemittel.....	724
	 Serviceteil	
	Sachverzeichnis	727