

Scheffer / Schachtschabel

# Lehrbuch der Bodenkunde

14., neu bearbeitete und erweiterte Auflage von  
P. Schachtschabel†, H.-P. Blume, G. Brümmer,  
K. H. Hartge, U. Schwertmann

Unter Mitarbeit von K. Auerswald, L. Beyer, W. R. Fischer,  
I. Kögel-Knabner, M. Renger, O. Strebel

248 Abbildungen · 100 Tabellen · 1 Farbtafel



Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1998

# Inhalt

|          |  |    |          |   |    |
|----------|--|----|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....  | 1  | 2.3.3    | Rolle der Biota .....   | 38 |
| 1.1      | Böden als Naturkörper in Ökosystemen .....                             | 1  | 2.3.4    | Verwitterungsstabilität .....   | 39 |
| 1.2      | Funktionen von Böden in der Ökosphäre .....                            | 3  | 2.4      | Mineralbestand von Böden – Mineralbestimmung .....  | 41 |
| 1.3      | Böden als offene Systeme .....   | 3  | 2.4.1    | Mineralbestand von Böden .....  | 41 |
| 1.4      | Literatur .....  | 4  | 2.4.2    | Mineralbestimmung .....   | 43 |
|          |  |    | 2.5      | Literatur .....   | 43 |
| <b>2</b> | <b>Anorganische Komponenten der Böden – Minerale und Gesteine</b> .... | 5  | <b>3</b> | <b>Organische Substanz und Bodenorganismen</b> .....                                      | 45 |
| 2.1      | Minerale .....   | 5  | 3.1      | Organische Substanz .....   | 45 |
| 2.1.1    | Allgemeines .....  | 5  | 3.1.1    | Definition und Einteilung .....   | 45 |
| 2.1.2    | Primäre Silicate .....   | 6  | 3.1.2    | Organische Ausgangsstoffe und ihre Umwandlung .....                                       | 46 |
| 2.1.2.1  | Struktur der Silicate .....  | 6  | 3.1.2.1  | Pflanzenreste .....   | 46 |
| 2.1.2.2  | Feldspäte .....  | 7  | 3.1.2.2  | Mikrobielle Reste .....   | 48 |
| 2.1.2.3  | Glimmer und Chlorite .....   | 8  | 3.1.2.3  | Zerkleinerung und Umsetzung der organischen Substanz durch das Edaphon .....              | 48 |
| 2.1.2.4  | Weitere Silicate .....   | 9  | 3.1.2.4  | Abbau- und Umwandlungsprozesse der Pflanzeninhaltsstoffe .....                            | 48 |
| 2.1.3    | Tonminerale .....  | 11 | 3.1.3    | Zusammensetzung und Eigenschaften der Huminstoffe .....                                   | 51 |
| 2.1.3.1  | Allgemeine Eigenschaften .....   | 11 | 3.1.3.1  | Humus-Fractionen .....  | 52 |
| 2.1.3.2  | Kristallstruktur und Einteilung .....                                  | 11 | 3.1.3.2  | Bausteine der Huminstoffe .....   | 53 |
| 2.1.3.3  | Die einzelnen Tonminerale .....  | 12 | 3.1.3.3  | Alter der organischen Substanz .....  | 55 |
| 2.1.3.4  | Bildung und Umwandlung der Tonminerale .....                           | 16 | 3.1.4    | Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau sowie Dynamik der organischen Substanz ..... | 56 |
| 2.1.4    | Oxide und Hydroxide .....  | 18 | 3.1.4.1  | Einfluß der Standortbedingungen ...   | 56 |
| 2.1.4.1  | Siliciumoxide .....  | 20 | 3.1.4.2  | Einfluß der Nutzungsform .....  | 58 |
| 2.1.4.2  | Aluminiumhydroxide .....   | 20 | 3.1.4.3  | Einfluß der Düngung .....   | 59 |
| 2.1.4.3  | Eisenoxide .....   | 21 | 3.1.4.4  | C-Dynamik und Modellansätze .....   | 61 |
| 2.1.4.4  | Titanoxide .....   | 25 | 3.1.4.5  | Einfluß globaler Änderungen .....   | 63 |
| 2.1.4.5  | Manganoxide .....  | 25 | 3.1.5    | Bedeutung der organischen Substanz für Böden und Pflanzen .....                           | 63 |
| 2.1.5    | Carbonate, Sulfate, Sulfide und Phosphate .....                        | 25 | 3.1.5.1  | Chemische und physiologische Wirkungen .....  | 63 |
| 2.2      | Gesteine .....   | 26 | 3.1.5.2  | Bodenbiologische Wirkungen .....  | 63 |
| 2.2.1    | Magmatite .....  | 26 | 3.1.5.3  | Physikalische Wirkungen .....   | 64 |
| 2.2.2    | Sedimente und Sedimentite .....  | 29 | 3.1.6    | Analytische Bestimmung und Fraktionierung der organischen Substanz .....                  | 64 |
| 2.2.2.1  | Allgemeines .....  | 29 | 3.1.6.1  | Isolierung und Fraktionierung .....   | 64 |
| 2.2.2.2  | Kiese, Breccien, Konglomerate (Psephite) .....                         | 30 | 3.1.6.2  | Methoden zur Identifizierung und Strukturauflärung .....                                  | 65 |
| 2.2.2.3  | Sande und Sandsteine (Psammite) ..                                     | 30 | 3.1.6.3  | Altersbestimmung der organischen Substanz .....   | 66 |
| 2.2.2.4  | Schluffe, Tone und Ton- und Schluffsteine (Pelite) .....               | 31 | 3.1.7    | Literatur .....   | 66 |
| 2.2.2.5  | Carbonatgesteine .....   | 31 | 3.2      | Organo-mineralische Verbindungen  | 69 |
| 2.2.2.6  | Quartäre Lockersedimente .....   | 31 | 3.2.1    | Literatur .....   | 70 |
| 2.2.3    | Metamorphite .....   | 32 |          |   |    |
| 2.2.4    | Anthropogene Substrate .....   | 33 |          |   |    |
| 2.3      | Verwitterung .....   | 34 |          |   |    |
| 2.3.1    | Physikalische Verwitterung .....                                       | 34 |          |   |    |
| 2.3.2    | Chemische Verwitterung .....   | 35 |          |   |    |
| 2.3.2.1  | Auflösung durch Hydratation .....                                      | 35 |          |   |    |
| 2.3.2.2  | Hydrolyse und Protolyse .....  | 36 |          |   |    |
| 2.3.2.3  | Oxidation und Komplexierung .....                                      | 38 |          |   |    |

|          |   |           |          |  |            |
|----------|---|-----------|----------|--|------------|
| 3.3      | Bodenorganismen .....   | 70        | 4.2.2.3  | Eintrag saurer Niederschläge .....   | 106        |
| 3.3.1    | Einteilung und Beschreibung .....   | 70        | 4.2.2.4  | Oxidation von $\text{NH}_4^+$ und $\text{NH}_3$ .....                                      | 106        |
| 3.3.1.1  | Mikroorganismen .....   | 70        | 4.2.2.5  | Oxidation von $\text{Fe}^{2+}$ - und $\text{Mn}^{2+}$ -<br>Ionen und von Fe-Sulfiden ..... | 107        |
| 3.3.1.2  | Meso-, Makro- und Megafauna .....   | 72        | 4.2.3    | Puffersubstanzen und -reaktionen ..  | 107        |
| 3.3.2    | Lebensbedingungen .....   | 72        | 4.2.3.1  | Erdalkalicarbonate .....   | 109        |
| 3.3.2.1  | Nahrung und Nährelemente .....  | 72        | 4.2.3.2  | Variable Ladungen .....  | 109        |
| 3.3.2.2  | Wasser und Luft .....   | 73        | 4.2.3.3  | Silicate .....   | 109        |
| 3.3.2.3  | Temperatur und Wärme .....  | 73        | 4.2.3.4  | Oxide, Hydroxide und<br>Hydroxysalze .....   | 110        |
| 3.3.3    | Bodenorganismen als Lebens-<br>gemeinschaft .....   | 74        | 4.2.4    | SNK und BNK von Böden .....  | 110        |
| 3.3.3.1  | Wechselbeziehungen .....  | 74        | 4.2.5    | pH-Werte von Böden .....   | 111        |
| 3.3.3.2  | Organismenbesatz<br>europäischer Böden .....  | 74        | 4.2.5.1  | pH-Werte verschiedener Böden .....   | 111        |
| 3.3.3.3  | Bodenorganismen anderer Klimate ..  | 77        | 4.2.5.2  | Variation des pH nach Ort und Zeit ..  | 112        |
| 3.3.3.4  | Einfluß von Bodentiefe und<br>Jahreszeit .....  | 77        | 4.2.6    | Kalkung .....  | 113        |
| 3.3.3.5  | Rhizosphäre und Mykorrhiza .....  | 77        | 4.2.7    | Anzustrebender pH-Wert<br>von Kulturböden .....  | 115        |
| 3.3.3.6  | Unterschiede im Organismen-<br>besatz zwischen Böden .....  | 79        | 4.2.8    | Bestimmungsmethoden .....  | 116        |
| 3.3.4    | Einfluß der Bodenorganismen<br>auf Bodeneigenschaften .....   | 79        | 4.2.9    | Literatur .....  | 116        |
| 3.3.4.1  | Mikroorganismen .....   | 79        | 4.3      | Redoxreaktionen .....  | 117        |
| 3.3.4.2  | Meso-, Makro- und Megafauna .....   | 80        | 4.3.1    | Allgemeines .....  | 117        |
| 3.3.5    | Einfluß von Kulturmaßnahmen .....   | 82        | 4.3.2    | Eh-pH-Stabilitätsdiagramme .....   | 118        |
| 3.3.6    | Organismen als Indikatoren für<br>Bodenzustände .....   | 83        | 4.3.3    | Redoxsysteme in Böden .....  | 120        |
| 3.3.7    | Untersuchungsmethoden .....   | 84        | 4.3.4    | Redoxpotentiale von Böden .....  | 122        |
| 3.3.7.1  | Mikroorganismen .....   | 84        | 4.3.5    | Literatur .....  | 122        |
| 3.3.7.2  | Bodentiere und deren Aktivität .....  | 85        | 4.4      | Bodenlösung .....  | 123        |
| 3.3.8    | Literatur .....   | 85        | 4.4.1    | Zusammensetzung .....  | 123        |
| <b>4</b> | <b>Chemische Eigenschaften<br/>der Böden</b> .....  | <b>87</b> | 4.4.2    | Chemische Formen der gelösten<br>Elemente .....  | 124        |
| 4.1      | Ionensorption .....   | 87        | 4.4.3    | Gelöste organische Substanzen (DOM)<br>und metallorganische Komplexe .....                 | 128        |
| 4.1.1    | Die sorbierende Oberfläche .....  | 87        | 4.4.3.1  | Gelöste organische Substanzen .....  | 129        |
| 4.1.1.1  | Größe der Oberfläche .....  | 87        | 4.4.3.2  | Gelöste metallorganische<br>Komplexe .....   | 129        |
| 4.1.1.2  | Oberflächenladung .....   | 88        | 4.4.3.3  | Eigenschaften metallorganischer<br>Komplexe .....  | 130        |
| 4.1.2    | System Sorbent – Sorbat .....   | 91        | 4.4.3.4  | Rhizosphärenkomplexe .....   | 131        |
| 4.1.2.1  | Sorptionstypen .....  | 91        | 4.4.3.5  | Einfluß der Redoxbedingungen .....   | 131        |
| 4.1.2.2  | Kationensorption .....  | 93        | 4.4.4    | Gewinnung der Bodenlösung .....  | 132        |
| 4.1.3    | Ionensorption an Al- und Fe(III)-<br>Oxiden sowie Allophan .....  | 98        | 4.4.5    | Literatur .....  | 133        |
| 4.1.4    | Ionensorption von Böden .....   | 100       | <b>5</b> | <b>Physikalische Eigenschaften<br/>der Böden</b> .....                                     | <b>135</b> |
| 4.1.4.1  | Kationenaustausch .....   | 100       | 5.1      | Körnung und Lagerung .....   | 135        |
| 4.1.4.2  | Anionensorption .....   | 102       | 5.1.1    | Entstehung der Körner .....  | 135        |
| 4.1.5    | Bestimmung .....  | 103       | 5.1.2    | Größen der Körner .....  | 136        |
| 4.1.6    | Literatur .....   | 103       | 5.1.3    | Einteilungen der Körner .....  | 136        |
| 4.2      | Bodenacidität .....   | 104       | 5.1.3.1  | Korngrößenfraktionen .....   | 137        |
| 4.2.1    | Wesen der Bodenacidität .....   | 104       | 5.1.3.2  | Mischungen, Korngrößen-<br>verteilungen .....  | 137        |
| 4.2.2    | $\text{H}^+$ -Ionen-Quellen .....   | 105       | 5.1.3.3  | Bestimmung der<br>Korngrößenverteilung .....   | 138        |
| 4.2.2.1  | Bildung von Kohlensäure und<br>organischen Säuren durch<br>Oxidation von Biomasse und<br>Wurzelatmung ..... | 105       | 5.1.4    | Eigenschaften der Körner .....   | 139        |
| 4.2.2.2  | Abgabe von $\text{H}^+$ -Ionen durch die Wur-<br>zel bei der Kationenaufnahme .....                         | 106       | 5.1.4.1  | Zusammensetzung und Form .....   | 139        |
|          |   |           | 5.1.4.2  | Oberflächen .....  | 139        |
|          |   |           | 5.1.5    | Häufige Verteilungen der Körner ..   | 140        |

|         |   |     |         |   |     |
|---------|---|-----|---------|---|-----|
| 5.1.5.1 | Ursachen .....  | 140 | 5.3.5   | Beurteilung des Bodengefüges<br>für den Pflanzenbau .....         | 180 |
| 5.1.5.2 | Landschaftsbezogene<br>Vorkommen .....  | 141 | 5.3.6   | Literatur .....   | 181 |
| 5.1.6   | Lagerung der Primärteilchen .....   | 141 | 5.4     | Bodenwasser .....   | 183 |
| 5.1.6.1 | Abstützung und Berührung .....  | 141 | 5.4.1   | Einteilung – Bindungsarten .....                                  | 183 |
| 5.1.6.2 | Kennziffern der Lagerung .....  | 142 | 5.4.1.1 | Grund- und Stauwasser .....                                       | 183 |
| 5.1.6.3 | Porenanteile in Böden .....   | 143 | 5.4.1.2 | Adsorptions- und Kapillarwasser ..                                | 183 |
| 5.1.6.4 | Porenformen .....   | 144 | 5.4.1.3 | Bestimmung des Wassergehaltes ...                                 | 185 |
| 5.1.6.5 | Porengrößenverteilung .....   | 144 | 5.4.2   | Intensität der Wasserbindung .....                                | 185 |
| 5.1.7   | Zeitliche bedingte Veränderungen .  | 146 | 5.4.2.1 | Potentiale .....  | 185 |
| 5.1.7.1 | Veränderungen der Körnung .....   | 146 | 5.4.2.2 | Potential-Gleichgewicht .....                                     | 188 |
| 5.1.7.2 | Veränderungen der Lagerung .....  | 146 | 5.4.2.3 | Beziehung zwischen Matrix-<br>potential und Wassergehalt .....    | 189 |
| 5.1.8   | Zusammenhang zwischen<br>fester Phase und anderen<br>Bodeneigenschaften .....       | 147 | 5.4.3   | Wasserbewegung in<br>flüssiger Phase .....                        | 191 |
| 5.1.9   | Literatur .....   | 147 | 5.4.3.1 | Einfluß von Körnung und Gefüge .                                  | 193 |
| 5.2     | Wechselwirkungen zwischen<br>Primärteilchen und Umgebung .....                      | 148 | 5.4.3.2 | Einfluß des Wassergehaltes .....                                  | 194 |
| 5.2.1   | Flockung und Peptisation .....  | 149 | 5.4.3.3 | Bestimmung der Wasserleit-<br>fähigkeit .....                     | 195 |
| 5.2.1.1 | Energetische Wechselbeziehun-<br>gen zwischen Bodenkolloiden .....                  | 149 | 5.4.3.4 | Wasseraufnahme – Wasserabgabe .                                   | 195 |
| 5.2.1.2 | Einfluß von Kationenbelag und<br>Wertigkeit auf die Flockung .....                  | 151 | 5.4.4   | Wasserbewegung in dampf-<br>förmiger Phase .....                  | 199 |
| 5.2.1.3 | Einfluß von Polymeren auf<br>Flockung und Dispergierung .....                       | 152 | 5.4.4.1 | Wasserdampfbewegung im Boden ..                                   | 199 |
| 5.2.1.4 | Aufbau der Flocken .....  | 153 | 5.4.4.2 | Evaporation aus dem Boden .....                                   | 200 |
| 5.2.1.5 | Einfluß des elektrokinetischen<br>Potentials .....                                  | 154 | 5.4.4.3 | Kondensation im Boden .....                                       | 202 |
| 5.2.2   | Schrumpfung und Quellung .....  | 154 | 5.4.5   | Wasserhaushalt der Böden .....                                    | 202 |
| 5.2.2.1 | Schrumpfung .....   | 154 | 5.4.5.1 | Bodenkennwerte .....  | 202 |
| 5.2.2.2 | Quellung .....  | 156 | 5.4.5.2 | Jahreszeitlicher Gang des<br>Wasserhaushalts .....                | 204 |
| 5.2.3   | Benetzbarkeit .....   | 157 | 5.4.5.3 | Klassifizierung .....   | 207 |
| 5.2.4   | Kohäsion, Konsistenz und<br>Strömungsdruck .....                                    | 158 | 5.4.6   | Wasserhaushalt von Landschaften .                                 | 207 |
| 5.2.5   | Literatur .....   | 159 | 5.4.6.1 | Einzugsgebiete .....  | 209 |
| 5.3     | Gefüge .....  | 160 | 5.4.6.2 | Einfluß von Topographie<br>und Geologie .....                     | 209 |
| 5.3.1   | Gefügemorphologie .....   | 160 | 5.4.6.3 | Einfluß von Klima und<br>Witterung .....                          | 209 |
| 5.3.1.1 | Makrogefüge .....   | 160 | 5.4.6.4 | Auswirkungen der Wasserbewe-<br>gung auf die Bodenentwicklung ... | 210 |
| 5.3.1.2 | Mikrogefüge .....   | 162 | 5.4.6.5 | Berechnungen .....  | 210 |
| 5.3.1.3 | Riß- und Röhrensysteme .....  | 164 | 5.4.7   | Wasserversorgung der Pflanzen ...                                 | 211 |
| 5.3.2   | Spannungen und Verformungen ...   | 165 | 5.4.7.1 | Pflanzenverfügbares Wasser .....                                  | 212 |
| 5.3.2.1 | Kräfte am Korn .....  | 165 | 5.4.7.2 | Wasserbewegung im System<br>Boden-Pflanze-Atmosphäre .....        | 214 |
| 5.3.2.2 | Kräfte und Spannungen<br>im Bodenverband .....                                      | 166 | 5.4.7.3 | Wasserverbrauch und<br>Pflanzenertrag .....                       | 216 |
| 5.3.2.3 | Einfluß des Wassers .....   | 168 | 5.4.8   | Literatur .....   | 217 |
| 5.3.3   | Stabilität des Bodengefüges .....   | 169 | 5.5     | Bodenluft .....   | 219 |
| 5.3.3.1 | Stabilisierende Stoffe .....  | 170 | 5.5.1   | Zusammensetzung und<br>Herkunft der Komponenten .....             | 219 |
| 5.3.3.2 | Verschlämmung, Verknetung und<br>Verkrustung .....                                  | 172 | 5.5.2   | Transportmechanismen .....  | 221 |
| 5.3.3.3 | Strömungsdruck, Erdfließen .....  | 172 | 5.5.3   | Gashaushalt .....   | 222 |
| 5.3.3.4 | Bestimmung der Gefügestabilität ..  | 173 | 5.5.3.1 | Gashaushalt und Umwelt .....                                      | 222 |
| 5.3.4   | Biologische, klimatische und<br>anthropogene Einflüsse auf das<br>Bodengefüge ..... | 174 | 5.5.3.2 | Gashaushalt und Pflanzenstandort                                  | 223 |
| 5.3.4.1 | Gefüge eines Bodens als<br>Gleichgewichtslage .....                                 | 174 | 5.5.4   | Literatur .....   | 224 |
| 5.3.4.2 | Natürliche Bodenentwicklung .....   | 175 | 5.6     | Bodentemperatur .....   | 225 |
| 5.3.4.3 | Anthropogene Einflüsse .....  | 179 | 5.6.1   | Bedeutung thermischer Phänomene                                   | 225 |
|         |   |     | 5.6.2   | Energiegewinn und -verlust .....                                  | 225 |
|         |   |     | 5.6.3   | Thermische Eigenschaften .....                                    | 226 |

|          |  |            |          |  |     |
|----------|--|------------|----------|--|-----|
| 5.6.4    | Wärmebewegungen .....  | 228        | 6.2.2.1  | Pflanzenverfügbares<br>Magnesium .....                               | 253 |
| 5.6.5    | Wärmehaushalt .....  | 228        | 6.2.2.2  | Bestimmung der<br>Mg-Versorgung von Böden .....                      | 254 |
| 5.6.5.1  | Natürlicher Wärmehaushalt .....  | 229        | 6.2.2.3  | Mg-Entzüge, -Auswaschung und<br>-Düngung .....                       | 255 |
| 5.6.5.2  | Anthropogene Eingriffe .....   | 230        | 6.2.3    | Kalium .....   | 256 |
| 5.6.6    | Literatur .....  | 231        | 6.2.3.1  | Kalium im Kreislauf .....  | 256 |
| 5.7      | Transportvorgänge und Ver-<br>lagerungen .....   | 232        | 6.2.3.2  | K-Formen in Böden .....  | 257 |
| 5.7.1    | Transport im Boden in der<br>flüssigen Phase .....   | 233        | 6.2.3.3  | Beziehung zwischen austausch-<br>barem K und K der Bodenlösung ..    | 258 |
| 5.7.2    | Transport im Boden in der<br>Gasphase .....  | 235        | 6.2.3.4  | Verfügbarkeit des nicht-<br>austauschbaren K für die Pflanze ..      | 259 |
| 5.7.3    | Transporte in der Landschaft .....   | 235        | 6.2.3.5  | Bestimmung der<br>K-Versorgung von Böden .....                       | 260 |
| 5.7.4    | Literatur .....  | 237        | 6.2.4    | Natrium .....  | 260 |
| 5.8      | Bodenfarbe .....   | 237        | 6.2.5    | Phosphor .....   | 261 |
| 5.8.1    | Farbansprache .....  | 237        | 6.2.5.1  | Phosphor im Kreislauf .....  | 261 |
| 5.8.2    | Farbgebende Stoffe und ihr<br>Zeigerwert .....   | 238        | 6.2.5.2  | P-Gehalt von Böden .....   | 261 |
| 5.8.1    | Literatur .....  | 239        | 6.2.5.3  | P-Formen und ihre Eigenschaften ..                                   | 261 |
| <b>6</b> | <b>Nährstoffe der Böden .....</b>  | <b>240</b> | 6.2.5.4  | Umsetzung von<br>Düngerphosphaten .....                              | 268 |
| 6.1      | Verhalten, Bestimmung und<br>Düngung von Nährstoffen .....                                 | 240        | 6.2.5.5  | Übergang des gebundenen Phos-<br>phats in Bodenlösung und Pflanze .. | 268 |
| 6.1.1    | Allgemeines über Gehalt,<br>Bindung und Bilanz .....                                       | 241        | 6.2.5.6  | P-Versorgung von Böden<br>und ihre Bestimmung .....                  | 269 |
| 6.1.2    | Nährstoffauswaschung .....   | 242        | 6.2.6    | Stickstoff .....   | 270 |
| 6.1.3    | Nährstoffverfügbarkeit .....   | 244        | 6.2.6.1  | N-Verbindungen und N-Gehalt .....                                    | 270 |
| 6.1.3.1  | Nährstoffkonzentration der<br>Bodenlösung .....  | 244        | 6.2.6.2  | N-Kreislauf, N-Bilanz und<br>N-Gleichgewicht .....                   | 271 |
| 6.1.3.2  | Nährstoffvorrat im Wurzelraum .....  | 245        | 6.2.6.3  | N-Mineralisierung und<br>Immobilisierung .....                       | 272 |
| 6.1.3.3  | Nährstoffnachlieferung<br>und -transport .....   | 246        | 6.2.6.4  | Nitrifikation .....  | 274 |
| 6.1.3.4  | Mikrobielle Aktivität und<br>pH-Wert in der Rhizosphäre,<br>Wurzelausscheidungen .....     | 247        | 6.2.6.5  | Denitrifikation .....  | 274 |
| 6.1.4    | Bestimmung der Nährstoff-<br>versorgung von Böden .....                                    | 247        | 6.2.6.6  | Ammonium-Fixierung .....   | 275 |
| 6.1.4.1  | Feldversuche .....   | 247        | 6.2.6.7  | Biologische N <sub>2</sub> -Fixierung .....                          | 276 |
| 6.1.4.2  | Gefäßversuche .....  | 248        | 6.2.6.8  | N-Düngung und N-Bilanz .....   | 276 |
| 6.1.4.3  | Pflanzenanalyse .....  | 248        | 6.2.6.9  | Gasförmige N-Verluste .....  | 278 |
| 6.1.4.4  | Mangelsymptome .....   | 248        | 6.2.6.10 | N-Auswaschung .....  | 279 |
| 6.1.4.5  | Chemische Bodenuntersuchungen .....  | 248        | 6.2.6.11 | Grundwasserbelastung<br>durch Nitrat auswaschung .....               | 281 |
| 6.1.5    | Düngung in Abhängigkeit von<br>Pflanzenentzug und Nähr-<br>stoffversorgung der Böden ..... | 249        | 6.2.7    | Schwefel .....   | 282 |
| 6.1.5.1  | Nährstoffentzug durch die Pflanzen .....   | 249        | 6.2.7.1  | S-Bindungsformen in Böden .....                                      | 282 |
| 6.1.5.2  | Entzugs- und Erhaltungsdüngung ..  | 249        | 6.2.7.2  | SO <sub>2</sub> -Emission und S-Deposition ...                       | 283 |
| 6.1.5.3  | Nährstoffgehaltsklassen und<br>Grenzwerte .....  | 250        | 6.2.7.3  | Schwefel in Pflanzen, S-Entzüge,<br>S-Auswaschung und S-Düngung ..   | 284 |
| 6.1.5.4  | Einfluß des Standorts, speziell<br>des Unterbodens .....                                   | 250        | 6.2.8    | Literatur .....  | 285 |
| 6.1.5.5  | Änderung der Bodenuntersuchungs-<br>werte nach einer Düngung .....                         | 251        | 6.3      | Spurennährelemente .....   | 288 |
| 6.1.6    | Literatur .....  | 251        | 6.3.1    | Mangan .....   | 288 |
| 6.2      | Hauptnährelemente .....  | 252        | 6.3.2    | Eisen .....  | 291 |
| 6.2.1    | Calcium .....  | 252        | 6.3.3    | Kupfer .....   | 292 |
| 6.2.2    | Magnesium .....  | 253        | 6.3.4    | Zink .....   | 295 |
|          |  |            | 6.3.5    | Bor .....  | 297 |
|          |  |            | 6.3.6    | Molybdän .....   | 299 |
|          |  |            | 6.3.7    | Chlor .....  | 301 |
|          |  |            | 6.3.8    | Literatur .....  | 301 |
|          |  |            | 6.4      | Nützliche Elemente .....   | 305 |
|          |  |            | 6.4.1    | Silicium .....   | 305 |

|          |   |            |          |  |            |
|----------|---|------------|----------|--|------------|
| 6.4.2    | Cobalt .....  | 306        | 7.6.1.2  | Formen der Wassererosion .....   | 367        |
| 6.4.3    | Selen .....   | 306        | 7.6.1.3  | Einflußgrößen .....  | 368        |
| 6.4.4    | Literatur .....   | 308        | 7.6.2    | Winderosion .....  | 369        |
| <b>7</b> | <b>Anthropogene Veränderungen<br/>und Belastungen .....</b>             | <b>309</b> | 7.6.2.1  | Prozesse der Winderosion .....   | 369        |
| 7.1      | Gewässereutrophierung und<br>Gewässerversauerung .....                  | 309        | 7.6.2.2  | Einflußgrößen .....  | 369        |
| 7.1.1    | Gewässereutrophierung .....   | 309        | 7.6.3    | Ausmaß der Bodenerosion .....  | 370        |
| 7.1.2    | Gewässerbelastung durch<br>Pflanzenschutzmittel .....                   | 312        | 7.6.4    | Schäden durch Bodenerosion .....   | 370        |
| 7.1.3    | Gewässerversauerung .....   | 313        | 7.6.5    | Erosionsschutz .....   | 371        |
| 7.1.4    | Literatur .....   | 314        | 7.6.6    | Prognosemodelle .....  | 371        |
| 7.2      | Luftbelastung .....   | 314        | 7.6.7    | Meßmethoden .....  | 372        |
| 7.2.1    | Emissionen .....  | 315        | 7.6.8    | Literatur .....  | 372        |
| 7.2.2    | Literatur .....   | 317        | <b>8</b> | <b>Bodenentwicklung, Bodensyste-<br/>matik und Bodenverbreitung ....</b> | <b>373</b> |
| 7.3      | Schadstoffe .....   | 317        | 8.1      | Faktoren der Bodenentwicklung ...  | 373        |
| 7.3.1    | Ökotoxikologische Bedeutung<br>von Bodenbelastung .....                 | 317        | 8.1.1    | Klima .....  | 373        |
| 7.3.2    | Filter-, Puffer- und Trans-<br>formatorfunktion der Böden .....         | 321        | 8.1.2    | Ausgangsgestein .....  | 375        |
| 7.3.3    | Ausmaß der Bodenbelastung<br>in Deutschland .....                       | 322        | 8.1.3    | Schwerkraft und Relief .....   | 376        |
| 7.3.4    | Ermittlung der Schadstoffgehalte<br>und der Belastbarkeit von Böden ..  | 324        | 8.1.4    | Wasser .....   | 377        |
| 7.3.5    | Anorganische Schadstoffe .....  | 326        | 8.1.5    | Fauna und Flora .....  | 378        |
| 7.3.5.1  | Schwefeldioxid und Stickstoffver-<br>bindungen, neuartige Waldschäden . | 327        | 8.1.6    | Menschliche Tätigkeit .....  | 379        |
| 7.3.5.2  | Fluor .....   | 330        | 8.1.7    | Literatur .....  | 380        |
| 7.3.5.3  | Cadmium .....   | 331        | 8.2      | Prozesse der Bodenentwicklung ...  | 381        |
| 7.3.5.4  | Blei .....  | 336        | 8.2.1    | Verwitterung und Mineralbildung .  | 381        |
| 7.3.5.5  | Quecksilber .....   | 340        | 8.2.1.1  | Kryoklastik .....  | 382        |
| 7.3.5.6  | Nickel .....  | 343        | 8.2.1.2  | Verbraunung und Verlehmung .....   | 382        |
| 7.3.5.7  | Chrom .....   | 344        | 8.2.1.3  | Ferralitisierung und Desilifizierung                                     | 383        |
| 7.3.6    | Organische Schadstoffe .....  | 346        | 8.2.1.4  | Temperatur- und Salzsprengung ....                                       | 383        |
| 7.3.6.1  | Nitrosamine .....   | 348        | 8.2.2    | Bildung von Humusformen .....  | 383        |
| 7.3.6.2  | Chlorierte Kohlenwasserstoffe .....                                     | 348        | 8.2.2.1  | Terrestrische Humusformen .....  | 384        |
| 7.3.6.3  | Polycyclische aromatische Koh-<br>lenwasserstoffe (PAK) .....           | 352        | 8.2.2.2  | Ackerhumusformen .....   | 386        |
| 7.3.6.4  | Mineralöl und Ölrückstände .....  | 353        | 8.2.2.3  | Hydromorphe Humusformen .....  | 386        |
| 7.3.7    | Salzschäden .....   | 354        | 8.2.3    | Gefügeentwicklung .....  | 387        |
| 7.3.8    | Literatur .....   | 355        | 8.2.4    | Umlagerungen im Profil .....   | 387        |
| 7.4      | Klärschlamm und Müllkompost ....  | 358        | 8.2.4.1  | Tonverlagerung .....   | 387        |
| 7.4.1    | Literatur .....   | 360        | 8.2.4.2  | Podsolierung .....   | 389        |
| 7.5      | Verhalten von organischen<br>Bioziden in Böden .....                    | 361        | 8.2.4.3  | Carbonatisierung .....   | 390        |
| 7.5.1    | Adsorption, Verlagerung und<br>Verdampfung .....                        | 361        | 8.2.5    | Versalzung .....   | 391        |
| 7.5.2    | Chemische und mikro-<br>biologische Umwandlung .....                    | 363        | 8.2.5.1  | Tagwasserversalzung .....  | 391        |
| 7.5.3    | Veränderung des Organismen-<br>besatzes durch Biozide .....             | 364        | 8.2.5.2  | Grundwasserversalzung .....  | 392        |
| 7.5.4    | Literatur .....   | 364        | 8.2.5.3  | Künstliche Versalzung .....  | 392        |
| 7.6      | Bodenerosion .....  | 365        | 8.2.5.4  | Vegetation und Melioration .....   | 393        |
| 7.6.1    | Wassererosion .....   | 365        | 8.2.6    | Redoximorphose .....   | 394        |
| 7.6.1.1  | Prozesse der Wassererosion .....  | 365        | 8.2.6.1  | Reduktomorphie und Sulfidbildung   | 394        |
|          |   |            | 8.2.6.2  | Konkretionsbildung und<br>Rostfleckung .....                             | 395        |
|          |   |            | 8.2.6.3  | Vergleyung .....   | 395        |
|          |   |            | 8.2.6.4  | Pseudovergleyung .....   | 395        |
|          |   |            | 8.2.6.5  | Schwefelsäurebildung .....   | 396        |
|          |   |            | 8.2.7    | Turbationen .....  | 396        |
|          |   |            | 8.2.7.1  | Bioturbation .....   | 396        |
|          |   |            | 8.2.7.2  | Kryoturbation .....  | 397        |
|          |   |            | 8.2.7.3  | Peloturbation .....  | 397        |
|          |   |            | 8.2.7.4  | Spaltenkumulation .....  | 398        |
|          |   |            | 8.2.8    | Stoffumlagerungen in der<br>Landschaft .....                             | 398        |

|          |  |     |           |  |     |
|----------|--|-----|-----------|--|-----|
| 8.2.8.1  | Massenversatz am Hang .....  | 399 | 8.6.3     | Nitisol .....  | 451 |
| 8.2.8.2  | Bodenumlagerung durch<br>Wasser und Wind .....                     | 399 | 8.6.4     | Acrisol und Lixisol .....                                | 452 |
| 8.2.8.3  | Verlagerung durch Hangzugwasser .....                              | 400 | 8.6.5     | Kastanozeme .....  | 452 |
| 8.2.9    | Profildifferenzierung .....  | 401 | 8.6.6     | Arenosol .....   | 453 |
| 8.2.10   | Literatur .....  | 403 | 8.6.7     | Calcisol und Gypsisol .....                              | 454 |
| 8.3      | Bodenhorizonte, diagnostische<br>Horizonte und Eigenschaften ..... | 404 | 8.6.8     | Solonchake .....   | 454 |
| 8.3.1    | Deutsche Definitionen von<br>Horizontsymbolen .....                | 404 | 8.6.9     | Solonetze .....  | 455 |
| 8.3.1.1  | Bodenlagen .....   | 405 | 8.6.10    | Planosol .....   | 456 |
| 8.3.1.2  | Horizontmerkmale .....   | 406 | 8.6.11    | Andosol .....  | 456 |
| 8.3.1.3  | Bodenhorizonte .....   | 407 | 8.6.12    | Cryosol und weitere Böden<br>mit Permafrost .....        | 456 |
| 8.3.2    | Diagnostische Horizonte,<br>Eigenschaften und Materialien .....    | 407 | 8.6.13    | Redoximorphe Kultisol<br>(Reisböden) .....               | 457 |
| 8.3.3    | Literatur .....  | 409 | 8.6.14    | Literatur .....  | 458 |
| 8.4      | Bodensystematik .....  | 410 | 8.7       | Bodenverbreitung .....                                   | 459 |
| 8.4.1    | Entwicklung der Bodensystematik .....                              | 410 | 8.7.1     | Grundsätze der<br>Bodenvergesellschaftung .....          | 459 |
| 8.4.2    | Klassifikationssysteme<br>in Deutschland .....                     | 410 | 8.7.2     | Bodenregionen Mitteleuropas .....                        | 461 |
| 8.4.3    | Klassifikationssysteme<br>in den USA .....                         | 413 | 8.7.3     | Bodenzonen der Erde .....                                | 463 |
| 8.4.4    | Bodeneinheiten der<br>Weltbodenkarte .....                         | 415 | 8.7.3.1   | Cryosol-Permafrost-Zonen .....                           | 463 |
| 8.4.5    | Internationale Bodensystematik .....                               | 416 | 8.7.3.2   | Podzol-Umbrisol-Glossisol-<br>Zonen .....                | 464 |
| 8.4.6    | Literatur .....  | 418 | 8.7.3.3   | Luvisol-Stagnosol-Cambisol-<br>Gleysol-Zonen .....       | 465 |
| 8.5      | Böden Mitteleuropas .....  | 418 | 8.7.3.4   | Zonen mediterraner Böden .....                           | 465 |
| 8.5.1    | Landböden (terrestrische Böden) .....                              | 418 | 8.7.3.5   | Steppenboden-Zonen .....                                 | 465 |
| 8.5.1.1  | Syrosem .....  | 419 | 8.7.3.6   | Calcisol-Gypsisol-Solonchak-<br>Arenosol-Zonen .....     | 466 |
| 8.5.1.2  | Lockersyrosem .....  | 419 | 8.7.3.7   | Vertisol-Lixisol-Nitisol-Zonen .....                     | 467 |
| 8.5.1.3  | O/C-Boden .....  | 419 | 8.7.3.8   | Ferralsol-Acrisol-Alisol-Zonen .....                     | 467 |
| 8.5.1.4  | Ranker .....   | 421 | 8.7.3.9   | Fluvisol-Gleysol-Regionen .....                          | 468 |
| 8.5.1.5  | Regosol .....  | 421 | 8.7.3.10  | Leptosol-Regionen .....                                  | 468 |
| 8.5.1.6  | Rendzina .....   | 422 | 8.7.4     | Böden städtisch-industrieller<br>Verdichtungsräume ..... | 468 |
| 8.5.1.7  | Pararendzina .....   | 423 | 8.7.5     | Literatur .....  | 470 |
| 8.5.1.8  | Tschernosem (Schwarzerde) .....                                    | 424 | <b>9</b>  | <b>Bodenbewertung</b> .....                              | 471 |
| 8.5.1.9  | Braunerde .....  | 425 | 9.1       | Allgemeines .....  | 471 |
| 8.5.1.10 | Terra fusca .....  | 427 | 9.2       | Bewertung für forstliche<br>Nutzung .....                | 472 |
| 8.5.1.11 | Parabraunerde und Fahlerde .....                                   | 428 | 9.3       | Bewertung für landwirt-<br>schaftliche Nutzung .....     | 472 |
| 8.5.1.12 | Podsol .....   | 430 | 9.4       | Bewertung für Sonderkulturen .....                       | 475 |
| 8.5.1.13 | Pelosol .....  | 431 | 9.5       | Literatur .....  | 476 |
| 8.5.1.14 | Pseudogley .....   | 432 | <b>10</b> | <b>Anhang</b> .....                                      | 477 |
| 8.5.1.15 | Stagnogley .....   | 434 | 10.1      | Gliederung geologischer<br>Formationen .....             | 477 |
| 8.5.1.16 | Reduktosol .....   | 435 | 10.2      | Literatur .....  | 479 |
| 8.5.2    | Grundwasserböden<br>(semiterrestrische Böden) .....                | 436 | 10.3      | Symbole .....  | 480 |
| 8.5.2.1  | Gleye .....  | 436 | 10.3.1    | Abkürzungen .....  | 480 |
| 8.5.2.2  | Auenböden .....  | 438 | 10.3.2    | Maßeinheiten .....                                       | 480 |
| 8.5.2.3  | Marschen .....   | 440 | 10.3.3    | Umrechnungsfaktoren .....                                | 480 |
| 8.5.3    | Unterwasserböden<br>(subhydrische Böden) .....                     | 442 | 10.4      | Sachwortregister .....                                   | 481 |
| 8.5.4    | Moore .....  | 444 |           |  |     |
| 8.5.5    | Anthropogene Böden .....   | 447 |           |  |     |
| 8.5.6    | Literatur .....  | 448 |           |  |     |
| 8.6      | Wichtige Böden außerhalb<br>Mitteleuropas .....                    | 449 |           |  |     |
| 8.6.1    | Vertisol .....   | 449 |           |  |     |
| 8.6.2    | Ferralsol und Sesquisol .....                                      | 450 |           |  |     |