

Scheffer/Schachtschabel

Lehrbuch der Bodenkunde

16. Auflage

neu bearbeitet von

Hans-Peter Blume, Gerhard W. Brümmer, Rainer Horn,
Ellen Kandeler, Ingrid Kögel-Knabner, Ruben Kretzschmar,
Karl Stahr, Berndt-Michael Wilke

Mit Beiträgen von Sören Thiele-Bruhn, Gerhard Welp
und Rolf Tippkötter

Inhalt

1	Einleitung: Böden – die Haut der Erde	1	2.2.6.3	Eisenoxide	23
1.1	Böden als Naturkörper in Ökosystemen	1	2.2.6.4	Titanoxide	27
1.2	Funktionen von Böden in der Ökosphäre	4	2.2.6.5	Manganoxide	27
1.3	Böden als offene und schützenswerte Systeme	5	2.2.7	Carbonate, Sulfate, Sulfide und Phosphate	28
1.4	Literatur	6	2.3	Gesteine	28
2	Anorganische Komponenten der Böden – Minerale und Gesteine	7	2.3.1	Magmatite	29
2.1	Der Kreislauf der Gesteine	7	2.3.2	Sedimente und Sedimentite	30
2.2	Minerale	7	2.3.2.1	Allgemeines	30
2.2.1	Allgemeines	7	2.3.2.2	Grobkörnige Sedimente (Psephite)	32
2.2.2	Struktur der Silicate	9	2.3.2.3	Sande und Sandsteine (Psammite)	33
2.2.3	Primäre (lithogene, pyrogene) Silicate	10	2.3.2.4	Schluffe und Schluffsteine (Silte), Tone und Tonsteine (Pelite)	34
2.2.3.1	Feldspäte	10	2.3.2.5	Carbonatgesteine und Mergel	34
2.2.3.2	Glimmer und Chlorite	11	2.3.2.6	Quartäre Sedimente	34
2.2.3.3	Pyroxene, Amphibole und Olivine	13	2.3.3	Metamorphite	35
2.2.3.4	Seltene Silicate	13	2.3.4	Anthropogene Substrate	36
2.2.4	Tonminerale	14	2.4	Verwitterung	37
2.2.4.1	Allgemeine Eigenschaften	14	2.4.1	Physikalische Verwitterung	37
2.2.4.2	Kristallstruktur und Einteilung	15	2.4.2	Chemische Verwitterung	39
2.2.4.3	Kaolinit und Halloysit	15	2.4.2.1	Auflösung durch Hydratation	39
2.2.4.4	Illite und Glaukonite	16	2.4.2.2	Hydrolyse und Protolyse	40
2.2.4.5	Vermiculite und Smectite	17	2.4.2.3	Oxidation und Komplexbildung	41
2.2.4.6	Pedogene Chlorite	17	2.4.3	Rolle der Biota	42
2.2.4.7	Palygorskit und Sepiolit	18	2.4.4	Verwitterungsstabilität	43
2.2.4.8	Allophan, Imogolit und Hisingerit	18	2.4.4.1	Thermodynamische Stabilitätsverhältnisse	43
2.2.4.9	Wechselagerungsminerale	19	2.4.4.2	Kinetik der chemischen Verwitterung	45
2.2.5	Bildung und Umwandlung der Tonminerale	19	2.4.4.3	Verwitterungsgrad	45
2.2.5.1	Veränderung der Zwischenschicht-Besetzung	19	2.5	Mineralbestand von Böden	46
2.2.5.2	Neubildung aus Zerfallsprodukten von Silicaten	20	2.6	Literatur	48
2.2.5.3	Tonmineralumwandlung	21	3	Organische Bodensubstanz	51
2.2.6	Oxide und Hydroxide	21	3.1	Entstehung, Verteilung und Dynamik	51
2.2.6.1	Siliciumoxide	22	3.1	Gehalte und Mengen der organischen Substanz in Böden	52
2.2.6.2	Aluminiumoxide	23	3.2	Pflanzenreste und ihre Umwandlung während des Abbaus	55
			3.2.1	Zusammensetzung und Struktur der organischen Ausgangsstoffe	55

3.2.2	Abbau- und Umwandlungsreaktionen im Boden	59	4.4	Bodenorganismen als Bioindikatoren	112
3.3	Bildung stabiler Humusverbindungen	61	4.4.1	Einfluss von Kulturmaßnahmen auf Bodenorganismen	112
3.3.1	Stabilisierung durch Wechselwirkungen mit der Mineralphase	61	4.4.2	Einfluss von Schadstoffen	114
3.3.2	Stabilisierung durch räumliche Trennung	65	4.4.3	Klimawandel	116
3.3.3	Gehalte an Huminstoffen im Boden	66	4.5	Untersuchungsmethoden	116
3.4	Zusammensetzung und Eigenschaften der Huminstoffe in Böden	67	4.5.1	Mikroorganismen	116
3.4.1	Bindungsformen von C, N, P und S in den Huminstoffen	67	4.5.2	Bodentiere	118
3.4.2	Eigenschaften der Huminstoffe	68	4.6	Weiterführende Lehr- und Fachbücher	119
3.5	Dynamik der organischen Substanz im Boden	70	4.7	Zitierte Spezialliteratur	119
3.5.1	Umsetzungsraten und Verweilzeit der organischen Substanz im Boden	70	5	Chemische Eigenschaften und Prozesse	121
3.5.2	Abschätzung der Verweilzeit	70	5.1	Bodenlösung	121
3.5.3	Modellierung des C-Umsatzes	73	5.1.1	Gelöste Stoffe im Regenwasser	121
3.5.4	Böden als Speicher und Quelle für Kohlenstoff	74	5.1.2	Zusammensetzung der Bodenlösung	122
3.6	Weiterführende Literatur	80	5.1.2.1	Gelöste anorganische Stoffe	122
4	Bodenorganismen und ihr Lebensraum	83	5.1.2.2	Gelöste organische Substanzen (DOM)	123
4.1	Bodenorganismen	84	5.2	Gasgleichgewichte	125
4.1.1	Bodenmikroflora und Viren	84	5.3	Speziation und Komplexbildung	125
4.1.2	Bodentiere (Mikro-, Meso-, Makro- und Megafauna)	88	5.3.1	Ionenstärke, Konzentration und Aktivität	126
4.1.3	Anzahl und Biomasse der Bodenorganismen	92	5.3.2	Lösungsspeziation	127
4.1.4	Bodenorganismen als Lebensgemeinschaft	96	5.3.2.1	Gelöste Komplexe und Ionenpaare	127
4.2	Lebensbedingungen	100	5.3.2.2	Massenwirkungsgesetz und Stabilitätskonstanten	129
4.2.1	Der Boden als Nährstoff- und Energiequelle für Bodenorganismen	100	5.3.2.3	Massenbilanzgleichungen	129
4.2.2	Wasser und Atmosphäre	103	5.3.2.4	Computerprogramme für Speziationsrechnungen	129
4.2.3	pH-Wert und Redoxpotenzial	104	5.4	Löslichkeit und Lösungskinetik	130
4.2.4	Temperatur	104	5.4.1	Löslichkeitskonstante, Ionenaktivitätsprodukt und Sättigungsindex	130
4.3	Funktionen von Bodenorganismen	105	5.4.2	Stabilitätsdiagramme	130
4.3.1	Funktion von Bodenorganismen in Stoffkreisläufen	105	5.4.3	Kinetik von Lösungs- und Fällungsreaktionen	133
4.3.2	Funktion von Bodenorganismen bei Redoxreaktionen	110	5.5	Sorption	134
4.3.3	Funktion von Bodenorganismen bei der Stabilisierung des Bodengefüges	111	5.5.1	Reaktive Oberflächen und Oberflächenladung	135
			5.5.1.1	Spezifische Oberfläche	135
			5.5.1.2	Bedeutung der Oberflächenladung	136
			5.5.1.3	Permanente Oberflächenladung	136
			5.5.1.4	Variable Oberflächenladung und Ladungsnulppunkt	136
			5.5.1.5	Oberflächenladung einzelner Bodenkompnenten	137
			5.5.1.6	Ladungsverhältnisse in Böden	138
			5.5.2	Ionenaustausch	139
			5.5.2.1	Kationenaustauschkapazität (KAK)	139

5.5.2.2	Kationenaustausch	141	5.7.1.1	Redoxreaktionen	161
5.5.3	Oberflächenkomplexierung von Kationen und Anionen	142	5.7.1.2	Redoxpotenzial	163
5.5.4	Sorption organischer Substanzen an Mineraloberflächen	144	5.7.2	pe-pH-Diagramme	163
5.5.5	Sorptionskinetik	145	5.7.3	Kinetik von Redoxreaktionen	164
5.5.6	Modellierung von Sorptions- prozessen	146	5.7.4	Redoxprozesse in Böden	166
5.5.6.1	Sorptionsisothermen	146	5.7.5	Redoxpotenziale von Böden	167
5.5.6.2	Modellierung des Kationen- austausches	147	5.8	Literatur	168
5.5.6.3	Modellierung der Diffusen Doppelschicht	149	6	Physikalische Eigenschaften und Prozesse	171
5.5.6.4	Modellierung der Oberflächen- komplexierung an Mineralober- flächen	150	6.1	Körnung und Lagerung	171
5.5.6.5	Modellierung der Kationenbindung an organischen Substanzen	150	6.1.1	Entstehung der Körner	171
5.6	Bodenreaktion und pH-Pufferung ..	151	6.1.2	Größe der Körner	172
5.6.1	Bodenreaktion	151	6.1.3	Einteilung der Körner	173
5.6.1.1	Alkalische Böden	151	6.1.3.1	Korngrößenfraktionen	173
5.6.1.2	Saure Böden	151	6.1.3.2	Mischungen, Korngrößen- verteilungen	173
5.6.1.3	Bodenversauerung und Kationenbelag	152	6.1.3.3	Bestimmung der Korngrößen- verteilung	174
5.6.2	Bodenacidität und Basen- neutralisationskapazität (BNK)	153	6.1.4	Eigenschaften der Körner	175
5.6.3	H ⁺ -Quellen	154	6.1.4.1	Zusammensetzung und Form	175
5.6.3.1	Eintrag durch Niederschläge	154	6.1.4.2	Oberflächen	175
5.6.3.2	Bildung von Kohlensäure durch Bodenatmung	154	6.1.5	Häufige Verteilung der Körner	176
5.6.3.3	Abgabe von organischen Säuren	155	6.1.5.1	Ursachen	176
5.6.3.4	Abgabe von H ⁺ durch Pflanzen- wurzeln	155	6.1.5.2	Landschaftsbezogene Vorkommen ..	177
5.6.3.5	Oxidation von NH ₄ ⁺ zu NO ₃ ⁻	155	6.1.6	Lagerung der Primärteilchen	178
5.6.3.6	Oxidation von löslichen Fe ²⁺ - und Mn ²⁺ -Ionen und von Fe-Sulfiden ...	156	6.1.6.1	Abstützung und Berührung	178
5.6.4	pH-Pufferung, Bodenversauerung und Säureneutralisationskapazität (SNK)	156	6.1.6.2	Kennziffern der Lagerung	179
5.6.4.1	Pufferung durch Carbonate	157	6.1.6.3	Porenanteile in Böden	179
5.6.4.2	Pufferung durch Oberflächen mit permanenter Ladung	158	6.1.6.4	Porenformen	180
5.6.4.3	Pufferung durch Oberflächen mit variabler Ladung	158	6.1.6.5	Porengrößenverteilung	181
5.6.4.4	Pufferung durch Silicat- verwitterung	159	6.1.7	Zeitlich bedingte Veränderungen ...	182
5.6.5	Kalkung saurer Böden	159	6.1.7.1	Veränderungen der Körnung	182
5.6.5.1	Optimaler pH-Wert land- wirtschaftlich genutzter Böden	159	6.1.7.2	Veränderungen der Lagerung	183
5.6.5.2	Kalkung und Kalkbedarf	160	6.1.8	Zusammenhang zwischen fester Phase und anderen Boden- eigenschaften	184
5.7	Redoxreaktionen und Redox- dynamik	161	6.2	Wechselwirkungen zwischen fester und flüssiger Phase	184
5.7.1	Redoxreaktionen und Redox- potenzial	161	6.2.1	Flockung und Peptisation	184
			6.2.1.1	Energetische Wechselwirkung zwischen Bodenkolloiden	185
			6.2.1.2	Einfluss von Kationenbelag und Wertigkeit auf die Flockung	187
			6.2.1.3	Einfluss von Polymeren auf Flockung und Dispergierung	188
			6.2.1.4	Aufbau der Flocken	188
			6.2.1.5	Einfluss des elektrokinetischen Potenzials	189
			6.2.2	Schrumpfung und Quellung	189
			6.2.2.1	Schrumpfung	190
			6.2.2.2	Quellung	192
			6.2.3	Benetzbarkeit	193

6.2.4	Kohäsion, Konsistenz und Strömungsdruck	194	6.4.6	Wasserhaushalt von Landschaften	247
6.3	Bodengefüge	195	6.4.6.1	Einzugsgebiete	247
6.3.1	Gefügemorphologie	196	6.4.6.2	Einfluss von Topographie und lithologischer Situation auf den Wasserhaushalt	248
6.3.1.1	Makrogefüge	196	6.4.6.3	Einfluss von Klima und Witterung auf den Wasserhaushalt	248
6.3.1.2	Mikrogefüge	199	6.4.6.4	Auswirkungen der Wasserbewegung auf die Bodenentwicklung	248
6.3.1.3	Riss- und Röhrensysteme	200	6.4.6.5	Berechnungen	249
6.3.2	Spannungen und Verformungen	202	6.5	Bodenluft	250
6.3.2.1	Kräfte am Korn	202	6.5.1	Zusammensetzung und Herkunft der Komponenten	251
6.3.2.2	Kräfte und Spannungen im Bodenverband	202	6.5.2	Transportmechanismen	253
6.3.2.3	Einfluss des Wassers	206	6.5.3	Gashaushalt	254
6.3.3	Stabilität des Bodengefüges	207	6.5.3.1	Gashaushalt und Umwelt	254
6.3.3.1	Stabilisierende Stoffe	208	6.6	Bodentemperatur	255
6.3.3.2	Verschlämmung, Verknetung und Verkrustung	210	6.6.1	Bedeutung thermischer Phänomene	256
6.3.3.3	Strömungsdruck, Erdfließen	211	6.6.2	Energiegewinn und -verlust	256
6.3.3.4	Bestimmung der Gefügestabilität	211	6.6.3	Thermische Eigenschaften	257
6.3.4	Biologische, klimatische und anthropogene Einflüsse auf das Bodengefüge	212	6.6.4	Wärmebewegungen	258
6.3.4.1	Gefüge eines Bodenprofils als Gleichgewichtslage	213	6.6.5	Wärmehaushalt	259
6.3.4.2	Natürliche Bodenentwicklung	213	6.6.5.1	Natürlicher Wärmehaushalt	259
6.3.4.3	Anthropogene Einflüsse	217	6.6.5.2	Anthropogene Eingriffe	261
6.3.5	Beurteilung des Bodengefüges für den Pflanzenbau	218	6.7	Transportvorgänge und Verlagerungen	262
6.4	Bodenwasser	220	6.7.1	Transport im Boden in der flüssigen Phase	262
6.4.1	Einteilung – Bindungsarten	220	6.7.2	Transporte im Boden in der Gasphase	264
6.4.1.1	Grund- und Stauwasser	220	6.8	Bodenfarbe	265
6.4.1.2	Adsorptions- und Kapillarwasser	221	6.8.1	Farbansprache	265
6.4.1.3	Bestimmung des Wassergehalts	222	6.8.2	Farbgebende Komponenten	266
6.4.2	Intensität der Wasserbindung	223	6.8.3	Zusammenhänge zwischen Farbe und Bodeneigenschaften sowie Prozessen	267
6.4.2.1	Potenziale	223	6.9	Literatur	267
6.4.2.2	Potenzialgleichgewicht	226			
6.4.2.3	Beziehung zwischen Matrixpotenzial und Wassergehalt	226			
6.4.3	Wasserbewegung in flüssiger Phase	229	7	Bodenentwicklung und Bodensystematik	273
6.4.3.1	Einfluss von Körnung und Gefüge	232	7.1	Faktoren der Bodenentwicklung	274
6.4.3.2	Einfluss des Wassergehalts	233	7.1.1	Ausgangsgestein	274
6.4.3.3	Bestimmung der Wasserleitfähigkeit	234	7.1.2	Klima	275
6.4.3.4	Wasseraufnahme – Wasserabgabe	235	7.1.3	Schwerkraft und Relief	277
6.4.4	Wasserbewegung in dampfförmiger Phase	239	7.1.4	Wasser	278
6.4.4.1	Wasserdampfbewegung im Boden	239	7.1.5	Fauna und Flora	279
6.4.4.2	Evaporation aus dem Boden	240	7.1.6	Menschliche Tätigkeit	279
6.4.4.3	Kondensation im Boden	241	7.1.7	Zeit	281
6.4.5	Wasserhaushalt der Böden	242	7.2	Prozesse der Bodenentwicklung	281
6.4.5.1	Bodenkennwerte	242	7.2.1	Umwandlungen und Verarmungen des Mineralkörpers	282
6.4.5.2	Jahreszeitlicher Gang des Wasserhaushalts	244	7.2.1.1	Frost-, Temperatur- und Salzsprengung	282

7.2.1.2	Verbraunung und Verlehmung	283	7.5.1.14	Pseudogley	328
7.2.1.3	Ferrallitisierung und Desilifizierung	283	7.5.1.15	Stagnogley	329
7.2.2	Humusanreicherung – Bildung von Humusformen	284	7.5.1.16	Reduktosol	330
7.2.2.1	Terrestrische Humusformen	285	7.5.2	Grundwasserböden (semiterrestrische Böden)	331
7.2.2.2	Hydromorphe Humusformen	287	7.5.2.1	Gleye	331
7.2.3	Gefügebildung	287	7.5.2.2	Auenböden	333
7.2.4	Umlagerungen	288	7.5.2.3	Marschen, Strände und Watten	335
7.2.4.1	Tonverlagerung	288	7.5.2.4	Solonchake	339
7.2.4.2	Podsolierung	289	7.5.2.5	Solonetze	340
7.2.4.3	Entkalkung und Carbonatisierung	290	7.5.3	Unterwasserböden (subhydrische Böden)	341
7.2.4.4	Verkieselung	290	7.5.4	Moore	343
7.2.4.5	Versalzung	291	7.5.5	Anthropogene Böden	346
7.2.5	Redoximorphose	292	7.5.6	Fossile Böden	347
7.2.6	Turbationen	294	7.6	Wichtige Böden außerhalb Mitteleuropas	349
7.2.6.1	Bioturbation	294	7.6.1	Vertisole	350
7.2.6.2	Kryoturbation	295	7.6.2	Ferralsole	351
7.2.6.3	Peloturbation	295	7.6.3	Nitisole	352
7.2.6.4	Spaltenakkumulation	296	7.6.4	Acrisole, Alisole und Lixisole	353
7.2.7	Bodenlandschaftsprozesse	296	7.6.5	Kastanzeme	353
7.2.7.1	Massenversatz am Hang	297	7.6.6	Arenosole	354
7.2.7.2	Bodenerosion durch Wasser und Wind	297	7.6.7	Calcisole und Gypsisole	356
7.2.7.3	Hangzugwassertransport	298	7.6.8	Durisole	356
7.2.8	Profildifferenzierung	299	7.6.9	Planosole	357
7.3	Horizontsystematik	301	7.6.10	Plinthosole	357
7.3.1	Definitionen von Horizont- symbolen	301	7.6.11	Andosole	357
7.3.1.1	Bödenlagen	302	7.6.12	Cryosole und andere Böden mit Permafrost	358
7.3.1.2	Horizontmerkmale	303	7.6.13	Redoximorphe (Hydragic oder Irragric) Anthrosole (Reisböden)	358
7.3.1.3	Bodenhorizonte	304	7.7	Literatur	360
7.3.2	Diagnostische Horizonte, Eigenschaften und Materialien	304			
7.4	Bodensystematik	308	8	Bodenverbreitung	363
7.4.1	Klassifikationssysteme in Deutschland	308	8.1	Die Pedosphäre	363
7.4.2	Internationale Bodensystematik	311	8.2	Paradigmen der Bodenverbreitung und Bodengeneese	363
7.4.3	Klassifikationssysteme in den USA	313	8.2.1	Grundsätze der Boden- vergesellschaftung	365
7.5	Böden Mitteleuropas	314	8.3	Bodengesellschaftssystematik und die Bodenregionen Mitteleuropas	369
7.5.1	Landböden (Terrestrische Böden)	315	8.3.1	Bodenregionen Mitteleuropas	369
7.5.1.1	Syrosem	315	8.3.2	Bodenregionen städtisch- industrieller Verdichtungsräume	369
7.5.1.2	Lockersyrosem	315	8.4	Bodenzonen der Erde	371
7.5.1.3	O/C-Boden (Humusboden)	316	8.4.1	Ferralsol-Gleysol-Fluvisol Bodenzone der inneren (feuchten) Tropen	372
7.5.1.4	Ranker	316	8.4.2	Acrisol-(Luvisol-Plinthosol)- Nitisol-Vertisol-Bodenzonen der wechselfeuchten Tropen (Savanne)	373
7.5.1.5	Regosol	316			
7.5.1.6	Rendzina	317			
7.5.1.7	Pararendzina	319			
7.5.1.8	Tschernosem (Schwarzerde)	319			
7.5.1.9	Braunerde	321			
7.5.1.10	Terra fusca	322			
7.5.1.11	Parabraunerde und Fahlerde	323			
7.5.1.12	Podsol	325			
7.5.1.13	Pelosol	327			

8.4.3	Regosol-Calcisol-Solonchak-Bodenzone der Halbwüste	373	9.5.2.2	Nährstoff-Nachlieferung und -Transport	396
8.4.4	Arenosol-(Leptosol)-Gypsisol-Solonchak-Bodenzone der Vollwüste	374	9.5.2.3	Aufnahme von Nährstoffen aus dem Unterboden	398
8.4.5	Planosol-Luvisol-(Acrisol)-Cambisol-Zone der mediterranen Gebiete	374	9.5.2.4	Bestimmung der Nährstoffversorgung von Böden	398
8.4.6	Chernozem-Kastanozem-Solonetz-Zone der Steppen	375	9.5.2.5	Versorgungsbereiche für Nährelemente in Böden	400
8.4.7	Cambisol-Luvisol-Gleysol-Zone der gemäßigt-humiden Breiten	376	9.5.3	Nährstoffdüngung	400
8.4.8	Podzol-Cambisol-Histosol-Zone der borealen Wälder (Taiga)	376	9.6	Hauptnährelemente	401
8.4.9	Leptosol-Regosol-Gleysol-Histosol-Zone der Tundren	377	9.6.1	Stickstoff	401
8.4.10	Leptosol-Gelic-Regosol-Cryosol-Zone der Kältewüsten	377	9.6.1.1	Biologische N ₂ -Bindung und Stickstoff-Kreislauf	402
8.5	Literatur	378	9.6.1.2	N-Verbindungen und N-Gehalte	403
			9.6.1.3	Ammonifikation und NH ₄ ⁺ -Fixierung, Nitrifikation und Denitrifikation	405
			9.6.1.4	N-Bilanz, N-Düngung und Pflanzenertrag	407
			9.6.1.5	Umweltbelastungen durch Stickstoff-Austräge	409
9	Böden als Pflanzenstandorte	379	9.6.2	Phosphor	412
9.1	Durchwurzelbarkeit und Gründigkeit	379	9.6.2.1	P-Gehalte von Gesteinen und Böden	412
9.1.1	Durchwurzelbarkeit	379	9.6.2.2	P-Formen und P-Mineralen in Böden	413
9.1.2	Gründigkeit	380	9.6.2.3	P-Mobilisierung unter reduzierenden Bedingungen	418
9.2	Wasserversorgung der Pflanzen	380	9.6.2.4	P-Versorgung der Pflanzen, P-Düngung und P-Bilanz	418
9.2.1	Pflanzenverfügbares Wasser	381	9.6.2.5	Gewässerbelastungen durch P-Austräge	420
9.2.2	Wasserbewegungen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre	384	9.6.3	Schwefel	421
9.2.2.1	Wasserbewegung zur Pflanzenwurzel	385	9.6.3.1	S-Gehalte von Gesteinen und Böden	421
9.2.2.2	Wasseraufnahme durch die Pflanze	385	9.6.3.2	S-Formen und -Mineralen in Böden	421
9.2.3	Wasserverbrauch und Pflanzenertrag	386	9.6.3.3	S-Versorgung der Pflanzen, S-Auswaschung und S-Düngung	422
9.3	Bodenluft und Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln	388	9.6.4	Kalium	423
9.3.1	Lufthaushalt der Böden	388	9.6.4.1	K-Gehalte von Gesteinen und Böden	423
9.3.2	Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln	388	9.6.4.2	K-Mineralen und -Formen in Böden	424
9.4	Bodenwärmehaushalt, Bodentemperatur und Pflanzenwachstum	390	9.6.4.3	Beziehungen zwischen austauschbarem und gelöstem K	425
9.5	Nährstoffversorgung der Pflanzen	391	9.6.4.3	K-Versorgung der Pflanzen, K-Düngung und K-Auswaschung	426
9.5.1	Nährstoffgehalte, -bindung und -bilanzen	392	9.6.5	Calcium	427
9.5.1.1	Nährstoffeinträge	392	9.6.5.1	Ca-Gehalte, -Mineralen und -Formen in Böden	427
9.5.1.2	Nährstoffausträge	393	9.6.5.2	Ca-Versorgung der Pflanzen, Ca-Düngung und Ca-Auswaschung	427
9.5.2	Nährstoffverfügbarkeit und Nährstoffversorgung der Böden	395	9.6.6	Magnesium	428
9.5.2.1	Nährstoffe in der Bodenlösung	396			

9.6.6.1	Mg-Gehalte, -Minerale und -Formen in Böden	428	10.3.2	Prozesse auf der Bodenoberfläche	484
9.6.6.2	Mg-Versorgung der Pflanzen, Mg-Düngung und Mg- Auswaschung	428	10.3.3	Festlegung im Boden	484
9.6.7	Natrium	429	10.3.4	Abbau und Verlagerung	489
9.7	Spurennährelemente	430	10.3.5	Aufnahme in und Wirkungen auf Organismen	491
9.7.1	Mangan	430	10.4	Wirtschafts- und Sekundär- rohstoffdünger, Baggergut	493
9.7.1.1	Mn-Gehalte, -Minerale und -Formen in Böden	430	10.5	Toxikologische/Ökotoxikologische Bewertung stofflicher Boden- belastungen	497
9.7.1.2	Mn-Versorgung der Pflanzen, Mn-Entzüge und -Auswaschung, Mn-Düngung	432	10.6	Sanierung stofflicher Belastungen	505
9.7.2	Eisen	434	10.7	Gefährdung der Boden- funktionen durch nichtstoffliche Belastungen	506
9.7.3	Kupfer	435	10.7.1	Bodenerosion	506
9.7.3.1	Cu-Gehalte, -Minerale und -Formen in Böden	435	10.7.2	Mechanische Bodenverformung	513
9.7.3.2	Cu-Versorgung der Pflanzen, Cu-Entzüge und -Auswaschung, Cu-Düngung	436	10.8	Weiterführende Literatur	517
9.7.4	Zink	437	11	Bodenbewertung und Bodenschutz	521
9.7.4.1	Zn-Gehalte, -Minerale und -Formen in Böden	437	11.1	Prinzipien der Bodenbewertung	521
9.7.4.2	Zn-Versorgung der Pflanzen, Zn-Entzüge und -Auswaschung, Zn-Düngung	438	11.2	Bewertung für Besteuerung und landwirtschaftliche Nutzung	524
9.7.5	Bor	439	11.2.1	Bodenschätzung – Acker- schätzungsrahmen	525
9.7.6	Molybdän	440	11.2.2	Bodenschätzung – Grünland- schätzungsrahmen	527
9.7.7	Chlor	442	11.2.3	Bewertung für Sonderkulturen	528
9.8	Nützliche Elemente	442	11.3	Bewertung für die forstliche Nutzung	528
9.8.1	Silicium	442	11.4	Bewertung für zivilisatorische Ansprüche ohne Nutzung der Primärproduktion	532
9.8.2	Cobalt	443	11.5	International übliche Verfahren der Bodenbewertung	534
9.8.3	Selen	444	11.5.1	Storie Index Rating (SIR)	534
9.9	Literatur	445	11.5.2	Fertility Capability Classification (FCC)	535
10	Gefährdung der Bodenfunktionen	449	11.5.3	Land Capability Classification (LCC)	535
10.1	Gefährdungen der Boden- funktionen durch stoffliche Belastungen	450	11.5.4	Land Suitability Classification (LSC)	536
10.1.1	Eintragspfade von Schadstoffen in Böden	451	11.5.5	Agro-Ecological-Zones	538
10.2	Anorganische Stoffe	452	11.5.6	Soil Quality Assessment	538
10.2.1	Schwefeldioxid und Stickstoff- verbindungen – Waldschäden	452	11.6	Bodeninformationssysteme	539
10.2.2	Fluor	456	11.7	Bodenschutz	540
10.2.3	Cyanide	457	11.7.1	Gründe für Bodenschutz	540
10.2.4	Schwermetalle	459	11.7.2	Schutz des Naturkörpers	541
10.2.5	Salze	472	11.7.3	Bodenfunktionen und -potenziale	541
10.2.6	Radionuklide	473	11.7.4	Bundes-Bodenschutzgesetz	542
10.3	Organische Schadstoffe	479	11.8	Literatur	544
10.3.1	Einteilung, Verwendung, Eintrag und Gehalte in Böden	479			

12	Anhang	545
12.1	Gliederung geologischer Formationen	546
12.2	Symbole, Umrechnungsfaktoren	549
12.2.1	Abkürzungen	549
12.2.2	Umrechnungsfaktoren für Düngemittel	550
	Index	551