



dandelion.com

© 2008 AGI-Information Management Consultants  
may be used for personal purposes only or by  
libraries associated to dandelion.com network.

Karl Heinrich Hartge und Rainer Horn

# Die physikalische Untersuchung von Böden

2., völlig neu bearbeitete Auflage

51 Abbildungen, 12 Tabellen



Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1989

# Inhalt

<b>Einleitung</b> .....	1
<b>1 Der Zusammenhang zwischen Fragestellung, Probenahme und Ergebnis</b> .....	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 Probeentnahmen .....	4
1.2.1 Probenanzahl, Flächencharakterisierung .....	5
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 .....	7
1.4.1 Grundwerte .....	7
1.4.2 Weitere Auswertung .....	8
1.5 Protokoll bzw. Laborkladde .....	9
1.6 Literatur .....	9
<b>2 Die Entnahme von Bodenproben</b> .....	10
2.1 Problemstellung .....	10
2.2 Gestörte Proben aus dem Oberboden .....	10
2.2.1 Geräte .....	10
2.2.2 Entnahme und Verpackung der Proben .....	11
2.2.3 Auswertung der Ergebnisse .....	12
2.3 Ungestörte Proben aus dem Oberboden .....	12
2.3.1 Geräte .....	12
2.3.2 Entnahme und Verpackung der Probe .....	12
2.3.3 Verarbeitung der Proben .....	14
2.3.4 Auswertung der Ergebnisse .....	14
2.3.5 Wahl der Zylindergröße .....	14
2.4 Gestörte Proben aus verschiedenen Profiltiefen bis etwa 1 m .....	14
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 .....	16
2.5 Ungestörte Proben aus verschiedenen Profiltiefen bis etwa 1 m .....	16
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	19
2.5.5	Auswertung der Ergebnisse	20
2.6	Zusätzliche Literatur	20
<b>3</b>	<b>Bestimmung des Wassergehaltes</b>	<b>21</b>
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	22
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	25
3.2.7	Handhabung eines Exsikkators	26
3.3	Weitere Methoden zur Wassergehaltsbestimmung	26
3.3.1	Trocknungsverfahren mit gravimetrischer Bestimmung	26
3.3.2	Verfahren ohne Trocknung	27
3.4	Rechenbeispiel	27
3.5	Literatur	28
<b>4</b>	<b>Bestimmung der Korngrößenverteilung</b>	<b>29</b>
4.1	Problemstellung	29
4.2	Vorbehandlung (Dispergierung)	29
4.2.1	Zweck und Ausmaß	29
4.2.2	Geräte	30
4.2.3	Durchführung von Vorbehandlung und Einwaage	30
4.3	Bestimmung der Anteile der Kornfraktion durch Siebung	32
4.3.1	Prinzip der Methode	32
4.3.2	Geräte	32
4.3.3	Durchführung der Bestimmung	32
4.3.4	Auswertung der Ergebnisse	34
4.4	Bestimmung der Anteile der Kornfraktion mit Hilfe der korngrößenbedingten Sinkgeschwindigkeit	34
4.4.1	Prinzip der Methode	34
4.4.2	Geräte für die Sedimentationsmethode	35
4.4.3	Durchführung der Bestimmung (Sedimentationsmethode)	35
4.4.4	Auswertung der Ergebnisse	38
4.4.5	Bemerkungen	39
4.5	Ergebnisse und Fehler	40
4.5.1	Darstellung der Verteilungen	40
4.5.2	Fehler der Bestimmungen, Anwendungsbereiche	41
4.5.3	Häufig vorkommende Korngrößenverteilungen	42
4.6	Zeichnen einer Summenkurve	42
4.7	Rechenbeispiele	44
4.8	Weitere Methoden	45
4.9	Literatur	46

<b>5</b>	<b>Die Bestimmung der Dichte des Bodens</b> . . . . .	47
5.1	Problemstellung . . . . .	47
5.2	Bestimmung der Dichte des Bodens an Proben mit bekanntem Volumen (Stechzylindermethode) . . . . .	47
5.2.1	Prinzip der Methode . . . . .	47
5.2.2	Geräte . . . . .	48
5.2.3	Durchführung der Bestimmung . . . . .	48
5.2.4	Berechnung der Ergebnisse . . . . .	49
5.2.5	Rechenbeispiel . . . . .	50
5.2.6	Bemerkungen . . . . .	50
5.3	Bestimmung der Dichte des Bodens ohne Stechzylinder (Volumenersatzmethoden) . . . . .	50
5.3.1	Prinzip der Methoden . . . . .	50
5.3.2	Geräte . . . . .	51
5.3.3	Durchführung der Bestimmung . . . . .	51
5.3.4	Rechenbeispiel . . . . .	54
5.3.5	Bemerkungen . . . . .	55
5.4	Literatur . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Dichte der festen Bodensubstanz</b> . . . . .	56
6.1	Problemstellung . . . . .	56
6.2	Prinzip der Methode . . . . .	56
6.3	Geräte . . . . .	56
6.4	Durchführung der Bestimmung (Tauchwägung) . . . . .	57
6.4.1	Aufbereitung der Proben, Bestimmung des Trockengewichts . . . . .	57
6.4.2	Vorbereitung der Tauchwägung . . . . .	57
6.4.3	Die Tauchwägung . . . . .	58
6.4.4	Ergänzende Bestimmungen . . . . .	59
6.4.5	Bemerkungen . . . . .	59
6.5	Berechnung der Ergebnisse . . . . .	59
6.6	Ergebnisse und Fehler . . . . .	60
6.6.1	Häufigste Werte der Dichte . . . . .	60
6.6.2	Fehler der Bestimmung . . . . .	60
6.7	Rechenbeispiel . . . . .	61
6.8	Weitere Methoden . . . . .	61
6.8.1	Arbeitsweise mit Volumenablesungen (Pyknometrie) . . . . .	61
6.8.2	Bestimmungen mit Hilfe verschieden schwerer Lösungen . . . . .	62
6.9	Literatur . . . . .	62
<b>7</b>	<b>Bestimmung des Porenraumes (Porenvolumen, Porosität, Porenziffer)</b> . . . . .	63
7.1	Problemstellung . . . . .	63
7.2	Bestimmung durch Berechnung aus Dichtewerten . . . . .	63
7.3	Bestimmung durch direkte Messung . . . . .	64
7.4	Ergebnisse und Fehler . . . . .	65
7.4.1	Häufige Werte des Porenvolumen (PV bzw. $n$ ) . . . . .	65
7.4.2	Häufige Werte der Porenziffer (PZ bzw. $\epsilon$ ) . . . . .	66
7.4.3	Fehler der Bestimmungen . . . . .	66

7.5	Rechenbeispiele . . . . .	66
7.6	Literatur . . . . .	67
<b>8</b>	<b>Bestimmung des Drucksetzungsverhaltens</b> . . . . .	<b>68</b>
8.1	Problemstellung . . . . .	68
8.2	Drucksetzungsmessung . . . . .	68
8.2.1	Prinzip der Methode . . . . .	68
8.2.2	Geräte . . . . .	69
8.2.3	Durchführung der Bestimmung . . . . .	70
8.3	Ergebnisse und Fehler . . . . .	72
8.3.1	Ermittlung der Porenziffer . . . . .	72
8.3.2	Zeichnen der Drucksetzungskurve und Bestimmung von Vorbelastung und Verdichtungsverhältnis . . . . .	73
8.3.3	Häufige Werte . . . . .	75
8.3.4	Fehler der Bestimmung . . . . .	75
8.4	Bemerkungen . . . . .	76
8.5	Rechenbeispiele . . . . .	76
8.6	Weitere Methoden . . . . .	77
8.7	Literatur . . . . .	77
<b>9</b>	<b>Bestimmung der Scherparameter</b> . . . . .	<b>78</b>
9.1	Problemstellung . . . . .	78
9.2	Der direkte Scherversuch . . . . .	78
9.2.1	Prinzip der Methode . . . . .	78
9.2.2	Geräte . . . . .	79
9.2.3	Einrichtung des Kreisschergerätes . . . . .	80
9.2.4	Durchführung des Scherversuches . . . . .	81
9.3	Auswertung der Messungen . . . . .	82
9.4	Ergebnisse und Fehler . . . . .	82
9.4.1	Häufigste Werte der Scherparameter . . . . .	82
9.4.2	Fehler . . . . .	83
9.5	Rechenbeispiele . . . . .	84
9.6	Andere Methoden . . . . .	85
9.7	Literatur . . . . .	85
<b>10</b>	<b>Bestimmung der Wasserspannungskurve</b> . . . . .	<b>86</b>
10.1	Problemstellung . . . . .	86
10.2	Unterdruckmethode . . . . .	86
10.2.1	Prinzip der Methode . . . . .	86
10.2.2	Geräte . . . . .	87
10.2.3	Durchführung der Bestimmung . . . . .	88
10.2.4	Auswertung der Ergebnisse . . . . .	90
10.2.5	Bemerkungen . . . . .	91
10.2.6	Ergänzende Arbeiten . . . . .	93
10.3	Überdruckmethode . . . . .	94
10.3.1	Prinzip der Methode . . . . .	94
10.3.2	Geräte . . . . .	94
10.3.3	Durchführung der Bestimmung . . . . .	95

10.3.4	Auswertung der Ergebnisse	96
10.3.5	Bemerkungen	96
10.4	Vergleich der Druck- mit der Saugmethode	98
10.4.1	Prinzipielle Unterschiede	98
10.4.2	Arbeitstechnische Unterschiede	98
10.5	Ergebnisse und Fehler	99
10.5.1	Darstellung der Ergebnisse	99
10.5.2	Fehler der Ergebnisse	100
10.5.3	Häufig vorkommende Ergebnisse	102
10.6	Bemerkungen	102
10.6.1	Be- und Entwässerungskurven	102
10.6.2	Zeitbedarf für die Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Wassergehalt und Wasserspannung	103
10.7	Rechenbeispiele	104
10.8	Weitere Methoden	104
10.8.1	Zentrifugalmethode	104
10.8.2	Dampfdruckgleichgewichte	105
10.8.3	Nomographische Bestimmung mittels Körnungssummenkurven	105
10.9	Literatur	105
<b>11</b>	<b>Aggregatstabilität (Wasserstabilität)</b>	<b>106</b>
11.1	Problemstellung	106
11.2	Prinzip der Methode (Naßsiebung)	107
11.3	Geräte	107
11.4	Durchführung der Bestimmung	107
11.4.1	Vorbereitung der Proben (Lufttrocknung, Oberflächenproben)	107
11.4.2	Die Naß-Siebung	109
11.4.3	Verfahren unter Umgehung der Trocknung (Proben aus Unterboden und Untergrund)	109
11.5	Auswertung der Ergebnisse	110
11.5.1	Das Stabilitätsmaß	110
11.5.2	Die graphische Auswertung	110
11.5.3	Die rechnerische Auswertung	111
11.5.4	Ergebnisse und Fehler	112
11.6	Bemerkungen	112
11.6.1	Charakterisierung der Aggregation eines Bodens	112
11.6.2	Verklebungen	112
11.7	Rechenbeispiel	113
11.8	Andere Methoden	113
11.9	Literatur	113
<b>12</b>	<b>Bestimmung der Wasserleitfähigkeit</b>	<b>114</b>
12.1	Problemstellung	114
12.1.1	Fließwiderstand und Wasserleitfähigkeit	114
12.1.2	Gesättigte und ungesättigte Wasserleitfähigkeit	114
12.1.3	Anwendungsbereiche	114
12.2	Prinzip der Methode	115

12.2.1	Die Darcy-Gleichung . . . . .	115
12.2.2	Dimensionen und Einheiten des Koeffizienten $k$ . . . . .	115
12.2.3	Ungestörte Lagerung . . . . .	116
12.3	Gesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	116
12.3.1	Meßprinzip . . . . .	116
12.3.2	Geräte . . . . .	117
12.3.3	Durchführung der Bestimmung . . . . .	118
12.3.4	Berechnung der Ergebnisse . . . . .	121
12.4	Ungesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	121
12.4.1	Meßanordnungen . . . . .	121
12.4.2	Messung mit direkter Ablesung . . . . .	122
12.4.3	Berechnung aus zeitlicher Veränderung der Wasserspannung . . . . .	124
12.4.4	Berechnung der Ergebnisse . . . . .	127
12.5	Ergebnisse und Fehler . . . . .	129
12.5.1	Gesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	129
12.5.2	Ungesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	131
12.6	Rechenbeispiele . . . . .	133
12.6.1	Gesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	133
12.6.2	Ungesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	134
12.7	Weitere Methoden . . . . .	135
12.7.1	Gesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	135
12.7.2	Ungesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	135
12.8	Literatur . . . . .	136
<b>13</b>	<b>Messung des Matrixpotentials (der Wasserspannung) im Boden . . . . .</b>	<b>137</b>
13.1	Problemstellung . . . . .	137
13.2	Tensiometer . . . . .	137
13.2.1	Prinzip der Methode . . . . .	137
13.2.2	Geräte . . . . .	138
13.2.3	Durchführung der Bestimmung . . . . .	139
13.2.4	Ergebnisse und Fehler . . . . .	142
13.2.5	Bemerkungen . . . . .	142
13.2.6	Freilandtensiometer . . . . .	143
13.3	Die Gipsblockelektrode . . . . .	144
13.3.1	Prinzip der Methode . . . . .	144
13.3.2	Geräte . . . . .	145
13.3.3	Durchführung der Bestimmung . . . . .	145
13.3.4	Auswertung der Ergebnisse . . . . .	149
13.3.5	Fehler bei Bestimmung . . . . .	149
13.3.6	Bemerkungen . . . . .	150
13.4	Häufig im Boden vorkommende Wasserspannungen . . . . .	151
13.4.1	Allgemeine Größenordnungen . . . . .	151
13.4.2	Der Jahresgang . . . . .	151
13.4.3	Einfluß der Bodenart (Porengrößenverteilung) . . . . .	151
13.4.4	Der Einfluß der Tiefe im Profil . . . . .	152
13.5	Rechenbeispiele . . . . .	153
13.5.1	Tensiometer . . . . .	153

13.5.2	Gipsblockelektrode . . . . .	153
13.6	Weitere Methoden . . . . .	153
13.7	Literatur . . . . .	154
<b>14</b>	<b>Bestimmung des Eindringwiderstandes des Bodens mit der Schlagsonde . . . . .</b>	<b>155</b>
14.1	Problemstellung . . . . .	155
14.2	Prinzip der Methode . . . . .	156
14.3	Geräte . . . . .	156
14.4	Durchführung der Bestimmung . . . . .	156
14.4.1	Die Schlagtechnik . . . . .	156
14.4.2	Die Meßpunkte . . . . .	158
14.5	Auswertung der Ergebnisse . . . . .	158
14.5.1	Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Tiefe im Boden . . . . .	158
14.5.2	Linien gleichen Eindringwiderstandes . . . . .	159
14.6	Ergebnisse und Fehler . . . . .	160
14.6.1	Natur der Unterschiede . . . . .	160
14.6.2	Häufige Ergebnisse . . . . .	160
14.6.3	Streuungen . . . . .	160
14.7	Bemerkungen . . . . .	161
14.8	Weitere Methoden . . . . .	161
14.8.1	Einfachste Schlagsonden und Aushilfsmethoden . . . . .	161
14.8.2	Sonden mit anderen Meßprinzipien . . . . .	161
14.9	Literatur . . . . .	162
<b>15</b>	<b>Auswertung räumlich zuordnungsfähiger Meßwerte . . . . .</b>	<b>163</b>
15.1	Problemstellung . . . . .	163
15.2	Prinzip der Methode . . . . .	163
15.3	Durchführung der Auswertung . . . . .	164
15.3.1	Datenfeld aus statischen Meßwerten . . . . .	164
15.3.2	Datenfeld aus statischen Meßwerten, dazu einzelne Daten über Bewegungs-(Fluß)vorgänge . . . . .	166
15.3.3	Datenfeld aus drei Meßwerten . . . . .	169
15.4	Bemerkungen zu Homogenitäts- und Kontinuitätsbedingungen . . . . .	170
15.5	Literatur . . . . .	170
<b>Anhang</b>	<b>. . . . .</b>	<b>171</b>
I	Hinweise auf arbeitstechnische Hilfsmittel . . . . .	171
II	Schema zur Umrechnung von Meßwerten verschiedener Einheiten . . . . .	172
<b>Sachregister</b>	<b>. . . . .</b>	<b>173</b>