Hartge/Horn

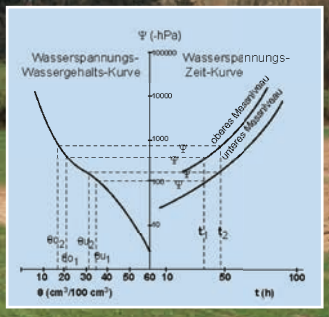
Die physikalische Untersuchung von Böden

Praxis
Messmethoden
Auswertung

4. vollst. überarbeitete Auflage







Schweizerbart

Die physikalische Untersuchung von Böden

Karl Heinrich Hartge und Rainer Horn

4. Auflage

E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) • Stuttgart • 2009

Professor Dr. Dr. h. c. Karl Heinrich Hartge
Institut für Bodenkunde der Universität Hannover
Herrenhäuserstraße 2
30419 Hannover

Professor Dr. Rainer Horn
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Herrmann-Rodewald-Straße 2
24118 Kiel

1. Auflage 1970 (Hartge)
2. Auflage 1989 (Hartge/Horn)
3. Auflage 1992 (Hartge/Horn) – ISBN 978-3-8274-1240-4
4. Auflage 2009 (Hartge/Horn) – ISBN 978-3-510-65246-4

www.schweizerbart.de
mail@schweizerbart.de

ISBN ebook (pdf) 978-3-510-65463-5
ISBN 978-3-510-65246-4

© 2009 by E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlags außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen, u. a. auch des Internet.

Verlag: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller),
Johannesstr. 3A, 70176 Stuttgart, Germany
Druck: freiburger graphische betriebe GmbH & Co. KG, Bebelstraße 11, 79108 Freiburg
Printed in Germany on permanent paper conforming to ISO 9706-1994

Zur 4. Auflage

Die hier vorliegende 4. Auflage ist im Vergleich zu den früheren Auflagen weitgehend überarbeitet worden, ohne das Ziel des Buches, nämlich bodenphysikalische Messungen auch mit Hilfe von einfachen und überall anwendbaren Methoden durchzuführen, aus den Augen zu verlieren.

In dem neu hinzugefügten 16. Kapitel werden Verfahren erläutert, die es ermöglichen, nicht nur aus mechanischen Spannungsverteilungen, sondern auch aus einfachen Lagerungsdichte- und/oder Eindringwiderstands-Tiefenverteilungen Aussagen über den Verdichtungszustand von Böden in der Landschaft abzuleiten.

Wie in den ersten 3 Auflagen steht auch in der nun vorliegenden 4. Auflage der Praktikumsbetrieb im Rahmen der bodenkundlichen Ausbildung und der selbständige Aufbau der Messanordnungen im Vordergrund.

In den einzelnen Kapiteln wurden die Zitierungen der neueren Geräteentwicklungen etwas ausgedehnt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, da diese häufig sehr teuren Messapparaturen nur in wenigen Speziallaboratorien und nicht für die allgemeine bodenphysikalische Analytik zur Verfügung stehen.

Dem Verlag E. Schweizerbart/Stuttgart danken wir sehr für sein Entgegenkommen bei der Herausgabe.

Hannover und Kiel, Sommer 2008 Prof. Dr. Dr. h. c. K. H. Hartge / Prof. Dr. R. Horn

Inhaltsverzeichnis

Vorwort XIII

Einleitung 1

1 Der Zusammenhang zwischen Fragestellung, Probennahme und Ergebnis 3
1.1 Das Prinzip des Beurteilens 3
1.1.1 Vergleichen, Skalieren, Klassifizieren 3
1.1.2 Messwerte und Schätzwerte 3
1.1.3 Richtigkeit, Reproduzierbarkeit, Genauigkeit 4
1.2 Auswahlprinzipien für Probenentnahmen 4
1.2.1 Probenanzahl, Flächencharakterisierung 4
1.2.2 Probenanzahl, Profilcharakterisierung 5
1.2.3 Probengröße 5
1.3 Fehlermöglichkeiten 6
1.3.1 Methodenwahl 6
1.3.2 Statistische Aspekte der Fehler 6
1.3.3 Sicherheitsmaßnahmen gegen Fehler 7
1.4 Darstellung der Ergebnisse 8
1.4.1 Grundwerte 8
1.4.2 Weitere Auswertungen 8
1.5 Protokoll, Laborkladde und Datensicherung auf dem PC 9
1.6 Literatur 10

2 Die Entnahme von Bodenproben 11
2.1 Problemstellung 11
2.2 Gestörte Proben aus dem Oberboden 11
2.2.1 Geräte 11
2.2.2 Entnahme und Verpackung der Proben 11
2.2.3 Auswertung der Ergebnisse 12
2.3 Ungestörte Proben aus dem Oberboden (Volumenproben) 13
2.3.1 Geräte 13
2.3.2 Entnahme und Verpackung der Probe 13
2.3.3 Vorarbeiten an den Proben 14
2.3.4 Wahl der Zylindergröße, Notlösung bei Zylindermangel 14
2.4 Gestörte Proben aus verschiedenen Profiltiefen bis etwa 1 m 15
2.4.1 Geräte 15
2.4.2 Entnahme und Verpackung kleiner Proben 15
2.4.3 Entnahme und Verpackung größerer Bodenmengen 16
2.4.4 Verarbeitung der Proben 17
2.5 Ungestörte Proben aus verschiedenen Profiltiefen bis etwa 1 m 17
2.5.1 Geräte 17
2.5.2 Entnahme der Proben aus Profilgruben und Verpackung 17
2.5.3 Entnahme aus nicht betretbarer Profilgrube 18
2.5.4 Verarbeitung der Proben 20
2.5.5 Auswertung der Ergebnisse 20
2.6 Literatur 20

3	**Bestimmung des Wassergehaltes**	**21**
3.1	Problemstellung	21
3.2	Bestimmung durch Trocknung bei 105° C im Trockenschrank	21
3.2.1	Prinzip der gravimetrischen Bestimmung	21
3.2.2	Geräte	21
3.2.3	Durchführung der Bestimmung	22
3.2.4	Berechnung der Ergebnisse	23
3.2.5	Ergebnisse und Fehler	24
3.2.6	Bemerkungen	24
3.2.7	Handhabung eines Exsikkators	25
3.3	Weitere Methoden zur Wassergehaltsbestimmung	25
3.3.1	Trocknungsverfahren mit gravimetrischer Bestimmung	25
3.3.2	Verfahren ohne Trocknung	26
3.4	Rechenbeispiel	26
3.5	Literatur	27
4	**Bestimmung der Korngrößenverteilung**	**28**
4.1	Problemstellung	28
4.2	Vorbehandlung (Dispergierung)	28
4.2.1	Zweck und Ausmaß	28
4.2.2	Geräte	29
4.2.3	Durchführung von Vorbehandlung und Einwaage	29
4.3	Bestimmung der Anteile der Kornfraktion durch Siebung	30
4.3.1	Prinzip der Methode	30
4.3.2	Geräte	31
4.3.3	Durchführung der Bestimmung	31
4.3.4	Auswertung der Ergebnisse	32
4.4	Bestimmung der Anteile der Kornfraktionen mit Hilfe der korngrößenbedingten Sinkgeschwindigkeit	32
4.4.1	Prinzip der Methode	32
4.4.2	Geräte für die Sedimentationsmethode	33
4.4.3	Durchführung der Bestimmung (Sedimentationsmethode)	33
4.4.4	Auswertung der Ergebnisse	35
4.4.5	Bemerkungen	36
4.5	Ergebnisse und Fehler	37
4.5.1	Darstellung der Verteilungen	37
4.5.2	Fehler der Bestimmungen, Anwendungsbereiche	38
4.5.3	Häufig vorkommende Korngrößenverteilungen	39
4.6	Zeichnen einer Summenkurve	40
4.7	Rechenbeispiele	41
4.8	Weitere Methoden	41
4.9	Literatur	42
5	**Die Bestimmung der Dichte des Bodens**	**43**
5.1	Problemstellung	43
5.2	Bestimmung der Dichte des Bodens an Proben mit bekanntem Volumen (Stechzylindermethode)	43
5.2.1	Prinzip der Methode	43
5.2.2	Geräte	44
5.2.3	Durchführung der Bestimmung	44

5.2.4 Berechnung der Ergebnisse ... 45
5.2.5 Rechenbeispiel ... 45
5.2.6 Bemerkungen ... 45
5.3 Bestimmung der Dichte des Bodens ohne Stechzylinder (Volumenersatzmethoden) ... 46
5.3.1 Prinzip der Methoden ... 46
5.3.2 Geräte ... 46
5.3.3 Durchführung der Bestimmung ... 47
5.3.4 Rechenbeispiel ... 49
5.3.5 Bemerkungen ... 49
5.4 Literatur ... 50

6 Bestimmung der Dichte der festen Bodensubstanz ... 51
6.1 Problemstellung ... 51
6.2 Prinzip der Methode ... 51
6.3 Geräte ... 51
6.4 Durchführung der Bestimmung (Tauchwägung) ... 52
6.4.1 Aufbereitung der Proben, Bestimmung des Trockengewichtes ... 52
6.4.2 Vorbereitung der Tauchwägung ... 52
6.4.3 Die Tauchwägung ... 53
6.4.4 Ergänzende Bestimmungen ... 53
6.4.5 Bemerkungen ... 54
6.5 Berechnung der Ergebnisse ... 54
6.6 Ergebnisse und Fehler ... 54
6.6.1 Häufigste Werte der Dichte ... 54
6.6.2 Fehler der Bestimmung ... 55
6.7 Rechenbeispiel ... 55
6.8 Weitere Methoden ... 56
6.8.1 Arbeitsweise mit Volumenablesungen (Pyknometrie) ... 56
6.8.2 Bestimmungen mit Hilfe verschieden schwerer Lösungen ... 56
6.9 Literatur ... 56

7 Bestimmung des Porenraumes (Porenvolumen, Porosität, Porenziffer) ... 57
7.1 Problemstellung ... 57
7.2 Bestimmung durch Berechnung aus Dichtewerten ... 57
7.3 Bestimmung durch direkte Messung ... 58
7.4 Ergebnisse und Fehler ... 58
7.4.1 Häufige Werte des Porenvolumens (PV bzw. n) ... 58
7.4.2 Häufige Werte der Porenziffer (PZ bzw. ε) ... 59
7.4.3 Fehler der Bestimmungen ... 60
7.5 Rechenbeispiele ... 60
7.6 Literatur ... 61

8 Bestimmung des Drucksetzungsverhaltens ... 62
8.1 Problemstellung ... 62
8.1.1 Der einachsiale Zylinderdruckversuch mit seitlicher Begrenzung ... 62
8.2 Drucksetzungsmessung ... 62
8.2.1 Prinzip der Methode ... 62
8.2.2 Geräte ... 63
8.2.3 Durchführung der Bestimmung ... 64

8.3	Ergebnisse und Fehler	66
8.3.1	Ermittlung der Porenziffer	66
8.3.2	Zeichnen der Drucksetzungskurve und Bestimmung von Vorbelastung und Verdichtungsverhältnis	66
8.3.3	Häufige Werte	67
8.3.4	Fehler der Bestimmung	69
8.4	Bemerkungen	69
8.5	Rechenbeispiele	70
8.6	Weitere Methoden	70
8.7	Literatur	71
9	**Bestimmung der Scherparameter**	**72**
9.1	Problemstellung	72
9.2	Der direkte Scherversuch	72
9.2.1	Prinzip der Methode	72
9.2.2	Geräte	73
9.2.3	Einrichtung des Kreisringschergerätes	74
9.2.4	Durchführung des Scherversuches	75
9.3	Auswertung der Messungen	75
9.4	Ergebnisse und Fehler	76
9.4.1	Häufigste Werte der Scherparameter	77
9.4.2	Fehler	77
9.5	Rechenbeispiele	77
9.6	Andere Methoden	79
9.7	Literatur	80
10	**Bestimmung der Wasserspannungskurve**	**81**
10.1	Problemstellung	81
10.2	Unterdruckmethode	81
10.2.1	Prinzip der Methode	81
10.2.2	Geräte	82
10.2.3	Durchführung der Bestimmung	82
10.2.4	Auswertung der Ergebnisse	84
10.2.5	Bemerkungen	85
10.2.6	Ergänzende Arbeiten	87
10.3	Überdruckmethode	88
10.3.1	Prinzip der Methode	88
10.3.2	Geräte	88
10.3.3	Durchführung der Bestimmung	89
10.3.4	Auswertung der Ergebnisse	90
10.3.5	Bemerkungen	90
10.4	Vergleich der Druck- mit der Saugmethode	92
10.4.1	Prinzipielle Unterschiede	92
10.4.2	Arbeitstechnische Unterschiede	92
10.5	Ergebnisse und Fehler	92
10.5.1	Darstellung der Ergebnisse	92
10.5.2	Fehler der Ergebnisse	94
10.5.3	Häufig vorkommende Ergebnisse	94
10.6	Bemerkungen	95
10.6.1	Be- und Entwässerungskurven	95

10.6.2 Zeitbedarf für die Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Wassergehalt und Wasserspannung ... 96
10.7 Rechenbeispiele ... 97
10.8 Weitere Methoden ... 98
10.8.1 Zentrifugalmethode ... 98
10.8.2 Dampfdruckgleichgewichte ... 98
10.8.3 Nomographische Bestimmung mittels Körnungssummenkurven ... 98
10.9 Literatur ... 98

11 Aggregatstabilität (Wasserstabilität) ... 99
11.1 Problemstellung ... 99
11.2 Prinzip der Methode (Nasssiebung) ... 99
11.3 Geräte ... 100
11.4 Durchführung der Bestimmung ... 100
11.4.1 Vorbereitung der Proben (Lufttrocknung, Oberflächenproben) ... 100
11.4.2 Die Nasssiebung ... 101
11.4.3 Verfahren unter Umgehung der Trocknung (Proben aus Unterboden und Untergrund) ... 102
11.5 Auswertung der Ergebnisse ... 102
11.5.1 Das Stabilitätsmaß ... 102
11.5.2 Die graphische Auswertung ... 103
11.5.3 Die rechnerische Auswertung ... 104
11.5.4 Ergebnisse und Fehler ... 104
11.6 Bemerkungen ... 104
11.6.1 Charakterisierung der Aggregierung eines Bodens ... 104
11.6.2 Verklebungen ... 105
11.7 Rechenbeispiel ... 105
11.8 Andere Methoden ... 105
11.9 Literatur ... 106

12 Bestimmung der Wasserleitfähigkeit ... 107
12.1 Problemstellung ... 107
12.1.1 Fließwiderstand und Wasserleitfähigkeit ... 107
12.1.2 Gesättigte und ungesättigte Wasserleitfähigkeit ... 107
12.1.3 Anwendungsbereiche ... 107
12.2 Prinzip der Methode ... 108
12.2.1 Die Darcy-Gleichung ... 108
12.2.2 Dimensionen und Einheiten des Koeffizienten k ... 108
12.2.3 Ungestörte Lagerung ... 109
12.3 Gesättigte Wasserleitfähigkeit ... 109
12.3.1 Messprinzip ... 109
12.3.2 Geräte ... 110
12.3.2.1 Durchführung der Bestimmung ... 110
12.3.2.2 Berechnung der Ergebnisse ... 113
12.4 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit ... 113
12.4.1 Messanordnungen ... 113
12.4.2 Messung mit direkter Ablesung ... 114
12.4.3 Berechnung aus zeitlicher Veränderung der Wasserspannung ... 116
12.4.4 Berechnung der Ergebnisse ... 118
12.5 Ergebnisse und Fehler ... 120

12.5.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit ... 120
12.5.2 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit ... 122
12.6 Rechenbeispiele ... 123
12.6.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit ... 123
12.6.2 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit ... 124
12.7 Weitere Methoden ... 125
12.7.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit ... 125
12.7.2 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit ... 125
12.7 Literatur ... 126

13 Messung des Matrixpotentials (der Wasserspannung) im Boden ... 128
13.1 Problemstellung ... 128
13.2 Tensiometer ... 128
13.2.1 Prinzip der Methode ... 128
13.2.2 Geräte ... 129
13.2.3 Durchführung der Bestimmung ... 130
13.2.4 Ergebnisse und Fehler ... 132
13.2.5 Bemerkungen ... 133
13.2.6 Freilandtensiometer ... 134
13.3 Die Gipsblockelektrode ... 135
13.3.1 Prinzip der Methode ... 135
13.3.2 Geräte ... 135
13.3.3 Durchführung der Bestimmung ... 135
13.3.4 Auswertung der Ergebnisse ... 138
13.3.5 Fehler der Bestimmung ... 139
13.3.6 Bemerkungen ... 139
13.4 Häufig im Boden vorkommende Wasserspannungen ... 140
13.4.1 Allgemeine Größenordnungen ... 140
13.4.2 Der Jahresgang ... 140
13.4.3 Einfluss der Bodenart (Porengrößenverteilung) ... 140
13.4.4 Der Einfluss der Tiefe im Profil ... 142
13.5 Rechenbeispiele ... 142
13.5.1 Tensiometer ... 142
13.5.2 Gipsblockelektrode ... 142
13.6 Weitere Methoden ... 143
13.7 Literatur ... 143

14 Bestimmung des Eindringwiderstandes des Bodens mit der Schlagsonde ... 145
14.1 Problemstellung ... 145
14.2 Prinzip der Methode ... 145
14.3 Geräte ... 146
14.4 Durchführung der Bestimmung ... 146
14.4.1 Die Schlagtechnik ... 146
14.4.2 Die Messpunkte ... 148
14.5 Auswertung der Ergebnisse ... 148
14.5.1 Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Tiefe im Boden ... 148
14.5.2 Linien gleichen Eindringwiderstandes ... 149
14.6 Ergebnisse und Fehler ... 149
14.6.1 Natur der Unterschiede ... 149
14.6.2 Häufige Ergebnisse ... 149

14.6.3 Streuungen ... 150
14.7 Bemerkungen ... 150
14.8 Weitere Methoden ... 150
14.8.1 Einfachste Schlagsonden und Aushilfsmethoden ... 150
14.8.2 Sonden mit anderen Messprinzipien ... 151
14.9 Literatur ... 151

15 Auswertung örtlich zuordnungsfähiger Messwerte ... 152
15.1 Problemstellung ... 152
15.2 Prinzip der Methode ... 152
15.3 Durchführung der Auswertung ... 153
15.3.1 Datenfeld aus statischen Messwerten ... 153
15.3.2 Datenfeld aus statischen Messwerten, dazu einzelne Daten über Bewegungs-(Fluss)vorgänge ... 155
15.3.3 Unvollständige Datenfelder, fehlende Messwerte ... 157
15.4 Bemerkungen zu Homogenitäts- und Kontinuitätsbedingungen ... 158
15.5 Literatur ... 158

16 Bestimmung des Spannungszustandes der festen Matrix ... 160
16.1 Problemstellung ... 160
16.1.1 Kapazitäts-Intensitäts Konzept ... 160
16.1.2. Hauptspannungen ... 161
16.1.3 Visuelle Ansprache Schürfe und frische Profile ... 161
16.2 Ruhedruck als Anisotropieparameter der Intensität ... 161
16.2.1 Prinzip, Basisgrößen ... 161
16.2.2 Der Ruhedruck ... 162
16.3 Der Ruhedruckkoeffizient ... 162
16.3.1 Prinzip, Wahl der Basisgrößen ... 162
16.3.2 Lagerungskurve als Ausgangsbasis ... 163
16.3.2.1 Benötigte Daten ... 163
16.3.2.2 Benötigte Geräte ... 163
16.3.2.3 Durchführung der Bestimmung ... 163
16.3.2.4 Lag-Kurve, zeichnerische Auswertung ... 163
16.3.3 Eindringwiderstand (EW) als Ausgangsbasis ... 164
16.3.3.1 Benötigte Daten ... 164
16.3.3.2 Benötigte Geräte ... 164
16.3.3.3 Durchführung der Bestimmung ... 164
16.3.3.4 Tiefenfunktion des EW ... 164
16.3.4 Bestimmung des Ruhedruckkoeffizienten ... 165
16.3.4.1 Auswertung der Lagerungskurve ... 165
16.3.4.2 Auswertung der EW-Tiefenfunktion ... 166
16.4. Konzentrationsfaktor nach Newmark ... 167
16.4.1 Prinzip der Methode ... 167
16.4.2 Benötigte Geräte ... 168
16.4.3 Durchführung der Messungen ... 169
16.4.4 Berechnungsbeispiele ... 169
16.4.5 Bemerkungen ... 170
16.5. Literatur ... 170

Häufige Umrechungen **171**
Längen, Flächen, Volumina, Massen, Dichten, Geschwindigkeit, Kraft 171
Druck, Energie/Arbeit, Leistung, Ertrag 172
Fluss, Temperatur 173

Stichwortverzeichnis **174**

Einleitung

Seit einigen Jahren hat das Konzept des Bodenschutzes und damit auch der Bodenerhaltung immer mehr an Bedeutung gewonnen. Gleichzeitig hat die Technik zunehmende Möglichkeiten eröffnet, Böden zu verformen, zu verdichten und zu transportieren. In weit größerem Maße als früher können damit Volumen- und Gefügeveränderungen erzeugt oder Böden mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt oder rekultiviert werden. Dabei zeigt sich dann, dass zur Beurteilung sowohl der Ausgangsituation, als auch deren Veränderung physikalische Eigenschaften, wie Körnung, Dichte, Durchlässigkeit/Festhaltekapazität für Luft und Wasser sowie Stabilität gegen Verformung, Verknetung und Verschlämmung die zunächst wichtigsten Parameter sind.

Wo auch immer auf Baustellen aller Art die neue Bodenoberfläche mit einer permanenten Pflanzendecke gegen Erosionsvorgänge geschützt, oder für die Kultur von Nutzpflanzen hergerichtet werden soll, müssen zur Charakterisierung des hierfür als geeignet eingestuften Standortsubstrates die genannten Parameter bekannt sein. Sie bestimmen weitgehend den Wasser-/Lufthaushalt eines Standortes und damit den primären lokalen Wachstumsfaktor. Wenn hier etwas verdorben oder nicht erreicht wird, ist spätere Korrektur meist mit großen Kosten verbunden, sie kann sehr zeitaufwendig sein und ist auch an entsprechende klimatische und Bodenfeuchtigkeitsbedingungen geknüpft.

In dem vorliegenden Text werden Methoden zur Erfassung der genannten Eigenschaften beschrieben. Auswahl und Beschreibung der Arbeitsweisen ist auf den Praktikumsbetrieb beim Studium der Bodenkunde ausgerichtet.

Die beiden ersten Kapitel stellen keine Praktikumsaufgaben im engeren Sinne des Wortes dar. Vor dem Einstieg in eines der anderen Kapitel sollte ihnen jedoch eine ausreichende Zeitspanne gewidmet werden, weil es für den Anfänger immer schwierig ist, den Rahmen für die erstmalige Untersuchung eines Problemkreises abzustecken.

Das erste Kapitel bringt Grundsätze zur Anlage von Untersuchungen einschließlich Hinweisen auf erste statistische Bedingungen und Auswertungen.

Das zweite Kapitel behandelt die Entnahme von Bodenproben. Es verdient besondere Aufmerksamkeit, denn kein Ergebnis kann besser sein als die Proben, aus denen es erhalten wurde. Da man den Erfolg einer Probennahme nicht ohne irgendeine Einzelbestimmung beurteilen kann, sind in diesem Abschnitt einfache Bestimmungen empfohlen, die keinen Selbstzweck darstellen, sondern nur dazu dienen sollen, eine Auswertungsmöglichkeit zur Beurteilung der entnommenen Proben zu schaffen.

Die Auswahl der in den Kapiteln 3–14 beschriebenen Methoden erfolgt aus dem Blickwinkel heraus, dass es in den meisten Fällen der Beurteilung bodenkundlicher Sachverhalte und Zusammenhänge genügt, Messergebnisse einer durchschnittlichen Genauigkeit zu verwenden, sofern nur die Problemstellung richtig erfasst und die Bearbeitung an angemessenem Probenmaterial vorgenommen wurde.

Oft ist es notwendig, die Wahl von Methoden für ein anstehendes Problem ausdrücklich zu begründen. Um hierbei Hilfestellungen zu geben, ist jedem dieser Kapitel ein Abschnitt über Problemstellungen vorausgeschickt, die mit der beschriebenen Methode zu bearbeiten sind.

Die Arbeitsweisen selbst wurden so gewählt, dass sie vor allem das grundsätzliche Prinzip deutlich werden lassen. Ihre Eignung für serienmäßige Routinemessungen und für Spezialuntersuchungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen stand demgegenüber im Hintergrund. Um in dieser Richtung die weitere Arbeit zu erleichtern, sind am Ende jeden Kapitels weitere auch neuere sowie speziellere Methoden bzw. weitere Methodenbücher angegeben. Es wird im Übrigen heute leicht einmal übersehen, dass die Verwendung eines bescheidenen Geräteparks kein Zeichen für schlichtherzige Gedankengänge ist. Man kann vielmehr nicht deutlich genug betonen, dass die Verwendung komplizierter und daher teurer Geräte kein Gradmesser für die

Qualifikation des Experimentators sein muss und dass die Wahl eines zu aufwendigen Gerätes ein ebenso deutliches Zeichen für Inkompetenz ist wie das Unvermögen, sich mit bescheidenen Mitteln zu behelfen.

Sobald ein Ergebnis in Form einer Zahl oder einer Zahlengruppe vorliegt, ist das Problem noch nicht gelöst. Da dem Anfänger die Interpretation seiner Ergebnisse besondere Schwierigkeiten macht, ist jedem Kapitel ein Abschnitt über häufige Fehler der Bestimmung sowie über häufig vorkommende Wertegrößen beigefügt.

Die Kapitel 15 und 16 unterscheiden sich von den vorhergehenden dadurch, dass sie keine neuen Messmethoden beschreiben. Sie zeigen weitere Auswertungsschritte von Ergebnissen, die mit hier beschriebenen Methoden erhalten wurden. Mit den hier beschriebenen Arbeitsweisen wird somit die Möglichkeit zu datengestützten Aussagen in diesem Bereich erweitert.

1 Der Zusammenhang zwischen Fragestellung, Probennahme und Ergebnis

1.1 Das Prinzip des Beurteilens

1.1.1 Vergleichen, Skalieren, Klassifizieren

Wenn man sich vor die Aufgabe gestellt sieht, einen Boden zu beurteilen, kann man dies wie bei jedem anderen Gegenstand auch nur aufgrund von „Kenntnissen und Erfahrungen“ tun. Denn das Beurteilen besteht darin, dass man den betreffenden Boden aufgrund eines oder mehrerer Kriterien mit anderen bekannten Böden vergleicht bzw. einordnet.

Das Einordnen setzt also eine Reihe von Vergleichsobjekten voraus. Die Reihe der Vergleichsobjekte kann nun mit einer Skala versehen werden, die entweder aus Worten oder aus Zahlen besteht. Als Beispiel ist eine verbale Skala von Wassergehalten einer digitalen gegenübergestellt (Tab.1.1).

Tab. 1.1. Klassifizierung des Wassergehaltes von Böden

trocken	**kaum feucht**	**feucht**	**sehr feucht**	**nass**
kein Wasser		wenig Wasser	viel Wasser	
0–5 %	5–10 %	10–20 %	20–30 %	≥ 30 %

Dieses Beispiel zeigt, dass bei Zahlenangaben eine stärkere Aufgliederung möglich ist als bei verbaler Einteilung. Demgegenüber wirken die verbalen Einteilungen vereinfachend, indem sie zum Klassifizieren zwingen. Sie beinhalten aber fast immer auch Wichtungen durch die Alltagsbedeutung, deren verwendeten Worte oder durch Denk- bzw. Sprachgewohnheiten. In dieser Richtung geben Klassifizierungen leicht Anlass zu Fehlbeurteilungen. Die digitalen Skalen geben umgekehrt ohne zusätzliche Interpretationen nichts her.

1.1.2 Messwerte und Schätzwerte

Die Unterscheidung zwischen Messwert und Schätzwert ist nicht grundsätzlich, sondern sprachlich gewohnheitsmäßig. Wenn Zahlenwerte genannt werden, wird eine vorhergehende Messung angenommen; wenn verbale Einordnungen vorliegen, eine Schätzung. Bei Feldarbeiten fallen vielfach Schätzungen an. Bei Laborarbeiten sind sie die Ausnahme.

In der Bodenkunde können Körnungsangaben mit der Fingerprobe ermittelt und als Schätzwerte angegeben werden. Die gravimetrische Bestimmung von Korngrößenfraktionen bedient sich der Messung von Massen – d. h. der Wägung. Die Ergebnisse werden vielfach in Summenkurven dargestellt. Aus diesen Kurven entnommene Werte sind ebenso gut Schätzwerte wie die Interpolationen der Teilstrecke einer Skala. Messung und Schätzung sind daher beim Zustandekommen des Endergebnisses von Wertegruppen oft nicht ganz einwandfrei zu trennen.

Wesentlicher als die Art der Ermittlung eines Wertes ist daher eine Angabe über seine Genauigkeit. Dies ist vor allem bei Zahlengruppen wichtig, weil ihnen sonst leicht eine zu hohe Genauigkeit zugeordnet wird. Es ist üblich die Zahlenfolge eines Ergebnisses so anzugeben, dass die vorletzte Ziffer die letzte Zuverlässige ist. Die letzte Ziffer ist eine Schätzung auf der jeweiligen Skala oder wird in Kenntnis der Streuungen geschätzt.

1.1.3 Richtigkeit, Reproduzierbarkeit, Genauigkeit

Der Wert jeder einzelnen Methode ist davon abhängig, wie richtig und wie reproduzierbar ihre Ergebnisse unter den vorliegenden Arbeitsbedingungen sind.

Dies ist zunächst eine Frage der gewählten Methode. Hier ist eine Kontrolle oft nicht möglich. Wenn anstelle des gesamten Materials nur Teile davon untersucht werden können und von diesen Ergebnissen dann auf Eigenschaften der Gesamtheit geschlossen werden soll, dann entsteht zusätzlich zum Problem der grundsätzlichen Richtigkeit noch die Frage der Repräsentativität. Diese ist in hohem Maße abhängig von Anzahl und Größe der Stichproben.

Einfacher liegt die Frage der Reproduzierbarkeit. Eine zufriedenstellende Repräsentativität wird bei einheitlichem Messgut und genau eingehaltenen Messbedingungen oft erreicht. Sie ist aber nicht gleichbedeutend mit hochgradiger Richtigkeit. Methoden und Substratbedingungen bei Probenahmen zwingen hier gelegentlich zu unbequemen Kompromissen oder zusätzlichen Erklärungen zu den Ergebnissen. Als Beispiel kann der Tongehalt eines Bodens gelten, für den bei verschiedenen Arbeitsweisen bei jeweils hoher Reproduzierbarkeit sehr unterschiedliche Endergebnisse erhalten werden.

Der Ausdruck „Genauigkeit“ ist gegenüber den Begriffen „Richtigkeit“ bzw. „Repräsentativität“ und „Reproduzierbarkeit“ bei bodenkundlicher Arbeit wenig spezifisch. Er wird in Bezug auf jedes der anderen Kriterien verwendet.

1.2 Auswahlprinzipien für Probenentnahmen

Böden sind dreidimensionale Körper. Je nach der Fragestellung, die zu einer Probenentnahme führt, muss daher ein ein-, zwei- oder dreidimensionales Raster verwendet werden. Die bei bodenkundlichen Problemen meistens verwendete Bezugsgröße, wie Fläche (Parzelle, Acker, Flurstück) oder Bodenprofil, sind nicht an bestimmte Dimensionen gebunden.

1.2.1 Probenanzahl, Flächencharakterisierung

Um eine Aussage über eine bestimmte Eigenschaft einer Fläche zu machen, die durch eine einzige Zahl dargestellt werden soll, ist es notwendig, eine größere Anzahl von Einzelmessungen durchzuführen. Die einfachste Aussage erfolgt durch einen Mittelwert und die dazugehörige Streuung. Die wichtigste Frage lautet: Wie viele Parallelen sind erforderlich? Im Prinzip sind umso weniger Parallelen notwendig, je einheitlicher die betreffende Fläche ist, d. h. je kleiner die Streuungen sind, je größer der Unterschied zu der Vergleichsmessung an einem anderen Objekt ist und je sicherer die Aussage in Zweifelsfällen sein soll.

Beispiele für die Angaben für zwei Messreihen mit je drei Messparallelen an zwei Objekten (A und B) sind in Tabelle 1.2 gezeigt.

Bei Wertegruppen wie in der Zeile A der Tabelle 1.2 ist der Unterschied zwischen den beiden Messreihen sicher. Erhöhte Parallelenzahlen erbringen hier keinen Vorteil. In der Wertegruppe B besteht demgegenüber die Aussicht, die Sicherheit der Aussage durch weitere Parallelen zu erhöhen.

Darüber hinaus muss geprüft werden, ob außer der beschriebenen Auswertung eine regionale Zuordnung der Messwerte vorgenommen werden kann. Durch eine solche wird die Aussage stark verbessert, die rechnerische Auswertungsarbeit wächst jedoch an. Hier können Verfahren der Geostatistik nützliche Zusatzinformationen bringen.

Tab. 1.2. Einzelwerte (Messwerte), Mittelwerte und Variationsbreiten zweier Messreihen an zwei Objekten (A und B)

		Messreihe 1			**Messreihe 2**		
A	Einzelwerte	4	8	12	22	28	34
	Mittelwerte		8			28	
	Variationsbreite		8 (±4)			12 (±6)	
B	Einzelwerte	15	19	23	22	28	34
	Mittelwerte		19			28	
	Variationsbreite		8 (±4)			12 (±6)	

Weitere Details zu dieser Frage sind in Statistik- bzw.Geostatistiklehrbüchern dargestellt (Sachs 2004; Goovaerts 1997; Houlding 2000; Sarma 2002).

1.2.2 Probenanzahl, Profilcharakterisierung

Im Gegensatz zur Flächencharakterisierung ist bei einem Bodenprofil eine Zuordnung der Werte zu Horizonten oder Tiefen im Boden von vornherein vorgesehen. Diese horizontweise Betrachtung läuft auf eine eindimensionale Aussage, eine „Tiefenfunktion“ hinaus. Horizonte oder Schichtungen im Profil werden je nach ihrer Mächtigkeit als homogen angenommen, oder in mehreren Tiefenlagen beprobt. Die vertikalen Abstände müssen je nach Versuchsfrage verschieden gewählt werden. Die Anzahl der Probenentnahmen, Beobachtungen oder Messungen an jeder gewählten Tiefe ist konstant zu halten. Die Auswertung beinhaltet mindestens die Bestimmung von Mittelwert und Standardabweichung zu jeder Tiefe unter der Bodenoberkante. Durch die im Computerzeitalter leichte Zugänglichkeit von entsprechenden Statistikprogrammen lässt sich häufig ohne großen Aufwand eine umfangreiche Datenanalyse anschließen; doch auch hier erspart die genaue Planung der Analytik unnötigen Zeitverlust bei der „schnellen“ Berechnung mittels PC.

1.2.3 Probengröße

Das primäre Auswahlkriterium für alle Untersuchungen ist die mögliche oder erwünschte Größe der Probe. Hier sind zwei Gruppen zu unterscheiden:

(a) volumengestörte Proben (Locker-, Schütt-, Bohrstock-, Spatenproben). Im hier interessierenden Bereich werden sie fast ausschließlich für die Körnungsanalyse benötigt. Sie seien aber zuerst erwähnt, weil sie bei allen Entnahmearbeiten zuerst anfallen, die Sicherstellung zum Schluss der Gesamtarbeit aber leicht vergessen wird. Die zu entnehmende Menge hängt ab von der Heterogenität im Hinblick auf die zu erfassende Eigenschaft. Vorkommen von Steinen oder Kieskorn zwingt zur Entnahme großer Proben, also Lockermaterialmengen bis über den Literbereich hinaus. Wenn irgend möglich ist der Grobkornanteil (>2 mm) vor Ort festzustellen, abzutrennen und zurückzulassen, denn er ist aus der Sicht vieler Fragestellungen und Probleme nicht beteiligter „toter Raum“. Für Feinboden bzw. -erde genügen kleinere Mengen (100 Milliliterbereich).

Körnung, Analyse von Dicht der festen Substanz und die meisten chemischen Analysen werden an losen, schüttbaren Proben durchgeführt. Mischproben können hergestellt und analysiert werden, wenn die Aufgabenstellung dies erlaubt. Ebenso können Aliquote verwendet (s. 2.2.2) werden.

(b) Volumenproben (ungestörte Proben, Stechzylinderproben, Monolithe) sind für den überwiegenden Teil der physikalischen Untersuchungen notwendig. Ihre Entnahme ist in Kap. 2 detailliert dargestellt, denn Methodenwahl und Probengröße beeinflussen das Ergebnis oft stark hinsichtlich Mittelwert und mehr noch Streuungen. Die Wahl der Probengröße wird dadurch beeinflusst, dass das kleinste repräsentative Volumen (REV, engl. representative equivalent volume) meist nicht bekannt und oft nicht einmal erfassbar ist.

1.3 Fehlermöglichkeiten

1.3.1 Methodenwahl

Die Wahl der Arbeitsweise ist in erster Linie darauf ausgerichtet, *richtige* Messwerte zu erbringen. Da fast alle Ergebnisse den Charakter von „Stichproben“ haben, darf der Bereich ihrer Gültigkeit, also ihrer Extrapolierbarkeit in Raum und Zeit nie aus den Augen gelassen werden.

Hinweise auf diesen Problemkreis gibt der Umstand, dass für viele Parameter verschiedene Methoden nebeneinander im Gebrauch sind. Die Unterschiede liegen oft in der Einfachheit der Durchführung oder vorhandenen Ausrüstung. Beispiele sind:

- Die Bestimmung des Porenvolumens durch (a) Berechnung aus Dichtebestimmungen und (b) Bestimmung von Luftanteil mittels Pyknometer und Wasseranteil durch Trocknung.
- Die Bestimmung der Festigkeit durch Drucksetzungsversuch (a) eindimensional, (b) seitlich begrenzt, (c) gedränt, in Abhängigkeit vom Gerät (Triaxialzelle, Oedometer).
- Die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit bei unterschiedlicher Probengröße im (a) Gesamtvolumen, (b) Verhältnis von Fließquerschnitt zu Probenhöhe und (c) Technik der Aufsättigung.
- Ein weiteres Feld sind die Anwendungsgrenzen bei Messungen, in denen laminare Strömungen sichergestellt sein müssen, wie bei Perkolation für Permeabilitätsbestimmung und bei Sedimentation für die Bestimmung der Korngrößenverteilung.

1.3.2 Statistische Aspekte der Fehler

Der Gesamtfehler eines Ergebnisses setzt sich aus Fehlern verschiedener Provenienzen zusammen. Man kann ihn daher untersuchen und gegebenenfalls teilweise vermeiden. Hierfür ist zwischen den folgenden häufigen Fehlern bzw. Ursachen für Streuungen zu unterscheiden:

1. Variation der betreffenden Eigenschaft auf der Fläche bzw. in der Tiefe im Profil. Diese Variation ist ein Charakteristikum, das zu messen oft sinnvoll ist, weil es Extraaussagen ermöglichen kann.
2. Fehler bei und nach der Entnahme der Probe. Hierher gehören Stöße beim Transport, Quetschungen, wechselnde Horizontbegrenzungen im Profil.
3. Fehler bei der Messung bzw. im Verlauf der Bestimmung (Materialverluste aus Zylindern), Schrumpfen (Trocknen) oder Quellen (Entlastung, Befeuchtung) oder der Vorbehandlung (Dispergierung, Aufsättigung)
4. eigentliche Messfehler wie Ablesefehler, Einstellfehler bei Geräten.
5. Rechen- und Ansatzfehler (Wägeschälchen mit oder ohne Deckel, Zylinder mit oder ohne Ring).

1.3.3 Sicherheitsmaßnahmen gegen Fehler

Doppelbestimmungen: Eine Möglichkeit, vorkommende Fehler in einer Einzelmessung zu erkennen, besteht darin, eine Probe zwei Mal nacheinander in verschiedenen Messreihen mitlaufen zu lassen. Bei ungewöhnlich großem Unterschied beider Werte enthält der eine wahrscheinlich einen Fehler aus der Gruppe (4) oder (5). Weniger wahrscheinlich ist ein Fehler aus der Gruppe (3). Es ist aber nicht ohne weiteres zu erkennen, welcher Wert fehlerhaft ist.

Wenn Wiederholungen der Messungen vorgesehen sind, dann ist die Größe des Unterschiedes zwischen den Werten das Kriterium im Sinne des Absatzes über Behandlung von Ausreißern.

Mituntersuchung von Standardproben: Eine sichere Methode, die relative Richtigkeit aufeinander folgender Seriensätze zu beurteilen, ist das Mitlaufenlassen eines bekannten Standards in jeder Serie. Aus den Messwerten dieses Standards lässt sich die Größe der Fehler aus Gruppe (4) und (5), teilweise auch (3) errechnen.

Behandlung von Ausreißern: Bei manchen Feldmethoden und bei Verwendung von Stechzylindern ist die Zahl der erwünschten Messparallelen durch den dafür notwendigen Aufwand (Zeit, Flurschaden, Geräte) begrenzt. Infolgedessen sind die Wertereihen kurz und ein Ausreißer beeinflusst den Mittelwert stark. Daher wird die Frage akut, ob der Mittelwert richtiger wird ohne den Ausreißer, wenn er vernachlässigt würde. Nach Dixon (1986) kann ein Einzelwert bei geringer Parallelenzahl gestrichen werden, wenn er mit hoher Wahrscheinlichkeit der Grundgesamtheit der Probe nicht angehört. Als Kriterium wird sein Abstand vom nächsten Wert der Probe im Vergleich zu deren Gesamtvariationsbreite W festgelegt. Tab.1.3 zeigt dies für zwei Sicherheitsstufen (x) und Parallelenzahlen von 3 bis 7.

$$Q = \frac{X_a - X_n}{W}$$

Hierbei ist Q ein Tabellenwert, X_a der abweichende Wert, X_n der benachbarte und W die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Wert (Ausreißer eingeschlossen), also die Variationsbreite. Wenn $Q > 0{,}94$ für n=3 bzw. $Q > 0{,}50$ für n = 7 beträgt, dann gehört der Ausreißer mit 90%iger Sicherheit nicht zur Grundgesamtheit.

Tab.1.3. Grenzwerte für den Ausschluss von Ausreißern. (nach Dixon 1996, verändert)

Anzahl der korrigierten Entfernung des Ausreißers			
Parallelen	Variationsbreite der Restprobe	vom nächsten Wert der Gruppe in Anteilen von (n–1)	
(n)	(n–1)	Sicherheit des Ausschlusses (Q)	
		90 %	80 %
3	1	0,94	0,88
4	1	0,76	0,68
5	1	0,64	0,55
6	1	0,56	0,48
7	1	0,50	0,43