

UNIVERSITY OF TORONTO

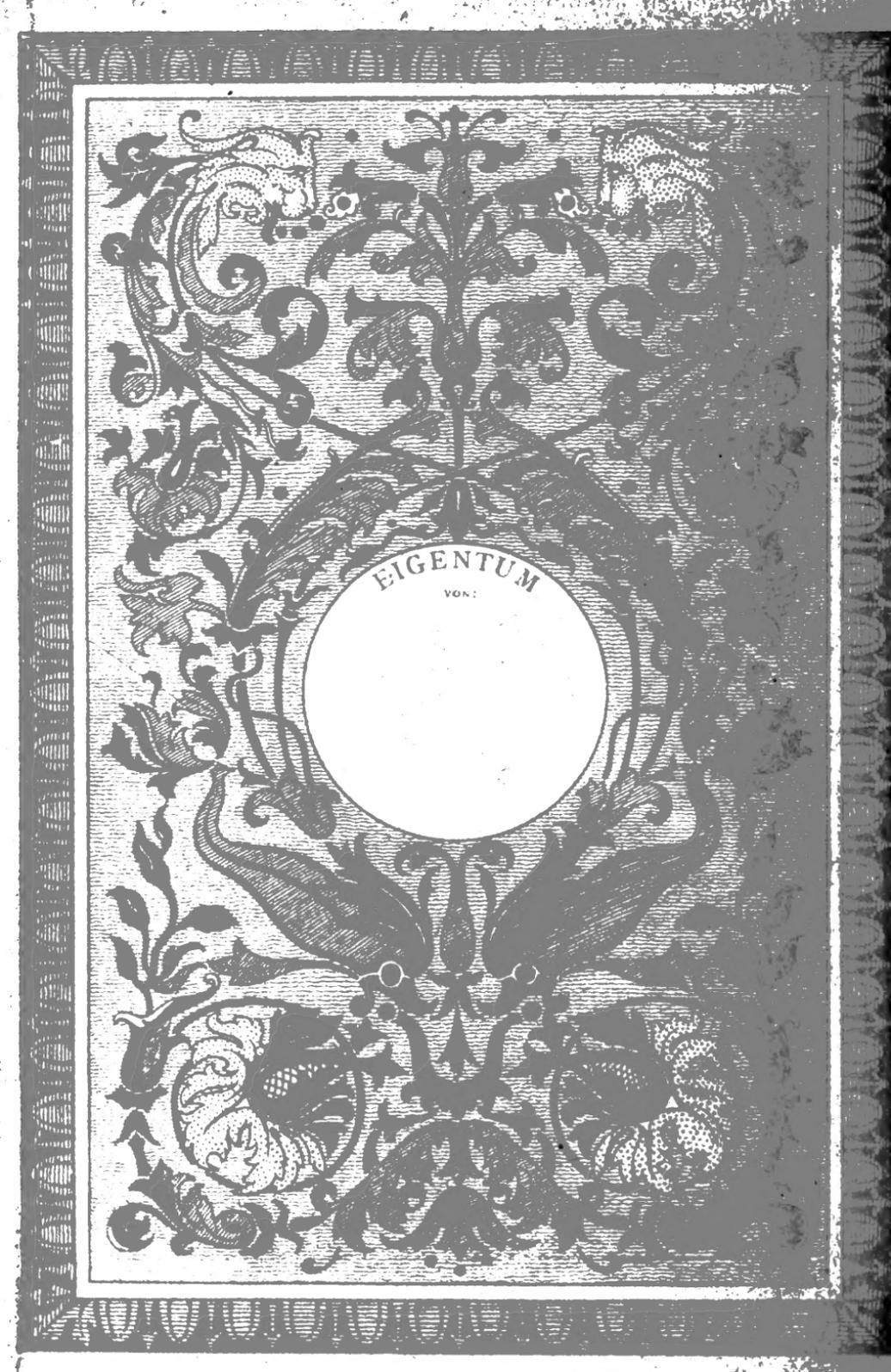


3 1761 01540672 1

Mitscherlich

Bodenkunde
für Land- u. Forstwirte

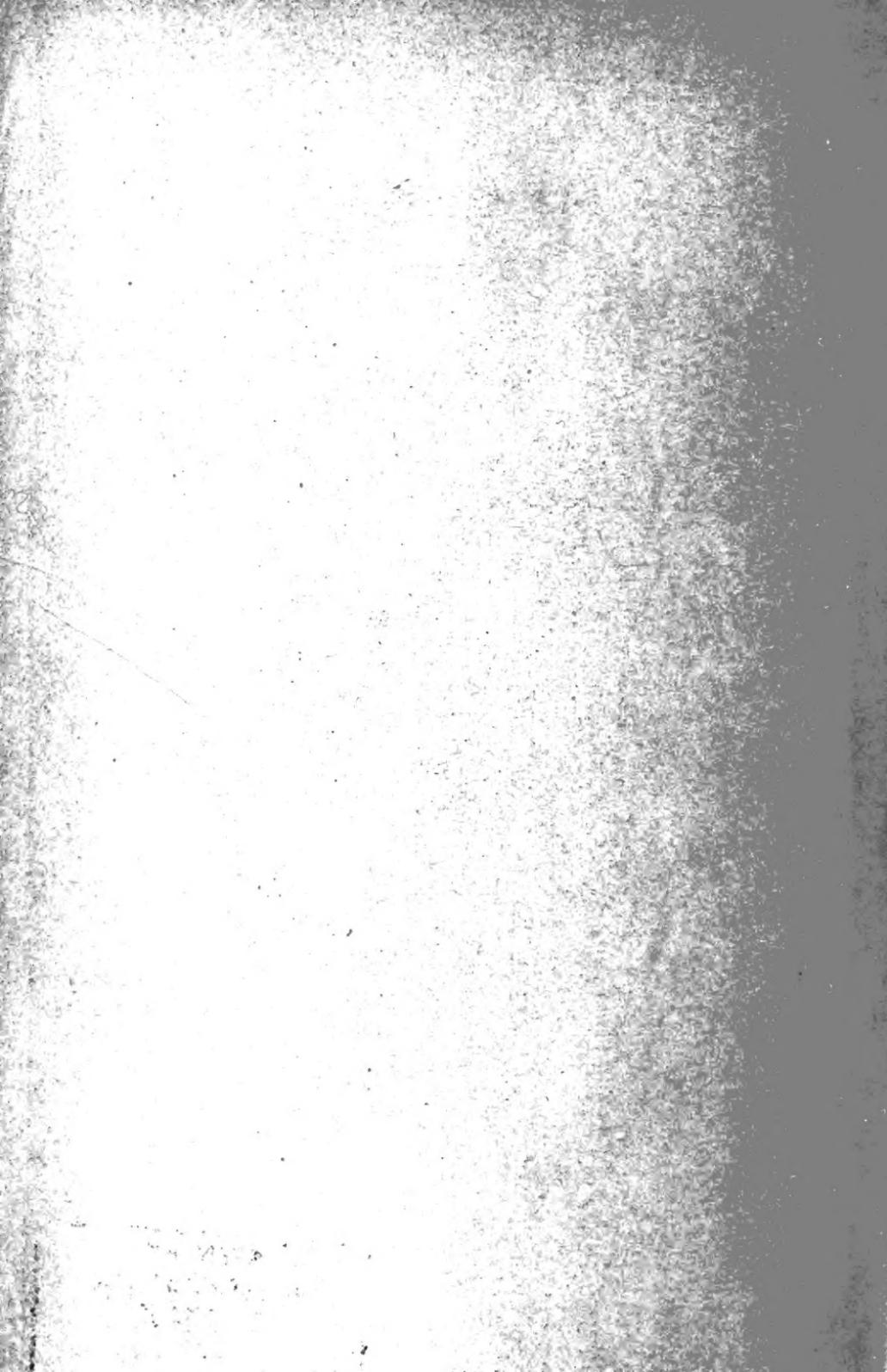
UNIVERSITY
OF
TORONTO
LIBRARY



EIGENTUM

VON:





Bodenkunde

für

Land- und Forstwirte.

Von

Dr. Eilh. Alfred Mitscherlich,

Privatdozent an der Christian Albrechts-Universität zu Kiel.



LIBRARY
FACULTY OF FORESTRY
UNIVERSITY OF TORONTO

Mit 38 Textabbildungen.

84862
5/12/07

BERLIN.

VERLAGSBUCHHANDLUNG PAUL PAREY.

Verlag für Landwirtschaft, Gartenbau und Forstwesen.

SW., Hedemannstrasse 10.

1905.

SEEN BY
PRESERVATION
SERVICES

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.

S
593
M58

Vorwort.

Alle Erscheinungen in der Natur lassen sich auf Energievorgänge zurückführen, welche sich in verschieden langer Zeit vollziehen. Die verschiedenen Arten dieser Energievorgänge behandelt die Physik und die Chemie — zwei Wissenschaften, welche somit als die Grundlage aller übrigen Naturwissenschaften betrachtet werden müssen. Auf ihnen bauen sich demnach die anderen Naturwissenschaften auf. Die Geologie z. B. betrachtet die physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten in ihrer Einwirkung auf die Erdrinde und so hier u. a. die Entstehung des Bodens. Die Botanik und insonderheit der für den Land- und Forstwirt wesentlichste Teil derselben, die Pflanzenphysiologie, untersucht die chemischen und physikalischen Bedingungen, unter denen die Pflanzen wachsen, und so von diesem Gesichtspunkte aus die physikalische und chemische Beschaffenheit des Bodens. — Man hat bislang fast stets diese pflanzenphysiologische Bodenkunde von der geologischen in *direkte* Abhängigkeit zu bringen versucht, ohne sich klar zu machen, daß das Bindeglied zwischen beiden, das *einzig* Gemeinsame der beiden Wissenschaften, die Grundwissenschaften, Physik und Chemie, sind. Wohl ist die Beschaffenheit verschiedener Bodenarten je nach ihrer Entstehung physikalisch und chemisch verschieden, wohl können die Unterschiede, welche auf die geologische Abstammung eines Bodens zurückzuführen sind, auch pflanzenphysiologisch als Unterschiede zu bezeichnen sein, trotzdem müssen wir beides scharf trennen, denn es ist für unsere Kulturpflanzen ganz gleichgültig, wie der Boden, auf dem sie wachsen, einst geologisch entstand; *das Gedeihen der Pflanzen wird sich stets danach richten müssen, wie der Boden momentan physikalisch und chemisch beschaffen ist.* — Dadurch nun, daß man bislang fast stets die direkten Beziehungen zwischen den Pflanzenerträgen eines Bodens und seiner geologischen Entstehung aufsuchte, und die physikalische und chemische Beschaffenheit des Bodens, welche die Grundlage jeder pflanzenphysiologischen Bodenkunde bilden muß, mehr oder weniger vernachlässigte, kam diese Wissenschaft in ein Stadium, in welchem eine Weiterentwicklung nicht mehr möglich war. Es unterliegt keinem Zweifel, daß viele Forscher, selbst solche, welche wohl den geologischen Aufbau des Bodens als fast allein maßgebend für den pflanzenphysiologischen Wert desselben ansahen, dies ahnten und auch teilweise erkannten;¹⁾ jedoch hat es bis heute merkwürdigerweise niemand

¹⁾ U. a. sagt Albert Orth, Die naturwissenschaftlichen Grundlagen der Bodenkunde; Landw. Versuchs-Stationen Bd. XX, S. 65: „Eine gewisse Vielgestaltigkeit der oberen Bodenbildung kommt auch bei gleicher geologischer Grundlage vor.“

unternommen, mit kühnem Entschluß scharf mit den alten Traditionen, welche die Wissenschaft unserer land- und forstwirtschaftlichen Bodenkunde nie fördern können, zu brechen.

Die vorliegende Arbeit will die land- und forstwirtschaftliche Bodenkunde auf ihrer naturgemäßen Grundlage, nämlich auf den grundlegenden Naturwissenschaften, der Physik und der Chemie, aufbauen und dürfte sie sich hierdurch von allen bisherigen Bodenkunden wesentlich unterscheiden. Wohl existiert hier eine ganze Reihe von Vorarbeitern — es seien nur die Namen Schübler und E. Wollny genannt —, jedoch fehlt es noch allenthalben an *exakter* Forschung, zumal sich die Physiker außerordentlich wenig mit Bodenuntersuchungen befaßt haben. Hierdurch wurde es erforderlich, hier und da statt bewiesener Tatsachen Arbeitshypothesen einzuflechten.

Der Umstand, daß die Literatur aus den verschiedensten naturwissenschaftlichen Disziplinen zusammengesucht werden mußte, machte die Bearbeitung des Buches sehr schwierig, doch hat der Verfasser es versucht, nach Möglichkeit jede einschlägige Arbeit zu berücksichtigen. Zum Teil befinden sich im vorliegenden Werke auch Arbeiten vom Verfasser, welche bislang noch nicht veröffentlicht wurden.

Einzelne theoretische Paragraphen konnten leider an den Stellen, wo es sich um den Sturz alter, und um den Aufbau neuer Methoden handelte, nicht aus dem Buche weggelassen werden; so war dies insonderheit nicht möglich bei der Bestimmung der der Bodenoberfläche (d. i. die Summe der Oberflächen aller Bodenpartikelchen in der Gewichtseinheit Boden) proportionalen Größen, denn die Größe der Bodenoberfläche scheint dem Verfasser — als eine für den einzelnen Boden „spezifische“ Größe — die wichtigste Bedeutung bei der Bestimmung des Bodenwertes zu besitzen.

Verschiedenen Dozenten der Kieler Universität, vor allem Herrn Professor Rodewald, möchte ich für den freundlichen Rat, den sie mir in einzelnen Punkten erteilt haben, hier meinen besten Dank sagen.

Sollte das vorliegende Werk, welches ich hiermit der Kritik und der wohlwollenden Nachsicht meiner Fachgenossen übergebe, dem studierten sowie dem studierenden Land- und Forstmanne manche nützliche Anregung geben und sie dazu anspornen, auch ihrerseits soviel wie möglich zum Ausbau unserer noch sehr jugendlichen Wissenschaft beizutragen, so dürfte der Zweck des Buches voll erfüllt sein.

Kiel, im Mai 1905.

Eilh. Alfred Mitscherlich.

Inhalt.

Einleitung.

	Seite
§ 1. Die Definition des Wortes „Boden“	1
§ 2. Der Wert des Bodens	3
§ 3. Die Bodenuntersuchung	6

Erster Abschnitt.

Die physikalische Beschaffenheit der Bodenprobe.

§ 4. Die Bodenprobe	9
-------------------------------	---

Kapitel I.

Die spezifischen Eigenschaften der festen Bodenbestandteile.

§ 5. Die Bestimmung der festen Bodenteilchen oder die Trockensubstanzbestimmung im Boden	14
a) Trockenmethode nach Mitscherlich	16
b) Trockenmethode nach Arntz	18
§ 6. Das spezifische Gewicht der festen Bodenteilchen	20
§ 7. Die spezifische Wärme der festen Bodenbestandteile	23
§ 8. Die Wärmeleitungsfähigkeit der festen Bodenteilchen	26
§ 9. Die Farbe der festen Bodenteilchen	28
§ 10. Die Korngröße der festen Bodenteilchen	32
a) Die mechanisch-chemische Bodenanalyse	33
α) Die Kalkbestimmung	33
β) Die Sandbestimmung	34
γ) Die Tonbestimmung	34
δ) Die Humusbestimmung	34
b) Die mechanische Bodenanalyse	36
α) Die Siebmethode	37
β) Die Schlämmethode	41
§ 11. Die Bodenoberfläche	49
a) Die Methode der Bestimmung der Benetzungswärme	51
α) Vorbereitung des Eiskalorimeters	51
β) Die Vorbereitung der Bodenprobe	55
γ) Die Bestimmung der Benetzungswärme	56
b) Die Methode der Bestimmung der Hygroskopizität	56
c) Die Theorie der Benetzungswärme und der Hygroskopizität	58
d) Die absolute Größe der Bodenoberfläche	70
e) Die äußere Bodenoberfläche	73
§ 12. Die spezifische Kohäsionskonstante der festen Bodenteilchen und ihre spezifische Adhäsionskonstante zum Wasser	77

Kapitel II.

Seite

**Das Verhalten der festen Bodenteilchen zueinander
und das Hohlraumvolumen des Bodens.**

Die festen Bodenteilchen und ihre Beziehung
zum Hohlraumvolumen des Bodens.

§ 13.	Die Beziehung zwischen den festen Bodenteilchen und der Größe des Hohlraumvolumens	80
§ 14.	Die Beziehungen zwischen den festen Bodenteilchen und der Gestalt des Hohlraumvolumens	84
§ 15.	Das Verhalten der festen Bodenteilchen zueinander	87
§ 16.	Die Bestimmung des Hohlraumvolumens des Bodens und die Veränderung desselben	93

§§ 17—22. Die Bindigkeit des Bodens.

a) §§ 17—19. Methoden betreffend die Bestimmung der Festigkeit
des Bodenkrümel.

§ 17.	Die relative Festigkeit des Bodenkrümel	99
§ 18.	Die absolute Festigkeit des Bodenkrümel	100
§ 19.	Der Trennungswiderstand des Bodenkrümel	103

b) §§ 20—22. Methoden betreffend die Bestimmung der Bindigkeit
des gewachsenen Bodens.

§ 20.	Der Trennungswiderstand des gewachsenen Bodens	107
§ 21.	Die Adhäsion des Bodens an Holz und Eisen	112
§ 22.	Die Reibung des Bodens an Holz und Eisen	116
§ 23.	Die festen Bodenteilchen und ihr Verhalten bei der Bodenbearbeitung	120
§ 24.	Das Verhalten der Pflanze zu den festen Bodenteilchen und zum Hohlraumvolumen des Bodens	124

§§ 25—28. Die Veränderlichkeit des Hohlraumvolumens
des Bodens.

§ 25.	Der Einfluss der Atmosphärien auf die Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens	131
§ 26.	Der Einfluss pflanzlicher und tierischer Organismen auf die Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens	135

§§ 27—28. Der Einfluss der menschlichen Tätigkeit auf die
Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens.

§ 27.	Die Bodenbearbeitung	140
§ 28.	Der Einfluss der Düngung auf die Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens	147

Kapitel III.

**Das Bodenwasser und sein Verhalten zu den festen
Bodenteilchen.**

§ 29.	Die Benetzungerscheinungen	153
§ 30.	Der Wert des hygroscopisch gebundenen Bodenwassers für die Vegetation	161

	Seite
§ 31. Die Kapillaritätserscheinungen	166
§ 32. Die Wasserkapazität	176
§ 33. Die Steighöhe des Wassers im Boden	185
§ 34. Die Durchlässigkeit des Bodens für Wasser	194
§ 35. Die Wasserverdunstung aus dem Boden	204
§ 36. Die Ausnutzung des kapillar gebundenen Bodenwassers durch die Pflanze	213
Schlussbemerkung	220

Kapitel IV.

Die Bodenluft und ihr Verhalten zum Bodenwasser und zu den festen Bodenteilchen.

§ 37. Die Bodenluft und ihre Bedeutung für die Vegetation	222
§ 38. Die Gasabsorption durch den Boden	225
§ 39. Die Luftkapazität des Bodens	227
§ 40. Das Leitungsvermögen des Bodens für Luft	230
Schlussbemerkung	236

Kapitel V.

Das Verhalten des Bodens zur Wärme.

§ 41. Der Einfluss der Bodenwärme auf die Vegetation	237
§ 42. Die spezifische Wärme oder die Wärmekapazität des Bodens	237
§ 43. Die Wärmeleitungsfähigkeit des Bodens	239
§ 44. Die Wärme-Absorption und -Emission des Bodens	245
Schlussbemerkung	248

Zweiter Abschnitt.

Die chemische Beschaffenheit der Bodenprobe.

Kapitel VI.

Die chemischen Bodeneigenschaften.

§ 45. Die chemischen Bodeneigenschaften in ihrer Beziehung zu der Pflanze	249
§§ 46—50. Die chemische Bodenanalyse.	
§ 46. Die Vorbereitung der Bodenprobe	257
§ 47. Die Bestimmung der Phosphorsäure	258
§ 48. Die Bestimmung des Kalis	259
§ 49. Die Bestimmung des Kalkes	260
§ 50. Die Bestimmung des Stickstoffs nach Kjeldahl, Modifikation von Ulsch	260
§ 51. Die physikalische Absorption der Pflanzennährstoffe	261
§ 52. Die chemische Absorption der Pflanzennährstoffe	264
§ 53. Die Möglichkeit, chemisch absorbierte Pflanzennährstoffe durch die Düngung in Lösung überzuführen	269
§ 54. Der Einfluss der Organismen auf die chemischen Bodeneigenschaften	270
§ 55. Die Pflanzengifte im Boden	273

Dritter Abschnitt.
Der gewachsene Boden.

Seite

Kapitel VII.

Die Eigenschaften des gewachsenen Bodens und ihre Schwankungen.

§ 56.	Der gewachsene Boden und der Bodenwert	276
§ 57.	Die Ackerkrume oder die Krumenschicht	277
§ 58.	Die Tiefe der Krume	284
§ 59.	Die natürliche und die künstliche Bodendecke (Waldstreu, Pflanzendecke und Moorkultur)	287
§ 60.	Die Neigung der Erdoberfläche	293
§ 61.	Der Untergrund	295
§ 62.	Der Einfluß des Klimas auf die Erträge des Bodens	299
	Schlussbemerkung	305

Kapitel VIII.

Die Bodenklassifikation.

§ 63.	Über die Bestimmung des Wertes eines Grundstückes auf Grund der Untersuchung einzelner Standorte	306
§ 64.	Die Anwendung der Fehlerwahrscheinlichkeitsrechnung zur Beurteilung der zweckmäßigen Anzahl der auf einem Grundstücke zu wählenden Probestellen und zur Beurteilung der Art der Probenentnahme	309
§ 65.	Der Wert der Untersuchung jeder einzelnen von der einem Grundstück entnommenen Bodenproben	316
§ 66.	Die zum Aufbau einer wissenschaftlichen Bodenklassifikation gangbaren Wege	322
§ 67.	Frühere Versuche zur Erzielung einer Bodenklassifikation	327
	I. Die mechanisch-chemische Bodenklassifikation des Praktikers	327
	II. Die Bodenklassifikation nach den Bodenerträgen	339
	III. Die Bodenklassifikation nach den wildwachsenden Pflanzen	344
	IV. Versuche einer chemischen Bodenklassifikation	349
	V. Versuche einer geologischen Bodenklassifikation	351
	VI. Weitere Versuche einer naturwissenschaftlichen Bodenklassifikation	354
	VII. Versuche einer ökonomischen Bodenklassifikation	356
	Alphabetisches Sach- und Namenregister	360

Einleitung.

Es ist die Aufgabe einer Bodenkunde, die Eigenschaften des Bodens zu besprechen. Dies kann von den verschiedensten Gesichtspunkten aus geschehen, denn der Boden hat für die meisten naturwissenschaftlichen Disziplinen hohes Interesse. Im vorliegenden Buche soll der Boden vom Standpunkte des Land- und Forstwirtes aus untersucht und beschrieben werden. Dieser studiert an ihm alle diejenigen Eigenschaften, welche für das Wachstum unserer Kulturpflanzen, sowie für die Bodenbearbeitung in Betracht kommen können. Es sind das vornehmlich die physikalischen und ferner die chemischen Bodeneigenschaften. Denn je nach dem Nährstoffgehalt eines Bodens, je nach seinen Wasserverhältnissen und je nach dem Widerstande, welchen dieser dem Eindringen der Pflanzenwurzel entgegensetzt, müssen die Erträge eines Bodens variieren; je nach dem Widerstande, welchen ein Boden den Kulturgeräten entgegensetzt, wird der erforderliche Arbeitsaufwand ein anderer. Der Umstand, daß der Widerstand, welchen ein Boden den Ackergeräten entgegenstellt, analog dem Widerstande ist, welchen der Boden dem Eindringen der Pflanzenwurzel entgegenstellt — denn mittelst der Ackergeräte wollen wir ja der Pflanze Arbeit abnehmen — ermöglicht es dem Land- und Forstwirte, den Boden ausschließlich vom pflanzenphysiologischen Standpunkte aus zu betrachten.

§ 1. Die Definition des Wortes „Boden“.

Von diesem Gesichtspunkte ausgehend, dürfte man das Wort Boden in folgender Weise definieren:

„Boden“ ist ein Gemenge von mehr oder minder kleinen, festen Teilchen, Wasser und Luft, welches, versehen mit den erforderlichen Pflanzennährstoffen, als Träger einer Vegetation dienen kann.

Der Boden muß notwendig, wenn wir ihn auf seine Fähigkeit hin, Pflanzen zu produzieren, betrachten, ein derartiges Gemenge sein, denn ist kein Wasser oder ist keine Luft im Hohlraumvolumen zwischen den festen Bodenteilchen vorhanden, so können unsere Kulturpflanzen nicht gedeihen. Wohl müssen die Pflanzennährstoffe im Boden sein, jedoch halte ich es für nicht erforderlich, in einer solchen Definition zu erwähnen, daß keine

Pflanzengifte im Boden sein dürfen, weil dies als ein anormaler Zustand anzusehen wäre. Unter der Einschränkung, „welches als Träger einer Vegetation dienen kann,“ fasse ich die klimatischen Faktoren, ohnè welche eine Pflanze im besten Boden nicht gedeihen kann, zusammen. Der Boden muß somit an der Erdoberfläche lagern, damit den Kulturpflanzen auch das nötige Licht, die erforderliche Luft und Wärme zukommt, und damit das dem Boden entzogene Wasser durch die atmosphärischen Niederschläge ergänzt werden kann, denn nicht von dem Boden allein, sondern vom Boden und Klima wird die Höhe unserer Pflanzenerträge bedingt. Aus dem Grunde erscheint mir diese Einschränkung erforderlich zu sein.

Von dem Begriff „Boden“ ist der Begriff „Erde“ meines Erachtens wissenschaftlich streng zu trennen, obwohl diese Trennung im gewöhnlichen Sprachgebrauch leider nicht immer durchgeführt wird.

Unter „Erde“ verstehe ich ausschließlich unseren Planeten, den „Erdball“. Somit ist für mich eine „Erdfäche“ oder „Erdoberfläche“ ein Teil der Oberfläche dieses Planeten, z. B. die Fläche eines Acker-, Wiesen-, Weide-, Forst- oder Wassergrundstückes, deren Größe, Gestalt, Neigung usw. der Geometer festzustellen hat.

Im Gegensatz hierzu verstehe ich nach der vorher gegebenen Definition unter „Bodenfläche“ oder „Bodenoberfläche“ die Oberfläche des von den festen Bodenteilchen gebildeten Hohlraumvolumens *im* Boden oder die dieser identische Summe der Oberflächen aller einzelnen festen Bodenpartikelchen. Auch die Bodenoberfläche hat natürlich eine bestimmte Größe und Gestalt, jedoch läßt sich bei ihr z. B. nicht mehr von einer Neigung gegen eine Horizontalebene sprechen.

Um auf die bisherigen Definitionen des Wortes „Boden“ kurz einzugehen, so ist hier besonders die von Wahnschaffe¹⁾ zu erwähnen, welcher mit zu den wenigen gehört, welche den Boden als Träger einer Vegetation bezeichnen.²⁾ Er sagt:

„Ich verstehe unter Boden die oberste, lockere und zum Teil erdige Schicht unserer Erdrinde, soweit dieselbe imstande ist, eine Vegetation, mag dieselbe auch noch so kümmerlich sein, zu tragen.“

Diese Definition steht meiner vorhergegebenen bei weitem am nächsten; trotzdem kann ich sie nicht beibehalten, weil ich es für erforderlich halte, einmal auf die gasförmigen, flüssigen und festen Bodenbestandteile hinzuweisen und ferner den Unterschied zwischen „Boden“ und „Erde“ durchzuführen.

¹⁾ F. Wahnschaffe, Anleitung zur wissenschaftlichen Bodenuntersuchung. Berlin 1887, S. 3.

²⁾ Diese Definitionen gehen nach E. Ramann („Bodenkunde“ S. 1) bis auf Kraut (Handwörterbuch der Chemie II. Bd., „Boden“, 1853) zurück, welcher den Boden als „die oberste zum Pflanzentragen geeignete Erdschicht“ bezeichnet.

Von anderen Bodendefinitionen dürfte diejenige von Nowacki¹⁾ hier noch zu erwähnen sein:

„Boden ist eine Anhäufung von unzähligen kleinen Körnern oder Einzelkörpern, die so lose aneinander gefügt oder gelagert sind, daß sie sich im feuchten, oft auch schon im trockenen Zustande leicht voneinander trennen, aneinander verschieben und in eine neue Lagerung, Anordnung oder Gruppierung bringen lassen.“

Nowacki hat bei seiner Definition nicht die Erzielung von Pflanzenerträgen, sondern die Bearbeitbarkeit des Bodens im Auge, welche allerdings dem Boden praktische Bedeutung verleiht. Trotzdem möchte ich mich nicht dieser Definition anschließen. Ich halte es zunächst für die wesentlichste Fähigkeit des Bodens, daß er überhaupt das, was wir erzielen wollen, die Pflanzenerträge, zu erzielen gestattet, insofern er der Träger einer Vegetation sein kann; erst in zweiter Linie muß der Land- und Forstwirt die Fähigkeit des Bodens, sich bearbeiten zu lassen, in Betracht ziehen.

Die verschiedene Definition des Wortes „Boden“ weist uns darauf hin, zunächst festzustellen, was wir unter dem „Wert des Bodens“ verstehen wollen.

§ 2. Der Wert des Bodens.

Eine Bestimmung des Wertes des Bodens ist vom volkswirtschaftlichen Standpunkte aus wünschenswert. Privatwirtschaftlich wird sie meist dann erforderlich, wenn Grundstücke verkauft oder auch hypothekarisch beliehen werden sollen. Eine solche Beleihung findet in der Regel auf viele Jahre hinaus statt, ohne daß inzwischen eine erneute Feststellung des Bodenwertes erforderlich wäre. Da nun der Gelddarleiher sein Geld sicher anlegen will, eine erneute Feststellung des Bodenwertes auf sein Gesuch hin aber so gut wie nie erfolgt, so muß demnach der Bodenwert oder, wie wir ihn betriebswirtschaftlich zu bezeichnen pflegen, „das Bodenkapital“ ein Kapital sein, welches sich im allgemeinen im Laufe der Jahre auf gleicher Höhe hält, welches aber jedenfalls aus ökonomischen Gründen nicht mit der Zeit geringer werden darf. Wollen wir so den Wert des Bodens feststellen, so müssen wir hierbei von allen denjenigen Bodeneigenschaften absehen, welche einer derartigen Veränderung fähig sind, denn sobald eine solche eintritt, wird die Bestimmung des Bodenwertes zwecklos. Aus diesem Grunde darf man bei einer Bestimmung des Bodenwertes meines Erachtens nicht diejenigen Kapitalien berücksichtigen, welche man zur Erzielung der nächsten Ernten dem Boden zugeführt hat und dann mit diesen Ernten dem Boden wieder entnimmt, d. i. der Aufwand für das

¹⁾ A. Nowacki, Praktische Bodenkunde (Thaer-Bibliothek). Berlin 1904, Seite 10.

Saatgut oder für die Pflanzen, der Aufwand für die Düngung und der für die Bodenbearbeitung, kurz: das sogen. „Betriebskapital“. Dies mag an dem Beispiel der Düngung näher ausgeführt werden.

Es ist richtig, daß der Boden einen Grundvorrat an Pflanzennährstoffen besitzt, und zwar jeder Boden einen andern. Wir könnten demnach diesen bei der Bestimmung des Bodenwertes mit berücksichtigen. In diesem Falle aber müssen wir Gefahr laufen, daß der Boden allmählich schlechter wird, da ihm in jeder Ernte Pflanzennährstoffe entnommen werden. Soll das vermieden werden, so sind dem Boden nach jeder Ernte wieder ebensoviel Nährstoffe zuzuführen, als er in der Ernte abgegeben hat. Verfährt man aber endlich in dieser Weise, so ist es schließlich vollkommen gleichgültig, wie groß der Grundvorrat des Bodens an Pflanzennährstoffen ist, da diese dann stets für die nächste Ernte ausreichen werden. Es hat dann der Gehalt des Bodens an Pflanzennährstoffen für den Bodenwert keine Bedeutung. Da die Pflanzennährstoffe im Boden aber diejenigen chemischen Bestandteile sind, welche für den Pflanzenwuchs vornehmlich in Betracht gezogen werden müssen, so dürfte eine Bodenklassifikation, d. h. eine Klassifikation der Bodenarten nach ihrem land- und forstwirtschaftlichen Wert nicht auf den verschiedenen Gehalt der Bodenarten an chemischen Bestandteilen aufzubauen sein.¹⁾

Die einzig mögliche Bestimmung des Bodenwertes ist die nach den physikalischen Eigenschaften des Bodens, wie sie der Praktiker schon seit undenkbar langen Zeiten ausübt und wie sie u. a. bereits von Thaer²⁾ eingehend beschrieben worden ist. Die praktischen Boniteure bestimmen den Wert des Bodens nach dem vorwiegenden Gehalt desselben an Sand, Kalk, Ton, Lehm und Humus, d. s. Gemengteile des Bodens, welche chemisch und physikalisch voneinander verschieden sind, welche aber in Sonderheit wegen ihrer physikalischen Verschiedenheit einen verschiedenen Einfluß auf die Vegetation ausüben. Die Art und Weise, wie der Praktiker den einzelnen Boden untersucht, ist verhältnismäßig primitiv, kann aber oft, wenn z. B. der Stand der umliegenden Saaten u. a. m. mitberücksichtigt wird, innerhalb weiter Grenzen als ausreichend genau bezeichnet werden, vorausgesetzt, daß der Taxator eine solche Übung besitzt, daß er nach dem Gefühl beim Zerbröckeln des Bodens dessen Bindigkeit, Feinkörnigkeit u. a. m. auch bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens mit ziemlicher Sicherheit einschätzen und in Taxklassen einordnen kann. Natürlich ist

¹⁾ Vergl. den vergeblichen Versuch Wohltmanns, Die chemische Untersuchung des Bodens und ihre Bedeutung für die Bonitierung des Ackers; schles. landw. Zeitung „Der Landwirt“ 1896, No. 75.

²⁾ A. Thaer, Grundsätze der rationellen Landwirtschaft. 2. Aufl. Stuttgart 1839, Bd. II, § 150 u. f.

die Methode schon, weil sie auf der persönlichen Fähigkeit eines einzelnen Beobachters beruht, also „subjektiv“ ist, sehr roh; dennoch wird man mit ihrer Hilfe den Boden in bestimmte Klassen einreihen können, wenn man *nur auf grobe* Unterschiede achtet, d. h. möglichst wenig Klassen bildet.

Da bei den Bodenarten sämtliche Übergänge von einer Klasse in die andere vorkommen können, so wird es oft schwer sein, festzustellen, ob ein Boden in die eine oder in die andere Klasse einzureihen ist; jedoch wird das hier dadurch erleichtert, daß gleichzeitig mit der Ackerkrume auch der Untergrund eingeschätzt wird, wodurch immerhin zwei bestimmende Merkmale gegeben sind.

Der Gehalt des Bodens an Sand, Lehm, Ton, Humus und Kalk ist aber in der Tat ein Merkmal, das dem einzelnen Boden innerhalb weiter Grenzen unverändert verbleibt. Um es zu verändern, ist ein erheblicher Kapitalaufwand erforderlich, welcher dem Boden einverleibt werden muß, ihm dann aber auch wiederum dauernd verbleibt. Einen Boden verschlechtern, ist unökonomisch und verbietet sich von selbst; verbessern aber können wir danach nur einen Boden, wenn wir z. B. Sandboden mit Lehm überfahren, um so aus dem Sandboden einen lehmigen Sandboden zu machen. Das Überfahren mit Lehm erfordert aber, wie alle Erdarbeiten, einen großen Kapitalsaufwand, welcher dem früheren Bodenkapital deshalb zuzuschlagen ist, weil er nicht durch die nächstjährigen Ernten gedeckt werden kann. Die Ernten auf dem neuen lehmigen Sandboden werden zwar höher ausfallen als die auf dem früheren „Sandboden“, doch wird der Mehrertrag *dauernd* anhalten und nur so groß sein, daß man ihn als Verzinsung des in der Erdbewegung angelegten Kapitals betrachten kann. Erreicht er nicht einmal diese Höhe, so ist es auch unökonomisch, den Boden in dieser Weise zu verbessern. Kann man aber eine solche Verbesserung eines Bodens rationell durchführen, so wird hiermit gleichzeitig das Bodenkapital vergrößert und der Bodenwert gehoben werden.

Noch eine zweite physikalische Bodeneigenschaft kann bei der Bestimmung des Bodenwertes zu berücksichtigen sein; es sind dies die Wasserhältnisse des Bodens. Durch Bewässern eines geringen, durch Entwässern eines schweren Bodens (z. B. durch Drainagen) vermag man die Erträge desselben erheblich zu steigern. Aber auch hier erfordern die Be- und Entwässerungsanlagen einen recht erheblichen einmaligen Kapitalsaufwand, welcher dann allerdings gleichfalls dem Boden dauernd verbleibt und gestattet, dauernd dem Boden höhere Ernten als vorher zu entnehmen.

Der Wert des Bodens richtet sich demnach nach seinen physikalischen Eigenschaften, da diese sowohl die Höhe der Ernteerträge bedingen, die man auf dem Boden erzielen kann, als auch Größen sind, welche so gut wie unabänderlich gegeben sind. Die Aufgabe der wissenschaftlichen Bodenuntersuchung muß es somit sein, für diese Boden-

eigenschaften einen Maßstab ausfindig zu machen, um, wenn möglich, die Bestimmung des Bodenwertes, welche in der Praxis einer subjektiven, d. h. mehr oder weniger willkürlichen Schätzung unterliegt, auf eine wissenschaftlich exakte Methode aufzubauen.

Außer mit diesen Bodeneigenschaften, welche den Bodenwert bedingen, das heißt, von welchen die Höhe der Pflanzenerträge abhängen, muß sich aber die Bodenkunde auch mit den Bodeneigenschaften beschäftigen, welche für die jedesmalige Erzielung von Ernteerträgen in Betracht kommen und somit auf die Höhe des erforderlichen Betriebskapitales einen Einfluß ausüben. Hierher gehören diejenigen Bodeneigenschaften, welche die Art der Bearbeitbarkeit des Bodens bedingen. Man könnte versucht sein, bei der Bestimmung des Bodenwertes auch noch gleichzeitig auf die schwerere oder leichtere Bearbeitbarkeit des Bodens Rücksicht zu nehmen, da auch sie etwas dem einzelnen Boden typisches ist, was für die Ermittlung des von einem Boden zu erzielenden Reinertrages besonders im landwirtschaftlichen Betriebe keineswegs von unwesentlicher Bedeutung sein dürfte. Würden wir dies aber tun, so würden wir gleichzeitig eine ganze Reihe ökonomischer Faktoren, so die Höhe der Marktpreise der erzeugten Produkte zur Ermittlung des Bruttoertrages, die der Düngemittel zur Ermittlung des Düngeraufwandes, wie in Sonderheit die der Arbeitslöhne zur Ermittlung des Arbeitsaufwandes mit hinzu ziehen müssen, Größen, welche in verschiedenen Gegenden und verschiedenen Jahren sehr verschieden sind. Nur auf diese Weise könnte man einen Zusammenhang zwischen der Höhe der Ernteerträge und der Art der Bearbeitbarkeit des Bodens konstruieren, welcher für die Grundlage einer Bodenklassifikation aufgesucht werden müßte. Durch diese veränderlichen ökonomischen Faktoren würde aber eine Unsicherheit in die Bestimmung des Bodenwertes hineinkommen, welche *eine für alle Bodenarten in allen Gegenden gleichmäßige Bodenklassifikation*, die wir erstreben, unmöglich macht.

Ich halte es deshalb nicht für richtig, die Art der Bearbeitbarkeit eines Bodens einer Bodenklassifikation mit zugrunde zu legen; mit dieser Bodeneigenschaft mag sich die Bodentaxation in jedem einzelnen Falle beschäftigen. Aufgabe der Bodenkunde aber soll es sein, auch diese physikalische Bodeneigenschaft mit zu untersuchen und festzustellen, welche Gesichtspunkte für die Bodenbearbeitung vom land- und forstwirtschaftlichen Standpunkte aus in Betracht zu ziehen sind.

§ 3. Die Bodenuntersuchung.

Die Bodenuntersuchung soll die Unterschiede, welche zwischen den verschiedenen Bodenarten bestehen, erkennen lassen. Wollen wir bei derartigen Untersuchungen nur grobe Differenzen feststellen, so genügt

ein angenähertes Verfahren, welches grössere Fehler einschließt; kommt es hingegen darauf an, mittelst einer Methode kleinere Unterschiede verschiedener Bodenarten festzustellen, so muß die Methode exakte Resultate liefern, d. h. solche, welche sich bei Neuanstellung des Versuches fast genau so wiederfinden lassen.

Die Methoden, welche man für die Bodenuntersuchung in Vorschlag gebracht hat, sind schon nach dem gewählten Ausgangspunkte leicht in zwei Gruppen einzuordnen. Die eine, die rohere Methode, geht von der Volumenmaßeinheit Boden aus, d. h. von dem in ein bestimmtes Maß eingefüllten Boden. Die andere, die exaktere Methode, hat zum Ausgangspunkt die Gewichtseinheit Boden. Dieser letztere ist, sofern man vom vollkommen trockenen Boden ausgeht oder wenigstens die Resultate auf vollkommen trockenes Material bezieht, eine konstante Größe. Stellt man so z. B. fest, daß in einem Gramm Boden x Milligramm Kalk enthalten sind, so wird man bei Erneuerung des Versuches wiederum in einem Gramm desselben Bodens x Milligramm Kalk vorfinden. *Diesen exakten Bodenuntersuchungen, zu welchen die chemischen und diejenigen physikalischen gehören, welche sich mit den spezifischen Eigenschaften der festen Bodenteilchen befassen, stehen alle anderen physikalischen Bodenuntersuchungen gegenüber.* Die letzteren haben als Grundlage den bewachsenen Boden: feste Teilchen, Wasser und Luft, und ergeben so, je nachdem, ob in der gleichen Volumenmaßeinheit mehr feste Teilchen oder mehr Wasser oder Luft zufällig eingelagert ist, notwendig andere Resultate. Hierdurch muß der zufällige Fehler verhältnismäßig groß werden, und es ist sehr zu bedauern, daß gerade in den letzten 30 Jahren so viel Mühe darauf verwendet worden ist, zur Bestimmung derartiger physikalischer Bodeneigenschaften Präzisionsapparate zu konstruieren und zu benutzen, wo doch der gewählte Ausgangspunkt nur mit gröberen Versuchsfehlern behaftete Resultate zu erzielen gestattet. Um einen Anhalt für die durch das Beobachtungsmaterial im äußersten Falle möglichen zufälligen Fehlergrößen zu geben, mögen folgende Zahlen angeführt sein. Es wurde das Gewicht der festen Bodenteilchen festgestellt, welche 1. in eine Maßeinheit lufttrocken eingefüllt und 2. unter Wasser eingeschlämmt wurden.¹⁾ Hiernach betragen die durch diese verschiedenen „Volumgewichte“ möglichen zufälligen Fehler die in der letzten Spalte der folgenden Tabelle angeführten Prozentzahlen.

(Siehe die Tabelle auf Seite 8.)

Betrachten wir die hier gefundenen Fehler als derartig groß, daß dieselben höchstens bei tausend Beobachtungen siebenmal vorkommen oder

¹⁾ A. Mitscherlich, Die Gewichtseinheit als Ausgangspunkt für physikalische Bodenuntersuchungen; Fühlings landw. Zeitung 49. Jahrg., 7. Heft, S. 259 u. f.

überschritten werden, was dem vierfachen wahrscheinlichen Fehler entspricht, so müssen wir als wahrscheinlichen Fehler, welcher durch das Beobachtungsmaterial bedingt wird, immerhin noch einen solchen von 4 bis 5⁰/₁₀ annehmen. Deshalb ist es wertlos, eine Methode für derartige Untersuchungen auszuarbeiten und zu benutzen, welche an sich eine größere Genauigkeit zuliefse.

Bezeichnung des Bodens:	Volumgewicht ¹⁾		Differenz vom Mittel	
	ad 1	ad 2	in g	in %
Moorboden	0,45	0,57	± 0,060	± 11,7
Humusreicher Sandboden	1,00	1,07	± 0,035	± 3,4
Humoser Sandboden	1,17	1,62	± 0,225	± 16,1
Sandboden	1,39	1,77	± 0,190	± 12,0
Lehmiger Sandboden	1,31	1,67	± 0,180	± 12,1
Sandiger Lehmboden	1,16	1,73	± 0,285	± 19,7
Strenger Tonboden	1,15	0,85	∓ 0,150	∓ 15,0

Wenn nun schon diese Bodenuntersuchungen infolge des veränderlichen Beobachtungsmateriales sehr ungenau sind, so ist es um so mehr zu bedauern, daß verschiedene Forscher es nicht immer für nötig gehalten haben, Parallelversuche anzustellen. Dies ist leider auch bei fast allen den Versuchen der Fall, welche Wollny durchgeführt hat, um den Einfluß der physikalischen Bodeneigenschaften auf die Pflanzenerträge zu studieren. So war es möglich, daß Wollny in einzelnen Fällen auch aus seinen Versuchen keine exakten Schlusfolgerungen ziehen konnte. Ich habe deshalb überall, wo dies anging, die Resultate in solchen Fällen neu derart verarbeitet, daß ich den Versuchsfehler nach Möglichkeit festzustellen suchte. Zu diesem Zwecke wurden die vorliegenden Beobachtungen durch Umrechnung auf Prozentzahlen vergleichbar gemacht und aus ihnen nach den ersten Potenzen der wahrscheinliche Fehler berechnet; diesen habe ich dann den Beobachtungen mit beiden Vorzeichen (+) beigefügt. Näheres über die Ermittlung des wahrscheinlichen Fehlers und über die Beurteilung der Fehlergröße ist aus § 64 zu entnehmen.

¹⁾ Volumgewicht = Gewicht in Gramm der in einem Kubikzentimeter eingefüllten trockenen Bodenmasse.

ERSTER ABSCHNITT.

Die physikalische Beschaffenheit der Bodenprobe.

§ 4. Die Bodenprobe.

Die Bodenprobe, welche dem Erdboden entnommen wird, soll uns einen Anhalt geben für die Beschaffenheit einer größeren Fläche Landes. Inwieweit sie das vermag, wie viele Proben man auf der Flächeneinheit hierzu entnehmen muß, und wie diese im Einzelfalle zu entnehmen sind, muß experimentell bestimmt werden. Es läßt sich das jedoch erst dann feststellen, wenn wir wissen, welche physikalischen Eigenschaften der Bodenprobe hauptsächlich für die Bestimmung des Bodenwertes in Betracht zu ziehen sind. Bevor uns das bekannt ist, müssen wir an die Untersuchung einer beliebigen dem Boden entnommenen Probe gehen.

Schon bei der Entnahme einer Bodenprobe aus dem Erdreich tritt uns eine große Fehlerquelle entgegen: der Gehalt des Bodens an Steinen. Es ist einleuchtend, daß, wenn wir den ganzen Boden untersuchen könnten, wir die Steine ohne weiteres mitnehmen müßten. Ziehen wir aber nur eine kleine Probe von vielleicht 50 g Boden zur Untersuchung heran, so ist es nicht mehr gleichgültig, ob z. B. in 50 g Boden ein Stein von 25 g enthalten ist oder nicht. Wollen wir die Fehler unserer Untersuchungsergebnisse geringer gestalten, so müssen wir daher notwendig derartige Steine aus der Bodenprobe entfernen, und wir müssen deren um so mehr und auch um so kleinere von diesen notwendig entfernen, je kleiner die von uns zur Untersuchung herangezogene Bodenprobe ist. Ich halte es für ausreichend, zu physikalischen Bodenuntersuchungen je 30—50 g Boden anzuwenden, und habe hierfür den Boden stets erst durch ein 1,5 mm Rundlochsieb abgesiebt. Die Übereinstimmung von Parallelversuchen war so eine sehr gute! Andere Forscher, welche mit anderen Bodenmengen arbeiteten, haben den Boden durch ein Sieb von 4, 3, 2, 1 oder $\frac{1}{4}$ mm abgesondert.¹⁾ Der Siebrückstand wird fast stets bei der Bodenanalyse vernachlässigt, der abgesiebte sog. „Feinboden“ aber der weiteren Untersuchung unterworfen.

Für eine Bodenkunde ist es aber erforderlich, zunächst festzustellen, wie groß der Fehler ist, welchen man durch die Vernachlässigung der

¹⁾ Vergl. J. König, Die Untersuchung landwirtschaftlich und gewerblich wichtiger Stoffe. Berlin, Verlag von Paul Parey, 1891, S. 6—7. W. R. Williams, Untersuchungen über die mechanische Bodenanalyse; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 18, S. 238.

Steine und des groben Sandes begeh. Da wir den Boden vom Standpunkte des Pflanzenphysiologen aus betrachten, so mußte demnach festgestellt werden, welchen Einfluß die Steine und der grobe Sand im Boden auf die Pflanzen ausüben.

Untersuchungen hierüber sind zunächst von Wollny¹⁾ angestellt worden, welcher den Boden mit verschiedenen Mengen an Steinen von Haselnufs- bis TaubeneigröÙe versetzte und dann die verschieden hohen Erträge der verschiedenartig behandelten Parzellen verglich. Wollny kommt auf Grund dieser Versuche zu dem Resultat,

„dafs im allgemeinen die Fruchtbarkeit des Bodens mit zunehmendem Steingehalt eine Erhöhung erfährt bis zu einer bestimmten Grenze (ca. 10—20 Volumprozent), über welche hinaus sich bei weiterer Steigerung der Steinmenge die Erträge der Pflanzen stetig vermindern“.

Dieses Resultat ist eigenartig, und hielt ich es für notwendig, die gewonnenen Resultate in der Art neu zu verarbeiten, dafs ich von den Ernteerträgen, welche auf einem Boden mit 0 $\frac{0}{0}$, 10 $\frac{0}{0}$, 20 $\frac{0}{0}$, 30 $\frac{0}{0}$, 40 $\frac{0}{0}$, 50 $\frac{0}{0}$ Steinen gewonnen waren, das Mittel bildete, dasselbe gleich 100 setzte und danach die einzelnen Ernten in Prozenten dieses Mittels ausdrückte. Ich konnte dann die Ernten aller Feldfrüchte als gleichwertig behandeln und erhielt somit eine gröÙere Reihe vergleichbarer Resultate. Ich lasse diese folgen.

(Siehe die Tabelle auf Seite 11.)

Diese Verarbeitung der Resultate ergibt, dafs ein Boden mit 10 $\frac{0}{0}$ Steinen um 5 $\frac{0}{0}$ höhere Erträge ergibt als einer ohne Steine. Dieses Resultat hat aber einen wahrscheinlichen Fehler von $\pm 5,4 \frac{0}{0}$; *es liegt also vollkommen innerhalb der Fehler der Versuchsanstellung* und wird wohl wesentlich durch die eine Beobachtung hervorgerufen, bei welcher nach den Gesetzen der Fehlerwahrscheinlichkeit ein grober Fehler vorliegen muß.

Es ergibt sich sonst, dafs die mit Steinen vermengten Bodenarten folgende geringere Erträge ergeben als der steinfreie Boden:

Gehalt des Bodens an Steinen	Minderertrag
20 Volumprozent	13 \pm 4,7 $\frac{0}{0}$.
30 „	21 \pm 4,6 „
40 „	32 \pm 5,2 „
50 „	40 \pm 5,1 „

Ich ziehe hiernach aus den Wollnyschen Versuchsergebnissen die Schlusfolgerung,

dafs die Pflanzenerträge um so geringer sein werden, je gröÙser der Gehalt des Bodens an Steinen ist.

¹⁾ E. Wollny, Untersuchungen über den Einfluß der Steine auf die Fruchtbarkeit des Bodens; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 363 u. f.

Ver- suchs- jahr	Feldfrucht	Körner-, Knollen- resp. Wurzel-Ernte pro qm in g (Mittel = 100 gesetzt)	Steingehalt des Bodens in Volumprozenten:					
			0	10	20	30	40	50
1886	Sommerroggen	81	117	104	98	100	94	86
1890	"	85	121	107	96	89	97	88
1891	"	194	106	110	107	103	94	81
1890	Mais	111	133	221 ¹⁾	87	74	36	53
1893	"	266	173	140	83	83	53	68
1887	Ackerbohne	144	88	118	109	95	86	103
1890	"	210	170	130	97	112	60	31
1886	Erbse	521	78	118	106	102	100	95
1892	"	340	109	107	114	88	91	88
1891	Leindotter	90	98	112	108	110	96	79
1893	"	70	114	107	99	100	93	86
1887	Kartoffel	1277	104	126	102	82	96	91
1892	"	1182	124	100	98	97	96	84
1893	"	710	102	105	111	104	103	75
1889	Runkelrübe	1777	127	123	134	85	76	55
1891	"	1465	106	123	108	111	82	71
Im Mittel			117	122	104	96	85	77
Wahrscheinl. Fehler desselben ±			4,1	3,4	1,9	2,1	3,1	3,0

Beide Größen stehen anscheinend in nahezu umgekehrt proportionalem Verhältnisse zueinander.

Bei einem Boden, der bis zu 10 Volumprozent an Steinen enthielt, liefs sich infolge von gröberem Versuchsfehlern eine Abnahme der Erträge nicht beobachten.

Über den Einflufs des Sandes auf die Pflanzenerträge liegen neuere Arbeiten von Lemmermann²⁾ vor. Dieser kultivierte Senf in Gefäfsen, welche 15 und 30 kg Boden fafsten. Bei einem Teil der gröferen Gefäfsen ersetzte er ferner den Boden zur Hälfte durch Glassand. Boden und Glassand wurden miteinander vermengt. Die Ernteergebnisse der verschiedenen Gefäfsversuche ersieht man aus folgender Tabelle, in der ich jedoch nur die Zahlen von Lemmermann anführe, wo bei den Versuchen kein Düngungsversuch gleichzeitig angestellt wurde, und damit eine durch die Düngung mögliche Fehlerquelle ausgeschlossen ist.

¹⁾ Hier mufs ein grober Versuchsfehler vorliegen!

²⁾ O. Lemmermann, Untersuchungen über den Einflufs eines verschieden grofsen Bodenvolumens auf den Ertrag und die Zusammensetzung der Pflanze; Journ. f. Landw. LI, S. 1 u. f. und ebenda S. 279 u. f.

Ernteerträge an Senf in Gefäßen, die beschickt waren mit			
	30 kg Boden	15 kg Boden + 15 kg Glassand	15 kg Boden
Versuch 1	{ 42,56	31,41	31,81
	{ 41,22	25,67	28,75
Versuch 2	{ —	7,6	7,4
	{ —	6,8	6,6
	{ —	6,4	6,1

Aus diesen Versuchen ergibt sich, daß die Erträge von dem der Pflanze zur Verfügung stehenden Bodenvolumen wesentlich abhängen. Die Erträge eines Gefäßes, welches mit einer Mischung von Boden und Glassand zu gleichen Teilen versehen ist, liefert innerhalb der Fehlergrenzen das gleiche Resultat wie ein nur halb so großes Gefäß, welches nur mit Boden angefüllt ist. Hiernach scheint der Glassand das Bodenvolumen, welches der Pflanze zur Verfügung steht, direkt zu verringern.

Wenn man von diesem Gesichtspunkte aus die folgenden Zahlen von Lemmermann betrachtet, so zeigt sich hier eine merkwürdige Übereinstimmung mit den Wollnyschen Versuchsergebnissen.

Ernteergebnisse in Gefäßen von gleicher Oberfläche und einem Inhalt von				
	30 kg	22,5 kg	15 kg	Boden
entspricht	30 — 30 = 0 kg	30 — 22,5 = 7,5 kg	30 — 15 = 15 kg	Steinen
oder	0 ‰	25 ‰	50 ‰	Steinen
Ernteergebnisse	52,42	46,40	35,50	
oder das Mittel				
44,77 = 100 gesetzt	117	104	79	

Mithin beträgt der Ernterückgang: Bei 25 ‰ Steinen im Boden 13 ‰.
 „ 50 „ „ „ „ 38 „

Diese Zahlen sind deshalb zum Vergleich mit den Wollnyschen direkt heranzuziehen, weil das Bodenvolumen in den drei Fällen im gleichen Verhältnis wie das Bodengewicht stand.

Aus den Arbeiten von Wollny und Lemmermann scheint mir also das hervorzugehen,

daß Steine und Sand je nach den Mengen, in welchen sie im Boden vorhanden sind, die Erträge des Bodens deshalb verringern, weil sie einen Teil des für die Pflanze ausnutzbaren Bodenvolumens für sich einnehmen.

Wenige Steine und geringe Sandmengen werden somit, sofern der Boden tiefgründig genug ist, so gut wie keinen merkbaren Einfluß auf die Pflanzenerträge ausüben können.

Um die Gründe für die durch die Steine und den Sand bedingte Verringerung der Pflanzenerträge zu erkennen, bedarf es erst der Besprechung der anderen physikalischen Bodeneigenschaften. (Vergl. § 24.)

Die vorliegenden Resultate aber geben uns die Berechtigung, Steine und Sand abzusieben und ihre quantitativen Mengenverhältnisse zu bestimmen; sie geben uns ferner die Berechtigung dazu, die abgeseihten Massen als angenähert gleichwertig zu behandeln und je nach den festgestellten Mengen eventuell eine noch eingehender festzustellende Ertragsverminderung des Bodens anzunehmen. Hierdurch wird es uns aber ermöglicht, Steine und Sand, welche die Güte unserer Analysenresultate wegen der schlechteren Probeentnahme und der schlechteren Mischbarkeit des Bodens wesentlich ungünstig beeinflussen, von der weiteren Untersuchung des eigentlichen Bodens auszuschließen.

Um die Resultate aller Bodenuntersuchungen aber vergleichbar und derart zu gestalten, daß man sie bei denselben Bodenarten jederzeit wieder erhalten kann, ist es durchaus wünschenswert, Steine, groben Sand und Boden jedesmal in gleicher Weise festzustellen.

Um den Gehalt des Bodens an Steinen festzustellen, empfiehlt es sich, vielleicht einen Doppelzentner möglichst lufttrockenen Boden durch ein 1 cm weites Maschensieb (Maurersieb) durchzuwerfen, die zurückbleibenden Steine auszuwaschen, zu trocknen und zurückzuwägen. Eine streng quantitative Trennung durch das Sieb ist hier nicht möglich und unnötig.

Von dem abgeseihten und gut gemischten Boden nimmt man ein Kilogramm Boden, siebt denselben durch ein 1,5 mm Rundlochsieb und bestimmt wieder den Siebrückstand. Dieser wird, mit 100 multipliziert, zu den zuerst in Kilogramm festgestellten Steingewicht hinzuaddiert. Man erfährt so, wieviel Kilogramm grober Sand und Steine im Doppelzentner Boden enthalten sind, oder m. a. W. den Prozentgehalt des Bodens an grobem Sand und Steinen.

Es ist vielleicht für die weitere Bodenuntersuchung auch gleichgültig, ob man den Boden durch ein 1,5 mm oder durch ein 2,0 mm Rundlochsieb absiebt, wie dies u. a. Wahnschaffe¹⁾ vorschlägt, da man den Siebrückstand in jedem Falle berücksichtigt und ebenso behandelt wie das Abgeseibte. Ein feineres Sieb bietet aber immer den Vorteil, daß man die durchgeseibte Bodenprobe besser zu mischen vermag, und daß man so, zumal wenn man nur geringere Mengen Boden zur Untersuchung heranzieht, eine bessere Mittelprobe nehmen kann. Aus dem Grunde möchte ich an dem Absieben des Bodens durch ein Rundlochsieb, dessen Lochdurchmesser 1,5 mm beträgt, festhalten, da sich dies bei quantitativen physikalischen Bodenuntersuchungen bewährt hat.²⁾

¹⁾ F. Wahnschaffe, Wissenschaftliche Bodenuntersuchung. 2. Aufl. Berlin 1903, S. 23.

²⁾ A. Mitscherlich, Zur Methodik der Bestimmung der Benetzungswärme; Landw. Jahrbücher 1902, S. 596—604.

Kapitel I.

Die spezifischen Eigenschaften der festen Bodenbestandteile.

Grundlegend für alle übrigen physikalischen Bodeneigenschaften sind die spezifischen Eigenschaften der festen Bodenbestandteile, die des Wassers und die der Luft. Während wir nun in den spezifischen Eigenschaften des Wassers und der Luft für alle Bodenarten konstante Größen haben, variieren die spezifischen Eigenschaften der festen Bodenteilchen bei allen Bodenarten. Von ihnen hängt somit das Verhalten eines Bodens zum Wasser, zur Luft und zur Wärme ab, Bodenerscheinungen, von denen wir annehmen, daß sie ihrerseits einen direkten Einfluß auf die Vegetation ausüben; durch sie wird die Größe, die Gestalt und die Veränderlichkeit des Hohlraumvolumens des Bodens, d. h. des von Wasser und Luft eingenommenen Bodenvolumens bedingt, desjenigen Bodenvolumens, in welchem die Pflanzenwurzel ihren Platz findet, in welchem die Nährstoffaufnahme durch die Pflanze stattfindet. Aus diesem Grunde halte ich es für erforderlich, gerade diese spezifischen Eigenschaften der festen Bodenbestandteile, soweit sie direkt oder indirekt auf den Pflanzenwuchs einen Einfluß ausüben können, hier eingehend zu besprechen und die Methoden zu ihrer Bestimmung wiederzugeben.

Da man jedoch nur dann darauf rechnen kann, die spezifischen Eigenschaften der festen Bodenteilchen exakt zu bestimmen, wenn man diese vollkommen von dem physikalisch anhaftenden Wasser zu trennen vermag, so ist es erforderlich, zuvor noch einen Paragraphen der Trockensubstanzbestimmung der Bodenarten einzuräumen.

§ 5. Die Bestimmung der festen Bodenteilchen oder die Trockensubstanzbestimmung im Boden.

Unter den festen Bodenteilchen finden wir alle möglichen anorganischen und organischen Substanzen. Die Affinität derselben zum Wasser ist außerordentlich verschieden. So hat Rodewald¹⁾ nachgewiesen,

¹⁾ H. Rodewald, Theorie der Hygroskopizität: Landw. Jahrb. 1902. S. 689—691.

dafs Holzfaser schon bei 65,5⁰ C., Weizenstärke bei 106,4⁰ C., Kartoffelstärke erst bei 117,3⁰ C. das letzte physikalisch gebundene Wasser abgibt, und es ist meines Erachtens durchaus anzunehmen, dafs wir im Boden Substanzen besitzen, welche das Wasser auch noch fester zu halten vermögen, mithin erst bei noch höherer Temperatur vollkommen trocken werden. Es war so natürlich, dafs ein Trocknen der Bodenarten nur durch Erwärmen des Bodens auf 100—110⁰ C. nicht zu einem konstanten Trockenzustande führen konnte. Dennoch sind die derart angestellten Versuche^{1) 2) 3) 4)} lehrreich, insofern sie zeigen, dafs schon bei längerem Trocknen von Humussubstanzen bei dieser Temperatur zeitweise Gewichtszunahmen der trocknenden Substanz eintreten, welche auf eine Aufnahme von Sauerstoff aus der Luft, d. h. auf eine Zersetzung des Humus zurückzuführen sind. Bei diesem Trocknungsverfahren unter Luftzutritt wird also der zu trocknende Boden ein anderer. Dies hatte schon Virchow¹⁾ richtig erkannt und ging so dazu über, die zu trocknende Substanz in ein Vakuum einzuschliessen. Um hier die Feuchtigkeit zu entfernen, wurden stark Wassergas absorbierende Substanzen, konzentrierte Schwefelsäure oder Phosphorpentoxyd mit eingeschlossen.¹⁾ Da die konzentrierte Schwefelsäure aber im Vakuum schon bei Zimmertemperatur sich verflüchtigt²⁾ und saure Beschläge bildet,⁵⁾ wodurch die Methode nicht einwandfrei war, so blieb schliesslich als wasserabsorbierendes Mittel nur das Phosphorpentoxyd übrig, welches sicherere Resultate zu ergeben versprach.⁶⁾ Neuerdings hat Arntz,⁷⁾ welcher sich hier an eine Methode von Tollens⁸⁾ anlehnt, das Trocknen des Bodens derart bewerkstelligt, dafs er einen trockenen Luft- resp. Wasserstoffstrom über die unter einem Druck von 20—30 mm Quecksilber befindliche

¹⁾ K. Virchow, Das Kehdinger Moor und seine landw. Meliorierung durch Marschboden; Landw. Jahrb. IX (2), S. 1022.

²⁾ H. Puchner, Über die Bestimmung der Trockensubstanz im Torf; Landw. Versuchs-Stationen XLVI, S. 224—225.

³⁾ H. Tryller, Über die Bestimmung der Trockensubstanz im Torf; ebenda II, S. 155—159.

⁴⁾ H. Puchner, Über die Bestimmung der Trockensubstanz in Bodenproben; ebenda LV, S. 311 u. f.

⁵⁾ A. Mitscherlich, Zur Methodik der Bestimmung der Benetzungswärme des Ackerbodens; Landw. Jahrb. 1902, S. 578.

⁶⁾ Vergl. H. Puchner, l. c. XLVI, S. 229—230.

⁷⁾ E. Arntz, Über die Bestimmung der Trockensubstanz im Torf; Landw. Vers.-Stat. LIX, S. 411—424.

⁸⁾ E. R. Flint und B. Tollens, Über die Bestimmung der Pentosane und Pentosen in Vegetabilien durch Destillation mit Salzsäure; Landw. Vers.-Stat. XLII, S. 383.

Substanz hinwegleitete. Dies Prinzip führt durch die dauernde Gaszirkulation eher zum Ziele. Im allgemeinen hatte das Trocknen im Vakuum den großen Übelstand, daß es selbst unter den günstigsten Bedingungen für den Dampfspannungsausgleich noch 8—14 Tage erforderte, wodurch das Verfahren sehr unhandlich war. Um dem abzuweichen, habe ich die Vakuumapparate derart gebaut, daß ich sie einer Temperatur von 100°C . aussetzen konnte. Es war so möglich, den Boden in 4 Stunden vollkommen trocken zu bekommen. Arntz, welcher bei $105\text{--}110^{\circ}\text{C}$. trocknet, erreicht angenähert die gleichen Resultate¹⁾ infolge der Luftströmung im nahezu evakuierten Raume schon in $2\frac{1}{2}$ —3 Stunden. Da beide Trocknungsmethoden für den Boden anwendbar sind, seien sie hier wiedergegeben.

a) Trockenmethode nach Mitscherlich (l. c. S. 578 u. f).

Die Exsikkatoren (Fig. 1), welche zu den Trocknungsversuchen angewandt werden, sind aus 3—4 mm starkem (zweckmäßig Jenaer) Glase hergestellt und haben annähernd die Form einer Halbkugel (Fig. 1, a). Ihr Rand ist mittelst feinem

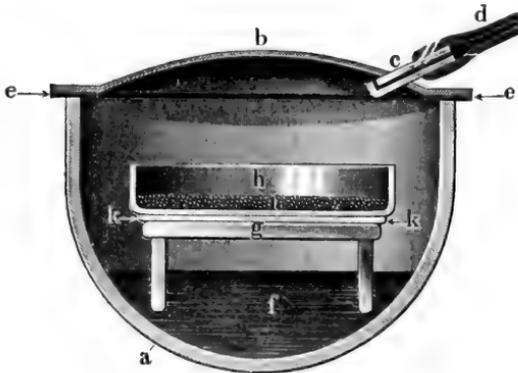


Fig. 1. Vakuumexsikkator ($\frac{2}{3}$ natürl. Gröfse).

Schmirgel auf einer Spiegelglasscheibe eben geschliffen. Als Deckel wird ein Messingdeckel (Fig. 1, b) von 0,6 bis 0,75 mm Stärke, welcher schwach nach der Mitte zu gewölbt ist, genommen. Der 1,5 cm breite Rand desselben, welcher auf die Gefäßwand aufpaßt, ist

ebenfalls möglichst fein und plan geschliffen. An einer Seite des Deckels ist ein Tubus (Fig. 1, c) eingelötet, welcher zum Evakuieren des Gefäßes dient. Seine innere Öffnung ist nach oben gegen den Deckel gerichtet, um beim Einlassen der Luft ein Verstauben der Substanz zu vermeiden. Der Verschluss des Tubus geschieht durch Aufziehen eines dickwandigen Gummischlauches (Fig. 1, d), welcher an seinem freien Ende mit einem Glasstöpsel verschlossen wird. Paragummi eignet sich für diesen Schlauch nicht, da dieser durch die Erhitzung und den Luftdruck zusammengepresst wird; hingegen ist die gute graue „Dampfqualität“ hierfür

¹⁾ E. Arntz. Über die Bestimmung der Trockensubstanz im Torf; Landw. Vers.-Stat. LIX, S. 411—424.

sehr brauchbar. (Ein Verschließen des Schlauches mittelst eines Quetschhahnes ist wegen der hierdurch entstehenden Deformation des Schlauches zu vermeiden.) Um den Exsikkator zu schliessen, wird zwischen Deckel und Gefäßrand, welche beide schwach eingefettet werden, ein ca. 0,8 mm starker, 1—1,5 cm breiter Ring aus Paragummi (Fig. 1, *e*) gelegt. Das Öffnen des Exsikkators nach dem Trocknen geschieht, nachdem er zuvor mit trockener Luft gefüllt ist, durch Herausziehen dieses Gummiringes, wobei der Zug, um den Ring zu schonen, möglichst in tangentialer Richtung zu geschehen hat.

Auf den Boden des Glasgefäßes wird zunächst Phosphorpentoxyd gebracht (Fig. 1, *f*). Dies ist nach jedem Versuch umzuarbeiten; es wirkt nur so lange vollkommen, wie noch weißes Phosphorpentoxyd an der Oberfläche der Wasser absorbierenden Substanz vorhanden ist. In das Phosphorpentoxyd wird ein Glasdreifuß (Fig. 1, *g*) gestellt, welcher mit einer flachen Glasscheibe (Fig. 1, *k*) von der Größe des einzusetzenden Schälchens (Fig. 1, *h*), in dem sich der Boden (Fig. 1, *i*) befindet, bedeckt wird. Diese Glasplatte soll Beschläge, welche durch Verstäuben des Phosphorpentoxyds beim Evakuieren des Exsikkators eintreten können, von dem Schälchen fernhalten. Die Glasscheibe muß deshalb mindestens so groß im Durchmesser sein, wie das Schälchen, welches direkt auf ihr stehen muß; sie darf aber

auch nicht wesentlich größer sein, da sonst der Dampfspannungsausgleich erschwert wird. Das Schälchen *h* — es eignet sich hierfür am besten das leichte Wiener Normalglas — ist am Rand eben geschliffen, damit es beim Wägen mit einer ebengeschliffenen Glasscheibe möglichst luftdicht abgedeckt werden kann. Wegen des Überdestillierens des Quecksilbers läßt sich kein Quecksilber-Manometer im Exsikkator anbringen. Es ist deshalb erforderlich, das Vakuum nach dem Evakuieren und nach dem Trocknen durch Vorlage eines Manometers zu prüfen. Da nach dem Trocknen durch Schwefelsäurewaschflaschen langsam durchgeleitete, trockene Luft in den Exsikkator eingelassen werden muß, so empfiehlt es sich, hierfür ein Quecksilber-Manometer (Fig. 2, *a*) gleich mit einer zweckentsprechend engen Glaskapillare (Fig. 2, *b*) zu verbinden.

Der Gang des Trocknungsverfahrens ist nun der folgende: Man wägt die Glasschale *h* mit dem aufgeschliffenen Deckel, z. B. 43,5 g, füllt dann 30—50 g Boden ein und wägt wieder, z. B. 85,842 g; stellt darauf

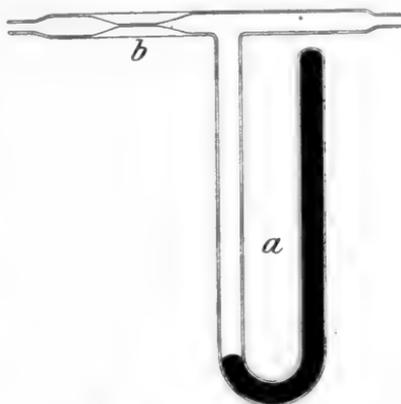


Fig. 2. Manometerkapillare
($\frac{1}{3}$ natürl. Größe).

Schale und Boden ohne den mitgewogenen Deckel in den Exsikkator, evakuiert diesen bis auf 1—2 cm Quecksilberdruck mittelst der gewöhnlichen Wasserstrahlluftpumpe, verschließt den Schlauch *d*, indem man ihn auf einen Augenblick oberhalb zuquetscht, durch Einstecken des Glasstöpsels und hängt dann den Exsikkator an seinem Deckel in einen Kochtopf. Ich habe die Exsikkatoren so angeordnet, daß ich gleichzeitig sechs Stück in einem Gestell in einen Blechtopf von ca. 45 cm Durchmesser und 45 cm Höhe einstelle. Unten in dem Topf befindet sich bis zu einer Höhe von 5—7 cm kochendes Wasser, welches durch eine einfache Bunsenflamme derart im Kochen erhalten werden kann, daß der Raum des Kochtopfes dauernd mit heißem Wasserdampf ausgefüllt ist. Der Deckel des Kochtopfes kann dabei leidlich fest schliessen, so daß nur wenig Dampf herausdringt. In dem Dampfbade läßt man den Exsikkator vier Stunden lang, nimmt ihn dann heraus, trocknet ihn ab und läßt ihn erkalten. Dann fällt man ihn in der angegebenen Weise mit trockener Luft und öffnet ihn durch Herausziehen des Gummiringes. Ist der Ring zur Hälfte herausgezogen, so läßt sich der Exsikkator öffnen. Es ist dann die Schale mit dem Boden *sofort* mit der anfangs mitgewogenen plangeschliffenen Glasscheibe gut zu bedecken, dann mit dieser bedeckt mittelst einer Zange mit Parallelführung herauszunehmen und sogleich zu wägen. Das Gewicht sei z. B. 85,413 g. Zieht man das gefundene Gewicht von dem zu zweit gefundenen ab, so erhält man die abgegebene Wassermenge; diese wird mit hundert multipliziert und durch die angewandte trockene Bodenmenge dividiert. Das Resultat besagt, wieviel Prozent Wasser der trockene Boden enthielt. Also:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Ta} + \text{Wasser} + \text{Boden} & = & 85,842 \text{ g} \\
 - (\text{Ta} + \text{Boden}) & & \underline{= 85,413 \text{ „}} \\
 \text{Wasser} & = & 0,429 \text{ g} \\
 \frac{0,429 \cdot 100}{41,9} & = & 1,02\% \text{ Wasser.}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{rcl}
 \text{Ta} + \text{Boden} & & = 85,4 \text{ g} \\
 - \text{Ta} & & \underline{= 43,5 \text{ „}} \\
 \text{Boden} & = & 41,9 \text{ g.}
 \end{array}$$

Ich habe das einfache Beispiel hier angeführt, um zu zeigen, wie genau die Wägungen auszuführen sind. Im vorliegenden Falle erhält man Resultate, die bis auf 1% genau sind, was für fast alle Zwecke ausreichend sein dürfte. Bei Untersuchungen von Sandarten wird man die Zehntel Milligramme bei der Wasserbestimmung mit auswägen müssen; bei Moorbodenarten u. dergl. hingegen wird man sich damit begnügen können, ca. 10 g Boden zu trocknen.

b) Trockenmethode nach Arntz (l. c. S. 420).

Die Substanz wird nach Arntz in Filtrierröhren von über 1 cm lichter Weite und 22 cm Länge, welche an ihren verjüngten Enden durch starke Asbestpfropfen verschlossen werden, abgewogen und dann bei

105—110° C. 3 Stunden unter Überleiten eines langsamen trockenen Luft- oder besser Wasserstoff-Stromes bei einem Druck von 20—30 mm Quecksilber getrocknet. Benutzt man zum Überleiten trockenes Wasserstoffgas, was zur Vermeidung von Oxydationserscheinungen jedenfalls vorzuziehen ist, so sind die Röhren vor jeder Wägung erst wieder mit trockener Luft zu füllen. Die Anordnung der Röhren geschieht zweckmäßig derart, daß vier Stück an eine gewöhnliche Wasserstrahlluftpumpe angeschlossen werden. Das getrocknete Gas muß dann natürlich jedem Rohre besonders zugeführt werden, damit man die Stärke des Gasstromes regulieren kann. Auch bei dieser Methode sind dieselben drei Wägungen auszuführen, wie bei der vorigen.

Die Methode von Arntz hat vor der anderen den Vorteil, daß die Trockenzeit infolge der besseren Gaszirkulation im Vakuum eine kürzere sein kann. Dieser Vorteil wird aber wohl durch manchen Nachteil aufgehoben. Zunächst ist die Temperatur von 105 oder 110° C. nur sehr schlecht konstant zu halten, wodurch die Trockenbedingungen bei verschiedenen Versuchen sich anders gestalten können; ferner gestatten die Glasröhren nur die Anwendung einer sehr geringen Bodenmenge. — Bei Torf konnte Arntz noch nicht 5 g zur Untersuchung heranziehen. — Hierdurch wird der Mischungsfehler naturgemäß sehr viel größer. Schließlich dürfte der Boden in einer flachen Glasschale handlicher sein, so daß man ihn leicht noch zu weiteren Untersuchungen quantitativ heranziehen kann.

Sofern man bei der von mir angegebenen Methode die gleichen Apparate und Gummiverbindungen¹⁾ anwendet, dürfte das Trocknen nach dieser Methode leicht und bequem durchführbar sein. Ich wende das Verfahren jetzt seit drei Jahren zu größeren Serienuntersuchungen ausschließlich an und habe dabei bei den Exsikkatoren stets einen sehr sicheren Schluss erzielt. An Zeit dürften hierbei im Durchschnitt auf eine Bestimmung kaum zwanzig Minuten zu rechnen sein.

Bei verschiedenen Bodenuntersuchungen ist es nicht erforderlich, jedesmal von der absolut trockenen Bodensubstanz auszugehen. Es genügt oft, wenn man den Wassergehalt des Bodens genau kennt, damit man sodann die Resultate auf die zur Untersuchung herangezogene trockene Bodenmenge umrechnen kann. Es ist dann aber allerdings erforderlich, daß der Wassergehalt des Bodens derselbe bleibt, wie er das eine Mal festgestellt wurde. In solchem Falle empfiehlt es sich, zunächst eine größere Menge Boden lufttrocken zu machen, d. h. sie so lange an der Luft liegen zu lassen, bis ihr Gewicht nicht mehr abnimmt, da sich in diesem Zustande der Wassergehalt des Bodens bei Wägungen oder dergleichen am wenigsten

¹⁾ Die Firma Franz Hegershoff-Leipzig, Karolinenstr., hat die Herstellung der erforderlichen Apparate übernommen.

ändern kann. Der Boden ist sodann in einem Standgefäß unter völligem Luftabschluß aufzubewahren. Von einer resp. zwei Proben desselben wird sodann der Wassergehalt bestimmt; er sei gleich $1,02\%$. Benutzt man nun eine beliebige lufttrockene Bodenmenge, etwa $42,3\text{ g}$, z. B. zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes, so würde man diese durch $100 + 1,02 = 101,02$ oder, da wir auf 1% genau rechnen wollen, durch 101 dividieren müssen, um festzustellen, wieviel trockenen Boden wir zur Bestimmung angewandt haben. Es ergibt in unserem Falle $41,9\text{ g}$.

Nach dieser Feststellung der Trockensubstanz der festen Bodenbestandteile können wir nunmehr zur Untersuchung und zur Besprechung ihrer spezifischen Eigenschaften übergehen.

§ 6. Das spezifische Gewicht der festen Bodenteilehen.

Das spezifische Gewicht, d. h. das Gewicht der Volumeneinheit oder seine reziproke Größe, das spezifische Volumen, d. i. das Volumen der Gewichtseinheit, läßt sich bei den festen Bodenteilchen ebenso wie sonst bei pulverförmigen Substanzen mit Hilfe des Pyknometers bestimmen.¹⁾ Die bekannte Methode dürfte wohl in die Bodenkunde zuerst von Schübler²⁾ eingeführt worden sein. Für genauere Bestimmungen mag das in nebenstehender Fig. 3 wiedergegebene Pyknometer eine zweckentsprechende Form besitzen. *a* ist ein Glasgefäß, welches aus so starkem Glase hergestellt sein muß, daß es den Unterdruck einer Atmosphäre auszuhalten vermag. *b* ist ein in *a* eingeschliffener Stopfen, welcher in eine Kapillare ausgezogen ist, an der oben ein zylindrisches

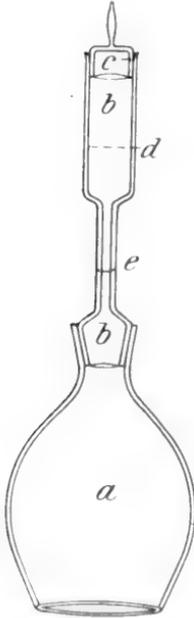


Fig. 3. Pyknometer
($\frac{1}{2}$ natürl. Größe).

Röhrchen angesetzt wurde. *c* ist ein Glasstopfen, welcher in dieses Röhrchen eingeschliffen ist. Die Kapillare trägt ungefähr in ihrer Mitte eine eingezogene Marke (*e*).

Die Untersuchung wird in folgender Weise ausgeführt:

Der Stopfen *b* wird leicht eingefettet, und darauf das Gewicht des leeren Pyknometers inklusive des noch nicht eingesetzten Stopfens fest-

¹⁾ Über die verschiedenen anderen Methoden, welche zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes angewandt wurden, vergl. Paul Gisevius, Beiträge zur Methodik der Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Mineralien etc.; Landw. Vers.-Stat. Bd. 28, S. 369 u. f.

²⁾ G. Schübler, Grundsätze der Agrikultur-Chemie II, S. 59 u. f.

gestellt. Es sei u . Sodann wird das Gefäß a mit gut ausgekochtem destillierten Wasser gefüllt, und der Stopfen b aufgesetzt und lose eingedreht, so daß am Schlif keine durch Luftblasen verursachte optische Brechung mehr beobachtet werden kann. Das Pyknometer ist ungefähr bis d mit Wasser angefüllt. Jetzt baut man es in schmelzenden Schnee oder feingeschabtes, mit Wasser übergossenes Eis gut ein, woselbst es ca. $\frac{1}{2}$ Stunde verbleiben muß, bis sich die Temperatur mit der des schmelzenden Eises ausgeglichen hat. Alsdann nimmt man zunächst das über der Marke e stehende Wasser ab und trocknet die weitere Röhre des Stöpsels b mit Filtrierpapier nach, worauf man oben den Stöpsel c aufsetzt. Ist diese Einstellung nach 5—10 Minuten noch die gleiche, so nimmt man das Pyknometer aus dem Eiswasser, trocknet es ab und wägt es, sobald es die Temperatur der Wage angenommen hat. Das Gewicht sei v . Es ist dann der Inhalt des Pyknometers $J = v - u$.¹⁾ — Jetzt reinigt und trocknet man das Pyknometer, fettet dann den Stöpsel b wieder leicht ein, wägt es wieder und füllt sodann das Gefäß a ungefähr gut halbvoll mit dem zu untersuchenden lufttrockenen Boden, dessen Wassergehalt w bekannt ist. Man wägt alsdann das Gefäß mit dem Boden, zieht von diesem Gewichte das des leeren Gefäßes (u) ab und berechnet mittelst des vorher festgestellten Wassergehaltes w des Bodens die Menge der angewandten trockenen Substanz. Darauf übergießt man den Boden mit destilliertem Wasser, bis dies ca. 2—3 mm über demselben stehen bleibt, und evakuiert dann das Gefäß a eine halbe Stunde lang, eventuell unter Nachfüllen von Wasser, damit die Luft aus dem Boden und Wasser entfernt wird. Ein wiederholtes leichtes Umschwenken oder Erschüttern des Gefäßes ist hierbei förderlich. Es wird dann das Gefäß mit ausgekochtem Wasser vollgefüllt, der eingefettete Stöpsel aufgesetzt, dann das ganze Pyknometer wieder in Schnee- oder Eiswasser eingestellt und wie zuvor weiter behandelt. Die Wägung ergibt jetzt: (Pyknometer + trockener Boden + nachgefüllte Wassermenge). Bringt man von dem jetzt gefundenen Gewichte das des leeren Pyknometers und das des *trockenen* Bodens in Abzug, so erhält man das Gewicht der nachgefüllten Wassermenge resp. das von ihr eingenommene Volumen W . Bringt man dies Volumen endlich von dem Volumeninhalte des Pyknometers (J) in Abzug, so ergibt sich das von der angewandten trockenen Bodenmenge (G) eingenommene Volumen $V = J - W$. Man erhält dann schließlich durch Division dieses Volumens V durch das Bodengewicht (G) $\frac{V}{G}$ das spezifische Volumen oder durch Division des Bodengewichtes durch das vom Boden eingenommene Volumen $\frac{G}{V}$ das spezifische Gewicht des Bodens.

¹⁾ Eine Reduktion des bei 0° gefundenen Wassergewichtes (durch Multiplikation mit 1,00013) auf Wasser von +4° C. ist für die Bodenuntersuchungen nicht erforderlich.

An spezifischen Gewichten der verschiedenen Bodenkonstituenten, d. h. der hauptsächlichlichen festen Bestandteile des Bodens, sind u. a. bestimmt worden:

Spezifische Gewichte des	Nach Beobachtungen von ¹⁾					
	Schübler	Trommer	Schuhmacher	v. Liebenberg	Lang	Wollny
Quarzsandes	2,65	2,74	2,75	2,75	2,64	2,64
Kalksandes	2,72	2,81	2,47	2,66	2,72	2,70
Kaolins	2,44	2,45	2,59	2,36	2,47	2,50
Humus (resp. Torfes*)	1,37	1,25	1,23	1,51	1,26*)	1,46

Man ersieht hieraus, daß die spezifischen Gewichte der hauptsächlichlichen Mineralbestandteile zwischen 2,4 und 2,8 liegen. Das spezifische Gewicht des Humus ist nur halb so groß. Wesentlich höher ist das der Eisenverbindungen im Boden, welche jedoch immerhin nur in geringerer Menge vorhanden sind. Das spezifische Gewicht des Roteisensteins z. B. ist 5,1—5,2. Es mögen hier noch einige spezifische Gewichte von Bodenarten folgen, welche nach der beschriebenen Methode ausgeführt wurden. Über den Gehalt dieser Bodenarten an den verschiedenen Konstituenten vergleiche die Tabelle auf S. 35.

Spezifische Gewichte verschiedener Bodenarten.²⁾

Tiefland-Moorboden	2,03	Sandboden	2,63
Humusreicher Sandboden . .	2,45	Lehmiger Sandboden . . .	2,62
Humoser Sandboden	2,59	Sandiger Lehmboden . . .	2,64
Sand (Untergrund).	2,65	Strenger Tonboden	2,70

Es ergeben sich hier, wie bei einer ganzen Reihe anderer Bodenarten, welche der verschiedensten Herkunft waren,²⁾ nur geringe Unterschiede im spezifischen Gewicht. Nur bei sehr humushaltigen Bodenarten macht sich das geringere spezifische Gewicht des Humus beim spezifischen Gewicht des betreffenden Bodens natürlich bemerkbar.³⁾

Der Einfluß, welchen das spezifische Gewicht der festen Bodenbestandteile auf den Pflanzenwuchs ausübt, dürfte nicht sehr groß sein. Wir

¹⁾ G. Schübler, Grundsätze der Agrik.-Chemie. Leipzig 1830, II, S. 60. — C. Trommer, Die Bodenkunde. Berlin 1857, S. 258—259. — W. Schuhmacher, Die Physik des Bodens. Berlin 1864, S. 245. — A. Ritter v. Liebenberg, Unters. über die Bodenwärme. Habilitationsschrift. Halle 1875, S. 38. — C. Lang, Über Wärmekapazität der Bodenkonstituenten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. I, S. 136. — E. Wollny, Unters. über das spez. Gewicht etc. der Bodenarten; ebenda Bd. VIII, S. 347—348.

²⁾ A. Mitscherlich, Die Gewichtseinheit als Ausgangspunkt für physikalische Bodenuntersuchungen; Fühlings landw. Zeitung 49. Jahrg., 7. Heft, S. 262—263.

³⁾ Vergl. E. Wollny, l. c. Bd. VIII, S. 348.

werden ihn darin suchen müssen, daß die Pflanzenwurzel bei ihrem Wachstum Bodenteilchen zur Seite schieben muß. Nimmt man hier nun an, daß die Bodenteilchen verschiedener Bodenarten gleichgroß und ganz gleichartig gelagert sind — eine Annahme, die in Wirklichkeit wohl nie zutreffen wird —, so wird die Pflanzenwurzel hierbei eine um so geringere Arbeit ausüben haben, je spezifisch leichter diese festen Bodenteilchen sind. Da diese Arbeit aber u. a. um so größer wird, je größer die Korngröße der festen Bodenteilchen ist, und da diese bekanntlich in sehr viel weiteren Grenzen variiert, so ergibt sich hieraus, daß der Einfluß des spezifischen Gewichtes eines Bodens auf die Pflanze im allgemeinen zu vernachlässigen sein dürfte.

Für die Bodenuntersuchung kann aber das spezifische Gewicht der festen Bodenteilchen sehr wesentlich sein, insofern es uns mit seiner Hilfe möglich ist, Resultate, welche wir für eine bestimmte Gewichtsmenge Boden erhalten haben, auf das Volumen der festen Bodenteilchen umzurechnen. Dieses Volumen nimmt einen Teil des Gesamtbodenvolumens, in welchem sich die Pflanzenwurzeln verbreiten, ein und dürfte gerade deshalb für die Pflanze eine größere Bedeutung haben als das Bodengewicht. Da die spezifischen Gewichte der verschiedenen Bodenarten aber sehr gleichartig sind, so dürfte eine Umrechnung der für die Gewichtseinheit der festen Bodenteilchen gefundenen Resultate auf die Volumeneinheit nur bei humusreichen Bodenarten größere Differenzen ergeben.¹⁾

§ 7. Die spezifische Wärme der festen Bodenbestandteile.

Unter der spezifischen Wärme einer Substanz versteht man diejenige Wärmemenge, welche dazu erforderlich ist, die Gewichtseinheit dieser Substanz um einen Grad Celsius zu erwärmen. Man benutzt hierbei jetzt ganz allgemein als Einheit diejenige Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 g Wasser von +15° C. um einen Grad zu erwärmen, das ist die Kalorie (cal).

Die Bestimmung der spezifischen Wärme wird in der Regel nach dem Mischungsverfahren ausgeführt. Dieses beruht darauf, daß der zu untersuchende Körper auf eine bestimmte Temperatur erwärmt wird und dann in eine bestimmte Menge Wasser von einer niederen Temperatur eingetaucht wird. Der Körper gibt dann seine Wärme an das Wasser ab, dessen Erwärmung gemessen werden muß. Bringt man so z. B. 20 g Boden von 70° C. mit 100 g Wasser von 20° C. zusammen, und erwärmt sich hierbei das Wasser um 2° C., so hat der Boden, um von 70 — 22° C. zu erkalten, 200 cal. an das Wasser abgegeben, das sind pro Gramm Boden und Temperaturgrad $\frac{200}{20 \cdot (70 - 22)}$ oder 0,208, was seiner spezifischen

¹⁾ A. Mitscherlich, l. c. S. 264 u. 265.

Wärme entspricht. — Nimmt man an, daß der Boden lufttrocken war und 0,2 g, das ist 1,0 % Wasser enthielt, so sind von den erhaltenen 200 cal. erst $0,2 \cdot (70 - 22)$ in Abzug zu bringen; demnach würde dann seine spezifische Wärme $\frac{200 - 9,6}{20 \cdot (70 - 22)} = 0,198$ sein.

Experimentell gestaltet sich diese Bestimmung dadurch komplizierter, daß gleichzeitig mit dem Wasser auch das Gefäß, in dem sich das Wasser befindet, mit erwärmt wird, und daß man ferner den erwärmten Boden nicht direkt in das Wasser hineinwerfen kann. Will man hier sauber experimentieren, so wird es sich empfehlen, eine bestimmte Menge trockenen Bodens in ein Glas, dessen spezifische Wärme und dessen Gewicht festzustellen sind, einzuschmelzen. Es dürfte zweckmäßig sein, hierzu nicht zu dickwandiges Jenaer Glas zu nehmen. Dasselbe ist vielleicht in einem mit einem Wattebausch und Korken verschlossenen zweiten Glasrohr erst eine halbe Stunde in strömenden Dampf zu hängen. Nachdem sich in der Zeit die Temperatur ausgeglichen hat, nimmt man beides schnell in ein wärmeisolierendes Tuch, öffnet den Stopfen und läßt das innere Röhrchen mit dem Boden in das Wasser des Kalorimeters hineingleiten.

Das Kalorimeter besteht aus einem doppelten Gefäß von dünnem polierten Messingblech. In das innere Gefäß wird die zum Untertauchen des Bodens erforderliche Wassermenge eingebracht, welche, um eine möglichst hohe Temperaturerhöhung anzugeben, möglichst knapp zu bemessen ist. In dem Gefäße hat ferner noch das Thermometer Platz zu finden. Das äußere Gefäß soll eine Wärme isolierende Luftschicht um das innere bilden; es darf daher das innere Gefäß nicht berühren, sondern muß von diesem nach Möglichkeit überall gleichen Abstand haben, was man durch Zwischenlegen von einigen kleinen Korkstückchen leicht erreichen kann. Das äußere Gefäß ist vor und nach Einbringung des zu untersuchenden Gegenstandes gut zu bedecken und ist jede Wärmezufuhr von außen nach Möglichkeit zu vermeiden. Der Versuch gestaltet sich nun folgendermaßen:

Es wird bestimmt, wieviel Kalorien zur Erwärmung des Kalorimetergefäßes und des darin befindlichen Thermometers erforderlich sind. Es seien pro Grad Celsius = a ; darauf wird eine bestimmte Wassermenge w eingefüllt. Die Temperatur des Kalorimeters mit dem darin befindlichen Wasser entspreche der Zimmertemperatur t_a . Sodann werden m g Boden, dessen spezifische Wärme x gesucht wird, und n g Glas von der spezifischen Wärme s , in welches der trockene Boden eingeschlossen ist, auf t_m °C. erhitzt und in das Kalorimeter übergeführt. Die nach der Mischung eintretende (höchste) Endtemperatur sei t . Jetzt ist die von den in dem Glas eingeschlossenen Boden abgegebene Wärmemenge $(m \cdot x + n \cdot s)(t_m - t)$; die von dem Kalorimeter aufgenommene Wärmemenge ist $(a + w)(t - t_a)$.

Beide Wärmemengen müssen gleich sein. Es folgt daraus:

$$(m x + n \cdot s) (t_m - t) = (a + w) (t - t_a)$$

oder
$$m x (t_m - t) = (a + w) (t - t_a) - n \cdot s (t_m - t)$$

oder schliesslich für die spezifische Wärme des Bodens:

$$x = \frac{(a + w) (t - t_a) - n \cdot s (t_m - t)}{m (t_m - t)}$$

Die spezifische Wärme der gleichzeitig mit dem trockenen Boden in dem Glase eingeschlossenen trockenen Luft kann man bei den Bestimmungen vernachlässigen. Es genügt, für praktische Zwecke die spezifische Wärme eines Bodens bis auf 1⁰/₁₀ genau festzustellen, und können deshalb auch die Änderung der spezifischen Wärmen mit der Höhe der Temperatur, für welche sie festgestellt wird, sowie ihre Änderung mit dem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens als Größen zweiter Ordnung vernachlässigt werden. Aus dem gleichen Grunde kann von einer feineren Methode der Wärmemessung, wie z. B. der Eiskalorimetrie, hierbei abgesehen werden.

Die spezifischen Wärmen der festen Bodenteilchen sind zuerst von Pfaundler¹⁾ festgestellt worden; an diese Arbeit schlossen sich solche von Schuhmacher,²⁾ v. Liebenberg,³⁾ Lang⁴⁾ und Ulrich⁵⁾ an. Es seien aus diesen Arbeiten die spezifischen Wärmen der wichtigsten Bodenbestandteile hier angeführt:

Spezifische Wärme von	Nach Beobachtung von				
	Pfaundler	Schuhmacher	v. Liebenberg	Lang	Ulrich
tertiärem Quarzsand	0,203	0,128	0,272	0,196	0,191
Kalksand (resp. kohlen- saurem Kalk*)	0,208*)	0,205	0,188	0,214	0,208*)
Ton	—	0,190	0,161	0,233	0,224
Torf (resp. Heideerde*) oder Humus**)	0,507	—	0,301*)	0,477	0,443**)

Die vorstehend mitgeteilten Resultate zeigen bei den verschiedenen Beobachtern bedeutende Abweichungen, was teils in der verschieden exakten Bestimmungsart, teils aber auch in der Verschiedenheit des benutzten Materials begründet sein mag. Ich möchte die Pfaunderschen und die

¹⁾ L. Pfaundler, Über die Wärmekapazität verschiedener Bodenarten; Ann. d. Physik u. Chemie 5. Reihe, 9. Bd., 1866, S. 102—135.

²⁾ W. Schuhmacher, Die Physik des Bodens. Berlin 1864, S. 245.

³⁾ A. v. Liebenberg, Unters. über die Bodenwärme. Habilitationsschrift. Halle 1875.

⁴⁾ C. Lang, Die Wärmekapazität der Bodenkonstituenten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 1, S. 109 u. f.

⁵⁾ R. Ulrich, Unters. über die Wärmekapazität der Bodenkonstituenten; ebenda Bd. 17, S. 1 u. f.

Langsches Resultate, welche miteinander am besten übereinstimmen, für die besten halten.

Schon Liebenberg hat erkannt, daß man die spezifische Wärme der festen Bodenteilchen aus pflanzenphysiologischen Gründen auf das Volumen beziehen müßte; doch erst Lang hat diese Umrechnung mittelst des spezifischen Gewichtes der betreffenden Bodenkonstituenten ausgeführt. Da ich die Langschen Werte für die besseren halte, so will ich hier von einer Berechnung der Schuhmacherschen und v. Liebenbergschen Größen absehen und nur die ersteren wiedergeben.

Spezifische Wärme bezogen auf die Volumeneinheit.

Tertiärer Quarzsand	0,517
Kalksand	0,582
Ton	0,576
Torf	0,601

Es zeigt sich, daß die verschiedenen Bodenkonstituenten pro Volumeneinheit demnach kaum wesentliche Unterschiede in der spezifischen Wärme aufweisen. Diese schwankt zwischen 0,5 und 0,6.

Die spezifische Wärme der festen Bodenteilchen bildet einen Teil der spezifischen Wärme oder der Wärmekapazität des gesamten Bodens. Ich werde daher bei der Besprechung der letzteren erst den Einfluß, welchen dieselbe möglichenfalls auf den Pflanzenwuchs auszuüben vermag, darzulegen versuchen.

§ 8. Die Wärmeleitungsfähigkeit der festen Bodenteilchen.

Die Wärmeleitungsfähigkeit einer Substanz wird durch die Wärme gemessen, welche in der Sekunde durch jeden Quadratcentimeter einer einen Zentimeter starken Platte dieser Substanz hindurch geht, wenn deren beide Seiten eine um 1° C. verschiedene Temperatur haben. Das Wärmemaß ist die Kalorie (cal.).

Die Wärmeleitungsfähigkeit ist bei den festen Bodenbestandteilen selbst nicht festzustellen, da diese hierzu zu klein sind. Es ist dies wohl der Grund dafür, daß man diese nie bei Bodenuntersuchungen berücksichtigt hat, obwohl sie doch einen wesentlichen Einfluß auf die Wärmeleitung des Bodens ausübt. Die festen Bodenteilchen sind aber in vielen Fällen chemisch und physikalisch gleichartig mit größeren Körpern, deren Wärmeleitungsfähigkeit sich bestimmen läßt, so insonderheit die mineralischen.

Für Gesteine hat v. Helmersen¹⁾ zuerst Versuche über die Wärmeleitungsfähigkeit angestellt. Seine Versuche waren aber sehr stark durch

¹⁾ G. v. Helmersen, Versuche, die relative Wärmeleitungsfähigkeit einiger Felsarten zu ermitteln: Ann. d. Physik u. Chemie Bd. LXXXVIII, S. 461.

die Wärmeausstrahlung seiner Mineralstangen nach ausßen beeinflusst. Zu einer Verarbeitung seiner experimentellen Befunde ist er nicht übergegangen. Die erste Methode zur Bestimmung dieser spezifischen Gröfse dürfte wohl von (Ängström¹⁾) herrühren.

Hier sei kurz nur das Prinzip einer Bestimmungsmethode wiedergegeben, da, wie wir später sehen werden, einer Bestimmung der Wärmeleitungsfähigkeit eines Bodens aus pflanzenphysiologischen Gründen kein großer Wert beizumessen ist. Man stelle sich von dem zu prüfenden Gestein eine Platte her von der Dicke d (cm) und der in Betracht zu ziehenden Oberfläche o (qcm), bringe sodann eine Seite dieser Platte auf konstante Temperatur, z. B. auf die des schmelzenden Eises t_0 . Auf der anderen Seite befinde sich heißes Wasser von t_1^0 C. Durch die Wärme, welche von diesem Wasser an die Platte abgegeben wird, sinkt die Temperatur desselben, was man an einem darin befindlichen Thermometer ablesen kann. Aus dem Sinken der Temperatur der ihrer spezifischen Wärme nach bekannten Flüssigkeit (nebst Behälter) läfst sich die Wärmemenge w berechnen, welche in der Sekunde durch die Platte hindurch geht. Da diese nun der Gröfse der Plattenfläche und der Gröfse der Temperaturdifferenz auf beiden Seiten der Platte proportional, der Dicke der Platte aber umgekehrt proportional ist, so folgt für die spezifische Wärmeleitungsfähigkeit s :

$$s = w \frac{d}{o \cdot (t_1 - t_0)}$$

Es sei hier die Wärmeleitungsfähigkeit einiger Mineralien, welche auch wesentliche Bestandteile des Bodens bilden können, wiedergegeben.

	<i>Wärmeleitungsfähigkeit</i>
Quarz, senkrecht zur Achse	0,0042 ²⁾
„ parallel zur Achse	0,0009 ²⁾
Kalkstein	0,0050 ²⁾
Marmor, weiß	0,0012 ³⁾
„ schwarz	0,0018 ³⁾
Kreide	0,0020 ²⁾
Feldspat	0,0058 ³⁾
Schiefer	0,0030 ²⁾

Die Wärmeleitungsfähigkeit dieser verschiedenen Mineralien schwankt demnach zwischen den Grenzen 0,001 und 0,006. Die spezifische Wärmeleitungsfähigkeit des Holzes oder auch der Kohle resp. des Torfes als

¹⁾ J. A. Ängström, Über das Wärmeleitungsvermögen des Kupfers und des Eisens bei verschiedener Temperatur; Ann. d. Physik u. Chemie CXVIII, S. 423.

²⁾ Nach Rieke, Lehrbuch der Physik. Leipzig 1902, II, S. 625.

³⁾ Nach den physikal.-chem. Tabellen von Landolt und Börnstein. Berlin 1894, S. 116.

Vertreter des Humus im Boden läßt sich nur dann bestimmen, wenn man gleichzeitig das in dem Holz resp. Kohle eingeschlossene Wasser und die darin eingeschlossene Luft mit ihrem spezifischen Wärmeleitungsvermögen mit berücksichtigt. Diesbezügliche Untersuchungen sind mir nicht bekannt.

Da die Wärmeleitungsfähigkeit der festen Bodenteilchen nur als ein Teil der Wärmeleitungsfähigkeit des gesamten Bodens zu betrachten ist, so soll eine Besprechung ihres eventuellen Einflusses auf das Pflanzenwachstum in dem betreffenden Boden erst bei der Bestimmung der Wärmeleitungsfähigkeit des Bodens erfolgen (vergl. § 43).

§ 9. Die Farbe der festen Bodenteilchen.

Die Hauptbodenbestandteile (Quarz, kohlenaurer Kalk und Kaolin) sind farblos. Durch die Feinheit der Teilchen und durch die Gestalt der Oberfläche derselben wird eine totale Reflexion des Lichtes bewirkt, so daß sie weiß erscheinen. Sind die Hohlräume zwischen den festen Bodenteilchen nicht mit Luft, sondern mit Wasser angefüllt, so ist die Reflexion des Lichtes nicht vollständig, der Boden ist dann durchscheinender oder im auffallenden Lichte dunkler. Wasser bewirkt so bei jedem Boden eine dunklere Farbe.

Schon geringe Beimengungen stark färbender Substanzen können dem von Natur weißen Boden eine andere Farbe verleihen. Am häufigsten ist die gelbe und rotbraune Farbe, welche durch Beimengungen von dem roten Eisenoxyd und von dem braunen Eisenoxydhydrat hervorgerufen wird. Die Menge dieser Beimengungen wechselt sehr; so enthalten nach Ramann¹⁾ Lehm- und Tonböden von brauner oder roter Farbe 5—10% Eisenverbindungen, während bei einem Sandboden schon 1% Eisenoxyd eine lebhaft rote und 1—2% Eisenoxydhydrat schon eine tiefbraune Farbe hervorrufen kann.

Die dunkle, braune bis schwarze Farbe verdankt der Boden seinem Humusgehalt. 0,2—0,5% Humus können nach Ramann beim Boden schon eine deutlich graue, 2—6% eine tiefgraue und 10% schon eine schwarze Färbung bewirken.

Selten tritt bei Untergrundproben auch eine grünliche Farbe des Bodens auf, welche durch Eisenoxydulverbindungen hervorgerufen wird. Da sich diese Verbindungen bei Luftzutritt oxydieren, so fehlt diese Farbe bei unseren eigentlichen Kulturböden; wo sie auftritt, ist sie demnach ein Kriterium dafür, daß der betr. Boden noch unkultiviert ist.

Die Farbe des Bodens übt einen Einfluß auf die Wärmeabsorption und -Emission aus, insofern ein Gegenstand im allgemeinen die Wärme- und Lichtstrahlen um so mehr absorbiert, je dunkler er gefärbt ist, um so mehr

¹⁾ E. Ramann, Forstliche Bodenkunde und Standortlehre. Berlin 1893, S. 87.

reflektiert, je heller er ist. Da diese Wärmeabsorption diejenige Bodeneigenschaft ist, welche uns vom pflanzenphysiologischen Standpunkte aus an der Farbe interessiert, so könnte uns diese am besten einen Wertmaßstab für die Farbe des Bodens geben.

Schübler¹⁾ war der erste, welcher den Einfluß der Farbe auf die Erwärmung des Bodens festzustellen suchte. Er brachte hierzu die Erden in Gefäße von 10 qcm Oberfläche und 1,3 cm Tiefe und setzte sie dem Sonnenlichte aus. Er färbte ferner die Bodenarten weiß und schwarz und stellte dann auf diese Weise die äußersten Grenzen des Einflusses der Farbe fest. Seine Resultate waren die folgenden:

Bodenarten:	Bei natürlich gefärbter Oberfläche bei		Bei trockenem Boden bei	
	nassem Boden	trockenem Boden	weißer Oberfläche	schwarzer Oberfläche
Bittererde, reinweiß	28,1	34,1	34,1	39,7
Kalkerde, weiß	28,5	34,4	34,3	40,4
Gips, heller weißgrau	29,0	34,9	34,8	41,0
Lettenartiger Ton, gelblich .	29,4	35,3	33,9	39,8
Ackererde, grau	29,2	35,4	33,6	40,0
Lehmartiger Ton, gelblich .	29,8	35,6	33,7	39,6
Kalksand, weißlich-grau . . .	29,9	35,6	34,6	40,9
Kleiartiger Ton, gelblich-grau	29,9	35,7	33,5	39,3
Quarzsand, hellgelblich-grau.	29,8	35,8	34,6	40,7
Feiner, bläulich-grauer Ton .	30,0	36,0	33,0	39,1
Gartenerde, schwärzlich-grau	30,0	36,2	33,9	40,2
Schiefriger Mergel, bräunlich-rot	31,0	37,0	33,9	40,6
Humus, bräunlich-schwarz .	31,8	37,9	34,0	39,5

Vorstehende Zahlen geben die Temperatur in Graden R. an, auf welche sich der Boden bei einer Lufttemperatur von 20° R. erwärmte.

Würde für die Erwärmung eines Bodens lediglich die Farbe maßgebend sein, so müßten alle schwarz- sowie alle weißgefärbten Bodenarten stets die gleiche Erwärmung zeigen. Das ist aber, wie aus den letzten beiden Spalten hervorgeht, nicht der Fall, und es kann auch nicht der Fall sein, da nicht nur die spezifische Wärme und die Wärmeleitfähigkeit eines Bodens für die Erwärmung desselben maßgebend ist, sondern außerdem auch für die Wärmeabsorption die Rauheit der Oberfläche, von welcher die Wärmestrahlen absorbiert werden können, in Betracht gezogen werden muß. Durch diese drei hinzutretenden Momente erklärt sich auch,

¹⁾ G. Schübler, Grundsätze der Agrikulturchemie, II. Teil, S. 88–89.

dafs sich die nassen Bodenarten längst nicht so erwärmen, wie die trockenere, obwohl sie in der Färbung jedesmal dunkler erscheinen. Es beträgt der Unterschied zwischen der Erwärmung des nassen und der des trockenere Bodens im Mittel der 13 Versuche $5,7^{\circ}$ R., zwischen der Erwärmung des schwarz- und des weifsgefärbten Bodens im gleichen Mittel $6,0^{\circ}$ R. Da nun in der Natur der Wassergehalt der Bodenarten weit gröfseren Schwankungen unterliegt als die Farbe, so folgt daraus, dafs der Farbe praktisch keine allzu grofse Bedeutung für die gröfsere oder geringere Erwärmung der verschiedenen Bodenarten zuzusprechen ist. Dies ist u. a. auch von Wollny¹⁾ experimentell bestätigt worden, welcher den Nachweis führte, dafs hellgelber Sand sich oft sehr viel höher erwärmte als dunkelgelber Ton und schwarzbrauner Torf, welche sonst den gleichen äufseren Wärme einstrahlenden Einflüssen ausgesetzt waren. Ich halte es deshalb nicht für erforderlich, hier noch weitere Versuche, wie z. B. die von Wollny und von Lang²⁾ ausgeführten, wiederzugeben.

Die verschieden grofse Erwärmung oder Wärmeabgabe verschiedener Bodenarten kann nach dem Vorhergehenden demnach nur dann ein Mafsstab für die Farbe eines Bodens sein, wenn man bei den verschiedenen Bodenarten stets die gleiche Fläche für die Wärmeabsorption und -Emission exponiert, wenn man ferner die spezifische Wärme und die Wärmeleitfähigkeit der betr. Bodenarten mitberücksichtigt und eventuell die erforderlichen Korrekturen für die Wärmeausstrahlung, welche durch die Verdunstung des Bodenwassers herbeigeführt wird, anbringt. Exakte Bestimmungen in der Art sind sehr schwierig und meines Wissens noch nicht angestellt worden.

Praktisch hat man sich den Einflufs der Farbe des Bodens auf seine Erwärmung in der Gartenwirtschaft zunutze gemacht, indem man z. B. Boden mit Schieferstaub oder mit Kohlenpulver bedeckte, um so Wein oder Melonen früher und sicherer zur Reife zu bringen.³⁾ In der land- und vornehmlich in der forstwirtschaftlichen Praxis spielt die Farbe des Bodens keine so grofse Rolle, da sie nur so lange auf die Erwärmung oder Wärmeausstrahlung des Bodens einen Einflufs ausüben kann, als der Boden nicht von Pflanzenmassen bedeckt ist. Er wird sich somit insonderheit im Frühjahr beim Auflaufen der Saaten bemerkbar machen, insofern hier die Saaten in dem dunklen Boden unter sonst gleichen Umständen eher auf-
laufen, da diesem eher die erforderliche Wärme zugeführt wird.

¹⁾ E. Wollny, Unters. über den Einflufs der Farbe des Bodens auf dessen Erwärmung; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 1, S. 43—69.

²⁾ C. Lang, Über Wärme-Absorption und -Emission des Bodens; ebenda Bd. 1, S. 383—407.

³⁾ Vergl. Wollny, l. c. S. 43—45.

Wollny¹⁾ hat dies durch Vegetationsversuche bestätigt, welche er derart anstellte, daß er Parzellen des gleichen Bodens teils mit Brocken von weißem kararischen Marmor, teils mit ebensolchen von (schwarzem) Steinkohlengrus bedeckte. Die Brocken waren hierzu durch Siebe in einer Korngröße von 2—6 mm abgeseibt worden. Die Parzellen wurden erst in gewöhnlicher Weise bearbeitet und dann besät und nach Ebnung der Oberfläche gleichmäßig mit dem abgeseibten Material teils weiß, teils schwarz überstreut. — Wenn man auch zugeben muß, daß exakte Versuche dieser Art ganz außerordentlich schwer anzustellen sind, so möchte ich doch die vorstehend wiedergegebene Versuchsanordnung keineswegs als einwandfrei bezeichnen. Es ist hier nicht nur die Farbe des so hergestellten Bodens eine andere, sondern es zeigt gleichzeitig auch das Deckmaterial wesentliche Unterschiede. Steinkohlengrus ist porös, Marmor nicht! Ersterer ist infolge der eingeschlossenen Luft ein sehr viel schlechterer Wärmeleiter, er hat eine entsprechend geringere spezifische Wärme, bietet aber andererseits der Wärmeabsorption und -Emission eine rauhere, d. i. eine entsprechend größere Oberfläche, welche, wie erwähnt, für die Erwärmung eines Bodens wesentlich mit maßgebend ist. Der Kohlengrus gestattet ferner infolge seiner Porosität einen viel regeren Luft- und Feuchtigkeits-Austausch zwischen Boden und Atmosphäre. War der Boden so vor dem Überstreuen mit den Farbenbröckeln verhältnismäßig naß, so mußte sich unter dem Marmor die Nässe länger halten, was der Vegetation leicht nachteilig sein kann. Der Marmor aber vermochte andererseits die Feuchtigkeit, wenn der Boden trocken war, besser für die Pflanzen zurückzuhalten. Wollny kam so durch seine Versuche dementsprechend auch zu folgender Schlussfolgerung:

„Das Ertragsvermögen der Pflanzen ist zwar bei dunkler Farbe des Erdreiches im großen und ganzen ein höheres als bei heller, unter Umständen aber können sich die entgegengesetzten Erscheinungen geltend machen.“

Ich vermute, daß diese „entgegengesetzten Erscheinungen“ lediglich auf die Umstände, welche in den besagten Fehlerquellen zu suchen sind, zurückzuführen sind. Immerhin zeigen auch diese Versuche, daß der Einfluß der Farbe des Bodens auf die Pflanzenerträge desselben selbst in extremen Fällen schwer festzustellen ist und deshalb gegen den Einfluß anderer physikalischer Bodeneigenschaften vernachlässigt werden kann.

Es dürfte sich deshalb für die „praktische Bodenkunde“ nicht verlohnen, eine exakte Methode für die Bestimmung des Einflusses der Farbe des Bodens auf die Erwärmung desselben auszuarbeiten.

¹⁾ E. Wollny, Unters. über den Einfluß der physikalischen Eigenschaften des Bodens auf das Produktionsvermögen der Nutzpflanzen; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 324 u. f.

Einen praktischen Wert hat die Farbe des Bodens, welcher für die Bodenuntersuchung keineswegs zu unterschätzen ist und somit hier auch erwähnt sein soll. Die Farbe ist uns ein Merkmal für die Gleichartigkeit oder Ungleichartigkeit des Bodens unseres Grundstückes. Befinden sich so auf einem in guter Kultur befindlichen braunen Acker rötliche Stellen, so ist dies ein Zeichen, daß hier strenger Lehm oder Kies vorherrscht, welcher den Humus nicht so aufzunehmen vermochte. Wir werden in dem Falle diese Stellen abgrenzen und den Boden derselben für sich untersuchen. Sind derartige Stellen, welche oft unfruchtbarer sind, größer, so werden wir sie zweckmäßig in der Bewirtschaftung aus dem Schläge heraus schneiden und für sich besonders bestellen, sie auch eventuell aufforsten resp. im Forst mit anspruchsloserem Holze bepflanzen, denn sie werden dann, in anderer Weise behandelt, voraussichtlich höhere Erträge geben. So kann uns die verschiedene Färbung der Bodenarten, wenngleich sie keineswegs ein brauchbarer Maßstab für die Güte des Bodens ist, als praktisches Merkmal für die Gleichartigkeit eines Bodens zuweilen sehr von Nutzen sein.

§ 10. Die Korngröße der festen Bodenteilchen.

Zu den spezifischen Eigenschaften des Bodens, welche vom land- und forstwirtschaftlichen Standpunkte aus besonders zu berücksichtigen sind, gehört ferner die Korngröße der festen Bodenteilchen. Dies scheint diejenige Bodeneigenschaft zu sein, auf welche der Praktiker das Hauptgewicht legt; denn wenn er nach seiner Art den Boden untersucht, wenn er ihn zwischen den Fingern zerreibt, so beobachtet er hierbei vornehmlich, wie fein die einzelnen Bodenteilchen sind, oder mit anderen Worten, ob die groben oder die feinen Teilchen vorherrschend sind. Die Feinheit, soweit sie sich auf diese Weise beurteilen läßt, und die Farbe sind dem Praktiker charakteristisch für die Art des Bodens.

Sind die Teilchen grob, so wird der Boden als Kies- oder als Sandboden bezeichnet; besitzt ein Boden 30—40 % feinere Teilchen, so heißt er nach Thaer¹⁾ Lehm Boden, dessen weiteres Kriterium in der Regel die gelbe bis rote Farbe ist. Ein Boden, der 50—60 % feinere Teilchen besitzt, heißt „Tonboden“. Seine Farbe ist meist grau und in der Regel heller, wenn größere Mengen Kalk im Boden vorhanden sind. Sind noch mehr feine Teilchen da, und hat der Boden eine dunkle bis schwarzbraune Farbe, so wird er als Humusboden bezeichnet. — Auf diese Weise werden von den Praktikern Sand-, Lehm-, Ton-, Kalk- und Humusböden unter-

¹⁾ A. Thaer, Grundsätze der rationellen Landwirtschaft. Stuttgart 1839, Bd. 2, S. 117—126.

schieden.¹⁾ Das Kriterium ist insonderheit die Korngröße der festen Bodenteilchen, und zwar der Grad, in welchem die feineren vor den gröbereren Bestandteilen vorherrschen. Diese Differenzierungsmethode des praktischen Land- und Forstwirtes ist aber sehr roh, und so haben die Theoretiker verschiedene Methoden ausgearbeitet, um diese Differenzierung exakter durchzuführen. Ein Teil dieser Methoden beschäftigt sich so direkt mit der Zerlegung des Bodens in Sand, Kalk, Ton und Humus. Der andere Teil hat es sich zur Aufgabe gestellt, die einzelnen Bodenteilchen nach ihrer Korngröße zu sortieren. Da diese Methoden, obwohl sie stets nur einen geringen Grad von Genauigkeit erreicht haben und erreichen konnten, die letzten 60 Jahre die allein üblichen Methoden der physikalischen Bodenuntersuchung waren, so sollen sie hier eingehend in ihren Grundlagen besprochen werden.

Die Trennung der verschiedenen Bodenteilchen in Sand, Kalk, Ton und Humus wird teils mechanisch durch Abschlämmen der feineren Teilchen von den gröbereren, teils chemisch ausgeführt. Dieselbe wird somit als „mechanisch-chemische Bodenanalyse“ bezeichnet. Die Trennung der Bodenteilchen nach ihrer Korngröße erfolgt lediglich auf mechanischem Wege und trägt so allgemein den Namen „mechanische Bodenanalyse“. Beide Analysen müssen entweder vom trockenen Boden ausgehen oder von einem lufttrockenen Boden, dessen Wassergehalt bekannt ist, so daß man die gefundenen Resultate auf die Trockensubstanz umrechnen kann (vergl. § 5).

a) Die mechanisch-chemische Bodenanalyse.

Die Methode, welche den Gehalt eines Bodens an Sand, Kalk, Ton und Humus am besten wiederzugeben vermag, verdanken wir Schlösing.²⁾ Sie sei hier als einzige dieser Analysenarten mit einigen Modifikationen wiedergegeben.

α) Die Kalkbestimmung.

5 g der lufttrockenen Bodenprobe werden mit möglichst wenig Wasser übergossen und darauf mit dem Finger so lange an den Wänden einer Porzellanschale gerieben und abgeschlämmt, bis die überstehende Flüssigkeit klar bleibt. Der in der Schale zurückbleibende Sand wird zunächst zur Seite gestellt. Das Abgeschlämmte wird unter gelindem Erwärmen mit Salzsäure schwach angesäuert, dann ammoniakalisch und von neuem schwach sauer gemacht. Hierauf wird filtriert und der Kalk

¹⁾ Vergl. u. a. auch Justus Liebig, Die Chemie und ihre Anwendung. Braunschweig 1846, S. 146. — G. Schübler, Grunds. der Agr.-Chemie Bd. 2, S. 145—151.

²⁾ L. Grandeau, Handbuch der agritektur-chemischen Analysen. Berlin, Verlag von Paul Parey, 1879, S. 105 u. f.

aus dem Filtrat durch Fällung mit oxalsaurem Ammoniak ausgeschieden, abfiltriert, getrocknet, geglüht und als Kalziumoxyd bestimmt.

β) Die Sandbestimmung.

Der Filtrerrückstand wird dann quantitativ in das Becherglas zurückgespült, hier mit 1—1,5 ccm konzentriertem Ammoniak versetzt und 4 bis 5 Stunden unter häufigerem Umrühren stehen gelassen, dann mit 100 ccm Wasser übergossen und von neuem 24 Stunden lang stehen gelassen. Hierauf wird wiederum abgeschlämmt und der Sand mit dem zuerst bei der Kalkbestimmung Zurückgestellten vereinigt. Der Sand wird dann bei 125° C. getrocknet und gewogen und eventuell noch weiter auf seine verschiedene Korngröße hin untersucht.

Diese Trennung des Sandes von der Tonsubstanz durch Abschlämmen läßt sich leidlich quantitativ ausführen. Wenn ein Glasstab, mit dem man die in ein Becherglas übergeführten nassen Schlämmpunkte umrührt, an der Wand dieses Glases nicht kratzt, so ist dies ein Zeichen dafür, daß man keinen Sand fälschlich mit übergeschlämmt hat.

γ) Die Tonbestimmung.

Zu der den Ton und die gelösten Humussubstanzen enthaltenden abgeschlämmten Flüssigkeit werden nun, um das schnellere Absitzen des ersteren herbeizuführen, 4—5 g Chlorkalium zugesetzt. Der Ton wird dann abfiltriert und bei 150° mit veraschtem Filter getrocknet, sodann gewogen.

δ) Die Humusbestimmung.

Das Filtrat hiervon, welches eine gelbliche bis dunkelbraune Farbe hat, wird zur Humusbestimmung mit Essigsäure, um die Kohlensäure zu entfernen, aufgeköcht. Durch Zusatz von essigsäurem Blei wird dann der Humus als flockig-brauner Niederschlag gefällt, auf ein gewogenes Filter gebracht, bei 100° C. getrocknet und gewogen, darauf im Porzellantiegel mit veraschtem Filter geglüht und das essigsäure Blei zurückgewogen.

Die Ton- und die Humus-Bestimmung nach Schlösing sind nicht ganz einwandfrei, da in Ammoniak unlösliche Pflanzenteile, welche aber doch zum Humus gerechnet werden müssen, nach Schlösing als „Ton“ mitbestimmt werden. Um dies zu umgehen,¹⁾ habe ich den Glühverlust des bei 150° C. getrockneten reinen Tones bestimmt und dann die Ton + Humus enthaltende abgeschlämmte Masse geglüht, wobei sich der Humus zersetzte und so verflüchtigte. Der geglühte Ton wurde nach dem Erkalten gewogen und mittelst des vorher berechneten Glühverlustes auf bei 150° C. getrocknete Substanz umgerechnet.

¹⁾ A. Mitscherlich, Beurteilung der physikalischen Eigenschaften des Ackerbodens mit Hilfe seiner Benetzungswärme. Inaug.-Diss. Kiel 1898.

Die Humusbestimmung des Bodens habe ich dann derart ausgeführt, daß ich eine im Vakuumexsikkator bis zur Gewichtskonstanz getrocknete Probe glühte und diesen Glühverlust feststellte. Da die Tonbestimmung des Bodens vorher ausgeführt war und der Glühverlust des Tones aus einer humusfreien Untergrundprobe des gleichen Bodens ermittelt werden konnte, so war leicht zu berechnen, wieviel von dem Glühverlust auf den in dem Boden vorhandenen Ton anzurechnen war. Zieht man diesen Glühverlust des Tones von dem gesamten Glühverlust ab, so ist die Differenz der Humus.

Die soeben beschriebene Methode der Humusbestimmung lieferte angenähert gleiche Resultate wie die Elementaranalyse.

Bei der *Elementaranalyse* genügt zur Kohlenstoffbestimmung im Boden nach Loges¹⁾ ein Verbrennen des mit Phosphorsäure eingedampften und dann mit Kupferoxyd vermengten Bodens, um alle Kohlensäure aus demselben zu entfernen. Auch fand Loges, daß eine Vorlage von metallischem Kupfer zum Zweck der Reduktion der Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen unnötig ist. Die Menge der Kohlensäure wird in der üblichen Weise durch die Gewichtszunahme eines Kaliapparates bestimmt. Die Berechnung des Humus aus dem so bestimmten Kohlenstoff geschieht durch Multiplikation des letzteren mit 1,724, einem von E. Wolff angenommenen Faktor.²⁾

Als Analysenresultate seien die folgenden³⁾ wiedergegeben:

Bodenart:	Gehalt der Bodenarten in % der trockenen Substanz an				Wasser
	Sand	Kalk	Ton	Humus	
Moorboden	26,97	2,32	24,33	45,93	12,74
Humusreicher Sandboden	77,37	1,06	13,76	6,70	1,88
Humoser Sandboden . . .	82,17	0,14	15,47	2,65	1,07
Sand (Untergrund). . . .	93,73	0,58	5,21	0,14	0,35
Sandboden	84,97	Spuren	12,29	0,92	0,57
Lehmiger Sandboden . . .	82,77	Spuren	15,55	1,55	0,78
Sandiger Lehm Boden . . .	67,23	1,15	28,84	2,89	1,95
Lehm (Untergrund)	67,91	1,87	27,88	0,55	1,34
Ton (Untergrund)	70,20	2,85	23,00	1,36	1,25
Strenger Tonboden (aus Java).	6,34	1,29	91,92	2,43	11,91

¹⁾ G. Loges, Über die Bestimmung des Humus in Ackererden: Landw. Vers.-Stat. Bd. XXVIII, S. 229 u. f.

²⁾ Fresenius, Zeitschrift für analytische Chemie Bd. III, S. 101.

³⁾ Mitscherlich, Die Beurteilung der physikalischen Bodeneigenschaften mit Hilfe ihrer Benetzungswärme. Inaug.-Diss. Kiel 1898.

Man erhält durch die vorstehende Tabelle ein Bild von der Übereinstimmung der praktischen Bezeichnungsweise mit den Resultaten der mechanisch-chemischen Analyse.

Parallelbestimmungen ergaben nach der verbesserten Methode recht gut übereinstimmende Werte. Williams,¹⁾ welcher genau nach der Schlösingschen Vorschrift arbeitete, erhielt hier gröfsere Differenzen.

b) Die mechanische Bodenanalyse.

Wohl schon längst hatte man das in der Praxis erkannt, was erst später experimentell bewiesen werden sollte,²⁾ dafs die mechanisch-chemische Bodenanalyse auferordentlich verschiedenartige Bodenteilchen in gleiche Rubriken einordnete. Es konnten so zwei Böden ganz genau den gleichen Gehalt an Humus, Ton, Sand und Kalk besitzen und doch ganz andere Erträge zeitigen. Es zeigte sich so, dafs die mechanisch-chemische Analyse, wengleich sie die Bestandteile bestimmte, welche auch der Praktiker bei seinem Boden zu bestimmen pflegt, doch nicht genau genug war, denn Ton und Ton, Humus und Humus etc. können je nach ihrer Art einen ganz verschieden großen Einflufs auf den Pflanzenwuchs ausüben, können also demnach auch physikalisch ganz verschieden sein. So suchte man jetzt die Korngröfse direkt zu bestimmen, d. h. die festen Bodenteilchen nach ihrer Korngröfse zu sortieren, und je nach dem quantitativen Mengenverhältnis der verschiedenen Sorten dann den einzelnen Boden zu beurteilen. Natürlich mußte die hierzu ausgearbeitete Methode derart sein, dafs sie die Korngrößen aller Bodenarten stets in gleicher Weise feststellte. Das haben aber, wie wir gleich sehen werden, die verschiedenen mechanischen Bodenanalysen *nicht* vermocht. Die Folge hiervon war, dafs diese Analysen, deren erste Anfänge schon auf Cadet de Vaux³⁾ zurückzuführen sind, bis zum heutigen Tage unzähligen Modifikationen unterworfen sind, und dafs sie trotzdem auch heute noch keine befriedigenden Resultate ergeben. Es ist in der Tat unmöglich, die Bodenteilchen nach ihrer Korngröfse zu sortieren, und, da somit den Methoden ein *prinzipieller* Fehler zugrunde lag, so konnten auch alle Verbesserungen zu keinem besseren Ziele führen.

Diejenigen Methoden, welche den Boden nur in zwei verschieden grobe Kornsortimente zerlegen, leisten hiermit nichts anderes als die

¹⁾ W. R. Williams, Untersuchungen über die mechanische Bodenanalyse; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 18, S. 290.

²⁾ W. R. Williams, ebenda Bd. 18, S. 241. — A. Mitscherlich, Die Beurteilung der physikalischen Bodeneigenschaften mit Hilfe der Benetzungswärme; Journ. f. Landw. 1898, S. 265.

³⁾ W. Edler, Die Entwicklung der mechanischen Bodenanalyse; Journ. f. Landw. Bd. 31, S. 185.

mechanisch-chemische Analyse, welche auch den groben Sand von den abschlämbaren Teilchen, dem Ton und Humus, trennte. Doch die meisten der mechanischen Analysen differenzieren weiter, ohne daß jedoch in den verschiedenen Methoden eine einheitliche Bezeichnung für die verschiedenen „Korngrößen“ durchgeführt wird; so unterscheidet z. B.

	A. Fadejeff ¹⁾ mm	E. Wollny ²⁾ mm
1. Steine	> 10	> 10
2. Grobkies	10—7	10—5
3. Mittelkies	7—5	5—2
4. Feinkies	5—3	2—1
5. Grobsand	3—1	1—0,5
6. Mittelsand	1—0,5	0,5—0,25
7. Feinsand	0,50—0,25	0,25—0,10
8. Staub resp. grober Schlamm . . .	0,25—0,01	0,10—0,05
9. Grober resp. mittelfeiner Schlamm .	0,01—0,005	0,05—0,025
10. Mittlerer resp. feiner Schlamm . .	0,005—0,0015	0,025—0,005
11. Feiner Schlamm resp. kolloidaler Ton	< 0,0015	0,005—0,0001

Um die Sonderung der Bodenteilchen in derartige elf „Korngrößen“ durchzuführen, bedient man sich allgemein zwei verschiedener Methodenarten. Die Sortimente 1—7 resp. 1—6 werden durch verschieden weite Rundlochsiebe, die übrigen durch das verschieden schnelle Absetzen der im Wasser aufgeschlämmten Substanzen voneinander getrennt. Wir haben danach die Siebmethode und die Schlämmmethode gesondert zu behandeln.

α) Die Siebmethode.

Wir hatten vorher gesehen, daß der Sand im Boden den Pflanzenwuchs angenähert ebenso beeinflusst wie die Steine, insofern er das der Pflanzenwurzel zur Verfügung stehende Bodenvolumen verringert. Ist die Pflanze aber darauf angewiesen, ausschließlich im Sande zu wachsen, so werden sich doch auch hier je nach der Feinkörnigkeit dieses Sandes Unterschiede in den Pflanzenerträgen bemerkbar machen. Zwischen Steinen kann die Pflanze nicht gedeihen. Hier sind die Hohlräume zu weit, die Pflanzenwurzel wird frei liegen und, da ihr nicht das erforderliche Wasser zugeführt wird, vertrocknen. Im Boden, wo viele feine Bestandteile sind, gedeiht sie nach praktischen Erfahrungen am besten. Wir dürfen also zunächst die Annahme machen, daß die Pflanze um so größere Erträge ergibt, je feiner die Bodenbestandteile sind. Diese Annahme hat

¹⁾ W. R. Williams, l. c. S. 227—228.

²⁾ E. Wollny, Bodenphysik in Lügers Lexikon der gesamten Technik II.

auch durch Wollnysche Vegetationsversuche¹⁾ ihre Bestätigung gefunden. Es wurden diese derart ausgeführt, daß ein Sand durch Siebe in verschieden große Korngrößen zerlegt wurde, und daß dann in den einzelnen Kornsortimenten Pflanzen angebaut und ihre Erntemengen festgestellt wurden. Ich habe die Zahlen von Wollny, wie die früher besprochenen Versuche, in Prozentzahlen umgerechnet, indem ich das Mittel der in Betracht gezogenen je fünf Versuche jedesmal gleich hundert setzte und die anderen Beobachtungen darauf bezog.

Die so vergleichbar gemachten Resultate sind dann die folgenden:

Versuchsjahr	Feldfrucht:	Mittlerer Ernteertrag an Körnern resp. Knollen in g	Ernteertrag in Prozenten des Mittels erzielt auf einem Quarzsande von einem Kornsortimente von				
			0,25—0,5 mm	0,5—1,0 mm	1,0—2,0 mm	2,0—4,0 mm	4,0—6,75 mm
1883	Sommerroggen	3,2	191	100	91	66	53
1887	"	7,9	142	121	97	82	58
1888	Winterroggen	5,1	125	114	109	85	67
1888	Erbsen	77,3	143	104	98	78	77
1889	Sommerroggen	2,9	173	161	77	47	43
1889	Desgl. ungedüngt	0,8	156	148	103	61	30
1890	Kartoffeln	95,5	128	116	94	92	71
1890	Desgl. ungedüngt	48,5	114	115	101	89	80
Im Mittel:			147	122	96	75	60
Wahrscheinlicher Fehler des Mittels +			6,5	5,1	2,1	4,1	4,4

Wir sehen hieraus, daß in der Tat die Größe der Körner des Sandes einen großen Einfluß auf die Pflanzenerträge ausübt, und daß so das Absieben und Sortieren der Bodenteilchen nach ihrer „Korngröße“ eine zweckentsprechende Methode für die Beurteilung eines Bodens sein kann. Von einer solchen Methode aber verlangen wir, wie gesagt, daß sie bei allen Bodenarten vergleichbare Resultate liefert, und das tut die Siebmethode nicht!

Nehmen wir an, daß der Sand stets aus lauter kugelförmigen Teilchen von den verschiedensten Größen bestände, so würde man mittelst der Siebmethode bei verschiedenen Bodenarten vergleichbare Resultate erhalten. Die Sandkörner aber variieren in ihrer Gestalt. Theoretisch kann jedes

¹⁾ E. Wollny. Untersuchungen über den Einfluß der physikalischen Eigenschaften des Bodens auf das Produktionsvermögen der Nutzpflanzen. Forsch. a. d. Geb. der Agrikulturnaturphysik XX. Bd., 3. Heft, S. 29 u. f.

Teilchen, welches durch ein bestimmtes Loch durchgehen soll, unbegrenzt groß sein, es muß nur dementsprechend lang sein und eine dem Loche entsprechend kleinere Querschnittsfläche besitzen. In Wirklichkeit wird die Grenze der größten, durch ein bestimmtes Loch „durchzusiebenden“ Körner angenähert gleich der Kugel sein, welche den gleichen Radius wie das betreffende Siebloch besitzt. Die kleinsten durch ein Siebloch noch abzusiebenden Körner können theoretisch unbegrenzt klein sein. Es sind dies unbegrenzt dünne runde Scheibchen von dem Durchmesser des Loches. Beim Absieben ist nun in der Tat diese untere Grenze auch sehr weit. Scharfe Quarzsplitter von muschelförmigem Bruch, welche den Durchmesser des Siebloches besitzen, lassen sich so genau nur noch durch das gleiche Rundlochsieb absieben, wie kugelförmige Teilchen von gleichem Durchmesser. Das Sieb sondert so nicht den Sand *nur nach der Gröfse der Teilchen*, sondern auch nach der Form! Nun könnte man einwenden, daß doch Wollny bei seinen Vegetationsversuchen durch verschieden weite Siebe abgesiebten Boden benutzt hatte, und daß also nicht nur die Gröfse, sondern eben auch die Form der Teilchen in Betracht gezogen werden muß. Dies ist aber von vornherein nicht zu folgern, da die Sandteilchen eines und desselben Sandes in der Regel gleichartig geformt sind, entweder abgeschliffen oder scharfkantig oder a. m., je nach der Entstehung des Bodens. Es dürfte deshalb doch die Annahme berechtigt sein, daß in diesem Falle die Teilchen durch das Sieb lediglich nach ihrer Gröfse sortiert sind. Nimmt man aber verschiedene Sandsorten und sibt man dieselben durch Rundlochsiebe ab und bestimmt dann ferner das mittlere Kornvolumen jeder dieser „Korngrößen“, so wird man finden, daß diese durch das Sieb bestimmten Korngrößen bei verschiedenen Bodenarten ganz andere sind, daß mithin die Resultate, welche man mittelst der Siebmethode für verschiedene Bodenarten erhält, gar nicht miteinander verglichen werden können.

Um dies zu veranschaulichen, habe ich einen scharfkantigen Seesand und einen aus Boden ausgewaschenen Alluvialsand durch verschiedene Rundlochsiebe abgesiebt und dann das mittlere Korngewicht und das mittlere Kornvolumen der einzelnen Sortimente bestimmt. Das mit Hilfe der pyknometrischen Methode festgestellte spezifische Volumen betrug beim Seesand 0,378, beim anderen Sande 0,377. — Der Seesand war vorher, um ihn von Muschelresten zu befreien, mit Salzsäure ausgewaschen worden.

(Siehe die obere Tabelle auf Seite 40.)

Es erübrigt nun noch, den Beweis zu führen, daß auch die Erträge der gleichen Kornsortimente von verschiedenen Sandarten ganz verschieden sind. Hierfür liegen leider nur wenige Zahlen von Wollny¹⁾ vor. Es ist bei diesen nicht möglich, festzustellen, wieweit dieselben vergleichbar

¹⁾ l. c. XX, 3. Heft, S. 30.

sind, zumal auch keine Parallelversuche angestellt wurden; trotzdem seien diese hier angeführt.

Anzahl der gewogenen Körner	Sieb-differenz	Gewichte in g:		Gewicht eines Kornes in mg:		Volumen eines Kornes in cmm:	
		Seesand	Alluvial-sand	Seesand	Alluvial-sand	Seesand	Alluvial-sand
Je 150	2,5—2,0	0,619 0,563	1,548 1,523	3,94	10,24	1,49	3,86
Mittel:		0,591	1,536				
Je 500	2,0—1,5	0,844 0,847	2,734 2,549	1,69	5,28	0,639	1,99
Mittel:		0,845	2,642				
Je 500	1,5—1,0	0,335 0,350	0,754 0,781	0,684	1,54	0,259	0,579
Mittel:		0,343	0,768				
Je 500	1,0—0,5	0,0989 0,0952	0,354 0,337	0,194	0,691	0,073	0,261
Mittel:		0,0971	0,346				
Je 500	0,5—0,25	0,0433 0,0446	0,0287 0,0289	0,088	0,058	0,033	0,022
Mittel:		0,0440	0,0288				

Versuchspflanze ist die Erbse. Eine Pflanze kam auf 100 qcm Bodenfläche und lieferte auf den verschiedenen Sortimenten eines weissen und eines gelben Quarzsandes die folgenden Resultate:

	Korngröße des Sandes:					
	0,25—0,50		0,50—1,0		1,0—2,0	
	Bezeichnung des Sandes:					
	weißer Quarz-sand	gelber Quarz-sand	weißer Quarz-sand	gelber Quarz-sand	weißer Quarz-sand	gelber Quarz-sand
Körnerertrag in g	11,0	8,2	9,8	3,6	7,0	1,8
Strohertrag in g	12,5	9,0	11,0	5,0	8,0	2,3

Die vorliegenden Differenzen sind zu grofs, als dafs sie lediglich durch die Farbe des Sandes bedingt sein könnten. Sie sind demnach höchstwahrscheinlich auf die Verschiedenheit der durch das Sieb bestimmten gleichen Kornsortimente bei den beiden Sandarten zurückzuführen. Dies mag genügen zur Feststellung der Tatsache, dafs die Siebmethode nicht den an sie gestellten Anforderungen genügen kann.

Man erhält durch Absieben verschiedener Bodenarten durch die gleichen Siebe Teilchen von verschiedener mittlerer Gröfse. Mithin ist die Siebmethode zur Bestimmung der Korngröfse des Bodens unbrauchbar, da sie nicht bei verschiedenen Bodenarten vergleichbare Resultate liefert.

Dafs die Siebmethode auch an und für sich nicht den exakten Methoden zuzuzählen ist, da ein Boden nie so durch ein bestimmtes Sieb abgeseibt werden kann, dafs nicht bei weiterem Absieben einzelne, und zwar grade gröbere Bodenteilchen, welche zufällig in die passende Falllage zum Siebloch kommen, noch durch das Sieb durchgehen, ist bekannt. Die Resultate der Siebmethode werden so bis zu einem gewissen Grade auch durch den Versuchsansteller, d. h. durch dessen Ausdauer beim Absieben und durch die Art des Schüttelns beeinflusst. Jedoch wäre dieser subjektive Fehler immerhin gering anzuschlagen, wenn die Methode nur sonst den an sie gestellten Bedingungen genügen würde.

β) Die Schlämmmethode.

Wie wir sahen, kam ja aber der Sand nur als „Ballast“ im Boden in Betracht (vergl. § 4), und es genügte vielleicht deshalb die Untersuchung der *feineren* Teilchen auf ihre „Korngröfse“ hin mittelst der Schlämmmethode.

Die erste Art Schlämmapparate stammen von v. Bennigsen, von Knop und von Jul. Kühn. Es waren Schlämmflaschen oder Schlämmzylinder, in welche der vorher zur Trennung der einzelnen Teilchen ca. 1 Stunde lang in Wasser gekochte Boden eingefüllt und mit Wasser unter ständigem Umrühren übergossen wurde. Nachdem man den Boden sich eine Zeit lang (nach Kühn 10 Minuten) unter Wasser absetzen läfst, wird der obere Teil der von den noch suspendierten feinsten Teilchen getrübbten Flüssigkeit mittelst eines Hebers oder einer passend angebrachten Ausflußöffnung abgelassen. Das Aufschlämmen und Absetzenlassen des Bodens und das Abschlämmen der feinsten Teilchen wird so lange in gleicher Weise fortgesetzt, bis die abgenommene Flüssigkeit klar ist.

Kühn sortiert so die Teile, welche durch ein 0,5 mm Rundlochsieb hindurchgehen, in zwei Gröfsen, nämlich in den sich absetzenden „Feinsand“ und in die „abschlämbaren Teile“ (Ton, Humus usw.; vergl. die mechanisch-chemische Analyse).

Diese Schlämmmethode wurde durch Nöbel, Schöne, Hilgard u. a. dann noch derart modifiziert, daß die feinen Teilchen durch fließendes Wasser suspendiert gehalten werden. Es geschieht dies in den sog. Spülapparaten. Sie beruhen darauf, daß der Boden in verschiedenen hintereinander geschalteten Gefäßen einem verschieden starken Wasserströme ausgesetzt wird, welcher ihn gleichzeitig dauernd aufrührt. Da die Wasserbewegung dadurch, daß die Gefäße, in welche die Bodenteilchen der Reihe nach gelangen können, immer größer werden, bei konstantem Zu- und Abflusse immer geringer wird, so werden sich in dem ersten Gefäß die größeren und schwereren Teilchen absetzen, in dem nächsten die feineren usw. Man kann so den Feinboden in Sortimente von verschiedenster „Größe“ zerlegen. Im äußersten Falle pflegt man die oben angeführten fünf Abstufungen zu machen. — Von der Art des Aufrührens des Bodens, wie von der Stärke des eingeleiteten Wasserstromes hängt natürlich die Bildung der Sedimente ab. Es ist hierdurch erklärlich, daß die verschiedenen Spülapparate, welche in diesen Bedingungen variieren, nie die gleichen Resultate ergeben können.¹⁾

Von Interesse für die Kenntnis des Bodens ist es, zu untersuchen, von welcher Beschaffenheit unsere Schlämmprodukte sind und ob wir in diesen einen für jeden Boden gleichwertigen Maßstab für die Größe der Bodenteilchen haben. Meines Wissens ist Ramann²⁾ zuerst auf die physikalischen Grundlagen der Schlämmmethode eingegangen. Er zeigte, daß die Schlämmmethode auf dem Fall der festen Körper im Wasser begründet sei, und daß diese Fallgeschwindigkeit nicht nur vom Rauminhalt der Körner, sondern auch von ihrer Gestalt und von ihrem spezifischen Gewicht abhängt.

„Aus den angeführten Gründen ergibt sich,“ sagt Ramann, „daß durch Schlämoperationen erhaltene Bodenteile nicht völlig gleicher Größe sein können. Man bezeichnet daher die in gleicher Zeit niedergefallenen Bestandteile, bzw. solche, die von gleichstarken Wasserströmen weggeführt werden, als von *gleichem hydraulischem Werte* und bezieht ihre Größe auf Quarkugeln entsprechenden Durchmessers.“

Ramann hat sich frei gemacht von der alten Anschauung, daß sich die Bodenteilchen beim Schlämmen nach ihrer „Größe“ sortieren lassen, hat aber in dem letzten Satze leider doch wieder eine Verbindung mit jener Anschauung herzustellen versucht.

¹⁾ A. Emmerling, Agrik.-chem. Untersuchungen. Festschrift. Kiel 1895, S. 170—174. — H. Puchner, Ein Versuch zum Vergleich der Resultate verschiedener mechanischer Bodenanalysen; Landw. Versuchs-Stationen LVI, 1902, Seite 141.

²⁾ E. Ramann, Forstliche Bodenkunde und Standortlehre. Berlin 1893, 1. Aufl., S. 48.

Auch ich habe mich früher, dank einer Anregung von Herrn Prof. Rodewald-Kiel, mit den theoretischen Grundlagen der Schlämmethode¹⁾ befaßt und sehe ich mich dazu genötigt, diese hier eingehend wiederzugeben, in der Hoffnung, so einen klaren Beweis für die Unbrauchbarkeit auch dieses Teiles der mechanischen Analyse zu erbringen.

Die Schlämmethode beruht auf dem verzögerten Fall der Körper im Wasser. — Im luftleeren Raume fallen bekanntlich alle Körper gleichschnell, und es gilt hier die Gleichung:

$$dv = g \cdot dt, \quad (1)$$

wobei v die Geschwindigkeit, t die Zeit und g die Beschleunigung ist. Nun wird aber die Bewegung in Luft, wie in Wasser, wie in irgend einem anderen Medium verlangsamt, und zwar dadurch, daß das Medium dem fallenden Körper einen Widerstand entgegensetzt, welcher von der Geschwindigkeit des Fallens abhängt.

Bei langsamen Bewegungen, mit denen wir es hier zu tun haben, trifft die einfachste Annahme zu, nämlich die, daß der Widerstand der Geschwindigkeit proportional ist. Ist nun k die Verzögerung (also eine negative Beschleunigung) bei der Geschwindigkeit 1, so ist $k \cdot v$ die Verzögerung bei der Geschwindigkeit v , und es geht somit unsere Gleichung (1) für den Fall der Körper in einem Medium in den Ausdruck

$$dv = (g - kv) \cdot dt$$

über oder, da wir die Fallzeit berechnen müssen, in

$$dt = \frac{dv}{g - kv},$$

woraus sich durch Integration ergibt:

$$t = -\frac{1}{k} \cdot \log(g - k \cdot v) + C. \quad (2)$$

Die Integrationskonstante C läßt sich hier derart eliminieren, daß wir für den Anfang der Bewegung die Zeit (t) und die Geschwindigkeit (v) gleich null setzen. Es folgt dann:

$$0 = -\frac{1}{k} \cdot \log g + C. \quad (3)$$

Subtrahieren wir diese Gleichung (3) von der oberen (2), so fällt C weg, und wir erhalten:

$$t = \frac{1}{k} \cdot \log \frac{g}{g - k \cdot v}. \quad (4)$$

Lösen wir diese Gleichung nach v hin auf, so ergibt sich für die Geschwindigkeit:

$$v = \frac{g}{k} \left(1 - \frac{1}{e^{k \cdot t}} \right).$$

¹⁾ A. Mitscherlich, Untersuchungen über die physikalischen Bodeneigenschaften; Landw. Jahrbücher 1901, S. 365 u. f.

Da in dieser Gleichung die Zeit (t) im Exponenten erscheint, so wird $\frac{1}{e^{k \cdot t}}$ bald sehr klein, so daß man es gegen 1 vernachlässigen kann. Für $t = \infty$ wird der Ausdruck:

$$v = \frac{g}{k}.$$

Da in diesem nun g eine Konstante ist, so hängt die Fallgeschwindigkeit nur von der Verzögerung (k) ab, und wir werden diese somit eingehender zu prüfen haben.

Verzögert wird der freie Fall, wie dies auch Ramann (l. c.) anführt, durch den Widerstand, welchen das Wasser dem fallenden Körper entgegensetzt. Wir dürfen für unseren Fall vielleicht annehmen, daß das Wasser stets chemisch rein ist, und daß sich also keine Salze vielleicht aus dem Boden in demselben aufgelöst haben. Unter dieser Voraussetzung wird das Wasser in gleicher Weise bei allen Bodenarten den freien Fall der Teilchen verzögern, und wir können dasselbe somit als eine konstante Größe bei unseren weiteren Betrachtungen ausschalten.

Beim Fallen leistet nun das Wasser zunächst allen Körpern den gleichen Widerstand, sofern sie die gleiche Wassermenge verdrängen. Auf die Gewichtseinheit bezogen, stehen demnach die Widerstände im umgekehrten Verhältnis der spezifischen Gewichte, d. h. wenn wir zwei dem Volumen nach gleichgroße Bodenteilchen abschlämmen, so wird sich das spezifisch schwerere schneller absetzen. Es ist deshalb theoretisch möglich, daß wir in allen Schlämmsedimenten gleichgroße Bodenteilchen vorfinden. Es ist möglich, daß die kleineren Bodenteilchen als Schlämmprodukte zu den „größeren“ gerechnet werden müssen. Es ist möglich, daß ein Boden, welcher spezifisch schwerer ist, obwohl seine Teilchen feiner sind, doch zu den „gröbereren“ Bodenarten nach den Resultaten der Schlämmmethode zu rechnen ist, und umgekehrt. Mithin gibt die Schlämmmethode keinen für alle Bodenarten gleichbleibenden Maßstab für die „Korngröße“ der Bodenbestandteile. Ob aber die andere hier den Fall der Körper im Wasser bedingende Größe, das spezifische Gewicht der einzelnen Bodenteilchen, bei verschiedenen Bodenarten einen wesentlichen Einfluss auf unsere Vegetation und zwar gerade im gleichen Sinne wie bei der Schlämmanalyse ausübt, dafür fehlt uns zunächst jeder Anhalt.

Ferner kommt der Reibungswiderstand in Frage. Dieser findet an der Fläche des Körpers statt; es muß also die Fallgeschwindigkeit auch von der Größe der Fläche abhängen und somit bei gleichgestalteten Körpern von der Größe des Volumens. Das ist der Gesichtspunkt, von dem aus die Schlämmanalyse ursprünglich ausgegangen ist. Es ist nun aber nicht gleich, ob die Fläche die einer Kugel ist, an der die Wasserpartikel abgleiten können (Fig. 4), oder ob dieselbe eben ist (Fig. 5). Auch

treten alle Flächen naturgemäÙs nicht in gleicher Weise in Wirksamkeit, sondern immer insonderheit diejenige Fläche, welche gerade nach unten gekehrt ist. Das Teilchen (Fig. 6) soll das gleiche sein wie Fig. 5; es erleidet aber in dieser Falllage beim freien Fall eine viel geringere Verzögerung durch das Wasser. Welcher Teil des Teilchens aber gerade nach unten gekehrt ist, das hängt von der Lage des Schwerpunktes bei dem einzelnen Bodenpartikelchen ab.

Wer sich durch ein einfaches Experiment von dem EinfluÙs der verschiedenen Falllage gleichgroÙser und annähernd gleichgeformter Körper überzeugen will, der nehme zwei gleichgroÙse

Stücke desselben Seidenpapiers von einer ungefähren Größe von 15×15 cm, und stecke bei dem einen einen Reisinagel durch die Mitte, beim anderen einen gleichschweren Reisinagel durch die eine Ecke. Er wird dann schon bei einer Fallhöhe von ca. 3 m in Luft deutlich wahrnehmen können, daÙ das letztere Blatt sehr viel eher am Boden liegt, obwohl beide Blätter zur gleichen Zeit fallen gelassen wurden.

Im vorliegenden Falle ist die Lage des Schwerpunktes in beiden Fällen eine andere.

Diese Lage des Schwerpunktes kann aber auch die gleiche sein, und trotzdem können die Teilchen verschieden schnell fallen. Liegt

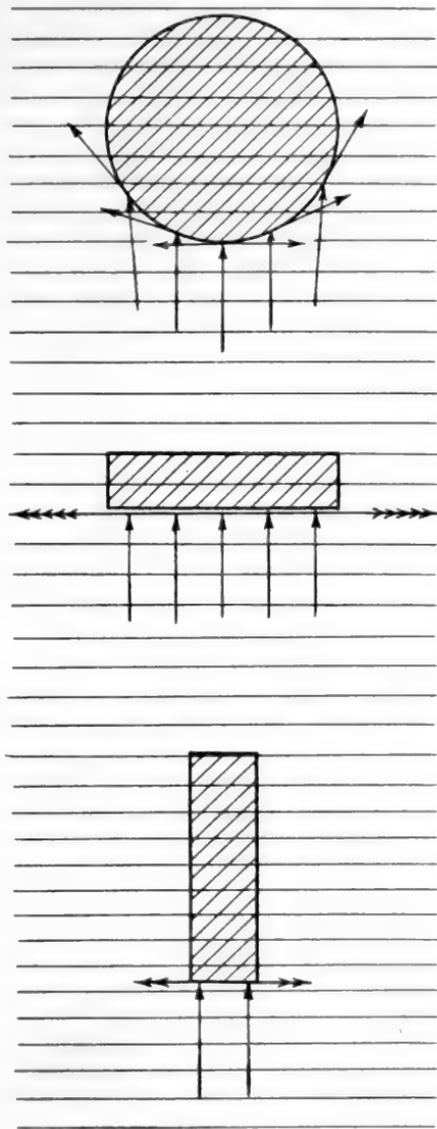


Fig. 4 bis 6. Zur Falllage der Schlämmprodukte.

nämlich der Schwerpunkt angenähert in der Mitte eines Bodenteilchens, so wird dasselbe meist in der Falllage fallen, welche es zufällig augenblicklich inne hat. Hierdurch kann aber die nach unten gekehrte Fläche, an welcher hauptsächlich der Reibungswiderstand stattfindet, bald groß, bald auch klein sein. Bei der Wiederholung des Experimentes wird man infolgedessen mit genau den gleichen Teilchen zu ganz verschiedenen Resultaten gelangen können.

Für die Schlämmanalyse ist der Einfluß der Falllage von Williams¹⁾ experimentell mittelst des Hilgardschen Schlämmapparates nachgewiesen worden. Williams will allerdings der Art des Schlämmapparates hier die Schuld beimessen; hätte er aber dieselben Versuche mit dem Schöneschen Apparate gemacht, so hätte er wahrscheinlich ganz ähnliche Resultate erhalten und somit einsehen müssen, daß der Fehler nicht in dem Apparat, sondern in der Methode lag. Da der Hilgardsche Apparat einer der anerkannt besten Schlämmapparate ist, so dürfte es von Interesse sein, die Resultate hier wiederzugeben.

Untersucht wurden zwei Proben (*a* und *b*) desselben Kaolins. Die verschiedenen Schlämmpunkte von jeder einzelnen der beiden Proben wurden nach der ersten Analyse (1) wieder zusammengemischt und dann von neuem durch Schlämzung in die verschiedenen „Korngrößen“ zerlegt (2).

Analyse	a		b	
	1	2	1	2
Schlamm: < 0,0015 mm	35,86	43,18	41,95	42,29
Staub: 0,0015—0,005 mm	43,79	24,43	32,81	27,65
0,005—0,01 mm	6,42	24,02	9,43	13,08
0,01—0,25 mm	14,42	9,37	15,51	17,15
> 0,25 mm	0,04	0,04	0,22	0,24
Summa:	100,53	101,04	99,92	100,41

Da in allen Fällen der Versuch mit gleicher Wasserstromgeschwindigkeit und auch sonst in genau der gleichen Weise durchgeführt wurde, so können diese großen Differenzen meines Erachtens nur in der verschiedenen Falllage der einzelnen Bodenteilchen resp. in der verschiedenen Fläche, welche sie gerade dem strömenden Wasser entgegengesetzten, begründet sein.

Bei kugelförmigen Teilchen allein ist die nach unten gekehrte Fläche stets die gleiche. Nur wenn der Boden demnach aus lauter kugelförmigen Teilchen bestände, welche stets bei einem und demselben sowohl wie auch bei allen Bodenarten das gleiche spezifische Gewicht hätten, nur in diesem einzigen Falle könnte man mittelst der Schlämzmethode die quantitativen

¹⁾ W. R. Williams, Untersuchungen über die mechanische Bodenanalyse; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 18, S. 282.

Mengenverhältnisse der den Boden zusammensetzenden gröberen und feineren Bestandteile feststellen, nur in dem Falle also kann die Schlämmethode die Korngröße der Bodenbestandteile bestimmen. *Die Schlämmethode ist aber, da dieser Fall in Wirklichkeit nicht zutrifft, somit für die Bestimmung der „Korngröße“ der Bodenbestandteile unbrauchbar.*

Hierfür noch einige Beobachtungsergebnisse von Bagger,¹⁾ welche jedoch, da es schwer ist, mikroskopisch einen mittleren Durchmesser eines Schlämmproduktes festzustellen, nur angenäherte Werte darstellen.

Bei gleicher Art zu schlämmen hatten die Körner verschiedener Mineralien die folgenden Durchmesser in Millimeter:

	Spez. Gewicht	Maximum	Minimum	Mittel
Quarz	2,63	0,01	0,003	0,0066
Orthoklas	2,58	0,01	0,002	0,006
Kaolin	2,45	0,008	0,0009	0,003
Kreide	2,45	0,005	0,0003	0,001

Diese großen Unterschiede sind teilweise auf das verschiedene spezifische Gewicht, teilweise und vornehmlich aber auf die verschiedene Gestalt der Teilchen bei den verschiedenen Mineralien zurückzuführen. — Bagger will den Befund durch die „Kohäsionsverschiedenheit“ der verschiedenen Mineralien erklären. Ich vermute, er meint damit nichts anderes als das mehr oder weniger gelockerte Gefüge, d. i. die Gestalt der festen Teilchen, da die Kohäsion derselben, soweit dies durch das Wasser möglich ist, durch längeres Kochen vor dem Schlämmen aufgehoben wurde; deshalb möchte ich den Ausdruck „Kohäsionsverschiedenheit“ zum mindesten als unzweckmäßig verwerfen.

Ramann schlägt (l. c.) vor, statt den „Wert nach der Korngröße“ den „hydraulischen Wert“ des Bodens anzugeben. Ich halte es jedoch nicht für möglich, festzustellen, was der hydraulische Wert des Bodens für die Pflanzenerträge, d. h. praktisch, für ein Wert ist. Denn abgesehen davon, daß derselbe, wie wir eben sahen, keine konstante, also auch keine spezifische Größe des Bodens ist, vermag man sich doch wohl keine Vorstellung davon zu machen, welchen Einfluß die Lage des Schwerpunktes in einem Bodenpartikelchen z. B. auf die Pflanze ausüben kann, und warum ein feineres, spezifisch schweres Bodenteilchen gerade ungünstiger auf die Pflanzenerträge einwirken soll als ein größeres, welches spezifisch leichter ist, usw.

Wir haben im vorhergehenden gesehen, daß die mechanische Analyse uns keinen Maßstab für die Korngröße der einzelnen Bodenteilchen ab-

¹⁾ W. Bagger, Die Bedeutung gewisser physikalischer Eigenschaften des Bodens und bodenbildender Mineralien für die Pflanzenkultur. Inaug.-Diss. Königsberg i. Pr. 1902, S. 22—23.

geben kann. Dennoch möchte ich hier noch auf die Eigenart des mittelst der mechanischen Analyse erhaltenen Resultates hinweisen. Von vornherein dürfte die Annahme berechtigt sein, daß es im Boden Teilchen der verschiedensten Korngrößen gibt. Die Grenzen, welche für die einzelnen Kornsortimente gewählt wurden, sind demnach ganz willkürliche. Man könnte unzählige Kornsortimente in dieser Weise bilden. Nehmen wir aber diese Grenzen als durch die willkürlich gewählte Art unseres Spülapparates gefundene an, so bleibt jetzt zu erörtern, welchen Wert für die Pflanze die einzelnen Korngrößen haben. Die gesamte mechanische Analyse kennt, wenn sie vollständig durchgeführt wird, elf Größenklassen. Läßt der Praktiker seinen Boden untersuchen, so erhält er also elf Resultate, ohne zu wissen, was er mit denselben anfangen soll. Die Frage, warum der eine Boden mit elf Resultaten besser ist als ein anderer mit seinen elf Resultaten, wird der Theoretiker meist nur dahin beantwortet haben: „weil er mehr feinste Teilchen enthält“. Hierzu aber bedurfte es doch wahrlich nicht dieser großen Differenzierung, die auch teilweise (vergl. Williams, l. c.) noch nicht für ausreichend gehalten wird; da leistet doch der einfache Kühnsche Schlämmszylinder oder auch die Schlösingsche mechanisch-chemische Analyse meines Erachtens die gleichen oder bessere Dienste!

Wollen wir die Analysenresultate dieser mühsam gemachten Untersuchungen bewerten, so werden wir Wertzahlen oder Punkte einsetzen müssen, die aber auch wieder willkürlich, d. h. subjektiv gewählt werden, denn wir wissen bislang nicht, welchen Wert das einzelne Kornsortiment für die Pflanze besitzt. Hätten wir also wirklich exakte Resultate mit Hilfe der mechanischen Analyse erzielt, so würde dann hierdurch ihr Wert herabgedrückt werden! Es ist uns leider nur möglich, zwei Größen auf einmal miteinander zu vergleichen. Müssen wir mehrere miteinander vergleichen, so werden wir darauf sehen müssen, daß wir nach Möglichkeit Beziehungen derselben zueinander aufsuchen, damit wir sie so auf zwei Größen reduzieren können. Bestehen keine exakten Beziehungen, so beginnt die subjektive Schätzung und die Analysenresultate verlieren an Wert.

Diese Betrachtungen führen uns zu der Erkenntnis, daß man, wenn irgend möglich, danach trachten muß, durch eine Untersuchungsmethode nur *ein* Resultat zu erhalten. *Ein* Resultat aber würden wir in unserem Falle nur dann erhalten können, falls wir die „mittlere Korngröße“ eines Bodens feststellen könnten.

Was die spezifische Korngröße der festen Bodenteilchen verschiedener Bodenarten anbetrifft, so sind wir durch die vorstehenden Betrachtungen zu dem Resultat gekommen, daß wir bislang keine Methode besitzen, dieselbe festzustellen. Einen Einfluß auf die Pflanzenerträge scheint dieselbe nach den Wollnyschen Vegetationsversuchen zu besitzen.

Anmerkung. Neuerdings versucht nach einem auf der Naturforscherversammlung in Breslau (1904) von A. Emmerling-Kiel gehaltenen Vortrage F. Sieden die alte Schlämmanalyse von neuem ins Leben zu rufen. Seine Versuchsanstellung ist die folgende: Zunächst wird der Humus aus dem Boden durch Oxydation mittelst Kaliumbichromat und Schwefelsäure entfernt. Dann wird der Boden in einen Schlämmsylinder übergeführt und hier mit einem mit Farbstoff¹⁾ (Malachitgrün) versehenen Wasser übergossen und aufgeschlämmt. Hierdurch werden die sich oben absetzenden Tonsubstanzen stark gefärbt, während der sich darunter lagernde Sand fast farblos bleibt. Auf diese Weise kann man direkt am Schlämmsylinder den volumprozentischen Gehalt des Bodens an Sand und Ton ablesen. Für die Unterschiede in den verschiedenen Tonarten, welche sich in der Praxis sehr bemerkbar machen, kann diese Analyse keinen Anhalt geben. Ihr Wert beruht vielleicht in einer einfachen Methode zur Bestimmung des Sandgehaltes des Bodens. Aber auch hierin ist sie der früher wiedergegebenen Methode unterlegen, da sie diese Bestimmung nur volumetrisch gestattet, wobei die zufällige Lagerung der festen Teilchen Fehler bedingen. Spült man aber die gefärbten Teilchen aus, und bestimmt man dann die Gewichtsprocente des Sandes, so ist die Methode genau die gleiche wie die bei der Sandbestimmung angegebene, nur dafs statt des Indikators, welchen man dort an dem Kratzen des Glasstabes im Becherglase für den Sand hat, der Farbstoffindikator für die abzuschlämmenden Bodenteilchen tritt, was meines Erachtens keinen irgendwie beachtenswerten Fortschritt bedeutet.

§ 11. Die Bodenoberfläche.

Versuche, die Bodenoberfläche zu bestimmen, das ist die Summe aller Oberflächen der einzelnen festen Bodenpartikelchen oder die dieser identische Oberfläche des Hohlraumvolumens, sind zuerst vor acht Jahren vom Verfasser ausgeführt worden. Sie basieren auf den theoretischen Vorarbeiten von H. Rodewald-Kiel. Die Bodenoberfläche, bezogen auf die Gewichtseinheit oder auf die Volumeneinheit der festen Bodenteilchen, ist eine für den einzelnen Boden typische, mithin eine spezifische Gröfse. Sie ist abhängig von der Korngröfse, welche die vorbesprochenen Methoden zu bestimmen suchten, und von der Gestalt der festen Bodenteilchen; denn je gröfser die Teilchen sind, um so geringer muß die Bodenoberfläche werden, je mehr die Gestalt der Bodenteilchen von derjenigen der Kugel abweicht, um so gröfser wird sie. Es ist so gewissermaßen in der Bodenoberfläche auch die Korngröfse mit enthalten und ferner auch die Gestalt der Bodenteilchen, welche uns eine Korngröfßenbestimmung mit Hilfe der mechanischen Analyse unmöglich machte.

¹⁾ Vergl. auch B. Sjollema, Anwendung von Farbstoffen bei Bodenuntersuchungen; Journal für Landwirtschaft 1905, Bd. 53, S. 67 u. f., und derselbe, Die Isolierung der Kolloidsubstanzen des Bodens; ebenda Bd. 53, S. 70 u. f.

Bei einfach geformten Körpern ist der Zusammenhang zwischen diesen drei Größen sehr einfach, z. B.:

<i>Gegeben:</i>		<i>Gesucht:</i>
Volumen	und	Gestalt
a^3		Würfel
$\frac{4}{3}r^3\pi$		Kugel
$r^2\pi \cdot h$		Zylinder
		Oberfläche
		$6a^2$
		$4r^2\pi$
		$2r\pi \cdot h.$

Dennoch ist die Gestalt nicht immer durch die Größe des Volumens und die Größe der Oberfläche gegeben. Aus einem Würfel a^3 seien z. B. 2 Würfelvolumina von $(\frac{1}{4}a)^3$ herausgeschnitten. Das Volumen ist jetzt $\frac{31}{32} \cdot a^3$, die Oberfläche sei $6a^2$; über die Gestalt ist in dem Falle noch nichts be-

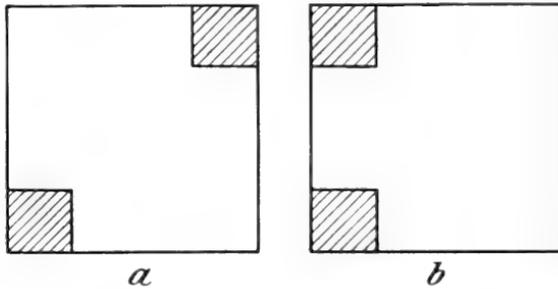


Fig. 7. Zu den Beziehungen zwischen Volumen, Gestalt und Oberfläche.

kannt, sie kann z. B. ähnlich wie Fig. 7 a, oder wie Fig. 7 b, oder auch noch anders sein.

Man kann sich ferner einen Würfel und eine Kugel von gleichem Volumen vorstellen. Ist die Oberfläche der Kugel rau, so kann dieselbe auch genau die gleiche Größe wie die Würfeloberfläche haben. Es ist somit auch dann die Form des festen Körpers eine andere, wenn auch Volumen und Oberfläche in jedem Falle gleichgroß sind. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Größe der festen Teilchen, ihrer Gestalt und der Größe ihrer Oberfläche existiert demnach nur bei regelmäßigen Körpern, mit denen wir es im Boden nicht zu tun haben. Eine gewisse Beziehung kann jedoch auch zwischen diesen Größen beim Boden bestehen; so wird z. B., wenn alle Teilchen angenähert gleiche Form und gleichartig rauhe Oberfläche haben, die Oberfläche um so größer sein, je feiner die Bodenpartikelchen sind. — Experimentell dürfte sich ein Nachweis hierfür wohl schwer erbringen lassen.

Die Bodenoberfläche oder eine ihr proportionale Gröfse läfst sich nach zwei Methoden bestimmen, nämlich einmal durch die Bestimmung der Benetzungswärme und ferner durch die Bestimmung der Hygroskopizität.

a) Die Methode der Bestimmung der Benetzungswärme.

Wird ganz trockener Boden mit Wasser benetzt, so wird eine Wärme frei, die sog. Benetzungswärme. Diese ist abhängig einmal von der spezifischen Adhäsionskonstanten der festen Bodenteilchen zum Wasser und ferner von der Gröfse der benetzten Oberfläche des Bodens. Sie wird mit Hilfe des Eiskalorimeters bestimmt.¹⁾

α) Vorbereitung des Eiskalorimeters (Fig. 8).

In eine Tonne mit Eis (Fig. 8, a) wird ein Zinkzylinder eingestellt, der bis obenhin mit destilliertem Wasser und geschabtem Eis resp. Schnee (b) angefüllt ist. Das Eis in der Tonne, welches in ungefähr walnufsgrofse Stücke zerkleinert ist, muß durch Einstampfen und Nüchfüllen möglichst in gleicher Höhe gehalten werden, so dafs man von oben den Zinkzylinder nicht sehen kann. Das abschmelzende Eiswasser ist durch einen Hahn abzulassen.

Mit der Zeit bildet sich im Zinkzylinder am Zink ein Eismantel, welcher eine sehr gleichbleibende Temperatur und mithin ein sehr sicheres Arbeiten verbürgt.

Das Eiskalorimeter nach Bunsen²⁾ (Fig. 8, c, d) besteht aus einem Reagenzrohr d, welches in ein weites, unten offenes Rohr eingeschmolzen ist. Die untere Öffnung des weiten Rohres läuft in ein enges Rohr aus, welches nach oben zurückgebogen ist. Für die Bodenuntersuchungen sind Eiskalorimeter von besonderer Gröfse erforderlich. Ich wählte zur Anfertigung derselben Glasrohre von 4 resp. 8 cm Durchmesser.³⁾

Das Prinzip des Eiskalorimeters ist das folgende: Der Hohlraum zwischen den beiden Glasröhren wird mit luftfreiem, destilliertem Wasser angefüllt und dann unten mit Quecksilber gegen die atmosphärische Luft verschlossen. Dies Wasser wird zum Gefrieren gebracht, so dafs sich um das enge Rohr ein Eismantel (e) bildet. Bringt man nun in das innere Rohr Wärme hinein, so teilt sich diese dem Eismantel mit. Da dem-

¹⁾ A. Mitscherlich, Beurteilung der physikalischen Eigenschaften des Ackerbodens mit Hilfe seiner Benetzungswärme. Inaug.-Diss. Kiel 1898. Vergl. auch Journ. f. Landw. 1898.

²⁾ R. Bunsen, Kalorimetrische Untersuchungen; Ann. d. Physik und Chemie Bd. 141, 1870, S. 1 u. f.

³⁾ Die Anfertigung der erforderlichen Apparate für die Bestimmung der Benetzungswärme hat die Firma Franz Hugershoff, Leipzig, Carolinenstr. übernommen.

entsprechend Eis schmilzt, so wird hierdurch das von (Wasser + Eis) eingenommene Volumen geringer und die Größe dieser Volumenverringeringung bietet uns somit ein Maß für die zugeführten Wärmemengen.

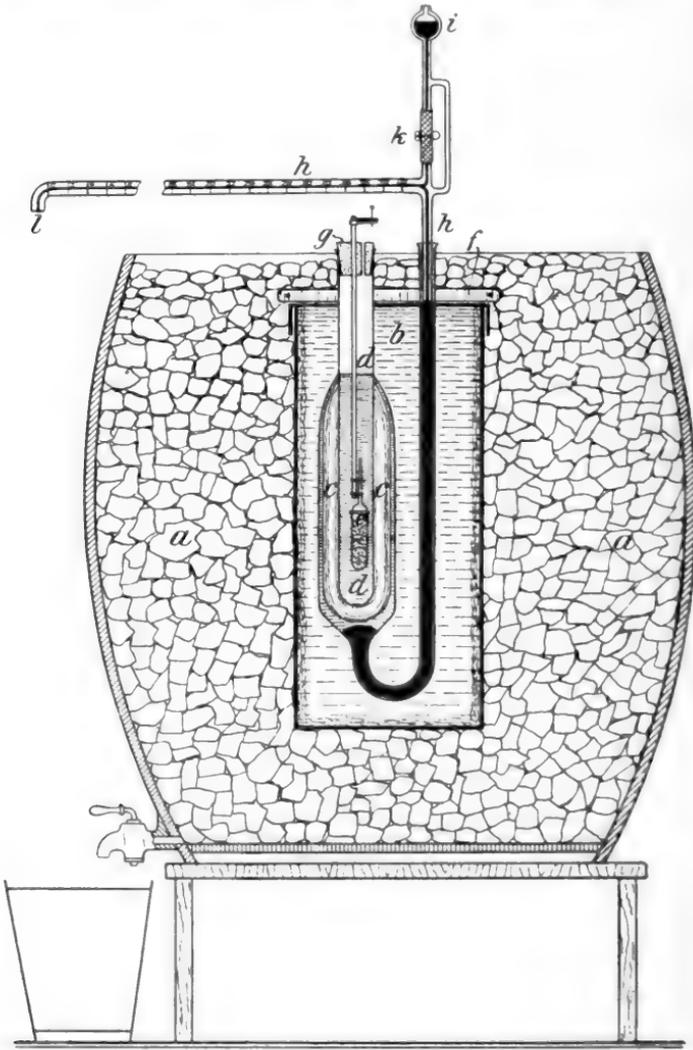


Fig. 8. Eiskalorimeter ($\frac{1}{10}$ natürl. Größe).

Das Eiskalorimeter wird nun in folgender Weise zur Wärmemessung vorbereitet: Das Mantelgefäß wird zunächst durch den offenen Schenkel zur guten Hälfte mit destilliertem Wasser gefüllt. Man dreht alsdann

das Kalorimeter so um, daß die Biegung des freien Schenkels nach oben kommt und dieser sich oberhalb des Kalorimeters befindet. In die Öffnung des Schenkels setzt man mittelst Kautschukstopfens ein Knierohr ein, welches unten in ein großes, mit destilliertem Wasser gefülltes Becherglas eintaucht. Man umgibt zweckmäßig das Kalorimeter sodann mit einem Drahtnetz und bringt darauf das Wasser in dem Kalorimeter und in dem vorgelegten Becherglas zum Sieden. Beim Erwärmen des Kalorimeters darf man das Glas nur so weit erhitzen, als die Glaswand mit Wasser bedeckt ist. Nachdem das Wasser eine Zeitlang im Kalorimeter gekocht hat, wird es erforderlich sein, neues Wasser nachzufüllen. Dies geschieht durch Wegnehmen der Flamme. Der im Kalorimeter entwickelte Wasserdampf kondensiert sich alsbald, und es steigt nun dementsprechend Wasser aus dem vorgelegten Becherglas zurück. Das Becherglas ist dabei möglichst voll zu halten, was man dadurch erreicht, daß man gleichzeitig in anderen Behältern noch destilliertes Wasser auskocht. Wenn das Wasser im Kalorimeter drei Stunden gut gekocht hat, ist es luftfrei. Man nimmt alsdann die Flamme darunter ganz weg, und läßt das Instrument sich mit dem vorgelegten Wasser anfüllen. Die letzte Luftblase wird vorsichtig durch den freien Schenkel durch Neigen herausgelassen und sodann gleich Quecksilber, welches vorher auf beinahe 100° C. erwärmt war, in das Schenkelrohr eingegossen. Hierdurch wird das luftfreie Wasser von der atmosphärischen Luft abgeschlossen. Da mit dem Erkalten des Wassers das Quecksilber eingesaugt wird, muß man solches rechtzeitig nachfüllen. Durch Neigen des Kalorimeters läßt man dann noch weitere Quecksilbermengen eintreten.

Ist das Instrument erkaltet, so kann man an das Gefrierenlassen des Eismantels gehen. Hierzu füllt man das innere Gefäß (*d*) mit Schnee oder geschabtem Eis an und übergießt dies sodann mit roher konzentrierter Salzsäure, Alkohol oder dergl. Diese Kältemischung darf aber nicht höher als ca. $\frac{1}{2}$ cm unterhalb der Einschmelzstelle des Innenrohres stehen. Während der ganzen Zeit, wo man die Kältemischung im Kalorimeter hat, ist diese gut umzurühren, um einen möglichst gleichmäßig starken Eismantel zu erzielen. Die Einschmelzstelle ist wiederholt durch Umlegen der Hand zu erwärmen, damit an dieser nicht der Eismantel bis an das Außengefäß heranwächst und dieses sprengt. Hat man $\frac{1}{3}$ — $\frac{2}{3}$ der im Kalorimeter befindlichen Wassermenge gefrieren lassen, so nimmt man die Kältemischung heraus, spült den Innenraum mit Wasser von 0° aus und trocknet ihn eventuell mit Watte nach. Der Hals des Instrumentes wird jetzt in den Deckel des Zinkzylinders von unten eingesteckt, dann oberhalb des Deckels mit einem Streifen Tuch umwickelt und in einer vorher angequollenen Holzklammer (*f*) befestigt. Die Holzklammer liegt direkt auf dem Deckel des Zinkzylinders auf. Alsdann wird das Kalorimeter in den Zinkzylinder

eingehängt. Der Innenraum wird jetzt durch einen doppelt durchbohrten Kork (*g*) verschlossen und in den freien Schenkel, der bis obenhin mit Quecksilber angefüllt ist, die Kapillare (*h*),¹⁾ welche man unten zweckmäßsig mit gelbem Seidenpapier umwickelt, luftdicht eingelassen. Oberhalb der Einlaßstelle der Kapillare befindet sich ein fest mit derselben verbundenes Quecksilbergefaß (*i*), von welchem aus man durch einen mit einem Quetschhahn versehenen Gummischlauch (*k*) bequem die Kapillare füllen kann. Es ist zunächst zweckmäßsig, das Ende der Kapillare (*l*) zu schließen und den Quetschhahn so lange offen zu lassen, bis man Beobachtungen anstellen will. Die Kapillare selbst trägt eine Zentimeter-skala, welche nach Gramm Quecksilber resp. nach Kalorien Benetzungswärme geeicht ist. Die 40 cm lange Skala faßt ungefähr 3 g Quecksilber.

Man läßt die Kapillare bis an ihre Biegungsstelle in den freien Schenkel des Kalorimeters ein und führt sie dicht vor dem Hauptrohr vorbei. In der Fig. 8 ist die Kapillare der besseren Übersicht wegen darüber hinweggehend gezeichnet, was praktisch nicht möglich ist, da man in das Hauptrohr des Kalorimeters die Bodenproben einbringen muß.

Zwei Tage nach dem Anfrierenlassen kann man mit den Beobachtungen beginnen. Man stellt zunächst die Quecksilberfäden in der Kapillare auf ca. 20 cm ein, was nach Entfernung des unteren Verschlusses durch Öffnen des Quetschhahnes geschieht, und beobachtet sodann den „Gang“ des Instrumentes. Es hat sich nämlich gezeigt, daß sich der Eismantel im Kalorimeter trotz aller Vorsichtsmaßregeln nicht konstant hält, sondern daß dauernd ein Abschmelzen oder Anfrieren bei demselben stattfindet. Hierdurch werden dauernd Quecksilbermengen eingesaugt resp. ausgestoßen. Diese Quecksilbermengen in der Zeiteinheit (Stunde) resp. die denselben entsprechenden Kalorien werden nach Rodewald²⁾ als „Gang“ des Instrumentes bezeichnet. Dieser Gang hält sich in der Regel recht konstant. Da es aber stets wünschenswert ist, ihn möglichst klein zu gestalten, weil er dann nicht nur am konstantesten ist, sondern auch möglichst geringen Eisverlust verursacht, so ist es eventuell zweckmäßsig, in dem Zinkzylinder eine schwache Kältemischung zu erzeugen. Nach meinen Beobachtungen bewirkt so z. B. ein Kubikzentimeter eines 96⁰/₁₀igen Alkohols auf 15 Liter Eiswasser eine Gangverschiebung von — 0,1800 g Quecksilber.³⁾ Ist der Gang gut, so dürfte es bei Serienbeobachtungen genügen, ihn während der Nachtstunden zu beobachten, indem man abends und morgens die Ablesung macht.

¹⁾ A. Mitscherlich, Zur Methodik der Bestimmung der Benetzungswärme (zweite Mitteilung); Landw. Jahrb. 1902, S. 577.

²⁾ H. Rodewald, Über die Quellung der Stärke. Kiel 1896, S. 25.

³⁾ A. Mitscherlich, Zur Methodik der Bestimmung der Benetzungswärme des Ackerbodens (erste Mitteilung); Journ. f. Landw. 1900, S. 79.

β) Die Vorbereitung der Bodenprobe.

Eine beliebige Menge Boden, ca. 30—50 g, bei Moorboden 5—10 g, bei strengem Tonboden 10—20 g, wird nach dem von mir angegebenen Trockenverfahren (§ 5, a) getrocknet. Nachdem das den trockenen Boden enthaltende Schälchen mit dem aufgeschliffenen Deckel bedeckt und aus dem Exsikkator herausgenommen ist, wird es mit einer beiderseits plangeschliffenen und in der Mitte durchbrochenen Glasscheibe bedeckt. Über das Loch in der Mitte wird sodann ein vorher mit einer ebenen Glasscheibe gewogenes Benetzungsgläschen (Fig. 9, a) gestülpt, in welches sodann der trockene Boden durch Umdrehen eingefüllt wird. Das Benetzungsgläschen mit dem Boden wird sodann wieder mit der zugehörigen Glasscheibe schnell bedeckt und darauf das Gewicht des Bodens bis auf ein Zentigramm genau festgestellt. Jetzt wird der am unteren Rande gut eingefettete Benetzungsdeckel (Fig. 8, b) aufgesetzt und das Gläschen gegen eine mit konzentrierter Schwefelsäure oder Phosphorpentoxyd beschickte und gut evakuierte Glocke vorsichtig evakuiert; alsdann schmilzt man das Glasrohr des Deckels an der ausgezogenen Stelle (c) mittelst Lötrohres zu und schneidet es ca. 2 cm vom Ende (d) mittelst eines Glasmessers an.

Es wird dann das Benetzungsgläschen mittelst Kupferdrahtes an der Rodewaldschen Hebelvorrichtung befestigt. Diese (Fig. 9, e) besteht aus zwei ineinander geschobenen und so ineinander drehbaren Glasröhren, deren jede oben einen Hebel und unten eine Öse trägt. Werden die Hebel gegeneinander verschoben, so verschieben sich unten gleichzeitig auch die Ösen gegeneinander. Es wird hier nun die Spitze des Benetzungsgläschen durch die Ösen geführt, so daß der Anschnitt d zwischen beide Ösen kommt, und so das Gläschen mittelst Kupferdrahtes an der Hebelvorrichtung befestigt. Diese wird dann, nachdem das Gläschen zuvor möglichst auf 0° C. abgekühlt ist, oben durch einen Spalt in die eine Durchbohrung des Kalorimeterkorkes eingeklemmt und das Ganze ins Kalorimeter eingelassen. Darauf ist der Quecksilberfaden ungefähr auf null einzustellen.

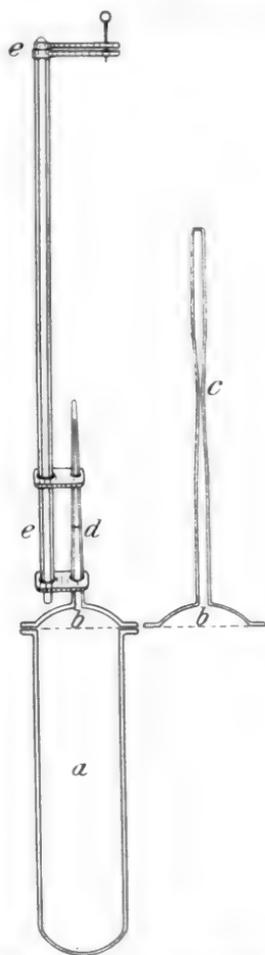


Fig. 9. Benetzungsgläschen
($\frac{1}{2}$ natürl. Größe).

γ) Die Bestimmung der Benetzungswärme.

Nach einer Stunde hat sich im Eiskalorimeter der Temperatureausgleich vollzogen. Es wird jetzt der Stand des Quecksilberfadens in der Kapillare abgelesen, und sodann werden die Hebel der Rodewaldschen Hebelvorrichtung, welche aus dem Kalorimeterkorken herausstehen, gegeneinander verschoben. Hierdurch bricht man die Spitze des Deckels des Benetzungsgläschens ab, und es vollzieht sich dann durch das Einströmen des Wassers in den evakuierten Raum die Benetzung des Bodens. Durch diese wird Wärme frei. Es schmilzt Eis, wodurch der Quecksilberfaden eingesaugt wird. Nach einer weiteren Stunde hat wiederum Temperatureausgleich im Kalorimeter stattgefunden. Es wird sodann der Stand des Quecksilberfadens von neuem abgelesen. Die Differenz dieser gegen die erste Ablesung ergibt die Zehntel Millimeter Quecksilberfaden resp. die durch die Eichung bekannte Gewichtsmenge Quecksilber, welche man, da nach Schuller und Wartha¹⁾ eine Kalorie 0,01544 g Quecksilber entspricht, in Kalorien umrechnen kann. Bei größeren Serienuntersuchungen ist es natürlich vorzuziehen, gleich die in Zentimeter eingeteilte Kapillare nach Kalorien zu eichen, da man dadurch die ständigen Reduktionen erspart.

Von der gefundenen Quecksilbermenge ist noch diejenige in Abzug zu bringen, welche der Arbeit entspricht, die durch den Luftdruck beim Einströmen des Wassers in die evakuierten Gläschen geleistet wird. Die diesbezügliche Korrektion beträgt

$$k = \frac{(76 - x) \cdot 13,6 \cdot v \cdot 0,01544}{42400},$$

worin x gleich dem in cm Quecksilber ausgedrückten, in den evakuierten Gläschen herrschenden Drucke und v gleich dem in den Gläschen unausgefüllt bleibenden Volumen in ccm ist. Für die meisten Fälle dürfte eine mittlere Korrektion von 0,00035 g Hg pro ccm für die Genauigkeit der Resultate ausreichend sein.²⁾

Außerdem ist die Korrektion für den Gang des Kalorimeters noch anzubringen.

Die nach Berücksichtigung dieser Korrektionen gefundenen Kalorien werden durch die angewandte Bodenmenge dividiert, und man erhält sodann die Benetzungswärme von 1 g Boden.

b) Die Methode der Bestimmung der Hygrokopizität.³⁾

Unter Hygrokopizität eines Bodens versteht man diejenige Wassermenge, welche ein Boden enthält, wenn seine Oberfläche gerade mit einer

¹⁾ A. Schuller und V. Wartha, Kalorimetrische Untersuchungen; Ann. d. Physik, N. F. Bd. 2, S. 364 u. f.

²⁾ A. Mitscherlich, l. c.; Journ. für Landw. 1900, S. 80.

³⁾ H. Rodewald und A. Mitscherlich, Die Bestimmung der Hygrokopizität; Landw. Versuchs-Stationen 1903, S. 433 u. f.

Moleküllschicht Wasser benetzt ist. Es ist die Hygroskopizität mithin auch eine der Bodenoberfläche proportionale Größe. Sie wird in Gewichtsprozenten des Bodens ausgedrückt.

Die Methode der Bestimmung der Hygroskopizität dürfte mit die einfachste Art der physikalischen Bodenuntersuchung sein, welche wir besitzen.

30—50 g Boden, bei Moorboden genügen 5—10 g, werden nach der oben angegebenen Methode (§ 5, a) getrocknet und sodann in der mit aufgeschliffenem Deckel versehenen Schale gewogen. Da das Gewicht der leeren Schale inkl. Deckel bekannt ist, so ergibt sich hieraus das Gewicht des angewandten trockenen Bodens. Die flache Schale (Fig. 10, *h*) mit dem trockenen Boden (Fig. 10, *i*) wird sodann in ein exsikkatorähnliches Gefäß

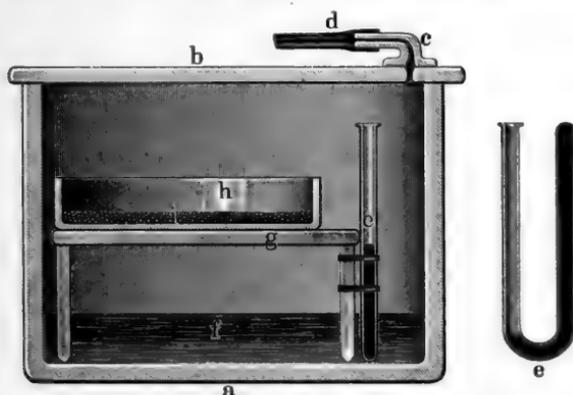


Fig. 10. Hygroskopizitäts-Apparat.

(Fig. 10, *a—d*), dessen Boden mit 100 ccm ca. 10 %iger Schwefelsäure (H_2SO_4) (Fig. 10, *f*) beschickt ist, auf einem Glasdreifuß (*g*) eingestellt, worauf das Gefäß mit der Wasserstrahl-Luftpumpe evakuiert wird.

An einem kleinen, in dem Gefäß befindlichen Manometer (*e*) kann man sich von dem Vorhandensein des Vakuums überzeugen. Das evakuierte Gefäß wird sodann in einen dunklen Schrank in einem möglichst geringen Temperaturschwankungen ausgesetzten Raume aufgestellt. Nach 2 bis 3 Tagen ist in das Glasgefäß langsam Luft einzulassen und sodann die Schwefelsäure durch 100 ccm einer solchen von einem *genauen* Gehalt von 10,0 % H_2SO_4 zu ersetzen. Hierauf wird das Gefäß von neuem evakuiert. Während des Auswechslens der Schwefelsäure, was zweckmäßig mittelst einer Pipette geschieht, ist die Schale mit Boden mittelst einer plangeschliffenen Glasscheibe zu verdecken. Jetzt wird der Apparat wieder in den vor Wärmestrahlungen schützenden Schrank 3 Tage lang eingestellt. Alsdann wird von neuem Luft langsam eingelassen, welche man

zweckmäÙig durch mit 10⁰/₀iger Säure beschickte vorgelegte Waschflaschen gehen läÙt. Sodann wird die Schale mit dem Boden, welche mit der zugehörigen ebenen Glasscheibe bedeckt ist, wiederum gewogen.

Die Differenz mit dem vorigen Gewicht ergibt die aufgenommene Wassermenge. Diese wird mit hundert multipliziert und durch die angewandten Gramm trocknen Bodens dividiert. Das Resultat ist die Hygroskopizität.

c) Die Theorie der Benetzungswärme und der Hygroskopizität.

Wird ganz trockener Boden mit Wasser benetzt, so wird, wie wir sahen, eine Wärme frei, die sog. Benetzungswärme. Diese entspricht der Arbeit sog. Molekularkräfte. Die feste Substanz übt auf die Wassermoleküle eine Anziehungskraft aus. Diese wird jedoch nur so lange voll zur Geltung kommen, bis die Oberfläche benetzt, d. h. mit einer Molekülschicht Wasser überzogen ist. Alsdann wird mit der gröÙeren Entfernung die Wirkung der Anziehungskraft geringer, bis sie schliesslich nach Aufnahme weiterer Wassermolekülschichten gleich null wird. Die jetzt eintretende gegenseitige Anziehungskraft der Wassermoleküle muÙ geringer sein als die Anziehung der festen Substanz zum Wasser. Wäre sie es nicht, so würde das Wasser die feste Substanz nicht benetzen können, sondern sich wie an fettigen Oberflächen tropfenartig zusammenziehen. Ist die Anziehungskraft, welche die feste Substanz auf die Wassermoleküle ausübt, aber gröÙer als die Anziehung der Wasserteilchen untereinander, so müssen wir hieraus schliessen, daÙ, wenn wir Wasser mit einer festen Substanz zusammenbringen, dies zunächst die *ganze* Oberfläche der festen Substanz mit einer Molekülschicht überziehen muÙ, ohne daÙ sich dasselbe an einer Stelle dieser Oberfläche ansammelt. Die Wärme, welche bei der Benetzung der festen Substanz mit Wasser frei wird, wird demnach zunächst abhängen von der GröÙe der benetzten Oberfläche (F) und von der spezifischen Anziehung der festen Substanz zum Wasser, d. h. von der Adhäsionskonstanten (α). Zu dieser sog. Benetzungswärme (r) tritt aber nach Rodewald¹⁾ noch eine weitere Wärme bei der Benetzung, welche dadurch entsteht, daÙ die Kohäsion einer festen Substanz durch die Wassermoleküle überwunden werden muÙ. Die hierdurch geleistete Arbeit ist somit bei einer und derselben Substanz als konstant zu setzen. Sie sei i . Wir gelangen so für die Benetzungswärme zu der Gleichung

$$\alpha F = E(r + i), \quad (1)$$

worin E das mechanische Wärmeäquivalent ist. Setzen wir ferner F für die Flächeneinheit und, ist demnach αF die ArbeitsgröÙe, welche die Flächen-

¹⁾ H. Rodewald, Über Quellungs- und Benetzungsercheinungen; Zeitschr. f. physik. Chemie XXXIII, 5, S. 593 u. f.

einheit der festen Substanz zu leisten hat, um das Wasser anzuziehen, so muß dieser Arbeit die Wärmeentwicklung proportional gehen, wenn man der Fläche nach und nach steigende Wassermengen zuführt. Bedeutet dw das Wasserelement, welches das Wärmeelement dr entbindet, so folgt daraus die Gleichung

$$c \cdot F \alpha dw = - dr E, \quad (2)$$

worin c der Proportionalitätsfaktor und E wiederum das mechanische Wärmeäquivalent ist. Das Vorzeichen der rechten Seite muß negativ sein, da die für dw freiwerdende Wärme von der gesamten Benetzungswärme zu subtrahieren ist. Durch Division (2):(1) ergibt sich dann

$$c \cdot dw = - \frac{dr}{r + i}, \quad (3)$$

die Benetzungsgleichung, welche, wenn man sie in bestimmten Grenzen integriert, wenn z. B. die Benetzungswärme r_0 dem Wassergehalte w_0 und ebenso die Benetzungswärme r_1 dem Wassergehalte w_1 entspricht, in die Form

$$c(w_1 - w_0) = \log(r_0 + i) - \log(r_1 + i) \quad (4)$$

übergeht.

Es war der Beweis zu führen, daß diese Gleichung auch für den Boden zutreffend ist; denn nur damit konnte man die Annahme, daß die Benetzungswärme eine der Oberfläche der festen Substanz proportionale Größe ist, bestätigen.

Rodewald hatte die Gleichung für die Benetzung entwickelt und auch die experimentelle Bestätigung derselben für homogenes Material, so für verschiedene Stärkearten erbracht.¹⁾ Es war nun zu untersuchen, ob das, was für einen Körper galt, auch für ein so heterogenes Gemisch, wie es der Boden ist, zutreffend sein konnte.²⁾

Nehmen wir an, unser Boden bestände aus einem Gemisch von Humus, Ton, Kalk und Sand. Jeder dieser Bodenkonstituenten habe seine eigene Adhäsionskonstante α , z. B. α_H , α_T , α_K und α_S , und jeder seine eigene Oberfläche, z. B. entsprechend F_H , F_T , F_K und F_S , so würde unsere Gleichung (1) für das Bodengemisch lauten:

$$\alpha_H \cdot F_H + \alpha_T \cdot F_T + \alpha_K \cdot F_K + \alpha_S \cdot F_S = E(r_0 + i) \quad (5)$$

und die Gleichung (2):

$$c(\alpha_H \cdot F_H + \alpha_T \cdot F_T + \alpha_K \cdot F_K + \alpha_S \cdot F_S) \cdot dw = - dr E. \quad (6)$$

Wie sich leicht übersehen läßt, gelangt man auch in diesem Falle durch Division (6):(5) zu derselben Gleichung (3) und somit durch Integration dieser Gleichung zur Gleichung (4). Theoretisch also muß auch für den Boden, wenn die Benetzungswärme der Bodenoberfläche proportional

¹⁾ H. Rodewald und A. Kattein. Über natürliche und künstliche Stärkekörner; Zeitschr. f. physik. Chemie XXXIII, S. 579 u. f.

²⁾ H. Rodewald, l. c. XXXIII, S. 603—604.

ist, diese Benetzungsgleichung gültig sein. — Bevor man zu der experimentellen Untersuchung vorgehen konnte, war es aber zunächst noch erforderlich, zu untersuchen, auf welche Weise sich die in der Benetzungsgleichung

$$c(w_1 - w_0) = \log(r_0 + i) - \log(r_1 + i) \quad (4)$$

neben den beiden Variablen w und r auftretenden Konstanten bestimmen ließen. Rodewald¹⁾ schlägt hierfür den folgenden Weg vor:

Hat man eine Reihe von Benetzungswärmen eines Bodens bei verschiedenem Wassergehalte festgestellt, und gleicht man diese Beobachtungen graphisch aus, so kann man aus ihnen drei Benetzungswärmen r_0 , r_1 und r_2 herausgreifen, welche untereinander die gleiche Wasserdifferenz aufweisen. Es ist dann:

$$w_2 - w_1 = w_1 - w_0. \quad (7)$$

Es folgt dann aus den Gleichungen

$$\log(r_0 + i) - \log(r_1 + i) = c(w_1 - w_0) \quad (4)$$

und $\log(r_1 + i) - \log(r_2 + i) = c(w_2 - w_1), \quad (8)$

da die rechten Seiten einander gleich sind, durch Subtraktion (4) — (8):

$$\log(r_0 + i) - 2 \cdot \log(r_1 + i) + \log(r_2 + i) = 0$$

oder durch Entlogarithmieren für Briggsche Logarithmen

$$\frac{(r_0 + i) \cdot (r_2 + i)}{(r_1 + i)^2} = 0.$$

Durch Auflösung dieser Gleichung erhält man dann für i :

$$i = \frac{r_1^2 - r_0 \cdot r_2}{r_0 + r_2 - 2 \cdot r_1}. \quad (9)$$

Der Proportionalitätsfaktor c ergibt sich dann, wenn i bekannt ist, direkt aus der Gleichung (4):

$$c = \frac{\log(r_0 + i) - \log(r_1 + i)}{w_1 - w_0}. \quad (10)$$

Sind nun die theoretischen Voraussetzungen richtig, besteht also eine Proportionalität zwischen der Benetzungswärme eines Bodens und seiner Oberfläche, so mußte sich die Gleichung (4) demnach experimentell auch für den Boden bestätigen lassen.²⁾

Zu diesem Zweck wurde eine größere Menge lufttrockenen Bodens, dessen Wassergehalt bekannt war, luftdicht in ein Glasgefäß eingeschlossen und dann Proben desselben teils durch Trocknen über Schwefelsäure im Exsikkator, teils durch Benetzen mittelst Wasserdampfes, d. h. Einstellen über Wasser in einem luftdicht abgeschlossenen Gefäße, auf verschiedenen

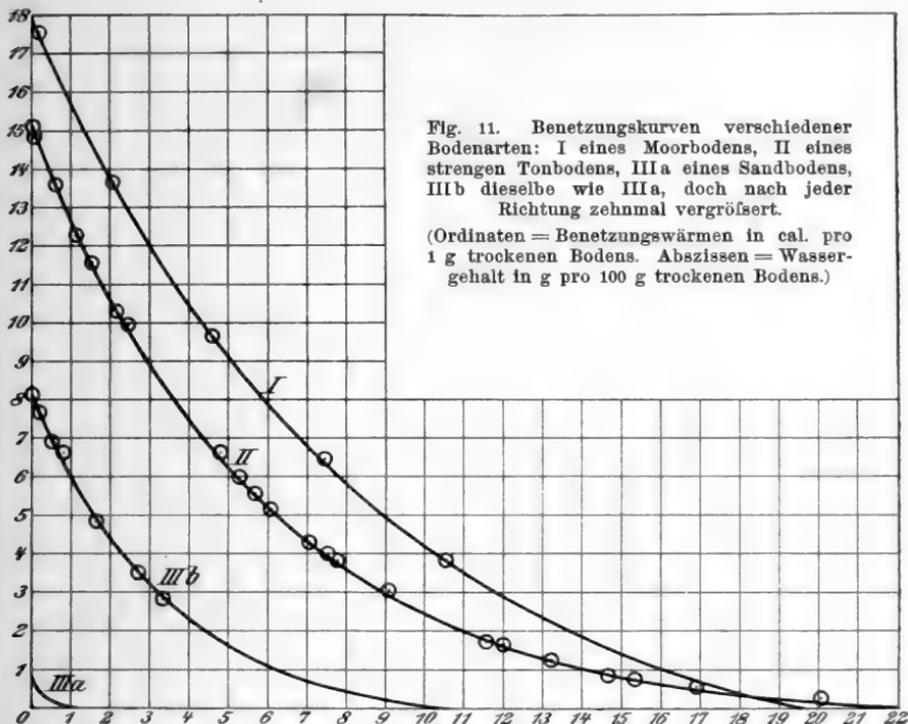
¹⁾ l. c. XXXIII, S. 595.

²⁾ A. Mitscherlich, Unters. über d. physik. Bodeneigenschaften; Landw. Jahrb. 1901, S. 380 u. f.

Wassergehalt gebracht. Die Proben wurden sodann in Benetzungsgläschen übergeführt, hier evakuiert und auf ihre Benetzungswärme hin, d. h. auf die Wärme, welche die wasserhaltige Probe bis zu ihrer vollständigen Benetzung mit Wasser noch entwickelte, untersucht.

Anbei mögen die Resultate drei verschiedener, zur Untersuchung herangezogener Bodenarten folgen:

(Siehe die Tabelle auf Seite 62.)



Die ersten beiden Spalten geben in der umstehenden Tabelle die für die drei Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalte gefundenen Benetzungswärmen an. Trägt man diese in Koordinaten ein (Fig. 11), und zwar derart, daß man die Benetzungswärme als Ordinate, den Wassergehalt des Bodens als Abszisse wählt, und verbindet man die Punkte eines und desselben Bodens nach dem Augenmaße ausgleichend durch eine Kurve, so kann man jetzt aus dieser Kurve jedesmal drei Benetzungswärmen herausgreifen, zwischen denen die gleiche Differenz in dem Wassergehalte besteht, z. B. beim Moorboden:

Bezeichnung des Bodens	Wassergehalt o/o	Benetzungswärme cal.		Abweichung	
		gefunden	berechnet	in cal.	in o/o
Moorboden:	0,16	17,51	17,50	+ 0,01	+ 0,1
	2,07	13,68	13,61	+ 0,07	+ 0,5
	4,60	9,625	9,620	+ 0,005	+ 0,1
	7,45	6,452	6,329	+ 0,123	+ 1,9
	10,54	3,845	3,799	+ 0,046	+ 1,2
Strenger Tonboden:	0,00	15,10	15,10	0,00	0,0
	0,04	14,86	14,99	- 0,13	- 0,9
	0,60	13,60	13,59	+ 0,01	+ 0,1
	1,17	12,26	12,31	- 0,05	- 0,4
	1,52	11,57	11,57	0,00	0,0
	2,16	10,29	10,34	- 0,05	- 0,5
	2,46	9,69	9,80	- 0,11	- 1,1
	4,81	6,62	6,60	+ 0,02	+ 0,3
	5,25	5,98	5,95	+ 0,03	+ 0,5
	5,69	5,57	5,62	- 0,05	- 0,9
	6,08	5,14	5,12	+ 0,02	+ 0,4
	7,05	4,29	4,28	+ 0,01	+ 0,2
	7,52	3,99	3,93	+ 0,06	+ 1,5
	7,78	3,83	3,74	+ 0,09	+ 2,4
	9,09	3,04	2,92	+ 0,12	+ 4,1
	11,58	1,76	1,78	- 0,02	- 1,1
	11,65	1,78	1,76	+ 0,02	+ 1,1
	12,00	1,67	1,63	+ 0,04	+ 2,4
	13,22	1,26	1,26	0,00	0,0
	13,22	1,25	1,26	- 0,01	- 0,8
	14,68	0,89	0,90	- 0,01	- 1,1
	15,32	0,77	0,77	0,00	0,0
	16,91	0,58	0,50	+ 0,08	+ 16,0
	20,05	0,276	0,00	+ 0,28	-
	20,08	0,238	0,00	+ 0,24	-
	20,14	0,309	0,00	+ 0,31	-
22,84	0,189	0,00	+ 0,19	-	
23,61	0,147	0,00	+ 0,15	-	
23,88	0,213	0,00	+ 0,21	-	
25,58	0,061	0,00	+ 0,06	-	
25,83	0,082	0,00	+ 0,08	-	
26,21	- 0,001	0,00	0,00	-	
Sandboden:	0,000	0,811	0,811	0,000	0,0
	0,020	0,765	0,763	+ 0,002	+ 0,3
	0,053	0,691	0,691	0,000	0,0
	0,082	0,662	0,632	+ 0,030	+ 4,7
	0,167	0,484	0,487	- 0,003	- 0,6
	0,273	0,350	0,348	+ 0,002	+ 0,6
	0,335	0,285	0,285	0,000	0,0

Beobachtung	Wassergehalt	Differenz	Benetzungswärme
1	0,0	}	17,88
2	5,0		5
3	10,0	}	4,18
			5

Aus diesen Beobachtungen läßt sich dann die Konstante i der Benetzungsgleichung nach der Gleichung (9) berechnen:

$$i = \frac{9,09^2 - 17,88 \cdot 4,18}{17,88 + 4,18 - 2 \cdot 9,09}$$

$$i = 2,05.$$

Ferner ergibt sich c nach Gleichung (10) aus den Beobachtungen 1 und 3:

$$c = \frac{\log(17,88 + 2,05) - \log(4,18 + 2,05)}{10,0 - 0,0}$$

$$c = 0,0505.$$

Demnach lautet nun die Benetzungsgleichung des Moorbodens analog Gleichung (4):

$$\log(r + 2,05) = 1,3049 - 0,0505 \cdot w;$$

hierbei setzt man für r_0 die höchste Benetzungswärme ein, d. h. die Benetzungswärme, welche beim Benetzen des vollkommen trockenen Bodens eintritt; dieselbe wurde im vorliegenden Beispiel zu 17,88 cal. berechnet. w ist dann gleich der Wasserdifferenz $w_1 - w_0$ oder, da $w_0 = 0$ ist, gleich dem momentanen Wassergehalt des Bodens, bei welchem dieser noch bei weiterer Wasserzufuhr eine Wärme r entbindet.

In der gleichen Weise erhält man für den strengen Tonboden die Benetzungsgleichung:

$$\log(r + 0,37) = 1,2541 - 0,074 \cdot w$$

und für den Sandboden:

$$\log(r + 0,04) = (0,9299 - 1) - 1,248 \cdot w.$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen läßt sich nun jeder einzelne Punkt in der Benetzungskurve berechnen. So wurden die Benetzungswärmen berechnet, welche bei den angestellten Versuchen bei dem verschiedenen experimentell festgestellten Wassergehalte des Bodens gefunden werden mußten. Die Zahlen sind in der dritten Spalte der vorstehenden Tabelle angegeben. Aus der sehr guten Übereinstimmung der gefundenen und berechneten Zahlen ergibt sich, daß in der Tat die Gesetzmäßigkeit, welche wir theoretisch ableiteten, auf den Boden zutrifft. Um dies besser zu veranschaulichen, habe ich außer den Beobachtungen bei den drei Bodenarten in Fig. 11 auch die zugehörigen Kurven eingezeichnet, nachdem ich sie in den in der folgenden Tabelle wiedergegebenen Punkten berechnet hatte. Die Zeichnung für den Sandboden ist in der Ecke in der gleichen Größe angegeben, darüber habe ich sie jedoch noch einmal, um die einzelnen Bestimmungen eintragen zu können, nach jeder Richtung hin um das Zehnfache vergrößert.

Analoge Kurven habe ich l. c. für 19 verschiedene Boden festgelegt. Wir finden überall die gleiche Gesetzmäßigkeit und können mithin den Schluß ziehen, daß unsere Voraussetzung, daß die Benetzungswärme eine der Oberfläche proportionale Größe ist, zutrifft.

Berechnete Benetzungskurven von					
Moorboden		Tonboden		Sandboden	
Wassergehalt %	Benetzungswärme cal.	Wassergehalt %	Benetzungswärme cal.	Wassergehalt %	Benetzungswärme cal.
0	17,88	0	15,10	0,0	0,811
1	15,69	1	12,68	0,1	0,598
2	13,74	2	10,63	0,2	0,439
3	12,01	3	8,91	0,3	0,319
4	10,46	4	7,46	0,4	0,230
5	9,09	5	6,23	0,5	0,162
6	7,87	6	5,20	0,6	0,112
7	6,78	7	4,32	0,7	0,074
8	5,81	8	3,59	0,8	0,045
9	4,95	9	2,97	0,9	0,024
10	4,18	10	2,45	1,0	0,008
11	3,50	11	2,00	1,064	0,000
12	2,89	12	1,63		
13	2,35	13	1,32		
14	1,86	14	1,05		
15	1,43	15	0,83		
16	1,04	16	0,64		
17	0,70	17	0,48		
18	0,40	18	0,35		
19	0,13	19	0,24		
19,56	0,00	20	0,14		
		21	0,06		
		21,91	0,00		

Des weiteren aber müßte man folgern, daß, wenn die Benetzungswärme des Bodens gleich null wird, die Bodenoberfläche gerade mit so viel Molekülschichten Wasser bedeckt ist, daß der Boden keine Anziehung auf weitere Wassermoleküle mehr ausübt, mithin nur hygroskopisches

Wasser enthält. Experimentell läßt sich der Punkt, wo gerade keine Benetzungswärme mehr auftritt, nicht bestimmen. Es zeigt sich vielmehr, daß praktisch auch dann noch eine Wärmetönung gefunden wird, wenn die Benetzungswärme theoretisch gleich null sein muß. Diese Erscheinungen, welche am deutlichsten bei dem strengen Tonboden (vergl. die Tabelle auf S. 62) auftreten, sind voraussichtlich auf das Strecken der Wassermenisken, d. h. auf Kapillaritätsvorgänge zurückzuführen; sie sind leider so gering, daß sich hier keine exakten Untersuchungen anstellen lassen. Theoretisch jedoch läßt sich aus der Benetzungsgleichung die Hygroskopizität des Bodens berechnen; unsere Benetzungsgleichung geht dann in die Form über:

$$\frac{\log(r_0 + i) - \log i}{c} = w_H, \quad (11)$$

worin r_0 die höchste Benetzungswärme ist; die zweite Benetzungswärme r_1 [vergl. Gleichung (4)] muß gleich null gesetzt werden und $w_1 - w_0$ wird, da $w_0 = 0$ ist, w_1 oder „ w_H “, womit ich die Hygroskopizität bezeichnen will.

Mittelst Gleichung (11) ist nun unter Einsetzung der für r_0 , i und c ermittelten Werte die Hygroskopizität der drei Bodenarten berechnet worden; die Zahlen sind in der vorstehenden Tabelle unten mit wiedergegeben.

Die Hygroskopizität soll nun der höchsten Benetzungswärme proportional sein, da beide Größen der Bodenoberfläche proportional sein sollen. Bei 27 Beobachtungen ergab sich:

$$\frac{r_0 + i}{w_H} = 1,00 \pm 0,026.$$

Es finden sich aber hier auch größere Abweichungen, welche meist auf die seinerzeit zu niedrig bestimmte „höchste Benetzungswärme“ zurückzuführen sein dürften. Der Grund für diesen Fehler lag in der Unvollkommenheit des seinerzeit angewandten Trocknungsverfahrens. Geringe Abweichungen aber sind auch erklärlich. Die Benetzungswärme hing nämlich, wie wir sahen, nicht nur von der Größe der Bodenoberfläche, sondern auch von der spezifischen Adhäsionskonstanten der verschiedenen Substanzen zum Wasser ab:

$$\alpha F = E(r + i). \quad (1)$$

Sollte diese aber bei verschiedenen Bodenarten verschieden sein, so wird auch die Benetzungswärme dementsprechend verschieden, d. h. nicht vollkommen proportional der Bodenoberfläche ausfallen müssen. Immerhin zeigt die im allgemeinen gute Übereinstimmung der Verhältniszahlen bei den verschiedenen Substanzen, daß die Adhäsionskonstante nur innerhalb geringer Grenzen schwanken kann.

Die Hygroskopizität muß demnach einen exakteren Maßstab für die Bodenoberfläche abgeben, und es kam so darauf an, theoretisch zu unter-

suchen, ob man nicht die Hygroskopizität auf eine einfachere Weise bestimmen kann. Diese Aufgabe hat Rodewald¹⁾ durch seine theoretischen Untersuchungen gelöst. Bei der Besprechung derselben will ich mich möglichst seinen Ausführungen anlehnen.

Wir denken uns den mit hygroskopischem Wasser benetzten Körper $(1 + w_H)$ mit einer Vorrichtung in Verbindung gesetzt, die es gestattet, die Spannung des von ihm ausgesandten Wasserdampfes zu vermindern; dann wird so lange Wasser aus dem Körper verdampfen, bis seine eigene Dampftension derjenigen der Umgebung gleich ist. Die Verdampfung kann beispielsweise bei konstanter Temperatur dadurch hervorgerufen werden, daß man das Volumen, in welchem sich der Körper befindet, fortgesetzt vergrößert, weil dadurch die Spannung des Dampfes abnimmt. Die Verdampfung soll so lange fortgehen, bis sich die Wassermenge w in Dampf verwandelt hat. Erfolgt die Verdampfung bei konstanter Temperatur, so muß Wärme zugeführt werden, und zwar einmal, um die Arbeit zur Lostrennung des Wassers von dem Körper zu leisten — das kalorische Äquivalent derselben ist die Benetzungswärme r — und ferner, um das Wasser w in Dampf zu verwandeln (l). Die zuzuführende Wärmemenge ist demnach $Q = wl + r$.

Dieser Wärmemenge ist die Arbeit äquivalent, die durch die Verminderung des Druckes geleistet wird. Wir wollen annehmen, daß es hierzu der Herabsetzung des Druckes bis auf p bedurfte. Trennen wir den Körper von dem Wassergas, und drücken wir das letztere wieder zusammen, so kondensiert es sich wieder zu der Wassermenge w , deren Dampfspannung der konstanten Temperatur T des Austrocknens mit p_0 entspricht. Beim Kondensieren gewinnen wir die Verdampfungswärme wl zurück; demnach muß man beim Zusammendrücken nur die Arbeit leisten, welche der Benetzungswärme r äquivalent ist, und die wir wiedergewinnen, wenn wir den ausgetrockneten Körper $(1 + w_H - w)$ wieder mit dem Wasser w benetzen. Jene der Benetzungswärme äquivalente Arbeit läßt sich aus den Gasgesetzen berechnen.

Nach Clausius²⁾ gilt für vollkommene Gase, als welches wir das Wassergas betrachten dürfen, die Gleichung

$$dQ = C_p \cdot dT - \frac{R \cdot T}{p} \cdot dp.$$

Hierin ist: Q die aufgenommene Wärme,

C_p die spezifische Wärme bei konstantem Druck,

p der Druck,

¹⁾ H. Rodewald, Theorie der Hygroskopizität; Landw. Jahrb. 1902, S. 675 u. f.

²⁾ R. Clausius, Die mechanische Wärmetheorie. Braunschweig 1887, Bd. I, S. 186.

T die absolute Temperatur
und R die Gaskonstante.

Wegen der Temperaturkonstanz ist $dT = 0$. Setzen wir dr für dQ ein, so müssen wir die Wassermenge $\frac{w}{18}$ einfügen, weil sich die Gleichung auf das Molekulargewicht bezieht, wenn wir die Gaskonstante R im kalorischen Maß zu 1,991 annehmen. Wir erhalten so:

$$dr = \frac{w \cdot R \cdot T}{18 \cdot p} \cdot dp.$$

Durch Integration zwischen den Grenzen p_0 und p entsteht für Briggs'sche Logarithmen, wenn man den Modulus zu 0,4343 annimmt:

$$r = \frac{w \cdot R \cdot T}{18 \cdot 0,4343} \cdot \log \frac{p_0}{p}. \quad (12)$$

Diese Gleichung können wir zur Berechnung des Dampfdruckes p , bei welchem der hygroskopische Körper sein Wasser vollständig verliert, benutzen, wenn wir die Benetzungswärme des trockenen Körpers bei der Temperatur T als bekannt voraussetzen. Kennen wir aber die Benetzungswärme als Funktion des Wassergehaltes des Körpers, so können wir auch die ganze Dampfdruckkurve als Funktion vom Wassergehalt berechnen.

In der Benetzungsgleichung

$$\log(r_0 + i) - \log(r_1 + i) = c(w_1 - w_0) \quad (4)$$

bedeutete w die Wassermenge in Prozenten, welche in der Gewichtseinheit Boden enthalten war. Wollen wir in unserer neuen Gleichung für w den gleichen Wert einsetzen, so müssen wir die Wassermenge, welche der Boden verdampft hat, die wir mit w bezeichneten, und die wir ebenfalls in Prozenten des trockenen Bodens ausdrücken, von der Hygroskopizität w_H in Abzug bringen. Die Gleichung geht dann in die Form über:

$$r = (w_H - w) \left(\frac{R \cdot T}{18 \cdot 0,4343} \right) \cdot \log \frac{p_0}{p}$$

oder, da $\frac{R \cdot T}{18 \cdot 0,4343}$ als eine für alle Bodenarten konstante Größe gleich k gesetzt werden kann, in die Gleichung:

$$\frac{r}{w_H - w} = k \cdot \log \frac{p_0}{p}. \quad (13)$$

Aus dieser Gleichung läßt sich p in Verbindung mit den Gleichungen (4) für die Benetzungswärmen für jeden Wassergehalt von 0 bis w_H berechnen, mit Ausnahme des Wertes für $w = w_H$, bei welchem, da $r = 0$ wird, die linke Seite die unbestimmte Form $\frac{0}{0}$ annimmt.

Diesen Druck berechnet man nach Rodewald wie folgt:

In der Benetzungsgleichung (4) wird $\log(r_0 + i)$ als eine für den einzelnen Boden konstante Größe gleich C gesetzt. Dieselbe geht dann in die Form

$$w = \frac{C - \log(r + i)}{c}$$

über. Führt man diesen Wert in den Nenner des Bruches der Gleichung (13) ein, so ergibt sich:

$$w_H = \frac{r}{\frac{C}{c} + \frac{\log(r + i)}{c}}$$

Bezeichnet man den Zähler des Bruches mit $f(x)$, den Nenner desselben mit $\varphi(x)$, so ergibt sich durch Differentiation für die ersten Ableitungen, wenn man noch beachtet, daß \log den Briggs'schen Logarithmus bedeutet, und den Modulus zu 0,4343 nimmt:

$$f'(x) = 1,$$

$$\varphi'(x) = \frac{0,4343}{c(r + i)},$$

also für

$$\frac{f'(x)}{\varphi'(x)} = \frac{c(r + i)}{0,4343}.$$

Da nun, wie wir sahen, dieser Bruch den Wert der Funktion $\frac{0}{0}$ darstellt, wenn darin die Veränderliche r gleich null gesetzt wird, so erhalten wir zur Bestimmung der Dampfspannung der hygroskopischen Körper in dem Moment, wo ihr Wassergehalt gerade w_H ist, die Gleichung

$$\frac{c \cdot i}{0,4343} = k \cdot \log \frac{p_0}{p}. \quad (14)$$

Nach den Gleichungen (13) und (14) kann man die Dampfspannung der Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt berechnen. Es ist hierbei dann für

$$k = \frac{R \cdot T}{18 \cdot 0,4343} = \frac{1,991 \cdot 273}{18 \cdot 0,4343}$$

und für

$$p_0 = 4,6 \text{ mm},$$

d. i. die Spannung des Wasserdampfes bei 0° C. einzusetzen.

Rodewald hat so die Dampfdruckkurve von einem humosen Sandboden, dessen Benetzungskurve der Verfasser experimentell bestimmt hatte, berechnet. Die Benetzungsgleichung desselben war die folgende:

$$\log(r + 0,226) = 0,2958 - 0,58 \cdot w.$$

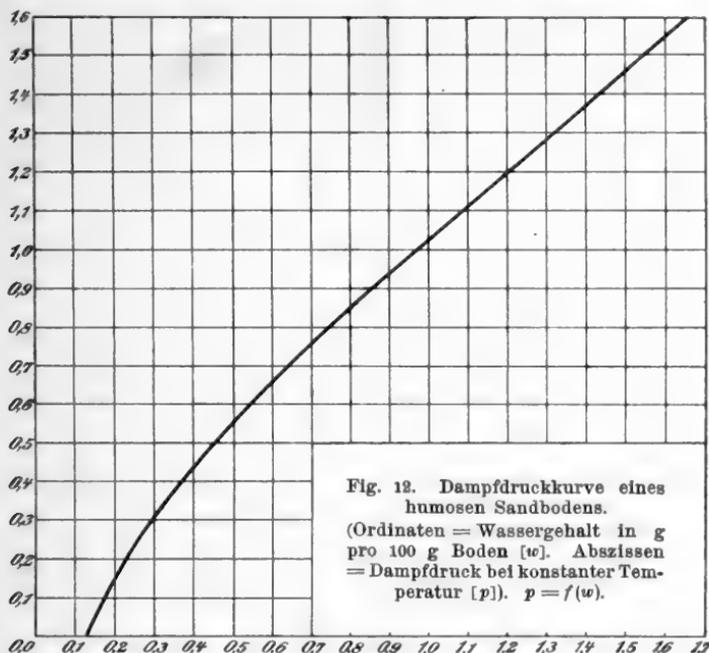
Den Verlauf der Dampfdruckkurve ersieht man aus der folgenden Tabelle. Um ihn übersichtlich zu machen, sei auch noch die Kurve, in Koordinaten eingezeichnet, wiedergegeben (Fig. 12).

Dampfdruck eines humosen Sandbodens bei verschiedenem Wassergehalt.

w	p	w	p	w	p
0,0	0,130	0,6	0,543	1,2	1,200
0,1	0,175	0,7	0,641	1,3	1,321
0,2	0,231	0,8	0,745	1,4	1,431

w	p	w	p	w	p
0,3	0,300	0,9	0,855	1,5	1,539
0,4	0,370	1,0	0,967	1,624	1,690
0,5	0,452	1,1	1,082	—	—

Bei der Hygroskopizität des Bodens $w_H = 1,624$ ist die Dampfspannung desselben noch längst nicht die des Wassers = 4,6 mm. Diese Eigentümlichkeit wiederholt sich bei allen 19 Bodenarten, deren Benetzungskurve vom Verfasser festgelegt wurde. Hiernach muß der Boden schon das hygroskopische Wasser aufnehmen, wenn er, statt über reinem Wasser,



über einer Salzlösung oder über einer verdünnten Schwefelsäure aufgestellt wird, deren Dampfspannung geringer als die des Wassers ist.

Leider läßt sich der zweckentsprechende Dampfdruck nicht aus den Benetzungskurven der verschiedenen Bodenarten ermitteln. Der Grund hierfür liegt in der sehr geringen Genauigkeit, mit welcher sich die in der Gleichung (14) auftretende Größe i bei den Bodenarten bestimmen läßt. Es mußte hier deshalb experimentell vorgegangen werden. Zu dem Zweck wählten wir¹⁾ Substanzen, deren Hygroskopizität mittelst der Benetzungskurve möglichst genau festgelegt war, und bei denen sich

¹⁾ H. Rodewald und A. Mitscherlich. Die Bestimmung der Hygroskopizität; Landw. Vers.-Stat. 1903, S. 433 u. f.

also auch noch die Größe i mit leidlicher Sicherheit feststellen liefs, so die von Rodewald und Kattjein untersuchten Stärkesorten, den vom Verfasser untersuchten Moor- und strengen Tonboden. Wir stellten diese Substanzen über Schwefelsäure von verschiedener Konzentration nacheinander auf und fanden hierbei, dafs die Substanzen gerade über einer Schwefelsäure von 10,0 % H_2SO_4 -Gehalt so viel Wasser aufnahmen, als ihrer Hygroskopizität entsprach. Hierauf hat sich dann unsere vorher beschriebene Methode der Bestimmung der Hygroskopizität aufbauen lassen.

Dafs die Höhe der Temperatur bei dieser Methode, sofern das Volumen konstant gehalten wird, keinen Einflufs auf die Hygroskopizität des Bodens ausübt, ergibt sich aus den weiteren theoretischen Untersuchungen Rodewalds (l. c. S. 692—695), auf die hier verwiesen werden soll.

Mit Hilfe dieser Methode läfst sich die Hygroskopizität des Bodens demnach sehr exakt bestimmen, und es läfst sich dann rückwärts auch die Größe i , welche wir als die Wärme bezeichnet haben, die dadurch entsteht, dafs die Kohäsion der festen Bodenteilchen bei der Benetzung mit Wasser stets bis zu einem bestimmten Grade aufgehoben wird, noch mit leidlicher Sicherheit aus der Gleichung

$$\log(r_0 + i) - \log i = c \cdot w_H$$

ermitteln, wenn w_H , c und r_0 experimentell in der angegebenen Weise bestimmt werden. Wir haben die Benetzungsgleichungen der angewandten Substanzen mit Hilfe der mittelst der 10 %igen Schwefelsäure festgestellten Hygroskopizität umgerechnet, und dürften sich die aus diesen resultierenden Benetzungskurven den von uns bei verschiedenem Wassergehalt gefundenen Benetzungswärmen besser anschliessen als die vorher empirisch bestimmten Benetzungskurven.

Fassen wir hier noch einmal kurz die Schlufsfolgerungen zusammen, so dürfte nach den theoretischen Untersuchungen von Rodewald und durch meine vielfachen experimentellen Bestätigungen derselben die Hypothese durchaus zutreffen, dafs die Benetzungswärme und die Hygroskopizität zwei der Bodenoberfläche proportionale Größen sind.

Noch eine dritte Größe, die bei der Benetzung mit Wasser auftretende Volumenkontraktion des Bodens, mufs nach den Rodewaldschen Untersuchungen¹⁾ der Bodenoberfläche proportional sein. Diese Größe ist jedoch bei Bodenarten so gering, dafs es mir s. Z. nicht möglich war, dieselbe noch exakt zu bestimmen.

d) Die absolute Größe der Bodenoberfläche.

Wenngleich für die praktische Bodenkunde proportionale Werte für die Größe der Bodenoberfläche vollauf genügen, so dürfte es doch eventuell

¹⁾ H. Rodewald, Thermodynamik der Quellung mit spezieller Anwendung auf die Stärke; Zeitschr. f. physik. Chemie XXIV, 2, S. 205.

auch für weitere Untersuchungen wünschenswert sein, wenn man sich eine Vorstellung von der absoluten Größe der Bodenoberfläche verschaffen kann. Dies ist möglich, wenn man an der Rodewaldschen Hypothese festhält, daß die Hygroskopizität die Wassermenge ist, welche die Bodenoberfläche gerade mit *einer* Molekülschicht Wasser bedeckt. Da das Wassermolekül nach Nernst¹⁾ ein Gewicht von $8,3 \cdot 18 \cdot 10^{-22}$ mg besitzt, so kann man berechnen, wieviel Wassermoleküle die Oberfläche des Bodens bedecken. Denkt man sich nun die Form des Wassermoleküls als Würfel, und zwar so, daß es mit einer Fläche an der des Bodens anliegt, mit vier der anderen Flächen aber mit den benachbarten Wassermolekülen zusammenfällt, und daß somit das Wasser den Boden mit einem kontinuierlichen Häutchen von der Dicke der Seite eines solchen Würfels überzieht, so folgt für die Fläche des Milligramm Bodens folgender Wert:

$$F = \frac{w_H}{\sqrt[3]{8,3 \cdot 18 \cdot 10^{-22}}} \text{ qmm,}$$

oder wenn wir, wie dies stets geschehen ist, die Hygroskopizität (w_H) in Prozenten ausdrücken und den Faktor, mit dem wir die Hygroskopizität zu multiplizieren haben, ausrechnen, so folgt für 1 g Boden:

$$F = w_H \cdot 40,6 \text{ qm.}$$

Es seien hier nun die Hygroskopizitätsbestimmungen und die aus ihnen berechneten Bodenoberflächen von verschiedenen Bodenarten wiedergegeben:

Bodenart:	w_H	Bodenoberfläche von 1 g Boden in qm	Bodenart:	w_H	Bodenoberfläche von 1 g Boden in qm
Feiner tertiärer Quarzsand	0,034	1,38	Milder Lehm Boden . .	3,00	121,8
Desgl. im Mörser pulverisiert	0,068	2,76	Wiesenboden 1. Klasse	3,19	129,5
Kohlensaurer Kalk . .	1,00	40,6	Kaolin	5,40	219,2
Sandboden (Krume) . .	1,06	43,0	Strenger Lehm Boden	6,54	265,5
Lehmiger Sandboden . .	1,40	56,8	Tiefland-Moorboden . .	18,42	747,9
Sandiger Lehm Boden . .	2,09	84,9	Desgl.	18,88	766,5
			Strenger Tonboden (aus Java)	23,81	966,7

Die Hygroskopizität des Quarzsandes ist nicht mehr als sicher anzusehen; im Gegenteil muß angenommen werden, daß dieselbe gleich null ist, da auch eine Benetzungswärme desselben nicht mehr festgestellt werden konnte. Die hierfür gefundenen Größen dürften wohl durch Fehler, welche

¹⁾ W. Nernst, Theoretische Chemie, 2. Aufl. Stuttgart 1898, S. 394.

auf Kondensationserscheinungen zurückzuführen sind, bedingt sein. Landwirtschaftliche, aber auch forstliche Kulturböden dürften wohl kaum je eine geringere Hygroskopizität als $0,3\%$ aufweisen. Für Sandarten, bei denen einem vielleicht aus anderen Gründen daran liegt, die Größe der Bodenoberfläche angenähert zu bestimmen, empfiehlt sich das folgende Verfahren, welches ich auch für den betr. Quarzsand ausgeführt habe:¹⁾

Es wird das mittlere Korngewicht des Sandes bestimmt und mit Hilfe des spezifischen Gewichtes resp. Volumens das mittlere Kornvolumen. Von diesem ausgehend, wird unter der Annahme, daß die Körner Kugel- oder Würfel-Gestalt haben, die Oberfläche des Sandkornes und, wenn man diese durch das Gewicht derselben (in Gramm) dividiert, die Oberfläche von einem Gramm Sand berechnet.

Da wir auf die so festgestellten Oberflächen später zurückkommen werden, so sei hier die Rechnung für zwei Sandarten, für einen feinen tertiären Quarzsand und für einen Seesand durchgeführt:

	Quarzsand	Seesand
Gewichte von je 500 Sandkörnern	0,0071 g	0,0160 g
	0,0071 „	0,0161 „
	0,0069 „	
	0,0069 „	
	0,0069 „	
	0,0069 „	
	0,0069 „	
Demnach mittleres Gewicht eines Sandkornes	0,0000139 g	0,0000321 g
Spezifisches Volumen des Sandes .	0,378	0,378
Mittleres Volumen eines Sandkornes	0,00000527 ccm	0,00001213 ccm
<i>Größe der Oberfläche von einem Sandkorn:</i>		
bei Annahme von Kugelform .	0,001464 qcm	0,002296 qcm
„ „ „ Würfelform	0,001817 „	0,003168 „
<i>Größe der Oberfläche eines Grammes des Sandes:</i>		
bei Annahme von Kugelform .	94,31 qcm	71,52 qcm
„ „ „ Würfelform	130,12 „	98,70 „

Diese Berechnung ergibt also bei dem tertiären Quarzsande eine Oberfläche von nur 0,013 qm pro Gramm. Sie ist also hundertmal so klein als die mit Hilfe der Hygroskopizität festgestellte. — Es ist zwar bei dieser Rechnung die Annahme, daß die Oberfläche der Körner sich zum Kornvolumen ähnlich wie die Würfeloberfläche zum Würfelvolumen ver-

¹⁾ A. Mitscherlich, Unters. über d. physik. Bodeneigenschaften; Landw. Jahrb. 1901, S. 403.

hält, eine sehr willkürliche; dennoch dürfte diese Rechnung nicht weit fehlgehen, zumal wenn man bedenkt, daß die Oberfläche erst doppelt so groß ist, wenn die Würfelteilchen schon achtmal so klein sind. Dies mag noch als Beweis dafür dienen, daß die Hygroskopizität des reinen Sandes nicht mehr exakt festgestellt werden kann.

e) Die äußere Bodenoberfläche.

Es dürfte berechtigt sein, an dieser Stelle auf einen großen Unterschied der aus organisiertem und aus nichtorganisiertem Material entstammenden Bodenbestandteile aufmerksam zu machen. Alle Bodenbestandteile fast ohne Ausnahme benetzen sich mit Wasser. Durch die Benetzung wird nun bei unorganisiertem Material der gegenseitige Zusammenhang der Moleküle teilweise nicht beeinflusst (z. B. Sand), teilweise wird er vollkommen, wie bei den Kolloiden (z. B. bei dem Ton), aufgehoben. Bei organisiertem Material findet eine Quellung statt, d. h. der Zusammenhang der Moleküle oder Mizellen wird dadurch gelockert, daß Wassermoleküle in die mizellaren Hohlräume eindringen, ohne daß hierdurch die Mizellen selbst aus ihrem Zusammenhang heraustreten. Diese mizellaren Hohlräume interessieren uns deshalb, weil sie bei ihrer Feinheit für die Pflanzenwurzel nicht in Betracht kommen können, und weil sie doch auch ihrerseits eine Oberfläche, die vom Verfasser deshalb als mizellare Oberfläche bezeichnet worden ist, besitzen. Es dürfte uns deshalb vom pflanzenphysiologischen Standpunkte aus interessieren, diese mizellare Bodenoberfläche oder auch die gesamte Bodenoberfläche mit Ausschluß dieser mizellaren Bodenoberfläche, das ist die „äußere Bodenoberfläche“, für sich zu untersuchen. Leider können die Untersuchungen hierüber noch keineswegs als abgeschlossen angesehen werden; dennoch halte ich es für gut, diese, soweit sie ausgeführt sind, hier kurz zu skizzieren.

Wir hatten vorher gefunden, daß die Benetzungswärme des Bodens von der Größe der Bodenfläche F und von der Adhäsionskraft α , mit welcher der Boden das Wasser anzieht, abhängig ist. Benetzen wir nun den gleichen Boden mit einer anderen nicht hygroskopischen Flüssigkeit, welche mit der Kraft α_1 an die Flächeneinheit angezogen wird, so müssen demnach die Benetzungswärmen beider Flüssigkeiten im Verhältnis $\frac{\alpha F}{\alpha_1 F}$ oder von $\frac{\alpha}{\alpha_1}$ stehen. Dieses Verhältnis müßte, da sich α bei verschiedenen Substanzen nur in sehr geringer Weise ändert, für verschiedene Bodenarten konstant sein. Das ist aber durchaus nicht der Fall.

Es war nun zunächst zu untersuchen, ob die bei der Benetzung mit einer derartigen nicht hygroskopischen Flüssigkeit auftretende Wärme auch eine der Bodenoberfläche proportionale Größe ist, d. h. ob auch für eine solche Flüssigkeit die Benetzungsgleichung

$$\log r_1 = \log r_0 - c(w_1 - w_0) \quad (4)$$

Gültigkeit hat.

Als Flüssigkeit wurde Toluol (t) genommen, dessen Siedepunkt zwischen 97°C. und 127°C. lag; als Boden ein strenger Tonboden, welcher eine recht hohe Benetzungswärme ergab. Die einzelnen Proben wurden vollkommen getrocknet und dann durch Überstellen über Toluol verschieden weit mit demselben benetzt, sodann in die Benetzungsgläschen eingeschlossen und in den mit Toluol statt mit Wasser gefüllten Innenraum des Eiskalorimeters eingelassen. Hier wurden diese in der gleichen Weise, wie zuvor beschrieben, auf ihre Benetzungswärme hin untersucht. Der Boden mußte jedoch, da er sich sehr langsam mit Toluol benetzte, zu diesen Versuchen sehr fein pulverisiert werden, und konnten die Versuche aus dem gleichen Grunde selbst dann erst nach 3—5 Stunden, nachdem man die Benetzung im Eiskalorimeter eingeleitet hatte, abgebrochen werden.

Die Resultate waren die folgenden:

Toluol-Benetzungskurve eines strengen Tonbodens.

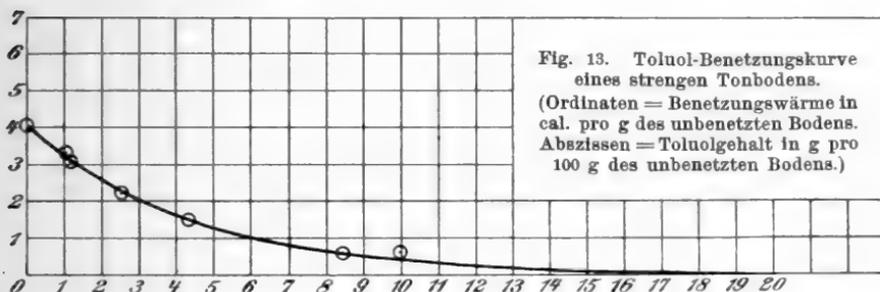
Bestimmungen:				Berechnete Kurve nach der Gleichung: $\log r_1 = 0,6064 - 0,0988 \cdot t$			
Toluol- Gehalt	Benetzungswärme in cal.		Ab- weichung in o/o	t	r	t	r
	gefunden	berechnet					
0,000	4,068	4,040	+ 0,7	0,0	4,040	6	1,031
0,000	4,044	4,040	+ 0,1	0,5	3,606	7	0,822
0,000	3,982	4,040	- 1,5	1,0	3,218	8	0,655
1,000	3,383	3,218	+ 5,1	1,5	2,872	9	0,521
1,188	3,083	3,083	0,0	2,0	2,564	10	0,415
2,511	2,201	2,282	- 3,5	2,5	2,288	12	0,264
4,355	1,510	1,500	+ 0,7	3,0	2,042	15	0,133
8,360	0,603	0,603	0,0	3,5	1,823	20	0,043
9,983	0,627	0,400	+ 56,8	4,0	1,627	30	0,004
				5,0	1,295		

Ich habe auch diese in Koordinaten eingetragen. Wie man ersieht, lassen sich dieselben sehr gut durch eine Kurve, welche derselben Benetzungsgleichung (4) folgt, ausgleichen. Die berechnete Kurve ist in der obenstehenden Tabelle mit angegeben. Ein Wert für die Größe „ i “ liefs sich nicht mehr berechnen. Die Arbeit, welche das Toluol leistet, um die Kohärenz der Bodenteilchen aufzuheben, ist also anscheinend sehr gering, d. h. die Kohärenz der Bodenteilchen wird kaum durch die Toluolbenetzung

aufgehoben, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man Bodenkrümel damit übergießt.

Die Versuche zeigen also, daß auch die Toluolbenetzung der Bodenoberfläche proportional geht. Findet dennoch bei verschiedenen Bodenarten keine Konstanz zwischen den Größen $\alpha \cdot F$ und $\alpha_1 \cdot F$ bei der Wasser- und bei der Toluolbenetzung statt, so muß der Grund hierfür darin liegen, daß das Toluol bei dem gleichen Boden nicht dieselbe Oberfläche benetzt wie das Wasser, daß also die Fläche in beiden Fällen eine andere war.

Nimmt man an, daß das Wasser stets die ganze Bodenoberfläche benetzt, so wird das Toluol bei demjenigen Boden die größte Oberfläche benetzen, bei dem das Verhältnis der Toluol- zur Wasserbenetzungswärme das größte ist. Dies ist der Fall bei allen den Bodenarten, in denen sich



keine Humussubstanzen vorfinden, und zwar ergaben sich hier die folgenden Verhältniszahlen:

Bezeichnung der Substanz:	Benetzungswärme bei der Benetzung		Verhältnis
	mit Toluol	mit Wasser	
Kohlensaurer Kalk	0,17	0,36	0,47
Lehm (Untergrund)	0,75	1,53	0,49
Ton (Untergrund)	0,52	1,02	0,51
Sand (Untergrund)	0,11	0,21	0,51

Je mehr Humus der Boden enthält, desto geringer, je mehr Ton, desto größer wird die Toluolbenetzungswärme und dementsprechend das Verhältnis; reiner Sand ergab auch unter Toluol keine meßbare Benetzungswärme, und mußte so eine Beimengung von Sand auch die Toluolbenetzungswärme eines Bodens herabmindern. Es mögen hier noch einige Zahlen von Bodenarten folgen, deren mechanisch-chemische Analyse auf Seite 35 wiedergegeben ist.

Bodenart:	Benetzungswärme bei der Benetzung		Verhältnis
	mit Toluol	mit Wasser	
Moorboden	0,284	15,27	0,02
Humoser Sandboden	0,118	1,68	0,07
Sandboden (Krume)	0,142	0,98	0,14
Lehmiger Sandboden	0,182	1,14	0,16
Sandiger Lehmboden	0,324	1,53	0,21
Strenger Tonboden	4,040	15,10	0,27

Dieser Befund hat den Verfasser zu der folgenden Hypothese geführt:

Während die gesamte Bodenoberfläche dem Wasser überall zugänglich ist, ist ein Teil der Oberfläche der Humussubstanzen, die mizellare Oberfläche, organischen Flüssigkeiten von größerem Molekulargewicht nicht zugänglich. Man kann sich diese Oberflächen als solche von sehr engen Hohlräumen in den Humuspartikelchen vorstellen, die wohl noch das kleine Wassermolekül, welches gleichzeitig noch mit einer größeren Kraft von der Flächeneinheit angezogen wird,¹⁾ einlassen, in welche aber jede Flüssigkeit von größerem Molekül nicht mehr einzudringen vermag. Die Benetzungswärme, welche bei der Benetzung des ganz trockenen Bodens mit Toluol frei wird, dürfte also vielleicht einen Maßstab für die äußere Bodenoberfläche bilden.

Die Bodenoberfläche ist eine Größe, welche für den einzelnen Boden typisch ist und jederzeit mit Hilfe einer der angegebenen Methoden wieder erhalten werden kann. Die Bodenoberfläche wird wesentlich mit beeinflusst durch die Korngröße, da, je kleiner die Bodenteilchen sind, um so größer die Oberfläche der Gewichtseinheit Boden wird. Sie hat vor der „Korngröße“ den großen Vorzug, daß man bei ihr ein einziges Resultat erhält, während es unmöglich war, eine mittlere Korngröße, z. B. beim Boden, festzustellen, ganz abgesehen davon, daß uns die für die Korngrößenbestimmung angegebenen Methoden überhaupt keinen Anhalt für die Korngröße eines Bodens gaben. Die Bestimmung der Hygroskopizität ist im übrigen noch wesentlich einfacher und bequemer als jede mechanische Bodenanalyse. — Die Besprechung der Bedeutung dieser spezifischen Größe für die Vegetation soll in einem späteren Paragraphen erfolgen.

¹⁾ A. Mitscherlich, l. c.; Landw. Jahrb. 1901, S. 431—432.

§ 12. Die spezifische Kohäsionskonstante der festen Bodenteilchen und ihre spezifische Adhäsionskonstante zum Wasser.

Die spezifische Kohäsionskonstante der festen Bodenteilchen wird teilweise, wie wir sahen, durch die Benetzung aufgehoben. Die Bodenkrümel zerfallen im Wasser. Lediglich so weit kann diese auch nur pflanzenphysiologisch in Betracht kommen. Die Größe „ i “, welche uns ein Maß für dieselbe sein könnte, liefs sich leider beim Boden nur sehr ungenau bestimmen. Im allgemeinen zeigt sich beim Boden, dafs die Kohäsion der festen Bodenteilchen, welche durch Wasser überwunden wird, um so gröfser ist, je gröfser auch die Benetzungswärme eines Bodens, d. i. seine Oberfläche ist. Durch Zerreiben des Bodens im Mörser kann man einen Teil dieser Kohäsion zerstören.¹⁾ Bei einem sandigen Lehmboden war diese so, wenn der Boden durch ein 1,5 mm Sieb abgeseibt war, äquivalent 0,093 cal.; wenn der abgeseibte Boden aber im Mörser zerrieben war, äquivalent 0,034 cal.

Über die Größe der spezifischen Adhäsionskonstanten der festen Bodenteilchen zum Wasser liegt eine Untersuchung Rodewalds vor.²⁾ Dieser hatte mit Hilfe der Hygroskopizität die Oberfläche eines Kubikmillimeters Weizenstärke zu 21,08000 qmm berechnet und dann aus der Gleichung

$$\alpha F = E(r + i) \quad (1)^3$$

durch Einsetzen des für $(r + i)$ gefundenen Wertes = 0,03017 Kal. und des Wertes für das mechanische Wärmeäquivalent = 424000000 α berechnet:

$$\alpha = \frac{0,03017 \cdot 424000000}{1283000} = 9,972.$$

Diese Kraft mußte gröfser sein als die Kohäsionskonstante des Wassers, damit überhaupt eine Benetzung eintrat. Da die letztere nach den physikalischen Tabellen von Landolt und Börnstein bei 0° C. 7,923 mg pro mm beträgt, so trifft dies auch in der Tat zu. (Als Adhäsionskonstante des Bodens zu Toluol berechnete ich 5,086, eine Größe, die auch entsprechend gröfser ist als die Kohäsionskonstante des Toluols, welche experimentell zu 3,211 mg pro mm bestimmt wurde.)

Die Adhäsionskonstante verschiedener Bodenarten zum Wasser läfst sich bislang nur sehr ungenau bestimmen. Da sie anscheinend aber auch bei den verschiedenen Bodenarten nur in sehr geringen Grenzen zu variieren scheint, so dürfte sie vielleicht auch deswegen keinen wesentlichen Einfluß auf die Pflanzenerträge ausüben. Sie könnte hier meines Erachtens erst dann in Betracht zu ziehen sein, wenn sie bei einzelnen

¹⁾ A. Mitscherlich, l. c.; Landw. Jahrb. 1901, S. 397—400, 402.

²⁾ H. Rodewald, l. c.; Zeitschr. f. physik. Chemie XXXIII, S. 598—599.

³⁾ Vergl. S. 58.

Bodenarten so groß ist, daß sie nicht immer die gleiche Anzahl von Molekülschichten Wasser festzuhalten vermag. Dies scheint aber nach allen bisherigen Untersuchungen nie der Fall zu sein.

Von einer Besprechung weiterer spezifischer Eigenschaften der festen Bodenteilchen glaube ich hier absehen zu dürfen.

Anmerkung. Da wir noch sehr im unklaren darüber sind, welchen Einfluß die Elektrizität qualitativ und quantitativ auf das Gedeihen unserer Pflanzen ausübt, glaube ich in der vorliegenden Bodenkunde die elektrischen Erscheinungen im Boden, wie auch speziell die Radioaktivität des Bodens übergehen zu können. Es sei hier nur auf die einschlägige Literatur verwiesen.¹⁾

¹⁾ J. Elster und H. Geitel, *Physikalische Zeitschr.* 3. Jahrg., 1902, S. 574. — H. Ebert und P. Ewers, *Über die dem Erdboden entstammende radioaktive Emanation*; ebenda 4. Jahrg., S. 162—166. — J. Elster und H. Geitel, *Über die radioaktive Substanz, deren Emanation in der Bodenluft und der Atmosphäre enthalten ist*; ebenda 5. Jahrg., S. 11—20. — H. Ebert, *Über die Ursache des normalen atmosphärischen Potentialgefälles und der negativen Erldladung*; ebenda 5. Jahrg., S. 135—140. — J. Elster und H. Geitel, *Über Radioaktivität von Erdarten und Quellsedimenten*; ebenda 5. Jahrg., S. 321—325. — Dieselben, *Über die Radioaktivität der Bodenluft und des Erdreiches*; *Die Welt der Technik* 2. Jahrg., No. 5. — H. Brandes, *Über die radioaktive Emanation der Bodenluft und der Atmosphäre*. Inaug.-Diss. Kiel 1905.

Kapitel II.

Das Verhalten der festen Bodenteilchen zueinander und das Hohlraumvolumen des Bodens.

Die festen Bodenteilchen und ihre Beziehung zum Hohlraumvolumen des Bodens.

Man hat die festen Bodenteilchen wie alle festen Substanzen in zwei Gruppen einzuteilen versucht: in Kristalloide und in Kolloide. Die Kristalloide sind solche Substanzen, welche Kristalle zu bilden vermögen, während dies die Kolloide nicht tun, sondern amorph sind.

Der wesentlichste Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen ist ihre sehr verschiedene Molekulargröße. Die Kolloide besitzen ein ausnehmend hohes Molekulargewicht; sie diffundieren so sehr langsam durch eine Membran und zeigen einen sehr geringen osmotischen Druck.

Ein Kolloid ist in der Regel eine sehr fein verteilte Substanz, welche mithin eine sehr große Oberfläche pro Gewichtseinheit besitzt. Sie bilden gewissermaßen den Übergang zwischen dem festen und dem flüssigen Aggregatzustande, denn wie überall in der Natur, so kann auch hier keine feste Grenze existieren.

Man kann sich denken, daß ein Krystalloid durch Polymerisierung in ein Kolloid übergeht, so Kieselsäure, Tonerde, Eisenoxyd.

Ein derartiger prinzipieller Unterschied zwischen den verschiedenen festen Bodenbestandteilen soll in der vorliegenden Bodenkunde nicht gemacht werden.

Durch die Größe und die Gestalt der festen Bodenteilchen, sowie durch die Art ihrer Aneinanderlagerung wird das von Wasser und Luft eingenommene Bodenvolumen, welches ich kurz mit „Hohlraumvolumen des

Bodens“ bezeichnen will, bestimmt. Da dieses Hohlraumvolumen für die Pflanze von der größten Bedeutung sein muß, so ist es erforderlich, zu untersuchen, in welcher Weise dasselbe von den festen Bodenteilchen abhängig ist. Hierbei ist nicht nur die absolute Größe des Hohlraumvolumens im Verhältnis zum Gesamtvolumen zu berücksichtigen, denn es ist für die Pflanze nicht gleichgültig, ob sie einen weiten Hohlraum vielleicht von kugelförmiger Gestalt im Boden vorfindet, oder ob sich derselbe vielfach verzweigt oder verästelt und so verhältnismäßig eng ist. Wir müssen mithin auch die Gestalt des Hohlraumvolumens neben seiner Größe mit zur Untersuchung heranziehen. Möglichst einfach gewählte Beispiele, denen die Annahme zugrunde liegen soll, daß die festen Teilchen entweder Würfel- oder Kugelgestalt besitzen, sollen zum besseren Verständnisse der sehr komplizierten Verhältnisse beitragen.

§ 13. Die Beziehung zwischen den festen Bodenteilchen und der Größe des Hohlraumvolumens.

Beispiel 1.

Annahme: Alle festen Teilchen seien Kugeln von gleicher Größe. Die Lagerung derselben sei derart, daß jede Kugel von sechs anderen berührt wird (vergl. den Querschnitt in Fig. 14; Kugel 5 liegt oberhalb, Kugel 6 unterhalb der Zeichenebene).

Legt man durch jeden der gegenseitigen Berührungspunkte Ebenen tangential zur Kugeloberfläche, so wird durch diese der Raum in lauter gleiche Würfel eingeteilt, deren jedem eine Kugel eingeschrieben ist. Die Kanten dieses Würfels sind, wenn man den Radius der Kugel gleich r setzt, gleich $2 \cdot r$. Das Hohlraumvolumen, welches bei solcher Kugellagerung entsteht, ist:

Hohlraumvolumen = Würfelvolumen — Kugelvolumen

$$H = (2r)^3 - \frac{4}{3} r^3 \cdot \pi$$

$$H = r^3 \left(8 - \frac{4}{3} \cdot \pi \right)$$

$$H = r^3 \cdot 3,811.$$

Das Hohlraumvolumen beträgt demnach Prozente des Gesamtvolumens:

$$\frac{8 \cdot r^3}{3,811 \cdot r^3} = \frac{100}{x} \text{ oder } x = 47,64\%$$

Diese Größe des Hohlraumvolumens im Verhältnis zur Größe des Gesamtvolumens ist ganz unabhängig von der Größe der festen Kugelteilchen! Denn r , der Kugelradius, fällt bei der Bestimmung dieses Verhältnisses heraus!

Beispiel 2.

Annahme wie bei 1, jedoch sollen die Kugeln derart gelagert sein, daß jede derselben von je zwölf anderen berührt wird. Es ist dies die engste Lagerung. (Vergl. den Querschnitt Fig. 15; Kugel 7, 8, 9 liegen über, Kugel 10, 11, 12 unterhalb der Papierebene.)

Legt man hier wiederum durch jeden der gegenseitigen Berührungspunkte Ebenen tangential zur Kugeloberfläche, so wird durch diese der Raum in lauter gleiche Dodekaeder eingeteilt, deren jedem eine Kugel ein-

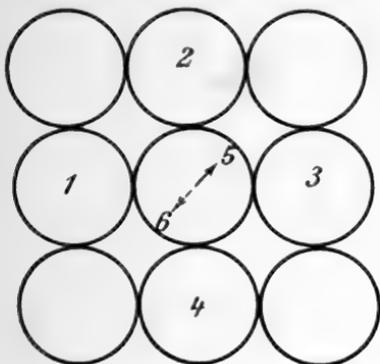


Fig. 14. Weitesten Kugellagerung.

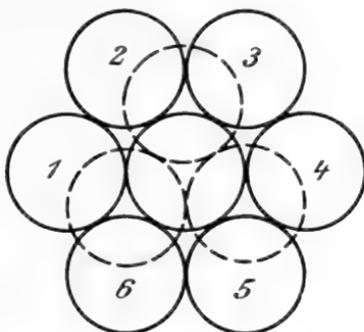


Fig. 15. Engsten Kugellagerung.

geschrieben ist. Ist der Radius der Kugel wieder gleich r , so ist die Kante des Dodekaeders gleich

$$\frac{20 \cdot r}{\sqrt{250 + 110\sqrt{5}}}$$

Das Hohlraumvolumen, welches bei dieser Lagerung der Kugelteilchen entsteht, ist:

$$\begin{aligned} \text{Hohlraumvolumen} &= \text{Dodekaedervolumen} - \text{Kugelvolumen} \\ H &= \left(\frac{20 \cdot r}{\sqrt{250 + 110\sqrt{5}}} \right)^3 \cdot \frac{15 + 7\sqrt{5}}{4} - \frac{4}{3} r^3 \pi \\ H &= r^3 (5,549 - 4,189) \\ H &= r^3 \cdot 1,360. \end{aligned}$$

Das Hohlraumvolumen beträgt demnach Prozente des Gesamtvolumens:

$$\frac{5,549 \cdot r^3}{1,360 \cdot r^3} = \frac{100}{x} \text{ oder } x = 24,51\% \text{ } ^{0,1}$$

¹⁾ Vergl. Soyka. Beobachtungen über die Porositätsverhältnisse des Bodens; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 8. S. 1 u. f.

Wiederum ist die Größe des Hohlraumvolumens unabhängig von der Größe der Kugelteilchen, hingegen wird dieselbe, wie man dies aus dem Vergleich von Beispiel 1 und 2 ersieht, außerordentlich stark durch die momentane Lagerung beeinflusst.

Beispiel 3.

Annahme: Alle festen Teilchen seien Würfel von gleicher Größe. Die Lagerung derselben sei die engst mögliche, d. h. derartig, daß sich die sechs Flächen eines jeden Würfel mit je einer Fläche der sechs benachbarten Würfel berühren. Das Hohlraumvolumen wird in diesem Falle gleich null.

Auch hier ist die Größe des Hohlraumvolumens ganz unabhängig von der Größe der Würfel.

Beispiel 4. (Experimentelle Bestätigung.)

Es wurde das Hohlraumvolumen in reinem tertiären Quarzsande (bezogen durch die „Vereinigten Hohen Bockauer Glassandgruben“ H. Weichelt & Co., Dresden) nach einer der später zu besprechenden Methoden festgestellt. Dasselbe betrug 37,2 % des Gesamtvolumens. Es wurde dann der Sand im Achatmörser derartig fein zerrieben, daß die Körner ungefähr achtmal so klein wurden. Das Hohlraumvolumen, welches von dem fein zermahlenden Sande in gleicher Weise festgestellt wurde, betrug 37,1 % des Gesamtvolumens.

Das Hohlraumvolumen blieb also innerhalb der Fehlergrenzen der Untersuchungsmethode das gleiche, obwohl die festen Teilchen im zweiten Falle sehr viel kleiner waren und die Gestalt der Teilchen voraussichtlich auch verändert wurde.

Beispiel 5.

Annahme: Alle festen Teilchen seien kugelförmig, jedoch möglichst verschiedener Größe. Die Lagerung sei die engst mögliche, d. h. derartig, daß immer in den Hohlräumen zwischen 4 größeren Kugeln eine kleinere derart eingelagert ist, daß sie die vier anderen Kugeln berührt.

Denkt man sich dies bis zu eingelagerten Kugeln von unendlich kleiner Größe fortgesetzt, so wird in diesem Falle auch das Hohlraumvolumen zwischen den Kugelteilchen unendlich klein werden.

Bei wechselnder Größe der Kugelteilchen kann somit bei engster Lagerung der Teilchen das Hohlraumvolumen angenähert gleich null werden, bei gleicher Größe der Kugelteilchen kann dasselbe hingegen nicht unter 24,51 % des Gesamtvolumens (vergl. Beispiel 2) betragen.

Haben die festen Teilchen Würfelgestalt, so kann das Hohlraumvolumen jedesmal gleich null werden. Es ist hierbei gleichgültig, ob die Teilchen alle ein und dieselbe Größe haben oder nicht, wenn sie nur entsprechend gelagert werden können.

Beispiel 6.

Annahme: Die Teilchen seien zur Hälfte Würfel von der Kantenlänge = $2r$, zur anderen Hälfte Kugeln von dem Durchmesser = $2r$. Die Teilchen seien abwechselnd aber aufs engste gelagert. Es wird dann analog Fig. 14 (kfr. Fig. 16) jeder Würfel von sechs Kugeln und jede Kugel von sechs Würfeln berührt werden. Das Hohlraumvolumen beträgt dann halbsoviel wie in Beispiel 1, d. h. 23,82 %; das Hohlraumvolumen ist also kleiner, als wenn nur Kugeln gleicher Größe aufs engste aneinander gelagert sind, in welchem Falle dasselbe 24,51 % des Gesamtvolumens ausmachte.

Beispiel 7.

Annahme: die gleiche wie bei Beispiel 6, nur sollen die Teilchen so geschichtet sein, daß die Würfelteilchen für sich und neben diesen die Kugelteilchen für sich auf das engste gelagert sind. Das Hohlraumvolumen der Würfelteilchen ist dann gleich null, das der Kugelteilchen gleich 24,51 % (vergl. Beispiel 2). Mit hin beträgt das Gesamt-Hohlraumvolumen in diesem Falle $\frac{0 + 24,51}{2} = 12,25$ % des Gesamtvolumens des Bodens.

Aus beiden Beispielen (6 und 7) ergibt sich entsprechend Beispiel 1 und 2, daß das Hohlraumvolumen bei den gleichen

Teilchen je nach der Aneinanderlagerung derselben variiert. Hier sind *beidmal* jedoch die Teilchen auf das *engste gelagert*; im ersten Falle sind die beiden verschiedenen Arten ideal gemischt, im letzten Falle geschichtet. Die Größe des Hohlraumvolumens wechselt also ferner nach der Art der Mischung der verschieden gestalteten Bodenteilchen.

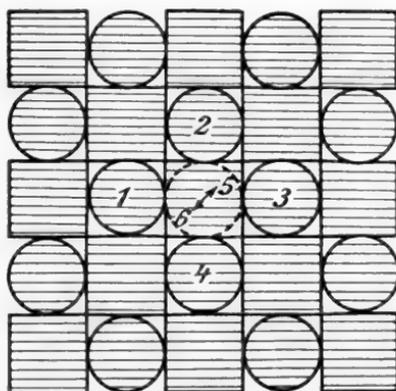


Fig. 16. Kugel-Würfellagerung.

Beispiel 8.

Haben wir schliesslich Teilchen der verschiedensten Größe und der verschiedensten Gestalt ganz durcheinander, so beeinflussen die groben Bestandteile das Hohlraumvolumen derart, daß dasselbe proportional mit dem Volumen, welches diese groben Bestandteile einnehmen, abnimmt.

Es ist dies leicht einzusehen, wenn man annimmt, daß für einen groben Bodenbestandteil so und so viel kleine eintreten können, welche

wenn sie auch auf das engste gelagert sind, stets ein Hohlraumvolumen zwischen sich lassen werden, welches zuvor nicht vorhanden war.

Es beeinflussen aber ferner auch die feinen Bodenbestandteile das Hohlraumvolumen in gleicher Weise. Denn wären die feinen Bestandteile nicht vorhanden, so müßten die gröbereren weitere leerbleibende Hohlräume zwischeneinander lassen.

Das Hohlraumvolumen wird demnach um so größer, je gleichartiger die einzelnen festen Bodenteilchen in ihrer Größe sind.

Aus Beispiel 1—7 ergeben sich schließlicly folgende Beziehungen, welche zwischen der Größe des Hohlraumvolumens und der Art der festen Teilchen bestehen:

1. Das Hohlraumvolumen ist unabhängig von der Größe der Teilchen, vorausgesetzt, daß alle festen Teilchen gleiche Größe haben (Beispiel 1 bis 4, 6 und 7).
2. Das Hohlraumvolumen wird bedingt durch die Lagerung der festen Teilchen, auch wenn die festen Teilchen alle einander gleich sind (Beispiel 1 und 2).
3. Bei verschiedener Größe der Teilchen wird die Größe des Hohlraumvolumens bedingt durch die Lagerung der Teilchen (Beispiel 5) und durch die Art der Mischung der verschiedenartigen festen Teilchen (Beispiel 6 und 7), sowie durch ihre mehr oder weniger gleiche Größe (Beispiel 8).

Der Praktiker versucht nun die Größe der festen Teilchen festzustellen, und die mechanisch-chemische sowie die mechanische Bodenanalyse suchten das gleiche zu erreichen. Diese Größe der festen Bodenteilchen bedingt aber, wie wir sehen, nicht die Größe des Hohlraumvolumens, beide Größen sind vielmehr ganz unabhängig voneinander. Die Größe des Hohlraumvolumens wird vielmehr durch die Art der Aneinanderlagerung und durch die Mischung der festen Bodenteilchen bestimmt, Größen, welche vom Praktiker bei der Untersuchung des Bodens nicht mit berücksichtigt werden, welche man der Bodenprobe, die man mit den Fingern zerreibt, nicht anmerken kann. Wir folgern hieraus, *daß die absolute Größe des Hohlraumvolumens nicht für die Beurteilung des Bodenwertes in Betracht kommen kann.*

Mit diesem Satz ist aber keineswegs gesagt, daß die künstliche Veränderung der Größe des Hohlraumvolumens eines und desselben Bodens nicht einen erheblichen Einfluß auf den Pflanzenwuchs ausüben könnte, wie wir dies später sehen werden.

§ 14. Die Beziehungen zwischen den festen Bodenteilchen und der Gestalt des Hohlraumvolumens.

Die Gestalt des Hohlraumvolumens des Bodens wird bedingt durch die Gestalt der einzelnen Teilchen und durch die Art der Aneinander-

lagerung derselben. Die letztere Größe ist eine wechselnde. Sie wird ebenso wie die Größe des Hohlraumvolumens nicht von dem Praktiker berücksichtigt, wenn er auf seine Weise den Boden zu bonitieren sucht. Wir können deshalb von dieser Größe hier vollständig absehen. Die Gestalt der festen Teilchen ist deshalb für die Gestalt des Hohlraumvolumens maßgebend, weil die Oberflächen derselben sich zu der Oberfläche des Hohlraumvolumens zusammensetzen und so das Hohlraumvolumen bilden.

Solange ein Körper eine einfache Gestalt besitzt, kann man diese beschreiben. Kennt man dann noch das Volumen des Körpers, so ist er damit vollständig bestimmt, z. B. eine Kugel vom Volumen $\frac{4}{3} r^3 \pi$, ein Würfel vom Volumen a^3 . Es ist hier die Kantenlänge des Würfels gleich a ,

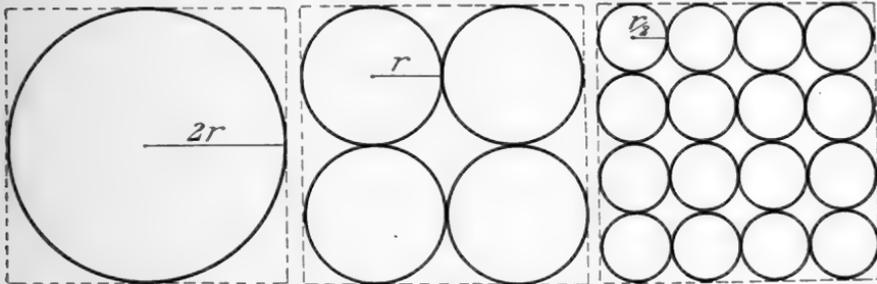


Fig. 17. Kugelvolumen und Kugeloberfläche.

der Radius der Kugel gleich r . Jede Würfelfläche beträgt a^2 , mithin die gesamte Oberfläche des Würfels $6a^2$, die Oberfläche der Kugel $4r^2\pi$ usw. Umgekehrt ist hier durch die Größe und die Gestalt der Oberfläche das Volumen des Körpers gegeben.

Die Größe eines Körpers und die Größe seiner Oberfläche bedingt aber, wie wir dies z. B. aus Fig. 7, S. 50 ersehen, keineswegs seine Gestalt. Die Gestalt kann hier eine außerordentlich mannigfaltige sein. Leider ist diese Größe in keiner Weise zu bestimmen und so müssen wir uns hier darauf beschränken, weitere Untersuchungen über den Einfluss der Größe der festen Bodenteilchen auf die Größe der Oberfläche des Hohlraumvolumens bei der Annahme einer *konstanten* Form der Bodenteilchen anzustellen. Hierfür wieder ein Beispiel:

Beispiel 9.

Es seien in einen Würfel von der Kante = $4r$ nacheinander 1 Kugel vom Radius $2r$, 8 solche vom Radius r und 64 vom Radius $\frac{r}{2}$ eingebaut.

Es bleibt hier das von den Kugeln eingenommene Volumen und somit auch das Hohlraumvolumen, wie wir vorher sahen, stets das gleiche. Hingegen verändert sich die Gesamtoberfläche der festen Kugeln und somit auch die Oberfläche des Hohlraumvolumens mit der Gröfse der Kugeln. Denke ich mir die Kugeln in gleicher Weise angeordnet wie in Fig. 5, so ergibt sich in den einzelnen Fällen (vergl. die Querschnitte in Fig. 9):

bei einem Kugel-				
radius =	$2r$	r	$\frac{r}{2}$
ein Hohlraum-				
volumen	$(2r)^3 - \frac{4}{3}(2r)^3 \cdot \pi = (2r)^3 - 8 \cdot \frac{4}{3}(r)^3 \cdot \pi = (2r)^3 - 64 \cdot \frac{4}{3}\left(\frac{r}{2}\right)^3 \cdot \pi = \dots$			
und eine Hohl-				
raumoberfläche	$4 \cdot (2r)^2 \cdot \pi$	$8 \cdot 4 (r)^2 \cdot \pi$	$64 \cdot 4 \left(\frac{r}{2}\right)^2 \cdot \pi$

Die Oberfläche nimmt also zu im umgekehrten Verhältnis zum Radius der Kugelteilchen.

Ebenso nimmt die Oberfläche des durch Würfel gebildeten, bei verschiedener Würfelgröfse stets gleichgrofsen Hohlraumvolumens in gleicher Weise zu, wie die Würfelkante abnimmt, wie also die einzelnen festen Teilchen dementsprechend kleiner werden müssen.

Nimmt man demnach gleiche Form der Teilchen an, so ist ihre Oberfläche ein direkter Mafsstab für ihre Gröfse. Es folgt hieraus:

1. dafs das Hohlraumvolumen um so verzweigter ist, je kleiner die festen Bodenteilchen sind.

Je komplizierter ferner die Gestalt eines Körpers ist, um so gröfser wird im Verhältnis zu seiner Gröfse seine Oberfläche.

Eine Kugel von dem Volumen $\frac{4}{3} r^3 \pi$ hat z. B. eine Oberfläche von $4r^2 \pi$ oder von $12,57 \cdot r^2$; ein Würfel von dem gleichen Volumen hat bereits eine Oberfläche von $6 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{4}{3} r^3 \pi\right)^2}$ oder von $15,60 \cdot r^2$.

Eine Kugel mit rauher Oberfläche mufs so z. B. eine gröfsere Oberfläche haben wie eine gleichgrofse Kugel mit glatter Oberfläche. Durch die Rauheit einer Oberfläche, d. h. durch die gröfsere Flächenentwicklung eines Körpers entstehen aber innerhalb der festen Körper und somit auch innerhalb der Bodenteilchen wieder neue feine Hohlräume, welche eine weitere Verzweigung und Verästelung des Hohlraumvolumens des Bodens hervorrufen. Wir folgern hieraus:

2. dafs das Hohlraumvolumen um so verzweigter ist, je gröfser die Summe der Oberfläche der festen Bodenteilchen ist.

In dieser zweiten Folgerung ist die erste, wie wir in Beispiel 9 sahen, mit enthalten. Wir können deshalb die Beziehung der festen Bodenteilchen zu der Gestalt des Hohlraumvolumens in folgender Weise kurz zusammenfassen:

Je größer die Bodenoberfläche ist, um so verzweigter ist das Hohlraumvolumen des Bodens.

Die Bodenoberfläche wechselt aber auch im Bodenvolumen je nach der Aneinanderlagerung der festen Teilchen. Nehmen wir z. B. an, daß die Teilchen in Beispiel 1 und 2 ganz gleich groß seien, d. h. in beiden Fällen Kugeln vom Radius r , so betrug bei Beispiel 2 die Oberfläche des Hohlraumvolumens in einem Gesamtvolumen von $5,549r^3$ gleich $4r^2\pi$, mithin in einem Bodenvolumen von $8r^3$ gleich $\frac{4r^2\pi \cdot 8}{5,549}r^2$ oder $18,12r^2$. — In Beispiel 1 hingegen beträgt in dem gleichen Bodenvolumen von $8r^3$ die Größe der Bodenoberfläche nur $4r^2\pi$ oder $12,57r^2$.

Soll nun die Bodenoberfläche etwas für den einzelnen Boden typisches sein — und wir betrachteten sie in § 10 als spezifische Größe — so müssen wir sie von der ungleichartigen Lagerung der Teilchen unabhängig machen. Dies ist dadurch möglich, daß wir sie nicht als die Oberfläche des variablen Hohlraumvolumens des Bodens auffassen, sondern als die dieser identischen Summe der Oberflächen der festen Bodenteilchen, und daß wir sie dementsprechend auf die Gewichtseinheit oder auf die Volumeneinheit der festen Bodenbestandteile beziehen. Es ist dann die Bodenoberfläche eine für den einzelnen Boden konstante spezifische Größe, welche uns somit einen Maßstab für die Eigenart des Hohlraumvolumens des Bodens abgeben kann. — Diese Oberfläche ist aber auch, wie wir sehen, um so größer, je feiner die einzelnen Teilchen sind (vergl. Beispiel 8), und somit dürfte auch diese Größe gerade diejenige sein, welche der Praktiker zu bestimmen versucht, wenn er den Boden mit den Fingern zerreibt. Da der Praktiker nun fand, daß diejenigen Bodenarten die besten sind, welche die feinsten Bodenteilchen besitzen, so müßte sich hieraus ergeben, daß, je größer die Bodenoberfläche ist, um so größer die Fruchtbarkeit des Bodens sein wird. Daß zwischen diesen beiden Größen eine gewisse Abhängigkeit bestehen muß und besteht, werden wir später sehen.

§ 15. Das Verhalten der festen Bodenteilchen zueinander.

Bislang hatten wir die festen Bodenteilchen immer als voneinander unabhängig betrachtet (die „Einzelkornstruktur des Bodens“ nach E. W. Hilgard). Beim Boden finden wir aber die einzelnen Teilchen fast nie für sich; in der Regel haften deren mehrere oder viele zusammen und bilden so Krümel oder Klumpen („Krümelstruktur des Bodens“ nach E. Wollny). Die Entstehung dieser Krümel ist auf die sog. Molekularerscheinungen zurückzuführen. Kommen zwei gleichartige oder verschiedenartige Teilchen einander sehr nahe, so üben sie infolge von Molekularewirkungen eine Anziehung aufeinander aus. Man hat dieser Erscheinung die Annahme zugrunde gelegt, daß die Körper aus einzelnen Teilen, den

Molekülen, zusammengesetzt seien, die, ähnlich wie die Weltensysteme im großen, voneinander durch relativ große Zwischenräume getrennt, umeinander rotieren und sich so gegenseitig anziehen. Diese Moleküle wirken aufeinander mit Kräften, den sogen. Ko- resp. Adhäsionskräften (vergl. §§ 11 und 12), die mit wachsender Entfernung rasch abnehmen. Den Radius der Wirkungssphäre der Molekularkräfte, das ist die Entfernung vom Mittelpunkte des Moleküls bis dahin, wo seine anziehende Kraft aufhört, kann man nach Versuchen von Quincke¹⁾ etwa gleich 0,00005 mm setzen. Es ist dies eine Größe, die weit unterhalb unserer Sehgrenze liegt. Für unser Auge treten diese Molekularerscheinungen demnach nur auf, wenn sich zwei Körper berühren.

Die Anziehung, welche zwei Bodenteilchen aufeinander ausüben, hängt einmal von der spezifischen Anziehungskraft (der Ko- resp. Adhäsionskonstanten) eines jeden der beteiligten Körper ab, ferner aber von der Größe der Fläche, welche innerhalb der Wirkungssphäre der Molekularkräfte liegt. Ob die Anziehungskraft bei verschiedenen Substanzen verschieden oder ob dieselbe stets die gleiche ist und somit die Anziehung nur eine Funktion der in Betracht kommenden Oberfläche ist, das ist meines Wissens bislang noch nicht festgestellt worden.

Wir werden deshalb diese Größe bei unseren Betrachtungen ausschalten und nur untersuchen, wie die Anziehung der festen Teilchen infolge ihrer verschiedenartigen Oberfläche variiert.

Zu diesem Zwecke machen wir zunächst wieder die Annahme, daß unsere Bodenteilchen Kugeln sind. Ein Kugelteilchen erforderte bei der Lagerung im Beispiel 1, Fig. 14, ein Bodenvolumen von $(2r)^3 = 8r^3$. In diesem Bodenvolumen waren 6 Berührungspunkte mit den benachbarten Kugeln gegeben oder, da die Berührung auch gleichzeitig von den sechs benachbarten Kugeln aus betrachtet werden muß, $\frac{6}{2} = 3$ Berührungspunkte. Nehmen wir hingegen an, daß die Lagerung der Kugeln wie in Beispiel 2, Fig. 15, sei, so kommen auf ein Bodenvolumen von $5,549r^3$ $\frac{12}{2} = 6$ Berührungspunkte, mithin auf ein solches von $8r^3$ 8,65 Berührungspunkte. Die Bodenteilchen werden demnach um so mehr zur Krümelbildung neigen, je enger sie gelagert sind.

Wir nehmen jetzt konstante Lagerung an und untersuchen nun, wie sich die Verhältnisse mit der Größe der Kugelteilchen ändern (kfr. Beispiel 9).

Bauen wir eine Kugel vom Radius $2r$ in ein Würfelvolumen von $(4r)^3$ ein, so haben wir wie zuvor bei der Lagerung Fig. 14 3 Berührungs-

¹⁾ G. Quincke, Über die Entfernung, in welcher die Molekularkräfte der Kapillarität noch wirksam sind; Ann. der Phys. u. Chem. 1869, 5. Reihe, Bd. 17, S. 413.

punkte mit den Nachbarkugeln. Bauen wir 8 Kugeln vom Radius r in das gleiche Volumen $(4r)^3$ ein, so haben wir $\frac{8 \cdot 6}{2} = 24$ Berührungspunkte. Bei 64 in gleicher Weise in dem gleichen Volumen eingestellten Kugeln vom Radius $\frac{r}{2}$ haben wir schliesslich $\frac{64 \cdot 6}{2} = 192$ gegenseitige Berührungspunkte usf.; das besagt: je kleiner die Bodenteilchen sind, um so gröfser wird ihre Neigung zur Krümelbildung sein,¹⁾ da die Berührungsfläche unter sonst gleichen Umständen um so gröfser wird. Die Anzahl der Berührungspunkte wächst aber in diesem Falle mit der Gröfse der Bodenoberfläche in folgender Weise:

Radius der Kugeln	$\frac{r}{2} \cdot 2^2$	$\frac{r}{2} \cdot 2^1$	$\frac{r}{2} \cdot 2^0$
Hohlraumoberfläche	$4 \cdot (2r)^2 \pi$	$8 \cdot 4r^2 \pi$	$64 \cdot 4 \left(\frac{r}{2}\right)^2 \pi$
oder	$16 \cdot 2^0 \cdot r^2 \pi$	$16 \cdot 2^1 \cdot r^2 \pi$	$16 \cdot 2^2 \cdot r^2 \pi$
Anzahl der Berührungspunkte	$3 \cdot 8^0$	$3 \cdot 8^1$	$3 \cdot 8^2$
oder	$3 \cdot (2^3)^0$	$3 \cdot (2^3)^1$	$3 \cdot (2^3)^2$

Beide Gröfsen nehmen also gleichzeitig in geometrischer Reihe zu, wenn der Radius der Kugeln in geometrischer Reihe abnimmt, und zwar besteht zwischen dem Kugelradius x und der Oberfläche des Hohlraumvolumens y die Beziehung:

$$x \cdot y = c, \quad (1)$$

worin c eine Konstante ist.

Zwischen dem Kugelradius x und der Anzahl der Berührungspunkte z besteht die Beziehung:

$$x \cdot z^3 = c_1, \quad (2)$$

worin c_1 wiederum eine Konstante ist.

Aus Gleichung (1) und (2) ergibt sich als Beziehung zwischen der Hohlraumvolumenoberfläche y und der Anzahl der Berührungspunkte z durch Division:

$$\frac{y}{z^3} = c_2;$$

c_2 ist wiederum eine Konstante.

Aus Gleichung (2) ergibt sich, dafs, wenn die Teilchen unendlich klein werden, wie in Beispiel 5, dafs wir dann dementsprechend unendlich viele Berührungspunkte haben werden.

Der Fall, dafs Bodenteilchen ebene Flächen besitzen und sich mit diesen zufällig aneinanderlagern, dürfte nicht vorkommen; hingegen kann die Anzahl der Berührungspunkte auch dadurch eine gröfsere werden, dafs die Oberfläche der Teilchen nicht glatt, sondern rauh ist. Es kann sich dann ein Teilchen so auf das unterliegende auflagern, dafs es dies

¹⁾ Vergl. den Befund von Hilgard, Über die Flockung kleiner Teichen; Wollnys Forschungen 1879, Bd. 2, S. 443; ferner ebenda Bd. 2, S. 57.

wenigstens in drei Punkten berührt; nur dann befindet es sich dem anderen Teilchen gegenüber im stabilen Gleichwichte; auch bei der Anlagerung der Teilchen werden dann oft mehr Berührungspunkte eintreten, dies ist zumal dann der Fall, wenn sich die Teilchen deformieren lassen. Hierbei werden wir im übrigen aber auch stets um so mehr Berührungspunkte im Boden haben, je feiner die Bodenteilchen sind. Da nun einerseits die Fläche eines Körpers um so größer sein muß, je rauher sie ist, und da andererseits, wie wir sahen, die Bodenoberfläche um so größer ist, je feiner die Bodenpartikelchen sind, so würde hieraus folgen:

Je größer die Bodenoberfläche ist, um so größer ist die Berührungsfläche im Boden, an welcher die Molekularkräfte in Wirksamkeit treten können, um so größer ist demnach die Neigung des Bodens zur Krümelbildung. Die Bodenoberfläche wird nun am größten, die einzelnen Bodenteilchen also am kleinsten, wenn diese unter Wasser in ihre Moleküle zerfallen, wie wir uns dies bei den Kolloidsubstanzen der kolloidalen Kieselsäure und dem kolloidalen Ton vorstellen (S. 79); mithin muß ein Boden um so mehr zur Krümelbildung neigen, je reicher er an solchen Substanzen ist.

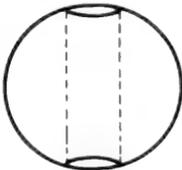


Fig. 18. Glasperle.

Bei dieser Erscheinung gibt es aber eine Ausnahme. Wenn wir z. B. Glasperlen betrachten, wie Fig. 18, so kann bei diesen die Oberfläche der Durchlochung der Perle — sie ist in der Figur im Querschnitt punktiert — für die Berührung nicht in Betracht kommen, wenn sich nicht feinere

Teilchen innen einlagern können. Solche Oberflächen aber finden wir, wie wir sahen, bei den Humussubstanzen im Boden. Da diese wohl identisch sind mit der Oberfläche der Mizellen,¹⁾ so habe ich sie als mizellare Oberfläche bezeichnet. Diese mizellare Oberfläche war schon für eine Flüssigkeit von größerem Molekül unzugänglich, sie kann somit von festen Bodenteilchen nicht mehr berührt werden und so auch nicht für das Verhalten der festen Teilchen zueinander in Betracht kommen. Hierfür kann demnach nur die „nichtmizellare“ oder die „äußere Bodenfläche“ maßgebend sein. Wir kommen auf Grund unserer Betrachtungen somit zu dem Schluß:

Die Neigung eines Bodens zur Krümelbildung ist um so größer, je größer die äußere Bodenoberfläche ist.

Da diese Oberfläche aber, wie wir sahen, bei verschiedenen Materialien folgenden Größen proportional war:

Sand	0,005 (?) oder 0,1
kohlensaurer Kalk	0,17 „ 4,2

¹⁾ v. Nägeli. Theorie der Gärung. München 1879. S. 121.

Tiefland-Moorboden	0,28	oder	6,9
strenger Tonboden	4,04	„	100,0

so müssen wir hieraus folgern, daß der Sand am wenigsten bindig ist; ihm folgen Kalk und Humus. Der Ton muß endlich erheblich bindiger als die anderen Bodenbestandteile sein.

Wir werden später sehen, inwieweit sich dieses experimentell bestätigen läßt.

Daß eine gleichmäßige Krümelbildung notwendig eine gute Mischung der verschiedenartigen Bodenbestandteile, insonderheit der kolloidalen und nichtkolloidalen voraussetzt, ist selbstverständlich. Vor allem wird aber auch die Art der momentanen Aneinanderlagerung einen großen Einfluß ausüben.

Außer dieser momentanen Aneinanderlagerung der festen Bodenteilchen kommt es aber bei der Krümelbildung auch auf den Gehalt des Bodens an Wasser und Luft an, welche in gleicher Weise auf sich selbst wie auf die festen Bestandteile eine Anziehung ausüben. Für die Luft hat dies Voigt¹⁾ experimentell nachgewiesen. Dieser fand, daß zwei Glasplatten auch dann noch aneinander adhärten, wenn ihre Entfernung 0,00036 mm betrug, d. i. ungefähr das Siebenfache des von Quincke bestimmten Radius der molekularen Wirkungssphäre. Es ist dieser Befund nur dadurch zu erklären, daß sich zwischen den Glasplatten Luft verdichtet, welche in Wechselwirkung mit jeder der Glasplatten tritt.

Für den Boden kommt wesentlich nur die molekulare Anziehung zwischen Wasser und festen Bodenteilchen noch in Betracht. Die Arbeit, welche durch diese molekulare Anziehung geleistet wird, läßt sich nachweisen in der beim Benetzen von ganz trockenem Boden frei werdenden Wärme, der „Benetzungswärme“ (s. § 11, a).

Wenngleich die Kraft, mit welcher das Wasser an der festen Substanz adhärirt, geringer ist als die Kraft, welche zwischen zwei festen Teilchen auftritt, so kann doch die erstere dann stärker werden als die letztere, wenn sie an einer entsprechend größeren Fläche zur Wirkung kommen kann. Da nun Wasser benetzbare Substanzen an ihrer ganzen Oberfläche berühren kann, so kann man sich vorstellen, daß an der Stelle, wo sich zwei Bodenteilchen berühren, stärkere Adhäsionskräfte zwischen Wasser und Boden in Wirksamkeit treten, und daß diese bewirken, daß der Zusammenhalt der festen Bodenteilchen durch das Eintreten von Wasser zerstört wird.

Bringen wir so Boden, welcher sich in Krümelstruktur befindet, unter Wasser, so wird dementsprechend je nach dem Verhältnis der Be-

¹⁾ W. Voigt, Einige Beobachtungen über das Verhalten der an Glasflächen verdichteten Luft; Ann. d. Physik u. Chemie 1883, Bd. XIX, S. 42.

rührungsflächen diese Krümelstruktur vollkommen oder weniger vollkommen zerstört. Es wird dies um so weniger vollkommen vor sich gehen müssen, je feiner die Bodenteilchen sind, da dementsprechend die Anzahl der Berührungspunkte derselben, und zwar in weit schnellerer Weise zunimmt, als die benetzbare Bodenoberfläche (vergl. S. 89), und ferner wird es um so weniger vollkommen vor sich gehen, je geringer die Masse der Teilchen ist, und je geringer dementsprechend die Anziehungskraft der Erde hierbei mitwirkt. Bei sehr feinen Teilchen (von strengem Ton) kann sogar oft noch die Zufuhr einer äußeren Kraft, z. B. eine kleine Erschütterung des Gefäßes, in welchem man den krümeligen Boden unter Wasser gesetzt hat, zur völligen Zerstörung der Struktur erforderlich sein. Wir erhalten so unter Wasser wieder die Einzelkornstruktur, eine sehr enge Lagerung des Bodens.

Ist das über dem Boden stehende Wasser entfernt, so verdunstet allmählich auch das Wasser, welches sich zwischen die festen Bodenteilchen eingeschoben hatte, und es treten dann allmählich die Molekularkräfte zwischen den festen Bodenteilchen wieder in Wirksamkeit. — Diese bewirken, daß sich die durch das Wasser noch auseinandergedrängten Bodenteilchen gegenseitig zusammenziehen. Findet an einer Stelle keine gegenseitige Berührung der festen Teilchen statt, so daß die Kraftkomponenten nach dieser Richtung nicht in Wirksamkeit treten können, so werden die festen Teilchen von dieser Stelle infolge der Molekularkräfte weggezogen, und zwar wiederum um so mehr, je größer die Fläche ist, an welcher die Kräfte zur Wirkung gelangen können.

Hierdurch entstehen die Risse im Boden, welche so bei dem Boden, welcher die feinsten Teilchen besitzt (dem Tonboden), am weitesten werden müssen. Trocknet der Boden gleichmäßig von oben nach unten aus, so werden die Risse in senkrechter Richtung zur Erdoberfläche verlaufen müssen. Wird rechtzeitig vor Eintritt der völligen Wasserverdunstung das Bodengefüge mechanisch (durch die Bodenbearbeitung) an vielen Stellen auch in horizontaler Richtung zerrissen, so bilden sich allenthalben auch horizontal solche Risse, und der Boden geht wiederum in die Krümelstruktur über. Die Größe der Bodenkrümel hängt dann vornehmlich von der Menge der Risse ab, welche wir künstlich in das Bodengefüge hineinbringen.

Besitzt ein Bodengefüge im trockenen Zustande nur eine sehr geringe Neigung zur Krümelbildung, wie dies bei allen gröbereren Bodenteilchen, z. B. bei grobem Sand der Fall ist, so kann durch das Eintreten von Wasser in die Hohlräume dadurch ein stärkerer Zusammenhang der Bodenteilchen bewirkt werden, daß sich möglichst zahlreiche Wasserminisken bilden, so daß die Bodenteilchen jetzt infolge der Oberflächenspannung des Wassers zusammengehalten werden. Diese Kraft ist vollkommen abhängig von der Krümmung der einzelnen Minisken und von ihrer Anzahl.

Sie wird um so größer sein, je mehr wir die festen Teilchen mit Wasser und Luft durchkneten. Ist die Anziehungskraft der festen Teilchen aber eine größere, sind dieselben feiner, so wird die Oberflächenspannung des Wassers hiergegen zu gering sein, und es wird dann notwendig dadurch, daß sich mehr und mehr Wassermoleküle zwischen die festen Teilchen einlagern, Oberflächenenergie verloren gehen, ohne daß man den geringen Gewinn an Kapillaritätsenergie hiergegen zu messen vermag, d. h. bei feinen festen Bodenbestandteilen nimmt die Bindigkeit des Bodens mit zunehmendem Wassergehalte dauernd ab.

Wir wollen nun in den folgenden Paragraphen untersuchen, wie sich die hier entwickelte Anwendung der Molekulartheorie auf die Krümelbildung des Bodens mit von einer großen Anzahl von Forschern beobachteten Erscheinungen im Boden in Einklang bringen läßt. Als solche Erscheinungen, welche von den festen Bodenteilchen und ihren Eigenschaften bedingt werden, kommen in Betracht:

1. die Volumenveränderung des Bodens,
2. die Bindigkeit des Bodens,
3. die Klebrigkeit des Bodens und die Adhäsion und die Reibung desselben an Holz und Eisen.

§ 16. Die Bestimmung des Hohlraumvolumens des Bodens und die Veränderung desselben.

Wenn man mit Schübler¹⁾ von einer „Volumenverminderung“ oder mit Wollny u. a. von einer „Volumenveränderung“ des Bodens sprechen will, so ist hiermit stets nur eine Veränderung der Größe des Hohlraumvolumens des Bodens gemeint. — Bevor ich aber auf die Veränderung dieses Hohlraumvolumens an der Hand der alten Versuche eingehe, sollen deshalb zwei Methoden zur Bestimmung desselben hier angegeben werden.

1. Methode. Bestimmung des Hohlraumvolumens:

a) des trockenen oder b) des gewachsenen Bodens.²⁾

a) Lufttrockener Feinboden wird in ein Volumenmaß — es genügt ein Maß von $\frac{1}{10}$ l Inhalt — eingefüllt, das Maß wird oben mit einem Messer glatt abgestrichen; sehr brauchbar ist hierfür u. a. der „neue Getreideprober“ von 1893; der Boden wird dann bei 100° C. getrocknet und gewogen (man erhält so das sog. „Volumgewicht des Bodens“), oder

b) ein 10 cm langes und 10 cm weites Eisenrohr, welches nach unten angeschärft und schwach verjüngt ist, wird durch langsame Schläge mit einem sehr breiten Holzhammer oder Schlegel in die Erde getrieben.

¹⁾ G. Schübler, l. c. II, S. 79.

²⁾ E. Ramann, Forstliche Bodenkunde und Standortslehre. Berlin 1893, Seite 60.

Bedingung für übereinstimmende Resultate ist ein sehr gleichmäßiges Schlagen; sowie sich der Apparat nicht ganz gerade einbohrt, erhält man fehlerhafte Bestimmungen. Ist die Oberfläche der Erdsäule mit der übrigen Erde in gleicher Höhe, was mit völligem Eintrieb des Apparates der Fall sein muß, so wird die obere Öffnung durch einen in Nutzen gehenden Deckel geschlossen. Es wird sodann der Apparat im Boden seitlich freigelegt und die Erdsäule unten mit einem scharfen Blech abgeschnitten und dann der Apparat auf diesem Blech herausgenommen. Der Boden wird auch in diesem Falle flach ausgebreitet, bei 110° C. getrocknet und gewogen. Das Volumenmaß beträgt in diesem Falle, wenn das Rohr unten einen Durchmesser von 10 cm besitzt, 785 ccm.

Es wird ferner das spezifische Gewicht des Bodens (c) bestimmt. Mit Hilfe desselben berechnet man aus dem Gewicht (G) des Bodens das von den festen Bodenteilchen eingenommene Volumen. Dies subtrahiert man von dem Volumen des angewandten Maßes (V) und erhält so das Hohlraumvolumen des Bodens (H), welches noch auf die Maßseinheit mittelst eines entsprechenden Faktors c zu reduzieren ist. Derselbe beträgt bei dem für den gewachsenen Boden beschriebenen Ramannschen Raummaß $\frac{1000}{785}$. Das Hohlraumvolumen ist demnach:

$$H = \left(V - \frac{G}{s} \right) \cdot c.$$

2. Methode. Bestimmung des Hohlraumvolumens des nassen Bodens.¹⁾

Es wird getrockneter Boden in einem Gefäß abgewogen, dann unter Wasser aufgeschlämmt und evakuiert, um die Luft zu entfernen. (Man kann hierzu die Bodenprobe nehmen, mit welcher das spezifische Gewicht ermittelt wurde.) Man läßt dann den Boden absitzen und entfernt das überstehende Wasser. Der Boden wird so lange eingerüttelt, wie noch Wasser aus demselben oben austritt, was jedesmal abgiefßen ist. Läßt sich das Wasser selbst, nachdem sich die Bodenteilchen leidlich gut abgesetzt haben, nicht klar abgiefßen, so gießt man es auf ein gewogenes Filter, trocknet die abgeschwämmten Teile auf demselben bei 105° C. und wägt sie zurück. Man kann dieselben, ohne einen wesentlichen Fehler zu begehen, von der angewandten Bodenmenge in Abzug bringen. Es wird dann die vom Boden aufgenommene Wassermenge resp. das im Boden enthaltene Hohlraumvolumen bestimmt. Mit Hilfe des spezifischen Gewichtes (s) wird wiederum das vom Boden (G) eingenommene Volumen festgestellt. Hierzu wird das vom Wasser eingenommene Volumen (w) addiert; man erhält so das gesamte Bodenvolumen. Das Hohlraum-

¹⁾ A. Mitscherlich, Fühlings landw. Zeitung 49. Jahrg., 7. Heft, S. 260.

volumen (H) erhält man in diesem Falle durch Division des vom Wasser eingenommenen Volumens durch das gesamte Bodenvolumen, also nach der Formel:

$$H = \frac{w}{\frac{G}{s} + w}$$

oder

$$H = \frac{1}{1 + \frac{G}{s \cdot w}}$$

Das Hohlraumvolumen wird nach beiden Methoden ganz verschieden groß gefunden werden. Beim gewachsenen Boden haben wir die Krümelstruktur, beim trocknen Boden fast die Einzelkornstruktur und beim nassen Boden ausschließlich die Einzelkornstruktur; doch sind hier noch die einzelnen festen Teilchen mit Wasserhüllen umgeben, welche unter Umständen einer engsten Lagerung entgegenwirken können, während sonst die Teilchen unter Wasser leichter verschiebbar sind und sich somit nach vollständigem Verlust der Krümelstruktur zueinander am engsten lagern können.

Ich stellte bei den schon zu den früheren Versuchen herangezogenen Bodenarten nach beiden Methoden, und zwar 1. für den trocknen und 2. für den nassen Feinboden folgende Hohlraumvolumen fest. (Siehe Näheres I. c. S. 262 u. 263.)

Bezeichnung des Bodens:	Hohlraumvolumen		Spez. Gewicht
	ad 1	ad 2	
Tiefland-Moorboden	0,78	0,72	2,03
Humusreicher Sandboden	0,59	0,56	2,45
Humoser Sandboden	0,55	0,37	2,59
Sandboden	0,48	0,33	2,65
Lehmiger Sandboden	0,50	0,36	2,62
Sandiger Lehmboden	0,56	0,35	2,64
Strenger Tonboden	0,59	0,69	2,70
Kohlensaurer Kalk	0,56	0,54	2,70

Die Lagerung der Teilchen unter Wasser ist also überall eine dichtere, bis auf die bei dem strengen Tonboden. Hier werden die außerordentlich feinen Teilchen durch die sie umgebenden Wasserhüllen sogar noch weiter auseinandergedrängt, als sie im lufttrockenen Zustand in Krümelstruktur gelagert sind:

Krümel des strengen Tonbodens abgesiebt durch Rundlochsiebe von einem Lochdurchmesser von	Hohlraumvolumen ad 1
< 4,0 > 1,5 mm	0,67
< 6,5 > 4,0 „	0,69

Werden demnach die festen Bodenteilchen sehr fein, wird die nicht-mizellare Bodenoberfläche dementsprechend sehr groß, so kann ein Boden bei Einzelkornstruktur unter Wasser ein größeres Hohlraumvolumen haben als bei Krümelstruktur.

Diese Vergrößerung des Volumenmaßes einer Substanz durch die Einlagerung von Wassermolekülen wird gewöhnlich als Quellung bezeichnet. Ich möchte diesen Ausdruck jedoch nur auf solche Substanzen angewandt wissen, die quellen, ohne unter Wasser zu zerfallen, bei denen sich also das Wasser in den mizellaren Hohlräumen ansammelt. Beim Ton ist dies, wie wir sahen, nicht der Fall.

Maßgebend für das Hohlraumvolumen eines Bodens ist auch das sog. Volumgewicht, welches wohl zuerst von Schübler¹⁾ festgestellt wurde. Es kann dasselbe jedoch nur bei gleichem Material, gleichem Feuchtigkeitsgehalt und bei gleichartiger Lagerung einen Anhalt für das Hohlraumvolumen geben. Erwähnt seien deshalb hier nur folgende Resultate Wollnys:²⁾

	Korndurchmesser	Volumgewicht
Lehmpulver	> 0,25 mm	1,246
Lehmkrümel	0,50—1,00 „	1,062
„	1,00—2,00 „	1,056
„	2,00—4,00 „	1,042
„	4,00—6,75 „	1,032
„	6,75—9,00 „	1,016

Man ersieht hieraus, daß das Volumgewicht des Bodens bei angenäherter Einzelkornstruktur sehr viel größer ist als bei der Krümelstruktur und daß somit das Hohlraumvolumen im ersteren Falle sehr viel kleiner ist als bei der Krümelstruktur des Bodens. Die Veränderung der Größe des Hohlraumvolumens mit der Größe der Krümel dürfte hingegen vollkommen innerhalb der Fehlergrenze der Methode liegen.

Bei Versuchen Wollnys mit Sand von verschiedener Korngröße zeigen sich in den Resultaten der Volumgewichte derartige Schwankungen, daß kaum ein Schluß auf die Veränderung der Größe des Hohlraumvolumens zulässig sein dürfte. Daß hingegen bei engerer Lagerung der Bodenteilchen, sowie mit dem Steingehalt des Bodens das Volumgewicht größer resp. das Hohlraumvolumen des Bodens geringer wird, bedarf wohl keiner weiteren experimentellen Bestätigung.³⁾ Desgleichen glaube ich hier von der Anführung weiterer Volumgewichte im allgemeinen absehen zu

¹⁾ G. Schübler, Grundsätze der Agrikulturchemie. Leipzig 1830, S. 60.

²⁾ E. Wollny, Das Volumgewicht der Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 8, S. 354 u. f.

³⁾ Vergl. E. Wollny, l. c.

können, weil diesen kein großer Wert beigelegt werden darf. Es seien deshalb hier nur die Volumgewichte trockener Bodenarten, die nach der Methode 1a bestimmt wurden,¹⁾ angeführt, um zu zeigen, innerhalb welcher Grenzen dieselben bei verschiedenen Bodenarten schwanken.

	Volumgewicht des trockenen Bodens (in g pro cem)
Moorboden	0,45
Humusreicher Sandboden	1,00
Humoser Sandboden	1,17
Sandboden	1,39
Lehmiger Sandboden	1,31
Sandiger Lehmboden	1,16
Strenger Tonboden	1,15

Für den gewachsenen Boden sind die Hohlraumvolumina verschiedener Bodenarten nach Ramann (l. c.) die folgenden:

Sand (unter Moor gelagert)	0,30
Lehmböden	0,47—0,50
Lehmböden (nach Schwarz)	0,45
Ton (nach Schwarz)	0,53
Moorböden (nach Schwarz)	0,84
Torfböden	0,84—0,85.

Natürlich schwanken diese innerhalb weiter Grenzen je nach der Art der Lagerung. So fand Ramann²⁾ auch eine bedeutende Abnahme des Hohlraumvolumens mit der Bodentiefe bei Diluvialsandböden:

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	Profil	Profil	Profil	Profil	Profil (Düne)	Profil
Oberfläche bis 11 cm Tiefe	0,55	0,56	0,58	0,53	0,51	0,41
„ in 20—31 cm Tiefe	0,45	0,47	0,50	0,44	0,46	0,42
„ „ 40—51 „ „	0,45	0,42	0,43	0,45	0,40	0,38
„ „ 60—71 „ „	0,41	0,41	0,43	0,45	0,38	0,36
„ „ 80—91 „ „	0,43	0,41	0,42	0,44	0,37	0,35

G. Schübler stellte (l. c.) die Volumenverminderung fest, welche der Boden durch Austrocknen erleidet. Zu diesem Zwecke formte er von nassem Boden würfelförmige Stücke von bestimmter Größe. Diese Bodenwürfel wurden dann von neuem ausgemessen, sobald sie kein Wasser mehr

¹⁾ Vergl. A. Mitscherlich, l. c. S. 260; vergl. die mechan.-chem. Analyse der Bodenarten auf S. 35.

²⁾ E. Ramann, Unters. über Waldböden; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. XI, S. 303—318.

abgaben, d. h. sobald sich ihr Gewicht nicht mehr änderte. Schübler fand so die folgende Volumenverminderung bei verschiedenen Bodenarten:

<i>Quarzsand und Kalksand</i>	0,0 %
<i>Feiner kohlenaurer Kalk</i>	5,0 "
45 % Sand + 55 % Ton	6,0 "
24 " " + 76 " "	8,9 "
10 " " + 90 " "	11,4 "
<i>Reiner grauer Ton</i>	18,3 "
Schiefriger Mergel (85 % Ton enthaltend)	9,5 "
<i>Humus</i>	20,0 "
Gartenerde (52 % Ton + 7,2 % Humus enthaltend)	14,9 "
Ackererde (51 " " + 3,4 " " " ")	12,0 "

Kalk erhöht hiernach die Volumenverminderung gegen Sand nur in geringer Weise, wohingegen Ton und namentlich Humus einen sehr großen Einfluß auf dieselbe ausüben.

Diese Volumenverminderung beim Austrocknen kann nicht in direkter Beziehung zur äußeren Bodenoberfläche stehen, denn das Wasser dringt auch in die mizellaren Hohlräume ein und bewirkt hier die Quellung. Wir werden deshalb untersuchen, ob eine Abhängigkeit zwischen der gesamten Bodenoberfläche und der Volumenverminderung besteht.

	Volumenverminderung	Hygroskopizität
Quarzsand	0,0	0,0
Feiner kohlenaurer Kalk	5,0	1,0
Kaolin	—	5,4
Reiner grauer Ton	18,3	—
Humus	20,0	—
Moorboden (45 % Humus)	—	18,9
Strenger Tonboden (92 % Ton)	—	23,8

Wie man aus den vorstehenden Zahlen ersieht, bestehen in der Tat offenbar sehr enge Beziehungen zwischen beiden Größen. Ein direkter Vergleich ist naturgemäß deshalb nicht möglich, weil den Beobachtungen jedesmal verschiedenes Material zugrunde lag, so insonderheit bei den Ton- und Humussubstanzen.

§§ 17—22. Die Bindigkeit des Bodens.¹⁾

Für die Bindigkeit des Bodens und alle Bodeneigenschaften, welche mit dieser im Zusammenhange stehen, ist nach § 11 die Bodenober-

¹⁾ Den hierfür von Schumacher (Physik des Bodens, Berlin 1864, S. 125) eingeführten Ausdruck „Kohärenzenz“ will ich nach dem Vorbilde Ramanns (l. c. S. 112) fallen lassen.

fläche in Betracht zu ziehen, welche für die Aneinanderlagerung der festen Teilchen maßgebend ist. Die Bindigkeit wird demnach unter sonst gleichen Umständen um so größer sein, je größer die äußere Bodenoberfläche ist.

Für die Bindigkeit der festen Bodenteilchen kann als Maß der Widerstand dienen, welchen die Bodenmasse einer Trennung, sei es durch Zug (relative Festigkeit), sei es durch Druck (absolute Festigkeit), oder welchen sie ferner dem Eindringen eines keilförmigen oder kegelförmigen Körpers (Trennungswiderstand) entgegensetzt. Die Bindigkeit des Bodens ist nicht nur abhängig von der Größe und Gestalt der festen Bodenteilchen, sondern auch, wie wir sahen, von ihrer momentanen Aneinanderlagerung, der jeweiligen Krümelbildung und insonderheit von dem momentanen Wassergehalte des Bodens. Sofern nicht alle diese Faktoren normiert werden — einzelne lassen sich überhaupt nur angenähert normieren —, hat eine Bestimmung der Bindigkeit des Bodens nur einen sehr untergeordneten Wert.

Die Methoden, welche zur Untersuchung derselben vorgeschlagen sind, zerfallen in zwei Kategorien. Die ersten beschäftigen sich mit dem einzelnen Bodenkrümel, die anderen mit dem gesamten gewachsenen Boden.

a) §§ 17—19. Methoden betreffend die Bestimmung der Festigkeit des Bodenkrümel.

§ 17. Die relative Festigkeit des Bodenkrümel.

Eine Methode zur Bestimmung der relativen Festigkeit des Bodens hat meines Wissens nur R. Heinrich beschrieben. Haberlandt¹⁾ will auch diese Größe dadurch messen, daß er eine an ihren beiden Enden unterstützte Bodensäule durch ein Blechband zerschneiden läßt. Die hierbei gefundene Größe dürfte aber nicht als „relative Festigkeit“, sondern als „Trennungswiderstand“ zu bezeichnen sein. —

Heinrich²⁾ verfährt in folgender Weise. Er durchfeuchtet den Boden zunächst derart gleichmäßig, daß er gerade die Hälfte derjenigen Wassermenge enthält, welche er nach einem vorher anzustellenden Laboratoriumsversuch im Höchsfalle zurückzuhalten vermag. Darauf wird der Boden zwischen zwei Eisenbleche von je 1 qdm Größe derart eingepreßt, daß die Bodenschicht 5—10 cm stark ist. Der herausgequetschte Boden wird mit einem scharfen Messer abgeschnitten. Alsdann wird die eine Platte an vier an ihren Ecken befindlichen Haken mittelst

¹⁾ F. Haberlandt, Über die Kohärenzenverhältnisse verschiedener Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrik.-Physik Bd. 1, 1878. S. 150.

²⁾ R. Heinrich, Grundlagen zur Beurteilung der Ackerkrume. Wismar 1882, S. 226.

eines Fadens aufgehängt. An der unteren Platte, deren Mitte mit einem Haken versehen ist, wird ein kleines Körbchen angehängt, welches man so lange allmählich mit feinem Sand belastet, bis die Bodensäule zerreißt. Nun wird die ganze abgerissene Masse, also die Platte mit der anhaftenden Erde, das Körbchen und die in dies eingefüllte Sandmenge gewogen. Ihr Gewicht entspricht der Kraft, welche nötig war, um den Zusammenhang einer Erdschicht von 1 qdm Querschnitt aufzuheben. Heinrich selbst sagt, daß die Methode keineswegs unverbesserlich sei. Jedenfalls läßt sie sich nur anwenden, wenn die Adhäsion des Bodens an der Eisenplatte größer ist als die Kraft, mit der die Bodenteilchen zusammengehalten werden. Für viele Bodenarten kommt sie somit gar nicht in Betracht.

Abgesehen davon, daß diese relative Festigkeit des Bodens je nach der momentanen Lagerung der Teilchen bei ein und demselben Boden verschieden groß sein wird, war es auch erforderlich, den Wassergehalt jedes Bodens nach Vorschrift zu normieren. Würde die relative Festigkeit zu dem maximalen Wassergehalte des Bodens stets in gleicher Beziehung stehen, so wäre die Methode einwandfrei und lieferte dann bei verschiedenen Bodenarten vergleichbare Resultate. Der Beweis dafür, daß eine solche Beziehung besteht, ist aber nicht erbracht worden; auch dürfte er, wie wir später sehen werden, deshalb nicht zu erbringen sein, weil für die maximale Wassermenge, welche ein Boden aufzunehmen vermag, ganz andere Größen maßgebend sind als für die relative Festigkeit des Bodens. Somit wechselt die relative Festigkeit des Bodens mit dem Wassergehalte desselben (ausgedrückt in Prozenten des maximalen Wasserfassungsvermögens) bei verschiedenen Bodenarten in ganz verschiedener Weise, und unsere nach der Heinrichschen Methode bestimmte relative Festigkeit des Bodens gibt uns daher gar keinen Anhalt dafür, wie sich die relative Festigkeit des einen Bodens im *allgemeinen* zu der eines anderen Bodens verhält. — Immerhin dürfte die Heinrichsche Methode die einzige sein, mit der man diese Bodeneigenschaft zu messen vermag.

Resultate von Bodenarten, welche nach dieser Methode untersucht wurden, sind mir nicht bekannt.

§ 18. Die absolute Festigkeit des Bodenkrümel.

Die absolute Festigkeit des Bodens läßt sich durch den Druck bestimmen, welcher erforderlich ist, um die Bindigkeit des Bodens zu zerstören. Eine Methode zur Bestimmung desselben stammt von Haberlandt.¹⁾ Dieser formte hierfür Bodenzylinder von 2 cm Durchmesser und 2 cm Höhe, indem er gleichmäßig durchfeuchteten Boden in einen beiderseits offenen

¹⁾ F. Haberlandt, Über die Kohärenzenverhältnisse verschiedener Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik 1878. Bd. 1. S. 150.

Glaszylinder einpresste, diesen dann mit einem Stöpsel auf eine Glasplatte herausdrückte, dann trocknete und eventuell unter Zuhilfenahme von Raspel und Feile in die bestimmte Länge brachte. Es wurde nun auf den Zylinder ein entsprechender, mit einer Platte versehener Zapfen aufgesetzt, und dieser nach und nach durch Auflegen von Gewichten auf die Platte so lange beschwert, bis der Bodenzylinder plötzlich barst oder zerquetscht wurde. Mittelst einer zweckentsprechenden Führung der Platte in einem Gerüst wurde verhindert, daß der Zapfen beim Beschweren der Platte durch Gewichte aus seiner vertikalen Lage verrückt wurde. Parallelbestimmungen wiesen einen wahrscheinlichen Fehler der einzelnen Beobachtung von $\pm 4,6\%$ auf. Diese und weitere¹⁾ Versuche von Haberlandt finden eine sehr gute Bestätigung und Ergänzung in einer Arbeit von Puchner,²⁾ aus der hier einige Resultate mitgeteilt werden mögen.

Absolute Festigkeit in g nach Puchner.

Feinheit des Kornes, Durchmesser in mm	% der von dem Boden aufnehmbaren maximalen Wassermenge					
	80	60	40	20	0	
	g	g	g	g	g	
Quarzsand	0,010—0,071	4146	4 403	4 679	3 805	775
	0,071—0,114	767	883	525	292	132
	0,114—0,171	342	275	192	112	68
	0,171—0,25	225	127	85	60	7
	0,25 —0,5	110	92	68	42	0
	0,5 —1,0	50	25	12	0	0
	1,0 —2,0	15	0	0	0	0
Kalksand	0,010—0,071	2058	2 542	3 125	3 463	2 857
	0,071—0,114	800	933	1 075	917	858
	0,114—0,171	525	625	692	525	442
	0,171—0,250	267	333	558	470	382
Quarzsand	475	954	1 450	908	78	
Kalksand	752	1 258	1 618	2 258	2 042	
Humus	1208	1 292	1 000	542	47	
Kaolin	—	19 224	21 188	23 644	32 949	

¹⁾ F. Haberlandt, Wissenschaftlich praktische Untersuchungen auf dem Gebiete des Pflanzenbaues Bd. 1. Wien 1875. S. 22. Vergl. auch ²⁾ S. 199—200.

²⁾ H. Puchner, Untersuchungen über die Kohäszenz der Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 12. 1889, S. 226 u. f.

Die Korngrößen des Quarzsandes und Kalksandes (enthaltend 86 % kohlen-sauren Kalk) wurden nach der Siebmethode bestimmt. Der Humus wurde durch Extraktion von Torf mittelst Alkohol und Äther und mittelst Salzsäure gewonnen und dann durch Zerreiben und Sieben der luft-trockenen Masse in ein staubartiges Pulver übergeführt.

Zunächst läßt sich aus den Resultaten ohne weiteres folgern, daß je feiner die Bodenteilchen sind, um so größer die Festigkeit der Krümel ist. Übertragen wir diesen beim Quarzsand und Kalksand festgestellten Befund auf die verschiedenen Bodenarten, so ergibt sich:

1. daß der Kalksand, welcher durch die gleichen Siebe wie der Quarzsand abgeseibt wurde, feiner ist als der letztere. Seine festen Teilchen müssen gemäß den Ausführungen bei der Siebmethode demnach mehr von der Kugelgestalt abweichen als die des Quarzsandes.
2. Der abgeseibte Humus muß gröbere Teilchen besitzen als der feinste Sand und Kalk, der Ton allen anderen Bodenarten gegenüber außerordentlich feine.

Es war so natürlich, daß Puchner, wenn er Ton mit seinem feinsten Sand und mit dem feinsten Kalk versetzte, feststellen mußte, daß die Festigkeit desselben nicht in dem Maße abnahm, wie wenn er den Ton mit dem von ihm hergestellten Humus in gleicher Weise vermengte. Desgleichen war es selbstverständlich, daß die absolute Festigkeit des feinen Sandes durch Humuszusatz geringer werden mußte.

Dieser Befund berechtigt aber *keineswegs* zu der Schlußfolgerung, die Puchner aus seinen Resultaten gezogen hat, und die von anderen Forschern wiederholt aufgenommen ist:

„daß die absolute Festigkeit des Humus am geringsten, die des Tones am größten ist, während jene des Quarzes zwischen beiden Extremen steht,“

daß also demnach Beimengungen von Humus und Quarz den Ton lockerer, daß ferner aber auch eine Beimengung von Humus den Sand lockerer gestaltet. — Schon die langjährige praktische Erfahrung, daß Humus zwar Tonboden lockerer, aber Sandboden bindiger macht, widerspricht diesem Befunde direkt. Der Grund für den Widerspruch liegt in der unstatthafter Verallgemeinerung der Puchnerschen Resultate. Was für den speziellen „feinsten Quarzsand“ und für den speziellen eigenartig hergerichteten „Humus“ gilt, ist keineswegs auf jeden Sand und auf jeden Humus zu übertragen. Hätte Puchner seine Bodengemische schon mit den zweitfeinsten Sandteilchen hergestellt, so würde er zu den seinen gerade entgegengesetzten Resultaten gekommen sein. Der Sand unserer Kulturböden ist aber fast stets gröber, der Humus in der Regel viel feiner und anders geartet als der, welcher zu den vorliegenden Versuchen verwendet wurde, und so bestehen die praktischen Erfahrungen trotz der anscheinend

ihnen widersprechenden Resultate der vorliegenden Puchnerschen Versuche vollkommen zu Recht.

Betreffend den Einfluß des Wassergehaltes des Bodens auf seine absolute Festigkeit läßt sich aus den mitgeteilten Zahlen ersehen, daß ein größerer Wassergehalt grobkörnigen Boden (infolge der Meniskenbildung) bindiger, feinkörnigen Boden, z. B. Ton, infolge der verminderten Adhäsionskraft, lockerer gestaltet. Dazwischen gibt es alle Übergänge. Diese Übergänge würden sich bei den verschiedenen grobkörnigen Bodenarten gleichartig vorfinden, wenn für den maximalen Wassergehalt nicht auch die Hohlräume innerhalb der festen Bodenteilchen in Betracht kämen, welche bei der Aneinanderlagerung der festen Teilchen nicht in Betracht zu ziehen sind. Hierdurch erklärt sich, daß z. B. die absolute Festigkeit des Puchnerschen „Humus“ mit der Verminderung des Wassergehaltes desselben auffallend stark abnimmt.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der absoluten Festigkeit des Bodenkrümel ist von Hazard¹⁾ beschrieben worden. Derselbe knetete 30 g Boden mit Wasser durch, formte ihn zu einer Kugel und ließ diese sodann an der Luft trocknen. Darauf legte er diese Kugel und zwei Kiesel von gleicher Größe so auf eine feste Unterlage, daß sie die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks von 30 cm Seitenlänge bildeten. Über das Ganze wird alsdann vorsichtig ein Brett gelegt und dieses so lange mit Gewichten beschwert, bis die Bodenkugel zerdrückt wird. Das Gewicht des Brettes + dem der aufgelegten Gewichte ergibt ihm dann die Belastungsgrenze des betreffenden Bodens. Die Gewichte müssen hierbei natürlich möglichst in der Mitte des Brettes aufgelegt werden. Da hier das Bodenkrümel nur ein Drittel der aufgelegten Belastung zu tragen hat, so vermag man mit Hilfe dieser Methode auch noch bei sandigen Bodenarten die Belastungsgrenze festzustellen. Hazard fand so

	für Diluvialsand, kiesig, eine Belastungsgrenze von . . .	12— 18 kg
	„ zweiglimmerigen Granit, feinkörnig, eine solche von	17— 63,5 „
	„ lössartigen Lehm eine solche von	62—152 „
und	„ Geschiebelehm eine solche von	106,5 „

§ 19. Der Trennungswiderstand des Bodenkrümel.

Der Trennungswiderstand des Bodenkrümel läßt sich auf zweierlei Art bestimmen: entweder dadurch, daß man das Krümel auf eine feste Unterlage legt und beobachtet, welchen Druck man anwenden muß, um dasselbe zu zerteilen, oder dadurch, daß man dasselbe an seinen beiden Enden auflegt und dann beobachtet, welche Zugkraft zur Zerteilung des-

¹⁾ J. Hazard, Die geologisch-agronomische Kartierung als Grundlage einer allgemeinen Bonitierung des Bodens; Landw. Jahrb. 1900, S. 892—905.

selben erforderlich ist. Die erste dieser beiden Methoden stammt von G. Schübler.¹⁾ Ich lehne die Beschreibung des erforderlichen Apparates an die l. c. wiedergegebene Figur Schüblers an (Fig. 19). Der genannte Forscher formt zur Untersuchung aus gleichmäßig durchnäßigtem Boden in einer Holz- oder besser Metallform viereckige, längliche Stücke von der Größe $0,9 \cdot 0,9 \cdot 5,3$ ccm, welche bei ca. 60° C. getrocknet werden. Das Instrument, mit welchem dann die Festigkeit dieser künstlichen Krümel erprobt wird, ist das folgende:

„ pq ist ein Wagbalken von 53 cm Länge; p ist eine Kugel von Blei, durch welche die an dem längeren Hebelarm befindliche Wagschale m im Gleichgewicht erhalten wird, solange letztere nicht mit Gewichten beschwert wird; der Hebelarm bewegt sich in einem gabelförmigen Ausschnitt h , welcher in hh im Durchschnitt noch besonders gezeichnet ist; n ist von Stahl, stumpf spatelförmig sich endigend, 0,75 mm dick, unten 9 mm breit, entsprechend der Breite der zu

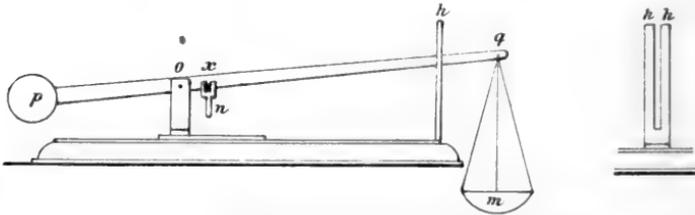


Fig. 19. Trennungswiderstandsmesser nach Schübler.

prüfenden viereckig geformten Erden; dieser kleine Spaten ist an dem Wagbalken in x durch einen Stift so befestigt, daß er immer eine senkrechte Richtung annehmen kann. Die zu prüfende Erde wird nun unter den kleinen Spaten gebracht, und in die Wagschale werden so lange kleine Gewichte gelegt, bis die Erde durchgeschnitten wird. Ist von o bis q eine Länge von a cm ($= 32$ cm), während der Befestigungspunkt des kleinen Spatens x von o $\frac{a}{12}$ cm entfernt ist, so drückt ein in die Wagschale gelegtes Gewicht von 1 kg auf die Erde mit einer Kraft von 12 kg.“

Die Versuche sind öfters mit neugeformten Proben des gleichen Bodens zu wiederholen, und es ist dann das Mittel aus den Resultaten zu ziehen. Bei den angegebenen Dimensionen des Apparates waren im Höchsthalle $2\frac{1}{4}$ kg Gewicht aufzulegen. Setzt man dies größte bei reinem Ton erforderliche Gewicht gleich 100, so waren nach den Schüblerschen Versuchen die Resultate für verschiedene Bodenarten die folgenden:

¹⁾ G. Schübler, Grundsätze der Agrikulturrechemie II, S. 72 u. Fig. 1.

<i>Quarz- und Kalksand</i>	0,0 ‰
<i>Feiner kohlenaurer Kalk</i>	5,0 "
Gipserde	7,3 "
45 ‰ Sand + 55 ‰ Ton	57,3 "
24 " " + 76 " "	68,8 "
10 " " + 90 " "	83,3 "
<i>Reiner grauer Ton</i>	100,0 "
Schiefriger Mergel (85 ‰ Ton enthaltend)	23,0 "
<i>Humus</i>	8,7 "
Gartenerde (52 ‰ Ton + 7,2 ‰ Humus enthaltend)	7,6 "
Ackererde (51 " " + 3,4 " " " ")	33,0 "

Auch aus diesen Zahlen ergibt sich, daß Sand (0,0) die geringste Bindigkeit besitzt; ihm folgt Kalk (mit 5,0), dann der Humus in angenehrt gleicher Höhe (mit 8,7), wo hingegen auch hier der Ton (mit 100,0) wieder das andere Extrem bildet.

Die Widerstandsfähigkeit gegen Trennung durch Zug ist von Haberlandt¹⁾ bestimmt worden. Derselbe formte in der früher (S. 100) angegebenen Weise Bodenzylinder von 10 cm Länge. Diese wurden dann mit beiden Enden je 2 cm weit auf feste Unterlagen gelegt. In ihrer Mitte wurde ein 2 mm breites Tragband aus Blech aufgelegt, an welchem unten eine Wagschale befestigt ist, die nach und nach mit schwereren Gewichten belastet wurde, bis der Bodenzylinder zerbrach. Das Gewicht, welches dieser schließlichen Belastung vorausging und von dem Boden noch getragen zu werden vermochte, ist die gesuchte Größe. Haberlandt fand, daß diese Widerstandsfähigkeit des Bodens gegen die Zugkraft bei verschiedenen Bodenarten angenähert in gleicher Weise variierte, wie die von den gleichen Bodenarten bestimmte absolute Festigkeit. Auch zeigte sich bei zunehmendem Wassergehalte eines Bodens eine entsprechend gleiche Verringerung des Zugwiderstandes, wie der absoluten Festigkeit. Kalk wirkte auch auf diese Größe sehr stark vermindernd ein; der Einfluß des Humus (Kohlepulver) war geringer.

b) §§ 20–22. Methoden betreffend die Bestimmung der Bindigkeit des gewachsenen Bodens.

Bislang hatten wir uns lediglich mit der Bindigkeit des Bodenkrümel beschäftigt. Es ist nicht zu leugnen, daß diese bei der Bearbeitung eines Bodens eine sehr wesentliche Rolle spielt, jedoch ist sie durchaus nicht allein maßgebend für den Widerstand, welchen der ge-

¹⁾ F. Haberlandt, Über die Kohärenzverhältnisse verschiedener Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik 1878, Bd. 1, S. 150.

wachsene Boden den Ackerwerkzeugen entgegengesetzt. Der Widerstand würde nur in dem Falle der gleiche sein wie bei der Schüblerschen Methode, wenn man das Instrument an einem Erdklumpen ansetzt, der auf festem Boden aufgelagert ist, und dessen Teilchen frei beim Zerbersten des Klumpens nach der Seite ausweichen können. So aber weichen auch die unter dem Bodenklumpen befindlichen Teilchen mit aus, auch hier wie seitlich werden Bodenkrümel, wie bei dem Haberlandtschen Versuch (betreffend die absolute Festigkeit des Bodens) zerpreßt; die einzelnen Teilchen werden zwar teilweise in die Zwischenräume, welche zwischen den gröbereren Bodenkrümeln gebildet sind, hineinbröckeln (z. B. beim Krümmern und Eggen), sie werden aber teilweise, namentlich wenn sich der Boden sehr dicht gelagert hat, wie dies z. B. vor dem Ziehen der Schälfruche der Fall sein dürfte, andere Teilchen beiseite schieben müssen; diese müssen wieder andere verdrängen usf., bis sich die letzten Teilchen schliesslich nach oben emporheben (z. B. beim Untergrundpflug). Ist ein Boden einmal in Krümelstruktur übergeführt, so ist eine Bearbeitung desselben, welche bezweckt, die Krümel noch weiter zu zerkleinern, somit sehr leicht, es kommt dann nur darauf an, die Krümel zu zerbröckeln, ohne daß dadurch die Teilchen wesentlich gegeneinander verschoben werden. Soll aber aus der nach der Erntezeit mehr oder weniger dichten Lagerung des Bodens die Krümelstruktur wiederhergestellt werden, so ist eine grössere Menge von Bodenteilchen zu bewegen und die hierzu erforderliche Arbeit wegen der grösseren Reibung der einzelnen Teilchen aneinander sowie an den Werkzeugen eine wesentlich grössere.

Diese Reibung der Teilchen aneinander wird natürlich ebenso wie die Krümelbildung um so grösser sein, je grösser ihre hierfür in Betracht zu ziehende Oberfläche ist. Je mehr Berührungspunkte der festen Teilchen im gleichen Volumen Boden sind, um so grösser ist unter sonst gleichen Umständen dieser Reibungswiderstand, um so grösser ist der Reibungswiderstand, welchen der Boden den Werkzeugen entgegengesetzt, um so mehr wird er an diesen Werkzeugen adhären oder kleben. Bei den Werkzeugen kommt aber natürlich auch die hierfür dem Boden entgegengesetzte Oberfläche der Werkzeuge selbst in Betracht. Blanker Stahl hat eine sehr glatte, rostiger Stahl und Holz eine viel rauhere; es muß also eine Bodenarbeit in jedem Fall um so leichter zu bewältigen sein, je glatter resp. je kleiner die Oberfläche unserer Werkzeuge ist, da dementsprechend die Anzahl der auf der Gerätefläche auftretenden Berührungspunkte des Bodens und ebenso die Reibung eine geringere sein muß. Wir müssen demnach im grossen und ganzen bei allen hier in Betracht zu ziehenden Methoden angenähert die gleichen Resultate erhalten wie bei den Methoden, mit denen wir die Bindigkeit des Bodenkrümelns untersuchten.

§ 20. Der Trennungswiderstand des gewachsenen Bodens.

Die Methoden selbst zerfallen in zwei Gruppen. Die erste beschäftigt sich mit dem gewachsenen Boden, ohne Berücksichtigung der Werkzeuge; die zweite sucht direkt den Widerstand festzustellen, welchen der Boden den Werkzeugen entgegenstellt.

§ 20. Der Trennungswiderstand des gewachsenen Bodens.

Wohl eine der ersten der Methoden zur Bestimmung des Trennungswiderstandes des gewachsenen Bodens beschreibt Meyer. Er wendet hierfür eine Scheibe von ca. 22 qcm an, welche an ihren 4 Ecken mit unten abgerundeten Stahlstiften versehen ist und auf eine Erdschicht von 8 cm Tiefe gesetzt wird; die zum Eindringen nötigen Gewichte, welche auf die Scheibe gelegt werden, dienen als Maß der Konsistenz der Erde. Diese Methode hat jedoch nach Schübler¹⁾ bei konsistenten Erden im trockenen Zustande die Schwierigkeit, sehr große Gewichte auflegen zu müssen; bei reinem Ton sind selbst 15 kg hierzu nicht hinreichend, während bei sehr lockeren Erden die Scheibe schon zu leicht einsinkt. Um diesen Schwierigkeiten zu begegnen, schlägt Meyer vor, die Erden bei einem gleichen Wassergehalt von 5 0/0 dieser Prüfung zu unterwerfen, welches jedoch in der Ausführung bei vergleichenden Versuchen viele Schwierigkeiten hat.

Es dürfte in dem Falle die Wassermenge, die Heinrich bei seiner Methode (S. 100) in Vorschlag brachte, schon zweckmäßiger sein, da dieser wenigstens auf die dem einzelnen Boden eigene, aufzunehmende maximale Wassermenge Bezug nimmt.

Wohl noch älter, aber wesentlich besser ist die Methode von Völker.²⁾ Ich lehne die Beschreibung derselben an die Fig. 20, A und B an. An einem festen Rahmen (b) ist an einer Welle (c), welche mit Stahlzapfen in Stahllagern im Rahmen angebracht ist, ein Spaten (a) von ca. 30 cm Länge und 10 cm Breite befestigt. Um für den ersten Versuch eine Drehung des Spatens zu vermeiden, wird die in die Welle eingreifende Latte (d) am Rahmen durch ein Zwischenstück (e) befestigt. Der ganze Rahmen ist in den Nuten eines festen Gestelles (p) in vertikaler Richtung leicht beweglich angebracht. In diesem Gestell wird der Rahmen zunächst so weit heruntergelassen, daß der Spaten auf dem Boden aufsteht; darauf wird die am Rahmen befindliche Wagschale (f) allmählich so weit mit Gewichten belastet, bis der Spaten soeben in den Boden eingedrungen ist. Das Gewicht entspricht dem Widerstande, welchen der Boden dem Eindringen des Spatens entgegensetzt.

An dem äußeren Gestell ist ferner ein Halter (g) für eine Wage fest angebracht. Auf ihm ruht der Wagebalken (h), welcher an dem einen

¹⁾ Vergl. Schübler, Grundsätze der Agrikulturchemie 1830, Bd. II, S. 71.

²⁾ Möglinsche Annalen der Landwirtschaft 4. Bd., 1819, S. 110—122.

Ende eine Wagschale (*i*) trägt, während an dem anderen Ende eine Kette (*k*) mit dem Rahmen (*b*) in Verbindung steht. Damit die Kette stets senkrecht über ihren Angriffspunkt steht, befindet sich an dem Wagbalken (*h*) ein Kreissegment aus Holz, über welches die Kette geleitet wird. Man beschwert, nachdem man die Kette an dem Rahmen eingehängt hat, die Wagschale (*i*), bis der Spaten (*a*) wieder aus dem Boden heraus-

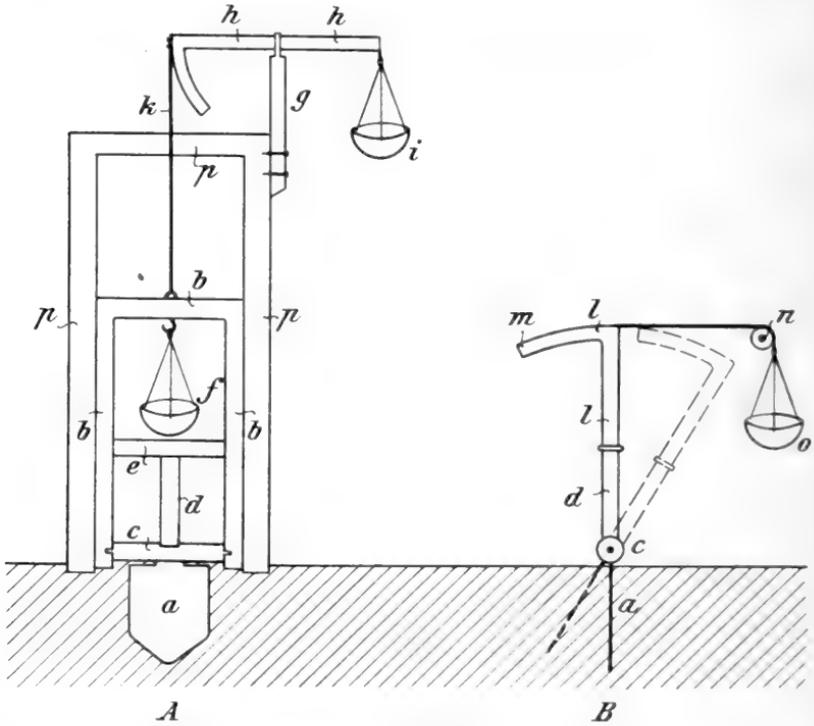


Fig. 20. Trennungswiderstandsmesser nach Völkers.

gehoben ist. Das hierzu erforderliche Gewicht entspricht der Reibung der Erde an dem Spaten.

Vom Pfluge und Spaten wird der Boden von dem angrenzenden Boden losgetrennt. Um diesen Einfluß zu bestimmen, wird die Latte *e* entfernt und in *d* eine kleine Latte (*l*) (vergl. den Querschnitt Fig. 20, B) mit einem Kreissegment fest angesetzt. Diese Latte mit dem Spaten (*a*) kann sich nun um die Welle (*c*) drehen. Im Punkte *m* an dem Kreissegment von *l* ist eine Schnur befestigt, welche über eine fest angebrachte Rolle (*n*) geführt ist und an ihrem Ende eine Wagschale (*o*) trägt. Durch Belastung dieser Wagschale wird durch den Spaten ein Erdstreifen, welchen

man vorher in bestimmter Dicke abstechen und freilegen kann, von dem umliegenden Erdreich abgebrochen.

Die Versuche sind nach Völker bei verschiedenen Zuständen der Feuchtigkeit und Trockenheit des Erdreiches zu wiederholen, wobei der Feuchtigkeitsgehalt des Erdreiches jedesmal zu bestimmen ist; auch ist es erforderlich, daß die Versuche bei demselben Zustande der Ackerkrume an verschiedenen Stellen derselben wiederholt und aus den Resultaten aller gleichartigen Versuche die Mittelzahl gezogen werde, falls man gründliche allgemeine Resultate in Rücksicht einer Ackerkrume erhalten will. Versuchsergebnisse bei typischen Bodenarten hat Völker leider nicht mitgeteilt.

Von dem soeben beschriebenen Verfahren von Völker unterscheidet sich eine Methode von Puchner¹⁾ wesentlich nur dadurch, daß statt des Spatens ein keilförmiger Körper aus poliertem Stahl mittelst Gewichte in den Boden eingedrückt wird. Dieser ist direkt mit einer Wagschale fest verbunden und wird durch eine Zylinderführung senkrecht zum Boden gestellt. Dem Keil und der Wagschale wird mittelst eines über eine Rolle geführten Gegengewichtes das Gleichgewicht gehalten, so daß, da so das Gewicht des Spatens aufgehoben wird, dieser genau auf die Oberfläche des Bodens aufgestellt werden kann. Wäre die gestellte Aufgabe exakt lösbar, so würde der Puchnersche Apparat zweifellos wegen seiner Metallführung und der infolge derselben verminderten Reibung den Vorzug vor dem Völkerschen verdienen, so aber tut der letztere die gleichen Dienste. — Die Resultate, welche Puchner mit seiner Methode für typische Bodenarten erhalten hat, sind angenähert den Resultaten proportional, welche er für die absolute Festigkeit der gleichen Bodenarten erzielte. Die wesentlichsten seien hier wiedergegeben:

(Siehe die Tabelle auf Seite 110.)

Der Widerstand, welchen der Boden dem Eindringen eines keilförmigen Körpers entgegenstellt, ist um so größer, je feiner die Bodenteilchen sind. Der Widerstand ist bei den feinkörnigsten Bodenarten (Ton und Lehm) im trockenen Zustande des Bodens am größten; er nimmt bei diesen ab mit der Zunahme des Bodens an Wasser. Bei sehr grobkörnigen Bodenarten ist der Widerstand des Bodens im nassen Zustande am größten und nimmt ab, je trockener der Boden ist. Dazwischen gibt es alle Übergänge. Der Widerstand, welchen ein Boden dem Eindringen eines Keiles entgegenstellt, ist im pulverförmigen Zustande, d. h. im Zustande der Einzelkornstruktur am größten, im Krümelzustande geringer. Im Krümelzustande wächst er mit der Größe der Krümel. — Auch hier weist der Humus einen geringeren Trennungswiderstand als der feinste

¹⁾ H. Puchner, Untersuchungen über die Kohäszenz der Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik 1889, 12. Bd., S. 208 u. f.

Quarzsand auf, was jedoch, wie oben besprochen, nicht als allgemeine Regel aufzunehmen ist, sondern in der Art des Humus und in der Art des Quarzsandes, welche Puchner zu seinen Versuchen benutzte, seine Begründung findet.

Trennungswiderstände in g nach Puchner.

Feinheit des Kornes, Durchmesser in mm		% der von dem Boden aufnehmbaren maximalen Wassermenge					
		100	80	60	40	20	0
		g	g	g	g	g	g
Quarzsand	0,010—0,071	87	2020	3004	3 404	5 037	2 470
	0,071—0,114	134	1654	1870	1 954	1 820	587
	0,114—0,171	152	1020	1304	1 237	920	100
	0,171—0,25	167	754	804	784	620	80
	0,25 —0,5	180	370	470	447	427	59
	0,5 —1,0	190	337	387	357	337	67(?)
	1,0 —2,0	310	404	320	304	237	84(?)
Kalksand	0,010—0,071	94	1670	1770	2 087	2 604	2 005
	0,071—0,114	210	1104	1437	1 554	1 417	774
	0,114—0,171	314	1037	1137	1 370	1 144	220
	0,171—0,250	420	937	1037	904	787	232(?)
Quarzsand	287	2470	2654	3 070	3 204	604	
Kalksand	137	1604	1804	2 104	1 937	1 404	
Humus (Torf).	115	1404	1904	1 804	870	487	
Kaolin	114	2404	9537	11 870	15 037	20 037	
Lehm	0,0 —0,25 (pulverförmig)	35	272	775	1 408	8 125	12 358
	0,5 —1,0 (Krümel) . . .	75	165	178	675	958	2 092
	1,0 —2,0	65	155	198	1 542(?)	2 258(?)	4 967
	2,0 —4,0	60	142	268	858	1 258	7 792
	4,0 —6,75	55	125	408	817	1 433	9 025
	6,75—9,0	50	98	418	877	1 725	10 192

Puchner hat ferner noch festgestellt, daß ein Boden unter sonst gleichen Umständen im bewachsenen Zustande dem Eindringen eines keilförmigen Körpers einen viel höheren Widerstand (19,75 kg) entgegensetzt, als wenn der Boden brach liegt (6,00 kg). Der Grund hierfür ist einmal darin zu suchen, daß sich der Boden im bewachsenen Zustande dichter gelagert hat, dann aber auch darin, daß eventuell auch Pflanzenwurzeln

durch den keilförmigen Körper zerschnitten oder verschoben werden müssen, wozu ein größerer Arbeitsaufwand erforderlich ist. Dafs auch der dichter gelagerte Boden einen größeren Trennungswiderstand leistet als der lose gelagerte, und ebenso der gefrorene Boden einen größeren als der nichtgefrorene, dies festzustellen hätte nicht erst einer experimentellen Untersuchung bedurft.

Ein weiterer Apparat für die gleiche Untersuchung, doch wiederum mit einigen technischen Modifikationen, ist neuerdings von van Schermbeek¹⁾ konstruiert und unter dem Namen „Bodensonde“ publiziert worden. Das Prinzip des Apparates beruht darauf, dafs ein zylindrischer Stab, der am unteren Ende einen Stift von 2, 4 oder 6 mm unterem Durchmesser trägt, mittelst Gewichte in den Boden eingedrückt wird. van Schermbeek schlägt vor, das Gewicht festzustellen, mittelst dessen der Stift eben schon einen Eindruck im Boden hinterläßt; er stellt aber auch frei, den Stift konisch abdrehen zu lassen und die Gewichtsmenge festzustellen, welche erforderlich ist, um den Stift z. B. 5 mm tief, bis zu einer deutlich an demselben angebrachten Marke, in den Boden eindringen zu lassen. — Was die weitere Ausführung des Apparates anbelangt, so wird die Reibung des senkrecht einzutreibenden Stiftes bei demselben durch Rollenführung wohl auf das möglichste Minimum reduziert. Der Stab und Stift wird sonst ebenso wie bei dem Puchnerschen Apparate durch Gegengewichte genau ausbalanciert. Die Gewichte, mit denen der Stift eingetrieben werden soll, können entweder direkt auf eine mit dem Stabe verbundene Platte aufgesetzt werden oder es kann der Druck durch ein an einem auf dem Stab aufliegenden Hebelarm befindliches Laufgewicht ausgeübt werden. Durch diese zweite Konstruktion wird der Apparat wesentlich komplizierter, als der Puchnersche ist; ohne diese zweite Konstruktion hat er jedoch vor diesem den Vorteil der reibungsfreieren Führung.

Die Resultate von Puchner hatten aber schon gezeigt, wie sehr der Trennungswiderstand des Bodens von dessen Wassergehalt und dessen Lagerung abhängig ist: zwei variablen Größen, mit denen wir in der Praxis rechnen müssen. Aus dem Grunde ist es aber *durchaus überflüssig*, für eine nicht genauer festzustellende Größe Präzisionsapparate zu konstruieren, deshalb wird der alte Völknersche Apparat genau die gleichen Dienste tun. Will man sich einen noch einfacheren Apparat herstellen, so zieht man (vergl. Fig. 21) einen dünnen Glasstab resp. ein Glasrohr (a) auf einer Seite zu einer konischen Spitze aus. Das andere Ende verdickt man tellerförmig und schleift dann eine zum Stabe senkrechte ebene Fläche auf. Mittelst Siegelack läßt sich dann hier ein Blechteller aus Aluminium (b) als Wagschale aufkitten. Will man feinere Ausführung

¹⁾ A. J. van Schermbeek, Die Bodensonde; Forstwissenschaftl. Zentralblatt 1902, S. 115—119.

der Spitze haben, auf deren Gestalt es für vergleichbare Werte natürlich sehr ankommt, so wählt man z. B. einen Stahldraht (*a*), an dessen unterem Ende man einen Stahlkeil (nach Puchner) aufschraubt (*c*). Das Gewicht des Glasstabes mit dem aufgelöteten Blechteller ist festzustellen. Man nimmt ferner ein Glasrohr (*d*), in welches der Glasstab bequem hereinpaßt, läßt dieses an beiden Enden so weit zusammenlaufen, daß der Glasstab, ohne wesentlich zu wackeln, leicht noch hindurchgeht. Das Glasrohr spannt

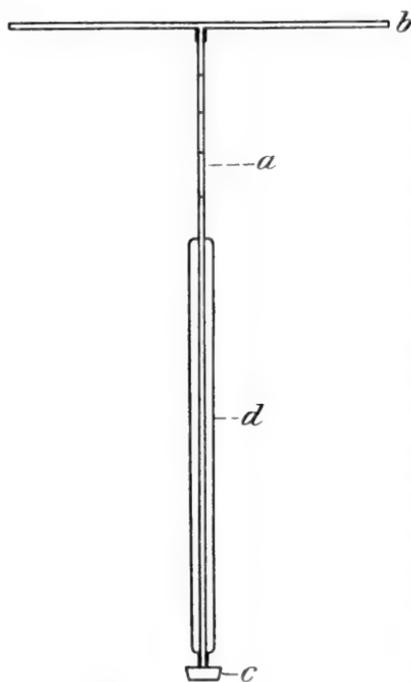


Fig. 21. Trennungswiderstandsmesser nach Mitscherlich.

man in ein gewöhnliches Eisenstativ vertikal ein, läßt darauf den Glasstab in dieser Führung auf den Boden herunter und beschwert ihn durch Aufsetzen von Gewichten auf dem Blechteller *b* so lange, bis er bis zu einer bestimmten Marke, welche an *a* angebracht werden kann, in den Boden einsinkt. Die aufgestellten Gewichte mit Hinzurechnung des Gewichtes des mit dem Blechteller versehenen Glasstabes entsprechen dann dem Trennungswiderstande des Bodens.

Ich denke, daß dieser Apparat nicht nur für Demonstrationszwecke, sondern auch überhaupt für Messungen dieser variablen Größe, soweit diese erforderlich sein sollten, vollauf ausreichend ist. Er hat den Vorteil, daß man ihn sich selbst ohne wesentliche Mühe und Kosten herstellen kann, während die van Schermbeeksche Bodensonde, welche auch keine wesentlich besseren Resultate erzielen läßt,

immerhin einen Kostenaufwand von 55 M. erfordert.

§ 21. Die Adhäsion des Bodens an Holz und Eisen.

Die Methode zur Untersuchung der Adhäsion des Bodens an Ackerwerkzeugen stammt von Schübler.¹⁾ Die Art der Ausführung ist folgende:

Man befestigt gleichgroße runde Scheiben von Eisen und Holz (als den zwei gewöhnlich zu Ackerwerkzeugen benutzten Substanzen) unter die Wagschale einer Wage und setzt mit ihr die andere Wagschale durch aufgelegte Gewichte ins Gleichgewicht; man bringt nun die Schale mit

¹⁾ G. Schübler, Grundsätze der Agrikulturchemie. Leipzig 1830, II, S. 73.

einem unter ihr liegenden durchnäsfen Boden in genaue Berührung und legt in die andere Schale so lange Gewichte, bis sie sich von dem Boden losreißt. Die Menge der aufzulegenden Gewichte soll der Größe der Adhäsion entsprechen. Schachbasian¹⁾ hat es für erforderlich gehalten, diese Methode zu verbessern. Sein Apparat ist allerdings eine Art Präzisionsapparat, mit dem er die durch inkonstante Lagerung u. dgl. schwankenden Werte exakter zu bestimmen sucht. Es ist dies meines Erachtens ebenso ein überflüssiger Kraftaufwand wie die Verbesserung der vorher besprochenen Völkerschen Methode durch Puchner und van Schermbeek. Um dies zu beweisen, sei darauf hingewiesen, daß je fünf Parallelbestimmungen unter Umständen selbst bei dem genau gearbeiteten Apparate z. B. bei Quarzsand verschiedener Größe noch einen wahrscheinlichen Fehler von ± 10 bis ± 14 %¹⁾ für die einzelne Bestimmung aufweisen. Dieser große Fehler liegt aber durchaus nicht in der Methode, denn das auch von Schachbasian benutzte Prinzip der Wage ist einer außerordentlichen Genauigkeit fähig; es liegt vielmehr in dem zu untersuchenden Material. Schachbasian schreibt darüber:

„Besondere Schwierigkeiten bietet das Auflegen der Platte in der Weise, daß sie in allen ihren Teilen mit dem Boden in innige Berührung tritt. Ich habe beinahe sechs Wochen dazu gebraucht, um mir die zur Erlangung zuverlässiger Resultate erforderlichen Fertigkeiten anzueignen.“

Diese Worte des Autors selbst legen dafür Zeugnis ab, daß seine Methode für die Bestimmung der nach der Lagerung des Bodens variierenden Bodeneigenschaft nicht der Feinheit seines Apparates entsprechend brauchbare Resultate liefert. Ich will deshalb hier von einer näheren Beschreibung der sich an das Schüblersche Verfahren anlehrenden Versuchsanordnung absehen. Um so mehr Interesse dürften aber die für verschiedene Bodentypen von beiden Forschern nach ihren Methoden erhaltenen Resultate besitzen.

Es wurden folgende Gewichte gefunden, bei denen das Abreißen der Platten erfolgte (berechnet auf 100 qcm Erdoberfläche):

(Siehe die Tabellen auf Seite 114.)

Die absolute Höhe der Zahlen zeigt wesentliche Unterschiede, welche in der Methode des „genauen Berührens“ der Platte mit dem Boden, sowie durch den variablen Wassergehalt des Bodens und endlich, wenn auch vielleicht am wenigsten, durch die Verschiedenartigkeit der untersuchten Substanzen begründet sein können. Der Ton liefert in beiden Fällen die

¹⁾ Johann Schachbasian, Untersuchung über die Adhäsion und die Reibung der Bodenarten an Holz und Eisen; Forsch. a. d. Geb. der Agrikultur-Physik Bd. 13, 1890, S. 193 u. f.

höchsten Werte, der Quarzsand die niedrigsten. Die Werte von Humus und Kalksand liegen zwischen beiden Extremen. Sie variieren, anscheinend je nach der Art der angewandten Substanzen in ihrer Höhe, d. h. ist der Kalk sehr fein (kohlenaurer Kalk), so liefert er höhere, ist er sehr grob (Kalksand), so liefert er niedrigere Werte als der Humus, und umgekehrt.

Von Schübler:	Platte aus	
	<i>Eisen</i> g	<i>Holz</i> g
Grauer reiner Ton	915	989
Feine Kalkerde (CaCO ₃)	485	529
Humus	298	318
Kalksand	139	149
Quarzsand	129	146

Von Schachbasian:	Platte aus		
	<i>poliertem</i> <i>Stahl</i> g	<i>gerostetem</i> <i>Stahl</i> g	<i>Holz</i> g
Kaolin	3347	2729	3997
Torf ¹⁾	1493	1422	1350
Kalksand	1588	1173	926
Quarzsand	268	254	111

Schachbasian hat ferner noch folgende Resultate über die Abhängigkeit des Anhaftens des Bodens an Werkzeuge, von dem Feinheitsgrade und der Struktur der Teilchen u. a. mitgeteilt. — Der Boden enthielt bei jedem Versuch die maximale aufnehmbare Wassermenge; die Zahlen sind Mittelwerte aus je fünf Bestimmungen.

(Siehe die obere Tabelle auf Seite 115.)

Es ergeben sich hier ähnliche Zahlen wie bei den Versuchen, betr. den Trennungswiderstand des Bodens, welche Puchner offenbar mit dem gleichen Material ausgeführt hat (s. S. 102). Das Anhaften des Bodens an der Platte ist um so größer, je kleiner die festen Bodenteilchen sind; es ist beim Boden, der sich in Krümelstruktur befindet, wesentlich geringer als bei solchem, dessen Krümel durch Pulverisieren teils in ihrer Größe sehr reduziert, teils auch wohl ganz beseitigt sind.

¹⁾ Wiederholt mit Alkohol und Äther extrahiert und pulverisiert.

Bodenart und Korngröße in mm:	Platte aus			
	<i>poliertem Stahl</i> g	<i>gerostetem Stahl</i> g	<i>Holz</i> g	
Quarzsand {	0,010—0,071	1957	1714	1653
	0,071—0,114	1717	1268	969
	0,114—0,171	1450	974	615
	0,171—0,25	727	570	292
	> 0,25	0	0	0
Kalksand {	0,010—0,071	1964	1801	1883
	0,071—0,114	1676	1166	1318
	0,114—0,171	1328	994	1054
	0,171—0,25	736	669	470
Lehm {	pulverförmig	1328	1272	1429
	krümelig	133	134	171

Weitere Versuche von Schachbasian ergeben noch, daß mit abnehmendem Wassergehalt des Bodens die Adhäsion des Bodens an den Werkzeugen im allgemeinen abnimmt, z. B.

Lehm pulverförmig	Adhäsion des Bodens an:		
	<i>Stahl poliert</i> g	<i>Stahl gerostet</i> g	<i>Holz</i> g
bei 100 % der maximal aufnehmbaren Wassermenge	1328	1272	1429
bei 80 % der maximal aufnehmbaren Wassermenge	1484	1362	1652
bei 60 % der maximal aufnehmbaren Wassermenge	770	557	937
bei 40 % der maximal aufnehmbaren Wassermenge	448	257	—

Auffallen muß bei all diesen Versuchsergebnissen, daß der Boden an poliertem Stahl überall eine größere Adhäsion zeigt als an gerostetem Stahl. Der Grund für dieses unseren früheren Ausführungen (S. 106) widersprechende Resultat liegt in der Versuchsanstellung Schachbasians. Derselbe brachte erst die Platte mit dem Boden in genaue Verbindung und führte alsdann dem Boden das erforderliche Wasser zu. Es ist leicht einzusehen, daß auf diese Weise die verrostete Stahlplatte gar nicht voll-

kommen mit dem Wasser benetzt wurde, da die beim Aufsetzen derselben an ihrer unteren Oberfläche eingeschlossenen Luftblasen nicht durch das Anfeuchten des Bodens von untenher verdrängt werden. Es wird auf diese Weise nur eine verhältnismäßig kleinere Oberfläche an der gerosteten Platte für die Adhäsion in Betracht kommen können. Denselben Umstände ist es zuzuschreiben, daß das Holz in einigen Fällen eine geringere Adhäsion aufweist als polierter Stahl. Dafür aber, daß das Wasser vornehmlich infolge der auftretenden Menisken die Adhäsion bewirkt, spricht die Tatsache, daß mit abnehmendem Wassergehalte des Bodens die Adhäsion des Bodens an dem Werkzeugmaterial sehr schnell abnimmt. Quarzsand zeigt so z. B. bei 80% der von ihm im Höchstfalle aufnehmbaren Wassermenge überhaupt schon keine Adhäsion mehr.

Der Apparat zur Bestimmung der Adhäsion des Bodens an den Werkzeugen ist endlich von R. Heinrich¹⁾ in zweckentsprechender Weise vereinfacht worden. Da derselbe in dieser Form, welche sich jeder leicht selbst herzustellen vermag, allen Anforderungen genügen dürfte, sei seine Beschreibung hier kurz wiedergegeben.

Der Boden wird mit entsprechendem Wasser versetzt in ein Gefäß gebracht, und alsdann auf die Oberfläche desselben eine glatt polierte Eisen- resp. eine glatte Buchenholzplatte von 1 qdm Fläche fest aufgedrückt, so daß eine vollständige Berührung der Platte mit dem Boden stattfindet. Dann wird die Kraft gemessen, welche nötig ist, um die Platte von dem Boden abzureißen. Dies erfolgt durch Gewichte (Sand oder dergl. in einem Gefäß), welche vermittelt Bindfadens über Rollen mit der Platte verbunden sind. Die Kraft, welche erforderlich ist, um die Adhäsion des Bodens an der Platte zu überwinden, entspricht den angewandten Gewichten, abzüglich des Gewichtes der abgerissenen Platte.

Der Wassergehalt des Bodens ist jedesmal zu bestimmen. Heinrich schlägt vor, die Bodenarten immer so weit mit Wasser zu benetzen, daß sie die Hälfte der von ihnen aufnehmbaren maximalen Wassermenge besitzen. Diese Größe — Heinrich benutzte sie schon bei der Bestimmung der relativen Festigkeit des Bodenkrümel (vergl. S. 99) — ist willkürlich, kommt aber wohl der Praxis am nächsten, insofern der Boden meist bei einem mittleren Wassergehalte bearbeitet wird.

§ 22. Die Reibung des Bodens an Holz und Eisen.

Versuche über die Reibung des Bodens an Holz und Eisen sind von Schachbasian²⁾ angestellt worden. Derselbe füllte einen Zinkkasten von

¹⁾ R. Heinrich, Grundlagen zur Beurteilung der Ackerkrume. Wismar 1882, S. 226—227.

²⁾ l. c. S. 214—225.

100 × 11,59 qcm Oberfläche und 2 cm Tiefe 1 cm hoch mit Boden an und liefs auf diesem, nachdem die Oberfläche geglättet war, einen Schlitten aus Holz resp. Stahl von 100 qcm Fläche entlang rutschen. Zu diesem Zweck wurde an einem Ende des Schlittens eine Schnur befestigt, welche zunächst wagerecht über eine am Ende der Schlittenbahn befindliche Rolle geführt wird und dann an ihrem unteren Ende mit einer Wagschale versehen ist. Die Bodenfläche wurde eben gestellt und der Schlitten mittelst auf die Wagschale aufgelegter Gewichte innerhalb einer zu beobachtenden Zeit über den Boden hinweggezogen. Der Reibungskoeffizient wurde dann in folgender Weise ermittelt.

Für die gleichförmig beschleunigte Bewegung gilt die Gleichung:

$$s = \frac{1}{2} c t^2, \quad (1)$$

worin s die Wegstrecke, t die Zeit und c die Beschleunigung der Bewegung bedeutet.

Die bewegende Kraft ist gleich dem Gewichte P , welches zum Fortziehen des Schlittens erforderlich ist, vermindert um die Reibung des horizontal fortgezogenen Gewichtes G des Schlittens. Die Reibung selbst, welche dem Gewicht G proportional ist, ist $= \varphi \cdot G$. Demnach ist die bewegende Kraft $= P - \varphi \cdot G$. Die bewegte Masse ist $= \frac{P + G}{g}$, worin g die Beschleunigung der Schwere ist. Da nun die Beschleunigung $= \frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}}$ ist, so folgt:

$$c = \frac{P - \varphi \cdot G}{\frac{P + G}{g}}. \quad (2)$$

Setzt man diesen Wert für c in (1) ein, so ergibt sich:

$$s = \frac{1}{2} \frac{P - \varphi \cdot G}{\frac{P + G}{g}} \cdot t^2$$

oder

$$\frac{2s}{g t^2} = \frac{P - \varphi \cdot G}{P + G},$$

oder für den Reibungskoeffizienten:

$$\varphi = \frac{-\frac{2s}{g \cdot t^2} (P + G) + P}{G},$$

oder endlich

$$\varphi = \frac{P}{G} - \frac{(P + G) \cdot 2s}{G \cdot g t^2}.$$

Bei der Schachbasianschen Versuchsanordnung sind die folgenden Größen gegeben:

$$G = 614 \text{ g},$$

$$s = 0,9 \text{ m}; \text{ ferner ist bekannt}$$

$$g = 9,81 \text{ m}.$$

Es sind zu beobachten P und t . — t betrug bei den vorliegenden Beobachtungen 2, 3 oder 4 Sekunden, P schwankte zwischen 220 und 560 g. Schachbasian bestimmte u. a. die folgenden „Reibungskoeffizienten“.

Bodenart und Korngröße in mm:	Boden feucht:			Boden trocken:			
	<i>Stahl poliert</i>	<i>Stahl gerostet</i>	<i>Holz</i>	<i>Stahl poliert</i>	<i>Stahl gerostet</i>	<i>Holz</i>	
Quarzsand {	0,010—0,071	0,825	0,793	0,812	0,383	0,548	0,586
	0,071—0,114	0,495	0,675	0,755	0,413	0,607	0,634
	0,114—0,171	0,484	0,672	0,701	0,422	0,624	0,645
	0,171—0,250	0,445	0,635	0,671	0,434	0,629	0,666
	0,25 —0,5	0,354	0,597	0,602	} war nicht zu bestimmen wegen Zusammenhäufung des Materials vor dem Schlitten.		
	0,5 —1,0	0,348	0,532	0,565			
	1,0 —2,0	0,330	0,445	0,558			
Kalksand {	0,010—0,071	0,740	0,777	0,810	0,350	0,443	0,480
	0,071—0,114	0,704	0,731	0,783	0,399	0,523	0,542
	0,114—0,171	0,685	0,721	0,728	0,435	0,536	0,568
	0,171—0,250	0,522	0,632	0,646	0,447	0,544	0,572
Lehm {	pulverförmig	0,531	0,683	0,628	0,470	0,484	0,504
	krümelig	0,472	0,621	0,563	0,357	0,575	0,656
Kaolin	0,434	0,479	0,535	0,332	0,409	0,420	
Torf	0,655	0,564	0,511	0,393	0,461	0,481	
Kalksand	0,635	0,694	0,711	0,384	0,485	0,508	
Quarzsand	0,526	0,559	0,604	0,445	0,471	0,521	

Die vorstehende Tabelle ergibt das, was bei den Adhäsionsversuchen durch Nebenerscheinungen verdeckt wurde. Der Reibungskoeffizient ist bei Holz am größten, bei gerostetem Stahl geringer und am kleinsten bei poliertem Stahl, wie dies wegen der Rauheit der Oberfläche, an welcher die Reibung stattfindet, zu erwarten war. Die wenigen Ausnahmen dürften wohl als Versuchsfehler anzusehen sein.

Ferner ersieht man aus den vorstehenden Zahlen, daß der Reibungskoeffizient *bei dem nassen Boden* um so größer ist, je feiner der Boden ist; dem widerspricht das Verhalten des Kaolins, bei welchem man einen besonders hohen Reibungskoeffizient erwarten müßte, da er viel feiner ist als die übrigen Bodenarten. Es dürfte diese eine Beobachtung, welche auch unseren früheren Erörterungen zu widersprechen scheint, sehr leicht damit zu erklären sein, daß die Schlittenplatte sehr gut mit dem Kaolin in Berührung gebracht wird, so daß nicht, wie bei den gröbereren Boden-

teilchen, durch die Anwesenheit von Luft eine große Anzahl von Wasser-
menisken gebildet wird, welche beim Gleiten des Schlittens deformiert werden
müssen. Alle anderen Beobachtungen stimmen überein mit den Resultaten,
welche Puchner für den Trennungswiderstand und welche Schachbasian
für die Adhäsion der gleichen Bodenarten an Holz und Eisen gefunden
hat; so ist die Reibung auch z. B. beim Boden in Krümelstruktur ge-
ringer als im pulverförmigen Zustande des Bodens. — Man kann also im
allgemeinen aus den Resultaten folgern, daß die Reibung des nassen Bodens
an Holz und Eisen mit der Anzahl der Berührungspunkte, welche die
Bodenarten den Werkzeugen bieten, d. h. mit der Feinheit der festen
Bodenbestandteile zunimmt, da dementsprechend die Anzahl der Wasser-
menisken, welche die Platte am Boden festhalten, zunimmt. Werden die
die Menisken bildenden Luftblasen, welche sich zwischen Platte und Boden
befinden, schließlic aufserordentlich klein, so verschwindet damit gewisser-
maßen die Meniskenbildung und es findet alsdann eine dementsprechend
geringere Reibung statt.

Beim trockenen Boden sind die Resultate angenähert umgekehrt. Je
grobkörniger das Material ist, um so größer ist die Reibung. Hier macht
auch der Kaolinton keine Ausnahme. Auch bietet der trockene Boden in der
Krümelstruktur einen größeren Reibungswiderstand als in der Einzelkorn-
struktur! All das scheint unserer früher ausgeführten Anschauung erst
recht zu widersprechen, doch ist dies keineswegs der Fall. Wir haben es
nämlich bei diesen Versuchen durchaus nicht *lediglich* mit der Reibung
der Bodenteilchen an Holz und Eisen zu tun, sondern es kommt hier noch
ein zweites Moment in Betracht, nämlich die Reibung der Teilchen anein-
ander und ihre gegenseitige Verschiebung. Würden die Bodenteilchen,
über die man den Schlitten führt, auf einer festen Unterlage ruhen
(vielleicht auf eine Wachsschicht aufgeschmolzen sein), so wäre es möglich,
den Reibungswiderstand zwischen Schlitten und trockenem Boden allein
festzustellen; so aber wird ein Bodenteilchen, z. B. welches hervorsteht,
durch den Schlitten eingedrückt, andere müssen ihm weichen; es können
wieder andere dementsprechend hierbei emporkommen, und dies kann sich so
lange vor dem Schlitten fortsetzen, daß (wie aus der Tabelle ersichtlich
ist), falls der Schlitten nicht groß genug ist im Verhältnis zur Größe der
festen Bodenteilchen, das Experiment überhaupt unausführbar wird. Sind
aber die Bodenteilchen, welche vom Schlitten verdrängt werden, größer,
so ist hierfür eine entsprechend größere Arbeit erforderlich; denn je nach
dem Durchmesser der Körner ist die Erdschicht, welche durch die Ver-
drängung der Körner bewegt wird, eine größere, und zwar wächst diese
proportional mit dem Korndurchmesser. Diese Arbeit, welche der Schlitten
durch die Verdrängung der festen Teilchen zu leisten hat, ist aber, wie
dies vornehmlich aus den Versuchen mit dem Quarzsande hervorgeht, sehr

viel größer als die Reibung, welche Schachbasian bestimmen wollte, und somit mußten diese Versuche zu den entgegengesetzten Resultaten führen.

Die Methode für die gleitende Reibung ist zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten von Holz, Stein, Metall, Leder u. dergl. mehr, welche in der Technik eine große Rolle spielen, exakt ausgearbeitet worden.¹⁾ Bei diesen Körpern hatte man es aber mit so gut wie unveränderlichen, festen Oberflächen zu tun. Dies ist beim Boden nicht der Fall, und deshalb ist die Methode nicht auf den Boden anzuwenden. Jedenfalls vermag man nicht mit ihrer Hilfe Reibungskoeffizienten zu bestimmen, denn entweder werden dieselben (bei nassem Boden) durch Adhäsions- und Kapillaritätserscheinungen stark beeinflusst, oder sie werden (bei trockenem Boden) durch den Arbeitsaufwand, welcher erforderlich ist, um die einzelnen festen Bodenteilchen aus ihrer Lage zu verschieben, direkt verdeckt.

§ 23. Die festen Bodenteilchen und ihr Verhalten bei der Bodenbearbeitung.

Durch die verschiedenen in den letzten Abschnitten besprochenen Methoden soll das Verhalten der festen Bodenteilchen bei der Bodenbearbeitung wiedergegeben werden. Keine der Methoden vermag dies vollständig zu tun. Beim Einsetzen des Pfluges in den Boden z. B. kommt der Trennungswiderstand desselben in Betracht (z. B. Methode von Völker); der Boden wird darauf beim Pflügen seitlich von dem umliegenden Boden getrennt und hochgehoben resp. umgeworfen (z. B. Methode von Völker); hierbei haftet der eine Boden mehr oder weniger an den Ackerwerkzeugen (z. B. Methode von Schübler), was auch, wie wir sahen, ganz nach dem Wassergehalte desselben verschieden ist. Haftet der Boden nicht an den Werkzeugen, so findet ein Arbeitsaufwand statt dadurch, daß sich derselbe an den Werkzeugen reibt (z. B. Methode von Schachbasian). Dies wird er um so weniger tun, je krümeliger der Boden ist, da die Krümel eine geringere Reibungsfläche bieten. Adhärirt der Boden an den Werkzeugen, so tritt ferner noch eine Reibung der Bodenteilchen aneinander auf. Dies ist ein außerordentlich schwer ins Gewicht fallender Faktor, welcher bei jeder Bearbeitung des Bodens eintritt und auch schon u. a. bei der Bestimmung des Trennungswiderstandes, bei der Bestimmung der Reibung des Bodens an Holz und Eisen mit in Betracht kommt; denn bei dem Eintreiben eines Keiles in den Boden werden nicht nur die Krümel auseinandergeteilt, sondern es findet gleichzeitig eine Reibung des Keiles am Boden statt; es werden ferner Bodenteilchen zur Seite gedrängt, welche wieder andere Bodenteilchen verschieben, wodurch eine Reibung der Bodenteilchen aneinander stattfindet. Es ist leicht einzusehen, daß

¹⁾ Vergl. u. a. E. Riecke, Lehrbuch der Physik. Leipzig 1902. Bd. I, S. 266 u. 267.

alle diese Momente, welche je nach der Struktur der festen Bodenteilchen, je nach ihrer Lagerung und je nach ihrem Wassergehalte in weiten Grenzen schwanken, nicht direkt durch einen derartigen Laboratoriumsversuch zu lösen sind, und dafs man deshalb dazu übergehen muß, den bei der Bodenbearbeitung erforderlichen Kraftaufwand direkt zu messen. Schon Sprengel¹⁾ schreibt hierzu:

„Der Grad der Festigkeit und Konsistenz des Bodens wird am besten durch einen Kraftmesser (Dynamometer), welchen man am Pfluge anbringt, ermittelt. Alle übrigen Vorkehrungen geben wenigstens kein so zuverlässiges Resultat. Man muß jedoch die Bodenarten nicht nur mit ein und demselben Pfluge, sondern auch bei verschiedenen Feuchtigkeitszuständen umpflügen und daraus dann das Mittel ziehen.“

Seitdem sind von den verschiedensten Technikern verschiedene Zugkraftmesser konstruiert worden, da es den verschiedenen Maschinenfabriken darauf ankommen mußte, den Landwirten solche Geräte und Maschinen zur Bodenbearbeitung zu liefern, die möglichst wenig Zugkraft erfordern. *Der Zugkraftmesser ist aber auch das einzige Instrument, welches uns Aufschluß über die momentane Bearbeitbarkeit eines Bodens geben kann.* Natürlich müssen auch hier die Versuche bei trockenem und nassem Boden u. a. m. ausgeführt werden, um ein allgemeines Urteil zu gestatten; auch wird man den Kraftmesser in Verbindung mit dem Pflug, dem Kultivator, der Drillmaschine u. a. m. beobachten müssen, um für jeden Fall ein Urteil zu gewinnen. Will man verschiedene Bodenarten auf ihre schwerere oder leichtere Bearbeitbarkeit hin prüfen, so muß man natürlich den Kraftmesser z. B. wenn nicht an dem gleichen, so doch mindestens an einem Bestellungsinstrument genau der gleichen Konstruktion anbringen. Man muß ferner z. B. beim Pfluge auf den zu vergleichenden Bodenarten nach Möglichkeit gleich tief pflügen usf.

Die Zugkraftmesser haben deshalb für die Bodenkunde in bezug auf die Bearbeitbarkeit eines Bodens die größte praktische Bedeutung und sind durch keinen Laboratoriumsversuch zu ersetzen. Ich möchte deshalb hier eins der besten der neuesten Systeme an der Hand einer Beschreibung von Nachtweh²⁾ wiedergeben.

Der im folgenden beschriebene und in der Fig. 23 wiedergegebene Meßapparat ist der „neue Sacksche Zugkraftmesser, verbessert von Professor Dr. A. Nachtweh“³⁾. Das Meßinstrument besteht der Haupt-

¹⁾ Carl Sprengel, Die Bodenkunde oder die Lehre vom Boden. Leipzig 1837, S. 298.

²⁾ A. Nachtweh, Hilfsmittel und Methoden bei der Prüfung landwirtschaftlicher Maschinen; Fühlings landw. Zeitung 53. Jahrg., 8. Heft, S. 306.

³⁾ Bezugsquelle: Paul Polikeit, Werkstätten für Präzisionsmechanik, Halle a. S., Sophienstr. 28.

sache nach aus zwei gebogenen Blattfedern (f und f' , vergl. Fig. 23). Dieselben sind an den Enden mit Haken versehen und nehmen einerseits die Öse D , andererseits den Haken C auf. Mit der Öse D wird der Apparat

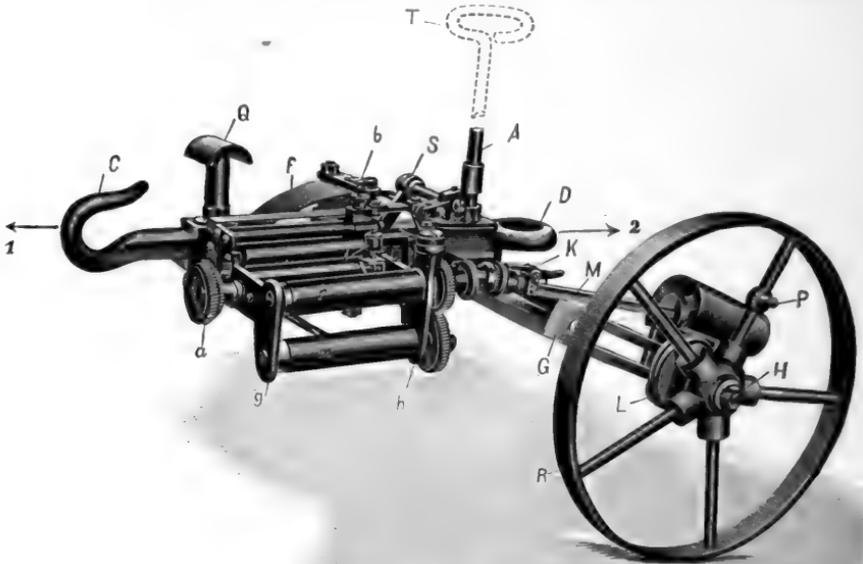


Fig. 22. Der neue Sack'sche Zugkraftmesser verbessert von A. Nachtweh.

in die Maschine oder das Ackergerät eingehenkt; in den Haken C wird die gewöhnliche Zug- oder Anspannvorrichtung eingelegt. In der Richtung der Pfeile 1 und 2 muß die Zugrichtung liegen. Um dies zu ermöglichen,

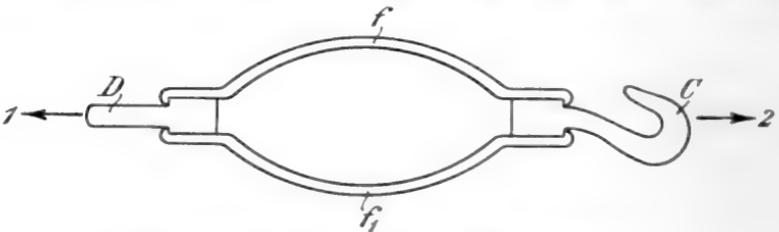


Fig. 23. Federpaar bei dem Zugkraftmesser nach Nachtweh.

ist das Federpaar um einen Bolzen drehbar angeordnet. Tritt die Zugkraft in Tätigkeit, so werden sich je nach der Größe des Kraftaufwandes die Federn mehr oder weniger strecken. Um den verschiedenen Kraftaufwand anzuzeigen, ist in dem elliptischen Raume zwischen den beiden Meßfedern ein Zeigerwerk angebracht, welches außerhalb zu einer

Schreibvorrichtung ausgebaut ist. Ein Schreibschlitten b ist mit einem Bleistift verbunden. Dieser schreibt auf einen Papierstreifen, welcher von zwei Rollen aufgenommen wird, die zwischen den festen Armen g und h liegen. i ist ein genau einstellbarer Nullstift, welcher an dem Arme h angebracht ist.

Um nun die erforderliche Zugkraft nicht nur in einem Augenblick zu beobachten, sondern einen brauchbaren Durchschnittswert für den untersuchten Boden und den betreffenden Bodenzustand zu gewinnen, ist es erforderlich, die Beobachtung eine Strecke weit fortzusetzen und so das Integral der für die Strecke erforderlichen Arbeit zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird der Papierstreifen in langsame Bewegung versetzt, so daß der Schreibtisch, welcher infolge der Federwirkung eine gradlinig hin- und hergehende Bewegung ausführt, nunmehr auf dem vorbeierollenden Papier Kurven aufzeichnet. Die Umdrehung der den Papierstreifen in Bewegung setzenden Rollen muß nun der durchgearbeiteten Wegstrecke proportional sein. Um dies zu ermöglichen, ist an dem gleichen Bolzen, um dem der Kraftmesser drehbar ist, ein Arm G befestigt, welcher einen Schlitz besitzt, in dem der Achsstummel H eines Laufrades R verschoben und festgestellt werden kann. Der Umfang dieses Laufrades beträgt 1 m. Auf dem Rade R sitzt eine Schnecke, welche die gleiche Umdrehungszahl wie das Rad besitzt; durch sie wird das Schneckenrad L in Bewegung gesetzt, wodurch eine Vierkantwelle M eine langsame Umdrehung erhält. Diese Vierkantwelle ist mittelst Universalgelenkes unmittelbar mit der den abrollenden Papierstreifen aufnehmenden Rolle verbunden. Es kann unter Umständen wünschenswert sein, den Papierstreifen zurückzurollen; dies läßt sich durch Zurückdrehen des Rades erreichen, wofür an demselben ein kleiner Kurbelhandgriff P angebracht ist. Wünscht man eine andere Übertragung des Meßrades auf die Papierrolle, was für einzelne Instrumente erforderlich ist, so kann man diese durch Einrücken des Zahnrades a bewirken.

Um den Schreibapparat beim Anbringen des Kraftmessers unterhalb einer Deichsel vor beschädigenden Stößen nach oben zu schonen, kann die eine Schraube nach oben in der Form Q verlängert werden. — Der Handgriff T an der Schraubenverlängerung A dient zur Führung des Kraftmessers.

Segnitz¹⁾ hat es versucht, die Arbeit, welche der Pflug aufzuwenden hat, mathematisch zu behandeln. Er nimmt dabei an, daß der Boden ein unelastischer und unvollkommen biegsamer Körper ist, welcher in abgeschnittenen prismatischen Streifen auf eine schiefe Ebene hinaufgeschoben

¹⁾ E. Segnitz, Beiträge zur Mechanik des Pfluges; Crelles Journal f. d. M. Bd. LII, 1852, Heft 2, S. 152—174.

und umgewendet wird, ohne dabei seinen Zusammenhang und seine Gestalt wesentlich zu verändern. Bei diesen Berechnungen wurde jedoch unter bestimmten Annahmen nur ein Teil der in Wirklichkeit stattfindenden Widerstände berücksichtigt, und dürfte überhaupt die mathematische Behandlung dieses Problems bei der mannigfaltigen Gestaltung des Bodens stets nur für bestimmte Annahmen, d. h. für einzelne in Wirklichkeit vielleicht nicht vorkommende Fälle durchführbar sein. Diese Berechnungen vermögen das Prinzip des Pfluges klar zu legen und können hier wesentlich fördernd wirken. Für die Bodenkunde können sie keine praktische Bedeutung beanspruchen. Ein Vergleich solcher theoretischen Ergebnisse mit den Resultaten eines Dynamometers wird deshalb, weil der Widerstand auch eines und desselben Bodens so sehr verschieden sein kann, fast unmöglich sein, wie dies auch Segnitz gleich im Anfange seiner Abhandlung ausführt.

§ 24. Das Verhalten der Pflanze zu den festen Bodenteilchen und zum Hohlraumvolumen des Bodens.

Dem Verhalten der Pflanze zum Boden muß die Annahme zugrunde gelegt werden, daß die Pflanze um so mehr von den aufgenommenen Energiemengen zum Wachstum und zur Fruchtbildung zu verwenden vermag, je weniger Energie durch die Arbeit, welche die Wurzeln im Boden zu verrichten haben, verloren geht. Diese Theorie, welche sich der einwandfreien experimentellen Forschung noch mehr oder weniger entzieht, findet doch in der Praxis schon überall Bestätigung.

Für die Pflanzenwurzel kommen zunächst die festen Bodenteilchen nur insofern in Betracht, als sie das Hohlraumvolumen bilden resp. für die Gestalt des Hohlraumvolumens, in welchem sich die Wurzeln der Pflanze verbreiten, maßgebend sind. Die Hauptwurzeln, denen u. a. die Aufgabe zufällt, der Pflanze den erforderlichen Halt zu geben, dringen wohl ähnlich in den Boden ein wie ein zylindrischer, unten konisch abgedrehter Stab, welchen man in den Boden eintreibt. Sie sucht sich hierzu entsprechende Hohlräume, bildet sich aber wohl auch solche, soweit sie dies durch Verschiebung der Bodenteilchen vermag. Von diesem Gesichtspunkte ausgehend, hatte van Schermbeek seine Bodensonde konstruiert, in welcher ich jedoch vom physikalischen Standpunkte aus nichts anderes als eine Modifikation früher beschriebener Apparate zur Bestimmung des Trennungswiderstandes des Bodens erblicken konnte (vergl. S. 111). Die Pflanzenwurzel wächst dann, wenn sie eine bestimmte Länge erreicht hat, gleichzeitig in die Dicke. Hierbei muß sie fast überall feste Bodenteilchen verdrängen. Befindet sich der Boden in Einzelkornstruktur, so muß sie hierbei die ganzen Teilchen zur Seite drängen und, falls dies bei zu enger Lagerung der Bodenteilchen nicht möglich ist, empordrücken. Hierzu ist eine

entsprechend große Arbeit erforderlich, welche die Pflanze oft nicht mehr zu leisten vermag. In dem Falle gedeiht sie nicht mehr normal. So finden wir im Seesande, im Dünenande wie im festgelegten Flugsande zunächst vor der Ansammlung von Humusteilchen eine sehr kümmerliche Vegetation, welche oft lediglich auf diesen Umstand zurückzuführen sein dürfte. Hierdurch erklärt sich der Befund, daß die in den unbearbeiteten Boden eingesäte Pflanze nur sehr spärliche Erträge liefert, und daß die Erträge um so besser zu werden pflegen, je tiefer wir den Boden aufzulockern vermögen.

Ist der Boden in Krümelstruktur, so braucht die Pflanzenwurzel die Bodenteilchen nicht empor zu drängen. Beim Dickenwachstum der Wurzel zerbröckeln die Krümel und die einzelnen losgebröckelten Bodenteilchen fallen alsdann in die größeren, zwischen den Krümeln befindlichen Hohlräume hinein. Der Druck, welchen die Wurzel hierbei ausüben muß, wird um so geringer sein, je kleiner das Bodenkrümel ist, da die Pflanze so eine geringere Bodenmenge gegen die festere Bodenmasse zu pressen und somit fortzubewegen hat.¹⁾ Deswegen hält der Landwirt so viel von einer möglichst feinen, gleichmäßigen Bearbeitung des einzusäenden Bodens. *Diese Krümelstruktur des Bodens soll aber deshalb nach Möglichkeit so lange anhalten, wie das Längen- und Dickenwachstum der Wurzel hauptsächlich stattfindet.* Insofern ist derjenige Boden für die Pflanze der beste, welcher möglichst konsistente Krümel bildet (so der Ton, dann der Humus und der Kalk). In Gegenden, die keinen großen Regenfall aufweisen, wird hingegen derjenige Boden der vorteilhaftere sein, der nicht zu feste Krümel bildet, da die Pflanze dann zum Zerdrücken derselben eine geringere Arbeit zu leisten hat, und die Krümelstruktur dennoch während der hauptsächlichsten Wachstumsperiode erhalten bleibt. Hier zeigt sich der Humus als der wertvollste Bodenbestandteil, denn die Tonkrümel haben in trockenen Gegenden eine zu große Konsistenz, wie wir dies aus den experimentellen Versuchen ersehen haben. *Strenger Ton* gilt daher meist als schlechter Boden, weil die Pflanze oft nicht die Kraft besitzt, die Krümel zu zerbröckeln, und diese so das Wachstum oft ganz hemmen können. Pflügt man z. B. auf einem flachgründigen, in guter Kultur befindlichen Boden, um Rübenanbau zu versuchen, derart tief, daß man den „toten“, d. h. streng bindigen Lehm nach oben bringt, so kann ein Regen bald nach der Rübensaat die oberste Bodenschicht in Einzelkornstruktur überführen, und es tritt alsdann bei darauffolgender Trockenheit eine derartige Krustenbildung ein, daß die Sämlinge nicht aufgehen können, d. h. daß die Keimlinge nicht durch diese Kruste hindurchzudringen vermögen. Hierin liegt die größte Gefahr des plötzlichen Überganges zur

¹⁾ Vergl. S. 118—119.

Tiefkultur. Sind die Wurzeln über das Hauptwachstum heraus, so kann der Boden gern wieder in die Einzelkornstruktur mehr oder weniger übergehen (d. h. „sich setzen“), wie dies meist schon im Juni und Juli der Fall zu sein pflegt. Haben bis zu dieser Zeit Pflanzenwurzeln noch nicht mit ihrem Dickenwachstum abgeschlossen oder weisen diese ein besonders starkes Dickenwachstum auf, so müssen wir für diese den Boden derart gestalten, daß sie auch jetzt nur eine verhältnismäßig geringe Arbeit leisten brauchen, um die festen Bodenteilchen zur Seite zu drängen. *Deshalb* müssen die Hackfrüchte, Kartoffeln und Rüben, die ihr Wurzel-Dickenwachstum erst im September oder Oktober beenden, auf Dämmen kultiviert, d. h. angehäufelt werden, damit sie so den nur schmal angehäufelten Boden leicht zur Seite drücken können, ohne die ganze Bodenmasse emporheben zu müssen. — Das Aufreißen der Kartoffeldämme, z. B. zur Zeit der Reife, eine Arbeit, welche die Kartoffel bei ihrem Dickenwachstum leisten muß, ist eine jedem Landwirt bekannte Erscheinung. — Deswegen liefern die Kartoffeln nach der Jülichischen Methode, wo jede Pflanze von allen Seiten angehäufelt wird, pro Staude bei weitem die höchsten Erträge; deshalb können Kartoffelstauden auf unkultiviertem, d. h. nicht angehäufeltem Acker, wie man dies z. B. auf Komposthaufen sehen kann, auch wenn ihnen sonst alles zum Wachstum Erforderliche zur Verfügung steht, keine brauchbaren Knollen liefern.

In diesen Erscheinungen liegt meines Erachtens der eigentliche Wert und die Bedeutung der Bodenbearbeitung, bei welcher uns, wie wir bald sehen werden, Frost, Bakterien (die „Gare“), Regenwürmer u. a. m. wesentlich unterstützen. Durch gute Bodenbearbeitung sollen wir der Pflanze Arbeit abnehmen, damit diese sie für ihr Endziel, zur Samenbildung oder zur Bildung von anderen Reservestofforganen auszunutzen vermag. Wie wesentlich groß diese der Pflanze abgenommene Arbeit ist, ersieht man u. a. daran, daß der einmal gepflügte Acker sich in den nächsten Monaten mit viel geringerer Kraftanstrengung zum zweiten Male pflügen läßt. — Die von den Pflanzen zu verrichtende Arbeit ist leichter, wenn die festen Bodenteilchen unter sonst gleichen Umständen spezifisch leichter sind. In dieser Beziehung ist der Humus für den Pflanzenwuchs am günstigsten.

Nächst den Hauptwurzeln haben wir aber noch die Nebenwurzeln der Pflanze mit ihren Nährstoff aufnehmenden Organen, den Wurzelhaaren zu betrachten. Die Wurzeln verzweigen sich nach experimentellen Untersuchungen u. a. von Nobbe¹⁾ und Heinrich²⁾ vornehmlich in derjenigen

¹⁾ Friedrich Nobbe, Die feinere Verästelung der Pflanzenwurzel; Landwirtschaftliche Versuchs-Stationen 1862, Bd. 4, S. 212.

²⁾ R. Heinrich, Grundlagen zur Beurteilung der Ackerkrume. Wismar 1882, Taf. IV.

Tiefe des Bodens, in welcher sie am meisten Nährstoffe vorfinden, welche sie aufzunehmen vermögen. Ist ein Boden arm an Nährstoffen oder bietet er den Wurzeln wenig Gelegenheit zur Trichombildung und Nährstoffaufnahme, so werden die Wurzeln verhältnismäßig tief in den Boden eindringen und nach den Nährstoffen suchen müssen.

Bei Wasserkulturen, wo man stets zweckentsprechende Nährstoffmengen zusetzt, entwickelt sich so das Wurzelsystem verhältnismäßig schwach, auch ist es nach Untersuchungen von Lemmermann¹⁾ für die Pflanze gleichgültig, wie groß in diesem Falle das Volumen ist, welches ihrer Wurzel zur Verfügung steht. In geringwertigem Boden, welcher jedoch dem Wurzelwachstum nicht zu großem Widerstand entgegengesetzt, entwickelt sich das Wurzelsystem hingegen sehr stark; dadurch, daß es sich in diesem Falle stärker ausbilden muß, geht natürlich wieder ein Teil der aufgenommenen Energiemengen für die Reservestoffbildung (Samen, Knollen, Wurzeln, Holz), d. h. für die Ausbildung der Ernte verloren. Ein viel größerer Energieverlust mag aber mit der fortlaufenden Neubildung der stets nach einiger Zeit wieder absterbenden Wurzelhaare verbunden sein. Diese bilden sich, sobald die Pflanzenwurzel mit Luft in Berührung kommt — in Wasserkulturen gar nicht oder nur sehr rudimentär —; sie wachsen senkrecht zur Wurzelachse, bis sie an einem Bodenteilchen Widerstand finden; dann wachsen sie an der Oberfläche desselben fort, indem sie sich mehr oder weniger flach an dasselbe anlehnen, auch mit diesem verwachsen. Hier an dem Bodenteilchen bilden die Trichomen somit die größte Oberfläche; hier findet offenbar die Nährstoffaufnahme vornehmlich statt, was wohl damit zusammenhängen dürfte, daß die Oberfläche der Bodenteilchen noch Wasser zurückhält, wenn dasselbe auch aus den Hohlräumen schon sonst verschwunden ist. Das Wachstum der Wurzelhaare ist also unter sonst gleichen Umständen ein geringeres, wenn die Bodenteilchen möglichst eng aneinander liegen, wenn also die Hohlräume möglichst eng oder m. a. W. die Bodenteilchen möglichst fein sind. Hiernach ist der Tonboden für die Pflanze der, welcher das geringste Wurzelwachstum erfordert; ihm folgt der Humus-, dann der Kalk- und schließlich der Sandboden.

Über die Nährstoff- und Wasserzufuhr der Pflanze in dem Boden haben wir nach der Untersuchung des Verhaltens der festen Bodenteilchen zum Wasser näher einzugehen. Nach den hier angestellten, auf der Annahme der zweckmäßigen Ausnutzung der durch die Pflanze aufgenommenen Energiemengen begründeten Darlegungen scheint derjenige Boden für den Pflanzenwuchs der beste zu sein, welcher

¹⁾ Otto Lemmermann, Untersuchungen über den Einfluß eines verschiedenen großen Bodenvolumens auf die Entwicklung der Pflanzen; Journal für Landwirtschaft 1905, S. 173—177.

1. möglichst zur Krümelbildung neigt und die Krümelstruktur nach Möglichkeit gegen die atmosphärischen Einflüsse zu bewahren vermag;
2. der, welcher möglichst enge und zahlreiche Hohlräume besitzt.

Beides ist, wie wir früher (§§ 11 und 12) sahen, auf die gleiche Ursache zurückzuführen, nämlich auf die Feinkörnigkeit der Bodenteilchen oder auf die Größe der nichtmizellaren Bodenoberfläche, welche eine für den einzelnen Boden typische Größe sein muß.

Ist aber die Größe dieser Bodenoberfläche maßgebend für die Fruchtbarkeit eines Bodens, so ist hiermit sofort der Befund von Wollny und Lemmermann (vgl. S. 10—12) erklärt. Die Wollnyschen Versuche ergaben direkt, daß, je größer die Oberfläche des Sandes war, oder mit anderen Worten: je feinkörniger der Sand war, in welchem die gleiche Pflanze kultiviert wurde, daß um so höher die Pflanzenerträge ausfielen. Lemmermann fand, daß, wenn er Kulturboden mit Sand vermischte, daß dadurch die Erträge angenähert um so viel niedriger ausfielen, um wieviel weniger Kulturboden er den Pflanzen zur Verfügung stellte. Der Sand wirkte also vermindern auf das der Pflanzenwurzel zur Verfügung stehende Bodenvolumen ein; und in der Tat ist die Oberfläche des Sandes im Verhältnis zu der Oberfläche der anderen Bodenbestandteile, wie wir sahen, so gering, daß man dieselbe bei einer Vermengung angenähert gleich null setzen, d. h. vernachlässigen kann. Ein Kulturboden von der Oberfläche x , welcher zu gleichen Teilen mit Sand von der Oberfläche θ vermischt wird, kann somit nur eine Oberfläche von $\frac{x+\theta}{2}$ oder von $\frac{x}{2}$ haben, mithin nur angenähert den halben Ertrag bringen.

Auf Grund unserer Oberflächentheorie hatten wir auch die Untersuchungen und Resultate der früheren Methoden besprochen. Stellen wir diese kurz zusammen, so ergeben sich für die Hauptbestandteile der verschiedenen Bodenarten folgende Zahlen, wenn man das für reinen Ton oder Kaolin erhaltene Resultat gleich 100 setzt.

(Siehe die Tabelle auf Seite 129.)

Die für die Adhäsion der festen Bodenteilchen an Holz und Eisen resp. Stahl gefundenen Zahlen müßten stets für das gleiche Bodenmaterial bei dem gleichen Forscher übereinstimmen, da nur durch die spezifische Eigenschaft des Stahls oder des Holzes andere absolute Werte bedingt sind, welche bei der Umrechnung in Prozentzahlen herausfallen. Dasselbe gilt auch für die Reibungskoeffizienten von Schachbasian. Bei den Schüblerschen Untersuchungen zeigt sich in der Tat auch hier eine sehr gute Übereinstimmung; das ist bei denen von Schachbasian trotz der angewandten feineren Apparate nicht so der Fall. Man ersieht daraus,

Bodenart:	Absolute Festigkeit des Bodenkümmels (nach Puchner)		Trennungswiderstand des Bodenkümmels (n. Schübler)		Trennungswiderstand des gewachsenen Bodens (nach Puchner)		Adhäsion der festen Bodenteilchen				Reibungskoeffizienten (nach Schachbasian) [reziproke Werte] ¹⁾				Äußere Bodenoberfläche (kfr. S. 73)		
	an Eisen	an Holz	an poliertem Stahl	an gerostetem Stahl	an Holz	an gerostetem Stahl	an poliertem Stahl	an Holz	an gerostetem Stahl	an poliertem Stahl	im Mittel	an Holz	an gerostetem Stahl	an poliertem Stahl	—	—	
Kaolin resp. grauer reiner Ton	100	—	—	—	100	—	—	100	—	—	100	100	100	100	100	4,2	7,0 ²⁾
Feiner kohlenaurer Kalk	—	—	—	—	53	53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Humus nach Schübler	—	—	—	—	32,5	32,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Humus nach Schachbasian	—	—	—	—	—	—	—	45	52	45	34	85	89	85	87	—	—
Kalksand	6,2	15,2	—	—	—	—	—	47	43	47	23	87	85	87	83	—	—
Quarzsand	0,24	14,1	—	—	—	—	—	8,0	9,3	8,0	2,8	87	87	87	81	0,0	—
Humus nach Puchner	0,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

¹⁾ Die Zahlen entsprechen der Kraft, die erforderlich ist, eine Schicht von der Feinheit der festen Bodenteilchen umzuarbeiten, vermindert um die Reibung an Stahl resp. Holz.
²⁾ Moorboden, enthaltend 45% Humus.

dafs diese Zahlen nicht gleich wertvoll sind, und dafs die in den Längspalten von oben nach unten erfolgende stete Abnahme der Zahlen bei Schachbasian durch Versuchsfehler gestört sein mufs. Im Mittel der drei Rubriken der Reibungskoeffizienten findet bei Schachbasian auch eine dauernde Abnahme von oben nach unten hin statt.

Wir haben theoretisch im vorhergehenden zu zeigen gesucht, dafs alle die in der Tabelle angeführten Bodeneigenschaften und noch andere, für welche kein Belegmaterial vorliegt, wesentlich von der Gröfse der äufseren Bodenoberfläche abhängen. Es ist dies jedenfalls diejenige spezifische Gröfse, welche hier insonderheit in Betracht zu ziehen ist. Um einen Vergleich zu ermöglichen, habe ich in der letzten Spalte der Tabelle auch proportionale Zahlen für die äufseren Bodenoberfläche angegeben. Dieselben sind die nach der in § 11 angegebenen Methode gefundenen Zahlen, welche zum Vergleich auch derart umgerechnet wurden, dafs der für die Tonsubstanz gefundene Wert gleich 100 gesetzt und die anderen danach berechnet worden sind. Besonders auffällig ist die gute Übereinstimmung mit den Zahlen, welche Schübler für den Trennungswiderstand des Bodenkrümels festgestellt hat. Jedenfalls zeigt sich überall eine gleichartige Abnahme, durch welche die vorher ausgesprochene Theorie, soweit wie dies durch derartige Versuche möglich ist, vollauf bestätigt wird.

Im vorhergehenden habe ich die Hypothese aufgestellt, dafs die Pflanze um so höhere Erträge liefert, je geringeren Energieaufwand sie mit ihren Wurzeln zu leisten hat. Ich möchte diese Hypothese hier noch durch zwei Beobachtungen stützen.

Dafs die Wurzel in ihrem Wachstum zunächst sich so einzurichten sucht, dafs sie die Nährstoffaufnahme ohne zu grofse Arbeitsleistung ausführen kann, scheint mir aus einer Beobachtung, welche wohl mit zuerst von Thiel¹⁾ gemacht ist, hervorzugehen. Nach dieser verzweigten sich die Pflanzenwurzeln in einer oberflächlichen Schicht Gartenerde sehr zahlreich und drangen dann in dünnen, wenig verzweigten Strängen durch die unter der Gartenerde befindliche Sandschicht hindurch, um sich darauf in der unter dem Sande befindlichen Gartenerde wieder von neuem zahlreich zu verzweigen. Dieselbe Beobachtung machen wir im Walde, wo sich die Wurzeln unserer Bäume hauptsächlich in der obersten Bodenschicht verzweigen, da sie hier die einzelnen Bodenteilchen mit dem geringsten Energieaufwand beiseite schieben können und gleichzeitig in der Regel die meisten Nährstoffe vorfinden.

¹⁾ H. Thiel. De radicum plantarum quarundam ab agricolis praecipue culturarum directione et extensione. Diss. physiol. Bonn 1865.

Bei geringerem Energieaufwand wird sich so die Wurzel zweckmäßiger auswachsen. Trifft doch das gleiche auch bei den oberirdischen Pflanzenteilen zu. Haben diese gegen eine Energie, z. B. gegen den Sturm anzukämpfen, so werden die Pflanzen, so die forstwirtschaftlichen wie landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, nicht so hoch wachsen (z. B. auf den Nordseeinseln), als wenn der Sturm nicht da ist oder aber seine Wirkung (z. B. durch die Knicks im östlichen Schleswig-Holstein) aufgehoben wird.

Bei der vorstehend aufgestellten Hypothese schlossen wir ferner von dem besseren Gedeihen der Wurzel auf die Erträge, mithin auch auf das bessere Gedeihen der oberirdischen Pflanzenteile, auf eine höhere Strohernte, ja auf eine höhere Kornernte. Auch dieser Schluss scheint mir berechtigt, zumal da aus Versuchen von v. Seelhorst¹⁾ hervorgeht, daß bei Begünstigung der Vegetationsbedingungen für die Wurzel nicht nur der Ertrag erhöht wird, sondern auch gleichzeitig der Aufbau der Pflanze in der Weise eine Änderung erfährt, *daß die oberirdischen Organe an Masse die unterirdischen um ein größeres Vielfaches übertreffen, als dies bei weniger günstigen Bedingungen der Fall ist.*

§§ 25—28. Die Veränderlichkeit des Hohlraumvolumens des Bodens.

Während wir in § 16 die Größe des Hohlraumvolumens des Bodens festzustellen suchten und hier beobachteten, daß dies eine sehr veränderliche Größe ist, sollen uns die folgenden Paragraphen die Ursachen für diese Veränderlichkeit des Hohlraumvolumens darlegen. Das Hohlraumvolumen des Bodens verändert sich teils unter dem Einfluss der Atmosphärlilien, teils auch unter dem Einfluss von Organismen.

§ 25. Der Einfluss der Atmosphärlilien auf die Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens.

Von den Atmosphärlilien haben die Niederschläge und der Frost den größten Einfluss auf das Hohlraumvolumen des Bodens. Ist ein Boden durch die Bodenbearbeitung in Krümelstruktur übergeführt worden, so vermag der Regen dadurch, daß er zwischen die einzelnen Bodenteilchen eindringt, das Gefüge des Bodenkrümelns so weit zu lockern, daß die ein-

¹⁾ M. Tucher und C. v. Seelhorst, Der Einfluss, welchen der Wassergehalt und der Reichtum des Bodens auf die Ausbildung der Wurzeln und der oberirdischen Organe der Haferpflanze ausüben; Journal für Landwirtschaft Bd. 46, 1898, S. 63, und C. v. Seelhorst mit N. Georgs, Der Einfluss von Wasser und Dünger auf die Verhältnisse von Wurzelmasse zur Masse der oberirdischen Substanz; Journal für Landwirtschaft Bd. 48, 1900, S. 328.

zelenen Bodenpartikelchen durch ihr eigenes Gewicht von dem Krümel losbröckeln, in die größeren, zwischen den Krümeln befindlichen Hohlräume hineinfallen und diese so allmählich ausfüllen. Auf diese Weise wird das gesamte Hohlraumvolumen kleiner, die großen Hohlräume werden verengt, was notwendig zur Folge hat, daß sich das Erdniveau senkt. In der Praxis sagt man: „Der Boden setzt sich.“ *Je heftiger der Regen fällt*, d. h. je größer die einzelnen Tropfen sind und je größer somit die Geschwindigkeit ist, mit der sie auf den Boden aufschlagen, *um so mehr vermag der Regen durch die ihm innewohnende kinetische Energie direkt die Zerstörung der Krümelstruktur zu fördern*. Da Hagel größere Massenteilchen bilden kann, welche somit eine noch größere Geschwindigkeit erreichen, wirkt derselbe in weit erhöhtem Maße im gleichen Sinne auf den Boden ein. Schnee hingegen übt diese Wirkung nicht aus, da das Volumen der Schneeflocke im Verhältnis zu ihrer Oberfläche zu gering ist und infolgedessen der Widerstand der Luft die Fallgeschwindigkeit außerordentlich verringert.¹⁾

Dies durch Regen und Hagel herbeigeführte „Sichsetzen“ des Bodens nähert sich allmählich einem Endstadium, welches dann erreicht ist, wenn der Boden auf das dichteste gelagert, d. h. wenn die Krümelstruktur vollkommen zerstört ist. Bei mittleren Niederschlägen setzen sich die meisten unserer Forst- und Ackerböden, welche vorher in gewöhnlicher Weise bestellt waren, schon im Laufe eines Jahres fast vollständig. — Ist diese Ruhelage einmal erreicht, so ist ein ferneres „Sichheben“ und „Sichsenken“ des Erdniveaus kaum noch zu beobachten. Alle anderen Einflüsse haben also im Vergleich mit der Bodenbearbeitung und den Niederschlägen für die *Größe* des Hohlraumvolumens nur eine außerordentlich geringe Bedeutung, sie verändern mehr die *Gestalt* desselben.

Die hauptsächlichliche Einwirkung des Schnees ist eine ganz andere als die des Regens oder Hagels. *Eine Schneedecke*, welche auf einem frischbearbeiteten Boden lagert, *wirkt durch ihren einheitlichen Druck zwar zerkleinernd auf die Bodenkrümel, ohne jedoch hierbei die eigentliche Krümelstruktur in irgend einer Weise zu zerstören*. Sie verhindert im Gegenteil das direkte Auffallen des Regens auf den Boden und trägt so zur Erhaltung der Krümelstruktur bei. Ein unter Schneedecke durchwintertes Boden ist „mürbe“.

Die Schneedecke kann aber auch andererseits, wenn sie sehr hoch liegt, das Eindringen des Frostes in den Boden, was nach praktischen Erfahrungen sehr günstig für die zukünftige Vegetation sein soll, verhindern.

Einen direkten Einfluß des Frostes auf die festen Bodenteilchen, welcher vielleicht derart zu denken wäre, daß in die Hohlräume der

¹⁾ Vergl. die Ausführungen auf S. 43—45.

letzteren eingetretenes Wasser beim Gefrieren diese auseinandersprengt, ist nach Versuchen des Verfassers¹⁾ nicht nachweisbar. Die in der Praxis beobachtete günstige Einwirkung des Frostes auf den Boden muss demnach anders zu erklären sein.

Wie wir später bei Besprechung der Kapillaritätserscheinungen sehen werden, halten die festen Bodenteilchen gerade zwischen den engsten Hohlräumen am längsten das Wasser zurück, wie überhaupt das Bodenwasser stets zuerst bestrebt ist, die engen Hohlräume im Boden anzufüllen. Gefriert nun ein Boden, so werden dadurch, dass das Wasser sich beim Gefrieren ausdehnt, diese engen Hohlräume geweitet. Es werden hierbei Bodenteilchen in die größeren Hohlräume hineingepresst oder, falls die anstossenden Teilchen nicht weichen können, emporgedrückt. Es tritt die Erscheinung ein, dass der Boden „auffriert“, dass Steine „ausfrieren“. Taut der Boden wieder auf, so ist es, da alle Hohlräume im Boden zusammenhängen, keineswegs notwendig, dass sich auch die engen Hohlräume, welche beim Gefrieren des Wassers erweitert wurden, wieder zusammenziehen. Vielfach wird die durch das „Auffrieren“ veränderte Lage der Bodenteilchen ein Zerfallen der Klumpen in kleinere Krümel zur Folge haben, ein Abbröckeln kleinerer Bodenteile bewirken, so dass dann ein äusserer Druck nicht mehr auf die Rückbildung dieser feineren Hohlräume hinwirkt. Ich möchte deshalb aus dem Vorhergehenden folgern, dass *der Frost bewirkt, dass enge Hohlräume erweitert, weitere* (durch Einbröckeln fester Bodenteilchen) *verengt werden*. Hierdurch werden demnach große Bodenkrümel zerkleinert, und wir erhalten so einen Zustand der Bodenstruktur, wie dieser sowohl für das Eindringen der Pflanzenwurzel, wie auch für die Wasserverhältnisse des Bodens nicht günstiger geschaffen werden kann. Kein Bodenbearbeitungsinstrument kann uns diese Arbeit des Frostes ersetzen.

Wir suchen nun noch für diese Theorie nach Beweismaterial. Hier kommen uns Beobachtungen zustatten, welche zuerst von Sachs²⁾ gemacht und später von Fleischer,³⁾ Wollny⁴⁾ u. a. bestätigt wurden. Es

¹⁾ A. Mitscherlich, Ein Beitrag zur Erforschung der Einwirkung des Frostes auf die physikalischen Bodeneigenschaften; Fühlings landw. Zeitung 51. Jahrg., 14. Heft.

²⁾ J. Sachs, Veränderungen vegetabilischer Stoffe durch Gefrieren und Auftauen; Landw. Versuchs-Stationen Bd. 2, S. 193.

³⁾ M. Fleischer, Die Wasser- und Temperaturverhältnisse des besandeten und des nicht besandeten Hochmoorbodens; Landw. Jahrbücher Bd. XX, 1891, S. 785 u. f.

⁴⁾ E. Wollny, Unters. über den Einfluss des Frostes auf die physik. Eigenschaften des Bodens; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. XX, S. 456 u. f.

zeigte sich nämlich, daß, wenn man Boden mit Wasser übergießt und ihn sodann gefrieren läßt und wieder auftaut, daß er alsdann einen Teil des vorher aufgenommenen Wassers nicht mehr zurückzuhalten vermag. Bei den vorliegenden Versuchen waren auch größere Hohlräume des Bodens noch mit Wasser angefüllt. Wenn nun beim Gefrieren des Bodens kleinere Bodenteilchen in die größeren Hohlräume hineinbröckeln, so muß dementsprechend Wasser aus diesen verdrängt werden. Bringt man z. B. einen solchen nassen Boden in ein unten verschlossenes Glasrohr und läßt man denselben dann in diesem gefrieren, so sondert sich über dem Boden schon beim Gefrieren aber insonderheit beim Auftauen eine Wassermenge ab, welche nachher nicht mehr von diesem aufgenommen wird.¹⁾ Es ist dies nur dadurch zu erklären, daß wir es hier mit einer Umlagerung der Bodenteilchen in gedachtem Sinne zu tun haben.

Ist dies aber der Fall, so muß sich hierfür auch ein Gegenbeweis erbringen lassen. Es darf demnach ein mit Wasser gesättigter Boden, der auf das engste gelagert ist, durch die Einwirkung des Frostes keinen Wasserverlust erleiden. Dies läßt sich leicht experimentell bestätigen. Wir bringen unter Wasser aufgeschlämmten Boden in unser Glasrohr, entfernen etwa vorhandene Luft durch Evakuieren des Rohres und gießen darauf das überstehende Wasser ab. Um ganz sicher zu gehen, rütteln wir den Boden im Glas nochmals zusammen und beobachten hierbei, daß kein Wasser mehr aus dem Boden austritt. Der Boden ist jetzt in die engste Lagerung, wie diese durch die Einzelkornstruktur gegeben ist, übergeführt und vollkommen mit Wasser gesättigt. Wir lassen ihn nun in unserem Glasrohre von unten aus gefrieren. Es hebt sich hier die Bodenmenge entsprechend der Eisbildung, setzt sich beim Auftauen dann aber wieder, *ohne* daß sich diesmal hierbei Wasser darüber ausscheidet. Es tritt also in dem Falle infolge der Frostwirkung kein Wasserverlust des Bodens ein. Dies Experiment mag zur Bestätigung der hier vertretenen Anschauung genügen.

Ist der Boden nicht so mit Wasser durchtränkt, wie dies bei den Versuchen der genannten Forscher der Fall war, so ist der Wasserverlust des Bodens, welcher durch die Frostwirkung eintritt, ein entsprechend geringerer. Nach Wollnyschen²⁾ Versuchen ist ein Wasserverlust bei Bodenarten, die noch 60 % der von ihnen im höchsten Falle aufnehmbaren Wassermenge enthalten, nicht mehr zu bestimmen. Wenn man berücksichtigt, daß ein viel höherer Wassergehalt des Bodens auf die Vegetation ungünstig einwirkt, so sieht man, daß dieser durch den Frost eintretende Wasserverlust keine Bedeutung für unsere Pflanzenkultur besitzt.

¹⁾ Alfred Mitscherlich, l. c. S. 11.

²⁾ E. Wollny, l. c. S. 459.

Von der Einwirkung der übrigen Atmosphäriken auf den Boden ist nur noch die des Sauerstoffes von Bedeutung, welcher, wie wir gleich sehen werden, bei der Zersetzung der organischen Substanzen eine große Rolle spielt. Dafs die Atmosphäriken bei der Verwitterung der anorganischen festen Bodenteilchen ebenfalls vornehmlich beteiligt sind, ist allgemein bekannt. Ihre Arbeit hier ist aber eine so langsame, dafs sie für die Vegetation fast ohne Ausnahme bedeutungslos ist.

§ 26. Der Einfluss pflanzlicher und tierischer Organismen auf die Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens.

Bei der Verwesung der organischen Stoffe im Boden dürften vornehmlich Spalt- und Sprosspilze eine große Rolle spielen. Ihre Einwirkung auf das Hohlraumvolumen des Bodens ist, sobald die Lebensbedingungen für sie günstig sind, außerordentlich groß. Als Lebensbedingung verlangen die meisten organische Bodenbestandteile und außerdem größtenteils den Sauerstoff der Luft; je grösser die Oberfläche ist, an welcher der Sauerstoff der Luft mit der organischen Bodensubstanz in Berührung kommt, um so reger ist ihre Lebenstätigkeit. Ist ein Boden gut durchgearbeitet, tief gelockert, zeigt er zahlreiche nicht zu enge Hohlräume, so sind die Vorbedingungen für das Leben der Pilze im Boden gegeben. Diese verarbeiten nun die organischen Substanzen teilweise unter Zuführung von Sauerstoff und erzeugen aus diesen vornehmlich als Endprodukt die Kohlensäure. — Während für eine Reihe von Spaltpilzen der Sauerstoff der Luft für ihre Lebenstätigkeit absolut notwendig zu sein scheint, spielt er bei den Sprosspilzen nur anfangs bei ihrer Entwicklung eine große Rolle. Sobald aber die Gärtätigkeit seitens der Hefezellen im Innern von Körpern eingesetzt hat, vermögen sie auch daselbst ohne Sauerstoff zu vegetieren.¹⁾

Durch diesen Prozess werden somit mehr Gase erzeugt als aufgenommen. Sind nun Hohlräume durch feine Wassermenisken²⁾ abgeschlossen, so kann in diesen sich ein Druck entwickeln, welcher ebenso auf die Menisken wie auf die Wandungen der Hohlräume, d. h. auf die festen Bodenteilchen, wirkt. Es ist leicht denkbar, dafs auf diese Weise gerade wie bei der Frostwirkung enge Hohlräume erweitert werden, zumal enge Wassermenisken, wie wir später sehen werden, einen außerordentlich großen Druck aushalten können. Ebenso können sich aber auch noch weitere Hohlräume, sofern diese von engen Wassermenisken begrenzt sind, entsprechend erweitern. Die Folge dieser Erscheinung mufs die von dem Praktiker so oft gemachte Beobachtung sein, dafs der Boden „aufgeht“,

¹⁾ Vergl. u. a. E. Wollny, Die Zersetzung der organischen Stoffe und die Humusbildung. Heidelberg 1897, S. 95.

²⁾ Vergl. später § 31 u. 33.

mürbe und krümelig wird, eine Erscheinung, die er mit „Gare“ bezeichnet. Der Boden verliert hier ebensowenig wie durch die Einwirkung des Frostes die Krümelstruktur; im Gegenteil scheint sich der ganze Boden teigartig zusammenzuhalten, insofern man bei jedem Fufstritt, den man auf einen in Gare befindlichen Boden macht, beobachten kann, daß der ganze Boden auch noch in fußweiter und noch größerer Entfernung um die Eintrittsstelle herum nachgibt und zum Teil mit nachsinkt. Um die Gare des Bodens möglichst gut zu gestalten, ist demnach organische Düngung, sei es Stalldüngung oder Gründüngung, und eine möglichst gute, lockere Bearbeitung des Bodens wünschenswert; wir werden aber dann einen Zustand des Hohlraumvolumens des Bodens mittelst der Gare erzielen können, wie er für das Eindringen der Pflanzenwurzel sowohl, wie auch für den Wassergehalt des Bodens nach dem Vorhergehenden am günstigsten sein muß. Auch diese Arbeit der Sprosspilze läßt sich mit keinem unserer Bodenbearbeitungsinstrumente auch nur einigermaßen nachahmen.

Ist der Boden hingegen fest, so kann diese Gärungserscheinung nur in äußerst geringer Weise eintreten. Einmal vermag nämlich der Sauerstoff, welcher den Anstoß zu diesem Prozeß geben muß, nicht tief in den Boden einzudringen; ferner aber wird die Kraft der Hefepilze nicht ausreichen, größere Bodenmassen beiseite zu schieben, sofern die Wassermenisken, welche die Hohlräume abschließen, dem Druck widerstehen können. Es kann so der Überdruck in den Hohlräumen, in welchen sich der Prozeß abspielt, so groß sein, daß das Wachstum des Sprosspilzes aufhören muß.¹⁾ Durch eintretenden Regen kann so, selbst wenn der Boden gut vorbereitet war, der Gärprozeß gehemmt werden. Er hört natürlich auch von selbst auf, sobald den Sprosspilzen die Nahrung ausgeht. Ohne Zweifel beteiligen sich an diesem Gärvorgange verschiedene Arten von Sprosspilzen und in ähnlicher Weise wohl auch eine ganze Menge verschiedener Spaltpilze. Dies läßt sich u. a. aus der verschiedenen Wirkung, die Pferdedünger einerseits und Rinderdünger andererseits auf die Gare des Bodens ausüben, deutlich erkennen. Bei mit Pferdedünger beschicktem Boden geht der Gärprozeß plötzlich sehr schnell vor sich, und zwar in der Weise, daß sich der Boden hierbei sehr erwärmt. Es ist dies eine Erscheinung, welche wir bekanntlich u. a. in der Gärtnerei in den Frühbeetskulturen sehr nutzbringend anzuwenden pflegen. Die Gare tritt schnell ein, geht aber auch entsprechend schneller zu Ende, so daß sich der Boden dementsprechend schneller wieder setzt. Bei Rinderdünger ist die Gärerscheinung eine langsamere. Er erwärmt den Boden nicht so wie

¹⁾ E. Wollny bestreitet l. c. S. 290 und Die Ackergare, Forsch. a. d. Geb. der Agrikulturphysik Bd. 12. S. 67 u. f., die Hohlraumvolumen-Erweiterung infolge der Gärung, vermag aber keine andere Erklärung für die „Gare“ zu geben.

der Pferdedünger. Dafür ist die Gärwirkung nachhaltiger, der Boden wird länger in dem gewünschten lockeren Zustande erhalten.

Während dies unstreitig der Haupteinfluss ist, welchen die niederen Pflanzen auf das Hohlraumvolumen des Bodens ausüben, ist auch ein anderer, welcher direkt in der Veränderung der festen Teilchen, speziell der Humusteilchen besteht, nicht zu übergehen. Ich habe versucht, diesen Einfluss dadurch zu bestimmen,¹⁾ daß ich die Benetzungswärme eines und desselben Bodens mehrere Jahre hindurch feststellte. Es ergaben sich hier bei der Stalldüngung in dem Jahre, wo der Dünger dem Boden einverleibt wurde, gegen die darauffolgenden Jahre keine erheblichen Differenzen, hingegen zeigte sich bei der Gründüngung in dem auf diese Düngung folgenden Jahre deutlich die Zersetzung der organischen Substanz im Geringerwerden der Bodenoberfläche resp. der beobachteten Benetzungswärme.

Einige Zahlen mögen hier folgen:

Benetzungswärmen in cal.	1. Versuch	2. Versuch	3. Versuch
Nach der Halmfrucht	0,97	1,18	—
„ „ Gründüngung	1,01	1,21	1,37
„ „ Halmfrucht	0,99	1,09	0,88
„ „ Gründüngung	1,00	1,21	1,57
„ „ Halmfrucht	—	—	1,40

Wenngleich die Unterschiede namentlich beim 3. Versuch außerordentlich groß sind, so sind doch die Fehler der Probeentnahme, wie wir später sehen werden, keineswegs unerheblich, so daß die Resultate immerhin noch durch andere Versuche bestätigt und vervollständigt werden müssen.

Betreffend die Schnelligkeit, mit welcher die organischen Substanzen im Boden zersetzt werden, liegen nur Untersuchungen vor, bei welchen die das Endprodukt der Zersetzung bildende Kohlensäure quantitativ bestimmt wurde. Ich glaube hier über diese Beobachtungen hinweggehen zu können, da sie uns keinen Anhalt für die physikalische Veränderung des Bodens gewähren können.

Auch die Kulturpflanzen selbst üben einen günstigen Einfluss auf die Gestaltung des Hohlraumvolumens des Bodens aus. Eine Reihe derselben, die sogen. Tiefwurzler, welche ihre Wurzeln in den Untergrund senden, arbeiten hier für weniger wurzelstarke Pflanzen die Kanäle vor, in welchen diese dann ohne erheblichen Energieaufwand ihre Wurzeln hineinsenden können. Wohl die ersten Beobachtungen hierüber dürften von Thiel²⁾

¹⁾ A. Mitscherlich, Zur Veränderung der physikalischen Bodeneigenschaften im Verlaufe einer zwei- und einer dreifeldrigen Fruchtfolge; Fühlings landw. Zeitung 51. Jahrg., Heft 19, 20.

²⁾ Hugo Thiel, De radicum plantarum quarundam ab agricolis praecipue cultarum directione et extensione. Diss. physiol. Bonn 1865, S. 16.

herrühren, welcher fand, daß u. a. Kleewurzeln über zwei Meter tief in den Boden einzudringen vermögen. Er stellte ferner in einer Mergelgrube auf einem Querschnitt, welcher sich zwei Meter unter dem vorherigen Erdniveau befand, im Mittel vieler Versuche pro 900 qcm Fläche 5—20 solcher Röhren fest, welche wohl vornehmlich auf die Tätigkeit ehemaliger Baumwurzeln zurückzuführen waren.

Daß übrigens auch andere landwirtschaftliche Kulturpflanzen so tief und noch viel tiefer in den Boden einzudringen vermögen, beweist ein Präparat einer Luzernenpflanze von Albert Orth-Berlin, welche eine fünf Meter lange Wurzel aufweist. Allerdings gehört diese bekanntlich auch zu den *viel*jährigen Ackerpflanzen. —

Die Landwirtschaft hat sich diesen Befund zunutze gemacht, indem sie stets auf tiefwurzelnde Pflanzen in der Fruchtfolge im nächsten Jahre flachwurzelnde folgen läßt.

Ähnlich wie viele tiefwurzelnde Kulturpflanzen als Pioniere den Untergrund anderen Pflanzen zugänglich machen, ähnlich sollen auch die Regenwürmer tätig sein. Der Nutzen der Regenwürmer wird von vielen Forschern anerkannt. Sie leben von absterbenden Pflanzenteilen und ziehen diese auch in ihre Gänge hinein. So könnten sie Humusstoffe direkt bis in den Untergrund befördern, welchen sie vorher durch ihre Gänge erschlossen haben. Die Beobachtungen, welche insonderheit Hensen¹⁾ hierüber angestellt hat, scheinen mir aber nicht beweiskräftig genug zu sein, denn gerade im Untergrunde sind die Röhrengänge der Würmer nach seinen Beobachtungen selten ausgepolstert. Ich möchte deshalb eher annehmen, daß der Regenwurm bei seinen Exkursionen in die tieferen Bodenschichten mehr den absterbenden Wurzeln unserer Tiefwurzler nachgeht und so die durch diese geschaffenen Hohlräume erweitert, als daß er hier ganz neue Gänge schafft, die er mit Humusstoffen der Krume auspolstert.

Wie dem nun auch sein mag, jedenfalls hat der Regenwurm einen sehr günstigen Einfluß auf den Boden, insofern er denselben zu einer Zeit noch aufzulockern vermag, wenn der Land- und Forstwirt seiner Saaten oder Kulturen wegen nicht mehr in dem Boden arbeiten kann. Außerdem mag er auch Nährstoffe der Pflanze aufnehmbarer zu gestalten. Um einen Anhalt für die Nützlichkeit dieser Tiere zu erhalten, sind u. a. von Wollny²⁾

¹⁾ Victor Hensen, Über die Fruchtbarkeit des Erdbodens in ihrer Abhängigkeit von den Leistungen der in der Erdrinde lebenden Würmer; Landw. Jahrb. Bd. 11, 1882, S. 661.

²⁾ E. Wollny, Unters. über die Beeinflussung der Fruchtbarkeit der Ackerkrume durch die Tätigkeit der Regenwürmer; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 13, S. 381 u. f.

und Mémhed Djemil¹⁾ Vegetationsversuche angestellt worden, welche fast ausnahmslos ergaben, daß die Pflanzen bei Gegenwart von Regenwürmern bessere Erträge zeitigten. Einige Wollnysche Resultate mögen hier folgen:

Versuchsjahr	Versuchspflanze	Anzahl der Versuchspflanzen	Zahl der Regenwürmer am		Korn- resp. Knollen- Ertrag g
			Anfange	Ende	
			des Versuches		
1888	Roggen	9	100	—	25,8
			0	—	16,2
1889	„	16	100	28	28,5
			0	—	14,7
1888	Erbsen	9	100	—	141,0
			0	—	146,0
1889	„	9	100	43	141,5
			0	—	113,0
1889	Ackerbohne	9	100	39	68,5
			0	—	40,5
1888	Raps	9	100	—	12,5
			0	—	1,5
1889	„	9	100	37	5,40
			0	—	2,81
1889	Kartoffeln	1	100	31	217
			0	—	92
1890	„	1	20	10	730
			0	—	560
1890	Runkelrüben	1	20	26	370
			0	—	250

Wenngleich dieser Tätigkeit des Regenwurms nach diesen wie nach den Djemilschen Versuchen das beste Zeugnis auszustellen ist, so gibt es doch auch andere Forscher, denen das Überhandnehmen der Regenwürmer große Sorge macht. So kann man im Journal d'agriculture 1902 No. 1310 eine Arbeit von Fribourg²⁾ lesen, in welcher gegen den Regenwurm die Impfung einiger Würmer mit einem Pilz (*Botrytis tenella*)

¹⁾ Mémhed Djemil, Unters. über den Einfluss der Regenwürmer auf die Entwicklung der Pflanzen. Inaug.-Diss. Halle a. S. 1896. Vergl. Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 19, S. 421.

²⁾ Vergl. auch den Jahresbericht der Landwirtschaft von Bürstenbinder, 7. Jahrg., S. 45.

empfohlen wird, welche dann an den „gefährdeten“ Stellen in 15 bis 25 cm weitem Abstände auszusetzen sind. Der Pilz soll dann die zum Tode der Regenwürmer führende Krankheit durch Ansteckung weiter verbreiten und so diese Regenwurm-Kalamität beseitigen. Wir finden hier also ein Analogon zur der Bekämpfung der Mäuse-Gefahr durch *Bacillus typhi murium* und zu der der Nonnengefahr durch *Bacterium monachae*.

Bei den Saaten kann der Regenwurm dadurch großen Schaden anrichten, daß er noch nicht aufgegangenen Samen in die tieferen Erdschichten hineinzieht und hierdurch das Keimen und Aufgehen desselben verhindert. Derartige Beobachtungen sind bei Schwarzerle-Saatkämpfen von Baur¹⁾ gemacht worden. Diese Tätigkeit des Regenwurms kann wohl unter Umständen dem Land- und Forstwirt großen Schaden zufügen, doch dürfte das wohl der einzige Schaden sein, und dürfte dieser hinter dem Nutzen dieser Tiere ganz zurücktreten.

Oft werden die Regenwürmer, namentlich auf leichtem Boden, überhaupt nur in geringeren Mengen vorkommen; so glaubt Ramann,²⁾ daß die Wirkung der Regenwürmer auf Sandböden erheblich überschätzt worden ist.

Auch andere Tiere vermögen den Boden aufzulockern, und zwar je kleiner dieselben sind, in um so günstigerer Weise für die Pflanzen. Es darf diesen und ihrer den Pflanzenwuchs fördernden Arbeit jedoch im allgemeinen keine große Bedeutung zugesprochen werden, da sie entweder in zu geringer Anzahl im Boden auftreten, oder da sie sich direkt von lebenden Pflanzen nähren, wie z. B. der Engerling, und somit ihr den Pflanzenwuchs schädigender Einfluß bei weitem überwiegt.

§§ 27—28. Der Einfluß der menschlichen Tätigkeit auf die Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens.

Der Mensch wirkt auf zweierlei Weise auf die Größe und die Gestalt des Hohlraumvolumens des Bodens ein. Einmal durch die ganze Bodenbearbeitung, ferner durch die Düngung.

§ 27. Die Bodenbearbeitung.

Der Zweck der Tätigkeit des Menschen, welche er in der Bodenbearbeitung ausübt, läßt sich dahin zusammenfassen, daß er bestrebt ist,

¹⁾ F. Baur, Die Bildung der Ackererde durch die Tätigkeit der Würmer: Forstliches Zentralblatt. Berlin 1883, 5. Jahrg., S. 263.

²⁾ E. Ramann, Untersuchungen über Waldböden, I; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 11, S. 325. Vergl. ferner E. Ramann, C. Bemelé, Schellhorn und Max Krause, Anzahl und Bedeutung der niederen Organismen

den Boden zu lockern und ihn in einen möglichst feinkrümeligen Zustand zu überführen. Von einem Boden, bei welchem man dieses Endziel leicht erreichen kann, den man in möglichst tiefer Schicht in diesen Zustand zu überführen vermag, sagt man: „er ist in guter Kultur“.

Wir wollen zunächst hier an der Hand von Vegetationsversuchen, welche von Wollny¹⁾ ausgeführt wurden, zeigen, welchen Einfluß die Lockerung eines Bodens auf die Erträge ausübt.

Wollny stellte zunächst durch Versuche fest, daß ein Boden in krümeligem Zustande (b) höhere Erträge liefert als ein solcher in pulverförmigem Zustande (a). Er züchtete hierbei die Pflanzen größtenteils in Töpfen, einige vereinzelt — die betreffenden Zahlen sind in der Tabelle mit einem Stern versehen — auch im freien Lande. (Wo in dieser wie in der folgenden Zahlenreihe zwei Versuche in dem gleichen Jahre angestellt wurden, ist jedesmal der zweite Versuch gedüngt worden; die mit zwei Sternen versehenen Versuche erhielten nur Kalk als Düngung.)

(Siehe die Tabelle auf Seite 142.)

Da im ersten Falle (a) der Boden künstlich durch Zerreiben in einem Porzellanmörser in ein feines Pulver von $< 0,25$ mm Durchmesser verwandelt, im anderen Falle (b) hingegen in Krümeln von $0,5-4,0$ mm Durchmesser abgeseibt wurde, so können die vorstehenden Resultate nur praktisch den Beweis dafür liefern, daß die Bildung der Krümel für die Höhe der Erträge eine unbedingte Notwendigkeit ist.

Wir hatten zuvor gesehen, daß der Boden allmählich durch die Niederschläge im Sommer in Einzelkornstruktur übergeführt wird und sich somit setzt, eventuell auch dann an seiner Oberfläche verkrusten kann; und ich hatte schon damals darauf hingewiesen, daß dieser Zustand beseitigt werden muß, falls wir höhere Erträge erzielen wollen, und daß hierfür die Bodenbearbeitung, d. i. die Überführung des Bodens in die Krümelstruktur, das einzige Mittel ist. Je tiefere Bodenschichten wir unter sonst gleichen Umständen in diese Krümelstruktur überführen können, d. h. je tiefer wir den Boden bearbeiten können, um so größer werden natürlich die Pflanzenerträge sein, *falls unser Boden sonst gleichartig ist*. Hierfür wiederum einige Belege aus Wollnyschen Versuchen. Diese wurden im freien Lande auf je 4 qm großen Parzellen angestellt. Je eine Parzelle wurde nicht bearbeitet (a), je eine wurde 18 cm tief (b) und je eine 36 cm (c) mit englischen Grabgabeln gelockert.

(Siehe die Tabelle auf Seite 143.)

in Wald- und Moorböden; Zeitschr. f. Forst- und Jagdwesen XXXI. Jahrg., S. 575—606.

¹⁾ E. Wollny, Unters. über den Einfluß der mechanischen Bearbeitung auf die Fruchtbarkeit des Bodens; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 231 u. f. Desgl. (erste Mitteilung) ebenda Bd. 18, S. 64 u. f.

Aus den vorstehenden Zahlen ersieht man zur Genüge, daß sich die Erträge durch die Bodenbearbeitung wesentlich heben, und daß sie auch größer werden, wenn man den Boden tiefer durcharbeitet. Dies hat natürlich eine Grenze, welche durch die Ausdehnung des Wurzelsystems der einzelnen Kulturpflanze gezogen ist. Im allgemeinen dürfte eine zu tiefe Bearbeitung des Ackers für eine flachwurzelnde Pflanze wertlos, ja oft sogar gefährlich sein.

Von praktischer Bedeutung ist ferner die Frage, ob man den Boden zweckmäßig nur einmal für jede Pflanze auflockert und, wann man dies tun muß, oder ob eine zweimalige Pflugfurche vor der Bestellung vorzuziehen ist. Auch hierüber liegen Versuche von Wollny vor, die sich jedoch leider nur auf ein Jahr erstrecken. Sie wurden auf Parzellen von je 10 qm angestellt, und zwar derart, daß je eine Parzelle im Herbst- und Frühjahr (a) gepflügt wurde; je eine Parzelle erhielt ferner nur die Herbst- (b) und je eine nur die Frühjahrs-Pflugfurche (c). Die Resultate waren die folgenden:

Feldfrucht	Sommer- roggen	Lein- dotter	Erbse	Mais	Kar- toffel	Runkel- rübe
Korn-, Knollen- resp. } a	1700	1310	1250	4960	22 930	50 150
Wurzel-Erträge } b	1460	1260	1190	4530	21 590	46 000
in g } c	1170	1180	1040	4010	18 250	29 740

Aus diesen Resultaten würde man schließen, daß doppeltes Pflügen (a) die höchsten Erträge ergibt, und daß sonst die Herbstfurche (b) der Frühjahrsfurche (c) vorzuziehen ist.

Anschließend an diese Versuche warnt aber Wollny sehr mit Recht vor einer Verallgemeinerung der Resultate. Wir können diese Warnung aus den vorherigen Erörterungen rechtfertigen.

Zunächst ist, wie dies in der landwirtschaftlichen Praxis längst bekannt ist, die Herbstfurche zu geben. Der Grund hierfür liegt, wie wir vorher sahen, darin, daß der Frost besseren Eintritt in den Boden findet und diesen in seiner Weise weiter verarbeiten kann. Ist der Winter günstig gewesen, hat der Frost womöglich unter einer leichten Schneedecke den Boden gelockert, so ist eine Frühjahrsfurche überflüssig oder schädlich; denn wir können durch sie den für das Keimbett gut gelockerten Boden nach unten kehren und mit anderem nicht gelockerten Boden bedecken. War der Winter hingegen für den Boden ungünstig, so daß durch viel Regen und Schlackerwetter der Boden oben sehr eingeschlämmt ist, so ist außerdem die Frühjahrsfurche zu geben. Die Weiterverarbeitung des Bodens muß sodann der Gare überlassen werden. Ist

ein Boden im Herbst frisch mit organischem Dung gedüngt, so kann die Frühjahrsfurche in keinem Falle etwas schaden, da dann, selbst wenn durch den Frost nicht gelockerter Boden nach oben gebracht wird, dieser noch nachträglich durch die sich entsprechend stärker entwickelnde Gare gelockert wird, und der Boden auf diese Weise tiefer in den bestmöglichen Zustand übergeführt werden kann. Wählt man nur die Frühjahrsfurche, so fällt einmal die Durchlockerung des Bodens durch den Winterfrost ganz aus; tritt aber dann noch zur Zeit der Gare im Frühjahr ungünstige Witterung ein, so geht die innere Lockerung des Bodens überhaupt verloren, denn sie läßt sich, wie wir sahen, auch durch kein Ackergerät, durch keine Maschine künstlich herstellen. — Es bietet uns somit die Herbstfurche immer eine Möglichkeit mehr dafür, diesen erstrebenswerten Bodenzustand zu erreichen.

Alle anderen Ackerwerkzeuge, welche dem Landwirt zur Verfügung stehen, dienen nun dazu, den Boden so vorzubereiten, daß die Gare möglichst gut in dem Boden arbeiten kann. Dies wird dann geschehen, wenn die an die Atmosphäre angrenzende Bodenoberfläche möglichst groß ist, und dies ist wiederum der Fall, wenn die Bodenkrümel möglichst klein sind. So dienen Grubber, Egge und insonderheit das beste unserer neueren Ackergeräte, der Federzinkenkultivator, dazu, die Bodenklöße und groben Bodenkrümel zu zerkleinern. Sind die Bodenklöße für diese Instrumente zu fest, so nehmen wir auch die Walze, besonders die schwere eiserne Ringelwalze, um sie zu zerdrücken. Tritt nach der Bodenbearbeitung die Gare ein, so verlangt der Boden Ruhe, damit er sich möglichst vollständig ausarbeiten kann; erst wenn er sich nachher wieder gesetzt hat, dann ist es Zeit für die Bestellung.

Um eine möglichst gute Frostwirkung zu erzielen, bereiten wir den Boden durchaus nicht ebenso vor wie für die Gare. Wir lassen ihn im Gegenteil möglichst in der Pflugfurche in den Winter gehen. Eine Lockerung des Bodens, wie diese im groben durch den Pflug hergestellt wird, muß stattfinden, damit nachher der Frost die Lockerung im kleinen bewirken kann. Eine feine Zerkrümelung des Bodens ist aber nicht wünschenswert, da dann der Boden die Wärme viel schlechter leitet, mithin der Frost nicht so tief in den Boden eindringen und dort seinen für die Vegetation günstigen Einfluß auszuüben vermag.

Daß durch die Bodenbearbeitung durch die Ackerinstrumente gleichzeitig ein großer Einfluß auf die Wasserverhältnisse des Bodens ausgeübt wird, und zwar gerade dadurch, daß das Hohlraumvolumen in seiner Gestalt, in seiner Weite verändert wird, haben wir später eingehend zu besprechen.

Nach den vorstehend mitgeteilten Untersuchungen dürfte es den Anschein erwecken, als ob nur der Landwirt von dieser Bodenlockerung Vorteile haben könnte. Daß dies aber nicht der Fall ist, sondern daß

wir hier eine allgemeingültige pflanzenphysiologische Gesetzmäßigkeit vor uns haben, dafür mögen noch einige forstwirtschaftliche Resultate Zeugnis ablegen. Cieslar¹⁾ untersuchte die verschiedene Wüchsigkeit von Fichtenpflanzen auf unbearbeitetem und auf gelockertem Boden. Es wurden zu den Versuchen je 200 einjährige Pflanzen benutzt, welche in einem Quadratverbande von 10 cm gepflanzt wurden. Nach zwei Jahren ergaben die 200 Pflanzen im unbearbeiteten Boden ein Frischvolumen von 231 cc gegen 289 cc im gelockerten Boden. Bei Wiederholung der Versuche wurden je 850 einjährige Fichtenpflanzen auf Beete eines sehr strengen Bodens im Quadratverbande von 10 cm gepflanzt. Im Herbst des darauffolgenden Jahres, also nach zwei Wachstumsperioden, wurden wiederum die Resultate gezogen. Es ergab sich hier folgendes:

	Mittlere Pflanzenhöhe cm	Mittleres Pflanzengewicht g	Mittleres Frischvolumen ccm	Luft-trocken-gewicht g
Im unbearbeiteten Boden .	12,8	7,065	7,312	2,612
„ gelockerten Boden . .	15,5	9,879	9,930	3,644

Die Bodenbearbeitung hat den Zweck, der Pflanzenwurzel unnötigen Arbeitsaufwand abzunehmen, damit sie die aufgenommenen Energiemengen mehr zur Vergrößerung der Erträge verwenden kann.

Allgemeingültige Regeln für die Bearbeitung eines Bodens lassen sich für die Praxis nicht aufstellen! Es hängt dies ganz von der Art des Bodens, von der Witterung, wie vornehmlich von dem *momentanen* Bodenzustand ab. Eine richtige und zweckmäßige Bodenbearbeitung richtet sich nicht nach dem Kalender, sie wird in verschiedenen Jahren, ebenso an denselben wie an verschiedenen Orten ganz verschieden sein können, und erfordert so die ganze Umsicht und Erfahrung des theoretisch vorgebildeten, praktischen Land- und Forstmannes.

Kann man durch den Frost oder die Ackergare den für die Pflanze erforderlichen Bodenzustand nicht mehr erreichen, wie dies bei sehr strengen Bodenarten und in einer an Niederschlägen sehr reichen Gegend der Fall sein kann, so kann man hier nur durch ein „notwendiges Übel“²⁾ aus-

¹⁾ A. Cieslar, Untersuchungen über den Einfluss der mechanischen Bodenbearbeitung . . . auf das Wachstum der Fichtenpflanzen: Zentralblatt f. d. ges. Forstwesen. Wien 1893; vergl. Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 16. S. 232 u. f.

²⁾ Th. Pfeiffer, Stickstoffsammelnde Bakterien. Brache und Raubbau. Berlin. Verlag von Paul Parey, 1904, S. 32.

helfen: durch die Brachhaltung. Glücklicherweise gehören die Verhältnisse, unter denen man den Boden ein ganzes Jahr lang hierzu in Schwarzbrache liegen lassen muß, zu den seltensten Ausnahmen. In der Regel wird man unter solch ungünstigen Bedingungen eine gute Gare bei zweckentsprechender Bearbeitung schon durch Teilbrachen (halbjährige Brache etc.) erreichen können.¹⁾

§ 28. Der Einfluss der Düngung auf die Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens.

Unter „Düngung“ verstehen wir in der Regel die Zufuhr der für die Pflanze unentbehrlichen Nährstoffe in den Boden. Da es aus ökonomischen Gründen nicht möglich ist, diese Nährstoffe dem Boden in reiner Form zuzuführen, werden diese teils an organische, teils an anorganische Stoffe gebunden („künstlicher Dünger“) dem Boden einverleibt. Der organische Dünger, insonderheit der Stall- und der Gründünger ist, wie wir sahen, den Garpilzen Lebensbedingung. Er ist somit für eine geeignete Bodenzubereitung unentbehrlich, falls der Boden nicht genügende Mengen von Humus enthält. Dafs auch durch die organische Düngung der Boden selbst physikalisch eine Änderung erfährt, haben wir bereits gesehen. Wir können deshalb hier von der organischen Düngung und ihrem Einfluss auf das Hohlraumvolumen absehen und speziell den Einfluss der anorganischen Düngung oder der künstlichen Düngung auf dasselbe untersuchen. Salze, welche in größeren Mengen dem Boden einverleibt werden, wie z. B. die Kalksalze, sind so gut wie wasserunlöslich. In den Quantitäten, in welchen diese dem Boden zugeführt werden, vermögen sie nur einen verhältnismäfsig geringen Einfluss auf die physikalische Bodenbeschaffenheit auszuüben.

Alle anderen Salze lösen sich mehr oder minder leicht in Wasser. Der Landwirt führt deshalb dem Boden solche Salze auch nur in den Mengen zu, in welchen sie in dem folgenden oder höchstens in den nächsten paar Jahren von den Pflanzen verarbeitet werden können. Dennoch übt dies im Verhältnis zu der den Pflanzenwurzeln zur Verfügung stehenden Bodenmenge äufserst geringe Salzquantum erfahrungsgemäfs einen sehr grofsen Einfluss auf die Bodenstruktur aus. Der Boden „verkrustet“ infolge der Salzdüngung, und zwar anscheinend um so mehr, je leichter wasserlöslich ein Düngesalz ist.

Durch die folgenden Versuche²⁾ dürfte diese Erscheinung unschwer zu erklären sein. Wir hatten in § 11 gesehen, dafs man die Arbeit be-

¹⁾ K. v. Rümker, Der Boden und seine Bearbeitung: Tagesfragen aus dem modernen Ackerbau 1. Heft, 2. Aufl. S. 55.

²⁾ Alfred Mitscherlich, Unters. zur Erforschung der Einwirkung der

stimmen kann, welche das Wasser leisten muß, um bei der Benetzung des trockenen Bodens die Kohärenz der festen Teilchen — soweit es dies überhaupt vermag — aufzuheben. Wir bestimmten diese Arbeit durch die hierdurch freiwerdende Wärme und bezogen diese auf die Gewichtseinheit des trockenen Bodens.

Es ergibt sich nun, daß diese Arbeitsgröße geringer wird, wenn ein Boden mit Salzen gedüngt wird. Bei einem guten Kulturboden, welcher 2,7 cal. pro Gramm Benetzungswärme lieferte, betrug so diese für die besagte Arbeit frei werdende Wärme $0,788 \pm 0,062$ cal. pro Gramm Boden. Versetzte man den Boden mit 0,013 Gewichtsprozenten Chlorkalium, was ungefähr einer Düngung von 5 dz pro Hektar entsprechen würde, so sank die entsprechende Wärme auf $0,144 \pm 0,015$ cal. pro Gramm Boden. Durch diese Salzdüngung wurde also die Kohärenz der festen Teilchen auf ca. 13% ihrer ursprünglichen Größe herabgedrückt. Diese Erscheinung dürfte dadurch zu erklären sein, daß da, wo Wasser im Boden hingelangt, auch im Wasser gelöste Salze in den Boden eindringen können. Diese werden sich beim Trockenwerden des Bodens zwischen die festen Bodenteilchen einlagern, so daß nunmehr nicht eine Kohärenz der festen Bodenteilchen, sondern eine Adhärenz derselben an die Salzkristalle stattfindet, welche, da sich bei Wasserzufuhr die Salzkristalle lösen, die Kohärenz der festen Bodenteilchen notwendig verringern muß. Praktisch muß hierdurch die folgende Erscheinung eintreten: Die atmosphärischen Niederschläge werden die bei einem mit wasserlöslichen Salzen gedüngten Boden vorhandenen Klumpen und Krümel entsprechend schneller zerstören. Der Boden geht so infolge der Salzdüngung schneller in die Einzelkornstruktur über, welche die Erscheinung hervorruft, die der Praktiker mit „Festwerden“ oder „Verkrusten“ bezeichnet. Da die Verteilung der Salze zwischen den festen Bodenteilchen um so vollständiger vor sich gehen wird, je leichter sich ein Salz in Wasser löst, so wird nach einer Düngung mit solchen Salzen die „Verkrustung“ des Bodens am meisten in die Augen fallen (z. B. nach der Düngung mit Chilisalpeter). Da alle diese Salze ferner in gleicher Weise eine Verkrustung des Bodens bewirken können, so werden sich auch die Wasserverhältnisse des Bodens bei *jeder* derartigen Salzdüngung in *gleichartiger* Weise verändern,¹⁾ worauf wir später näher einzugehen haben.

Es ist mit dieser Erscheinung der Verkrustung und Lockerung des Bodens häufig die Flockenbildung des Tones in Zusammenhang gebracht Salzdüngung auf die physikalischen Bodeneigenschaften; Fühlings landw. Zeitung 51. Jahrg., 16. Heft.

¹⁾ E. Wollny, Unters. über den Einfluß der Salze auf die Bodenfeuchtigkeit; Mitteilungen vom landw. Versuchsfelde der technischen Hochschule in München IV.

worden, welche eintritt, wenn man einem Wasser, in welchem Tonteilchen suspendiert sind, eine Salzlösung zusetzt. Meines Erachtens spielt diese Erscheinung bei unserem Kulturboden gar keine Rolle, da bei diesem ganz andere Bedingungen vorliegen als bei dem besprochenen Versuche, wo sich die Bodenteilchen *unter* Wasser befinden. Da aber diese Erscheinung die Grundlage für die Neubildung unserer Flußmarschen bildet, insofern die von einem Fluß mitgerissenen und durch die Wasserbewegung suspendiert bleibenden Tonteilchen, sobald sie in das salzige Meerwasser gelangen, sich zusammenflocken und absetzen, so dürfte es doch wohl berechtigt sein, auf dieselbe hier näher einzugehen.

Eine Erklärung dieser Erscheinung der Flockenbildung dürfte die folgende sein:

Durch den Zusatz von Salzen zum Wasser wird die Oberflächenspannung der Flüssigkeit vergrößert. Die Flüssigkeit hat somit mehr das Bestreben, möglichst eine kleinere Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Volumen zu bilden, als vorher das Wasser, was zur Folge hat, daß die Adhäsion der Flüssigkeit zu den Tonteilchen geringer wird. Infolgedessen werden andererseits, falls die Oberflächenspannung der Flüssigkeit bis zu einer bestimmten Grenze gesteigert wird, die Kohäsionskräfte der Tonteilchen in Wirkung treten können, wodurch sich dieselben zusammenflocken und dann, da sie größer geworden sind, in der Flüssigkeit rasch absetzen.

Gemäß dieser Anschauung mußte die Oberflächenspannung der Lösung verschiedener Salze in den verschiedenen, jedesmal geringsten Konzentrationsstadien, in welchen soeben diese Flockung auftritt, überall bei ein und derselben Tonsubstanz dieselbe sein.

Adolf Mayer¹⁾ hat diese Konzentrationen für indische Erde, welche vorher mit Salzsäure extrahiert war, bei verschiedenen Lösungen festgestellt. Ich habe daran anschließend die Oberflächenspannung dieser Lösungen nach der Jägerschen Methode²⁾ (die des Wassers = 7,663 mg/mm gesetzt) bestimmt und kam dabei zu den folgenden Resultaten:

(Siehe die Tabelle auf Seite 150.)

Die vorstehenden Zahlen scheinen allerdings diese Theorie zu bestätigen; es dürfte aber trotzdem zu voreilig sein, aus diesen Resultaten zu folgern, daß man z. B. in diesen Messungen der Oberflächenspannung einen neuen Maßstab für die Kohäsionskräfte erhalten könnte, welche

¹⁾ Adolf Mayer, Über die Einwirkung von Salzlösungen auf die Absetzungsverhältnisse toniger Erden; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik, Bd. 2, S. 257—258.

²⁾ Vergl. W. Ostwald, Handbuch physiko-chemischer Messungen. Leipzig 1893, S. 202.

zwischen den festen Tonteilchen in Wirksamkeit treten.¹⁾ Die Grundlagen der Ausflockung sind hierzu leider noch viel zu wenig klargelegt.

Lösung:	Konzentration nach Ad. Mayer, bei welcher soeben die Flockung eintritt 0 0	Oberflächen- spannung bei ca. 15° C. in mg/mm
Ammoniak	2,5	8,47
Neutrales phosphorsaures Natron . .	2,0	8,57
Phosphorsäure (Hydrat)	0,8	8,54
Kalihydrat	0,56	8,54
Natriumsulfat	0,4	8,51
Schwefelsäure	0,025	8,47

So hat auch eine weitere Theorie, welche die Ausflockung des Tones als einen elektrischen Vorgang annimmt, keineswegs geringere Wahrscheinlichkeit für sich. Dieselbe ist die folgende:

Sind die schwebenden (Ton-) Teilchen nicht elektrisch geladen, so liegt die Lösung eines Nichtelektrolyten vor. Sind sie aber durch einen noch so geringfügigen Dissoziationsvorgang elektrisch geladen, so müssen entgegengesetzt geladene Ionen (kleinste elektrische Teilchen) die sammelnde Wirkung auf sie ausüben, die Billitzer²⁾ als Kondensationskernwirkung bezeichnet. Diese bewirken so eine Ausflockung, wenn die Anhäufung der (Ton-) Teilchen um ein Ion bei erfolgter elektrischer Neutralisation nicht so spärlich ist, daß der ganze Komplex noch unter der „kritischen“ GröÙe bleibt, bei welcher eine spontane Ausfällung erst statthaben kann, das heißt, wenn die Ladung der schwebenden Teilchen nicht zu groß, die Teilchen selbst nicht zu klein sind. Werden die Teilchen allzu klein, wird ihre Ladung eine allzu geringfügige, so gestalten sich die Bedingungen für eine Ausflockung um so ungünstiger, je größer die Zahl der Teilchen ist, die zur Erreichung der kritischen GröÙe oder zur Erzielung der elektrischen Neutralisation vereint werden muß.

Für diese Theorie spricht der Umstand, daß freie Alkalien und alkalisch reagierende Salze eine Ausflockung der Tonsubstanzen nach meinen Beobachtungen überhaupt nicht zu bewirken scheinen, während alle anderen Salze und insonderheit freie Säuren dies schon bei geringer

¹⁾ Vergl. § 12.

²⁾ Jean Billitzer. Eine Theorie der Kolloide und Suspensionen; Zeitschr. f. physikalische Chemie 1903. Bd. 45, S. 307—330. — Derselbe, Theorie der Kolloide: ebenda 1905, Bd. 51, S. 129—192, vergl. speziell S. 137.

Konzentration vermögen. Säuren und Basen aber müssen wir als elektrisch verschieden geladen betrachten.

Nach Untersuchungen von Krüger-Halle¹⁾ verliert ein Boden, welcher zuvor die Ausflockung zeigt, nach starker Salpeterdüngung, sobald auf demselben Pflanzen gewachsen sind, diese Ausflockungsfähigkeit. Der Grund hierfür ist die Bildung von kohlensaurem Natron unter der Einwirkung der Pflanze, welches ebenso wie ein freies Alkali der Ausflockung entgegenwirkt, was dem zuvor besprochenen Befunde entspricht.

In unseren Kulturböden kann, wie gesagt, dieser Ausflockungsprozefs durch die Salzdüngung nicht hervorgerufen werden. Einmal nämlich befindet sich der Kulturboden schon vor der Salzdüngung in Krümelstruktur. Wäre dies aber nicht der Fall, so würde zweitens aber auch dann die Salzlösung wohl nie eine Krümelstruktur herbeiführen können, weil die einzelnen festen Bodenteilchen nicht so gegeneinander verschiebbar sind, wie dies bei einem unter Wasser befindlichen Boden der Fall ist, in welchem diese Teilchen suspendiert sind.

Ob ein Boden, wenn er in einer Salzlösung ausgeflockt ist und dann trocken wird, festere Krümel bildet, als wenn derselbe nicht ausgeflockt wurde, bedarf auch erst noch einer weiteren Untersuchung. — Die Beobachtungen der Praktiker in diesen Punkten widersprechen sich häufig, so dafs es den Anschein gewinnt, als ob ein und dasselbe Düngesalz auf verschiedene Bodenarten einen verschiedenen Einfluss ausüben kann.

Im allgemeinen sollen Alkalikarbonate so stark verkrustend wirken, dafs trotz aller Bearbeitung die Schollen des Bodens nicht in Krümelstruktur übergeführt werden können. Andere Salze machen den Boden lockerer, aber nur so lange, wie sie nicht ausgewaschen werden, dann geht der Boden leicht in die für den Pflanzenwuchs schädliche Einzelkornstruktur über. Es tritt ein Dichtschrämen des Bodens ein, „der Boden wird abgebunden“. Dies tritt besonders bei gröfseren Mengen salzsaurer, salpetersaurer und auch schwefelsaurer Salzlösungen im Boden ein, so bei Salzwasserüberschwemmungen, bei besonders starker Salpeterdüngung u. a. m., und zwar vornehmlich auf strengem Tonboden.²⁾

Dafs bei diesen Erscheinungen auch chemische Vorgänge mitsprechen können, ist keineswegs ausgeschlossen.

Unlösliche und schwer wasserlösliche Salze führen eine gröfsere Lockerung des Bodens herbei, so die Kalksalze und u. a. das Tomasmehl

¹⁾ Krüger-Halle, Vortrag a. d. Naturforscher-Versammlung in Breslau 1904.

²⁾ Vergl. Ulrich, Über den Einfluss der in künstlichen Düngemitteln enthaltenen Mineralsalze auf den mechanischen Zustand des Bodens; *Illustr. landw. Zeitung* XVII. Jahrg., No. 49, und die gegenteilige Beobachtung von A. J. Swaving, Die schädlichen Wirkungen des Meerwassers auf den Ackerboden; *Landw. Versuchs-Stationen* Bd. LI, 1899, S. 463.

(wegen seines Kalkgehaltes). Diese Salze verteilen sich nicht so gleichmäßig im Boden; wir müssen die Verteilung daher möglichst selbst besorgen. Bei der Bodenbearbeitung werden sie so auch zwischen die feinen Bodenteilchen gelangen und mit diesen Krümel bilden. Ist der Boden nun sonst sehr feinkörnig, so werden auch hier die größeren Kalksalze¹⁾ die Kohäsion der Bodenkrümel verringern, und die Bodenkrümel werden so leichter zerfallen. Da aber die Kalksalze sich nicht überall zwischen die feinen Bodenteilchen gleichmäßig einlagern können, so werden die Bodenkrümel nur an den Stellen leichter bersten, wo sich gerade Kalksalze eingelagert haben, was zur Folge hat, daß größere Bodenklumpen wohl leichter in kleinere zerfallen, als wenn der Boden nicht so gedüngt wurde, daß diese aber als solche erhalten bleiben. Das ist die Erscheinung, welche in der Praxis unter „Lockerung des strengen Bodens durch eine Kalkdüngung“ allgemein bekannt ist. Die Düngung mit unlöslichen oder schwerlöslichen Salzen wirkt somit günstig auf die Bodenstruktur ein.

In ähnlicher Weise wie die Kalksalze vermag auch der organische Dünger: Blutmehl, Hornspäne, Knochenmehl, Gründünger und Stalldünger zur Lockerung des Bodens beizutragen. Der hauptsächlichste Einfluß dieser Düngemittel auf den Boden in physikalischer Hinsicht beruht aber in ihrem Gehalt an vergärungsfähigen Materialien und an der hierdurch bedingten Förderung der Bodengare.

¹⁾ Vergl. § 24, S. 129.

Kapitel III.

Das Bodenwasser und sein Verhalten zu den festen Bodenteilchen.

Der zweite Hauptbestandteil unseres kulturfähigen Bodens ist das Bodenwasser. Dieses dürfte wohl nie chemisch reines Wasser sein, sondern wird stets in verschiedenen Mengen die verschiedensten Salze gelöst enthalten. Die Konzentration dieser Salzlösung ist aber so außerordentlich gering, daß wir bei der Betrachtung der physikalischen Erscheinungen, welche sich zwischen dem Bodenwasser und den festen Bodenteilchen abspielen, im allgemeinen von dem Gehalt des Bodenwassers an Salzen absehen können.

Das Bodenwasser kann das Volumen des Bodens anfüllen, welches ihm durch die Lagerung der festen Bodenteilchen angewiesen ist: das Hohlraumvolumen des Bodens. In diesem wird es durch zweierlei Kräfte festgehalten, nämlich einmal durch die Adhäsionskraft, welche die festen Teilchen auf das Wasser ausüben, und zweitens durch die Oberflächenspannung des Wassers. Die erste Kraft äußert sich in den Benetzungserscheinungen, die letztere in den Kapillaritätserscheinungen.

§ 29. Die Benetzungserscheinungen.

Die trockenen, festen Bodenteilchen üben, wie wir dies (§ 11) sahen, eine Anziehung auf die Wassermoleküle aus, welche größer ist als die Kohäsionskraft, mit welcher die einzelnen Wassermoleküle zusammengehalten werden, und zwar verhalten sich diese beiden Kräfte nach Untersuchungen, die Rodewald¹⁾ für Weizenstärke und Wasser angestellt hat, wie 9,972 : 7,923. Hierdurch vermögen die festen Teilchen zunächst Wasserdampf aus der Atmosphäre an ihrer Oberfläche zu verdichten. Da aber der Radius der Wirkungssphäre dieser Molekularkräfte, wie erwähnt, sehr gering ist, so werden die festen Bodenteilchen diese anziehende Wirkung auf die Wassermoleküle nur so lange ausüben können, bis ihre Oberfläche mit einer Molekülschicht Wasser bedeckt ist, d. h. bis sie mit Wasser „benetzt“ sind. Die Wassermenge, welche der Boden so im Höchsthalle aufzunehmen vermag, beziehen wir auf die angewandte trockene Boden-

¹⁾ l. c. Zeitschrift f. physik. Chemie Bd. XXXIII. S. 599.

menge und bezeichnen sie als „Hygroskopizität“. Hat der Boden sich mit hygroskopischem Wasser bedeckt, so wird jedes weitere Wassermolekül sich nicht mehr an die Oberfläche der festen Bodenteilchen anlagern können, vielmehr muß eine Anlagerung derselben an die erste die festen Bodenteilchen bedeckende Wassermolekülschicht eintreten. Die Kraft, mit welcher die weiteren Wassermoleküle von dem hygroskopisch gebundenen Wasser angezogen werden, dürfte schon angenähert gleich der Kohäsionskraft des Wassers sein. Die Gestalt, die Größe und die Aneinanderlagerung der festen Bodenteilchen bestimmen somit dann nur die Gestalt, welche das Bodenwasser im Boden einnehmen muß, durch welche, wie wir später sehen werden, die Mannigfaltigkeit der Kapillaritätserscheinungen bedingt wird. Die „Hygroskopizität“ bildet somit die Grenze zwischen den Benetzungs- und den Kapillaritätserscheinungen im Boden, insofern die Kapillaritätserscheinungen einsetzen und die Benetzung der festen Bodenteilchen aufhört, sobald die Bodenoberfläche mit hygroskopischem Wasser vollständig bedeckt ist. Ich habe in § 11 zwei Wege angegeben, nach denen man diese Grenze, „die Hygroskopizität“ des Bodens feststellen kann. Sie diene uns damals direkt als Maßstab für die Bodenoberfläche.

Früher verstand man unter „Hygroskopizität“ die Fähigkeit des Bodens, Wasserdampf aus der Atmosphäre zu absorbieren. Der erste, welcher hierüber umfangreichere Versuche angestellt hat, ist Schübler.¹⁾ Er brachte hierzu völlig getrockneten Boden in eine ganz mit Wasserdampf gesättigte Atmosphäre. Am einfachsten verfährt man hierbei derart, daß man dem Boden in einer flachen Glasschale eine möglichst große Oberfläche gibt und sodann diese Schale auf einem Glasdreifuß über einer anderen großen Schale, welche teilweise mit Wasser angefüllt ist, aufstellt. Über die erste Schale wird darauf eine Glasglocke gestülpt, welche in das Wasser der unteren Schale eintaucht und so ein mit Wasserdampf gesättigtes Volumen, in welchem sich der Boden befindet, abschließt. Durch wiederholtes Wägen der mit dem Boden beschickten Schale wird sodann die Wasseraufnahmefähigkeit oder die „Hygroskopizität“ des Bodens festgestellt.

Schübler stellte so u. a. die folgenden Hygroskopizitäten fest:

	Wasseraufnahme in Gewichtsprozenten des trockenen Bodens nach			
	12 Stunden	24 Stunden	48 Stunden	72 Stunden
Quarzsand	0,0	0,0	0,0	0,0
Kalksand	0,2	0,3	0,3	0,3
Grauer reiner Ton	3,7	4,2	4,8	4,9
Humus	8,0	9,7	11,0	12,0
Gartenerde	3,5	4,5	5,0	5,2
Ackererde	1,6	2,2	2,3	2,3

¹⁾ G. Schübler, Grunds. d. Agr.-Chemie 2. Bd., S. 80—81.

Trommer¹⁾ fand ferner nach der gleichen Methode u. a.:

	Wasseraufnahme in Gewichtprozenten des trockenen Bodens nach			
	12 Stunden	24 Stunden	48 Stunden	72 Stunden
Kohlensaure Kalkerde	0,2	0,2	0,25	0,25
Humussäure (aus Torf mittelst kohlensauren Natrons darge- stellt)	7,5	9,0	10,8	12,8
Geraspelttes Gerstenstroh	15,0	24,0	34,5	45,0
„ Roggenstroh	12,0	20,3	27,3	29,0

Umfassendere Versuche über die Hygroskopizität des Bodens sind von Knop²⁾ angestellt worden. Derselbe fand hierbei auch zuerst, daß die Hygroskopizität eine Temperaturfunktion ist, insofern der Boden um so weniger Wasser hygroskopisch zu binden vermag, je höher die Temperatur ist. Um die Gesetzmäßigkeit in eine Formel einzukleiden, führt Knop eine Umrechnung der Reaumur-Temperaturskala ein. In der Annahme, daß alle Substanzen bei 80° R. trocken werden — eine Annahme, die, wie wir früher sahen, falsch ist —, setzt er für $t = 80^{\circ} \text{R.}$, $T = 0^{\circ} \text{R.}$ Eine Temperatur von t° entspricht dann der folgenden Temperatur T° :

t°	T°	t°	T°
+ 10° = 70°		0° = 80°	
+ 15° = 65°		— 5° = 85°	
+ 20° = 60°		— 10° = 90°	
0° = 80°		— 20° = 100°	

Bezeichnet man ferner mit p die bei den verschiedenen T -Graden von einer Substanz aufgenommenen Wassermengen, ferner mit K die Kondensation, resp. mit K^2 das Kondensationsvermögen, so besteht nach Knop die Formel:

$$p = K^2 T^2$$

oder

$$K = \frac{\sqrt{p}}{T}$$

Knop hätte zweckmäßiger die alte Temperaturskala beibehalten und $T^{\circ} = (x - t)^{\circ}$ ansetzen müssen; es wäre dann x die Temperatur, bei welcher der Boden das letzte hygroskopische Wasser abgibt. Führt er jetzt zwei Beobachtungen bei verschiedener Temperatur mit dem gleichen Material aus, so vermochte er aus der Gleichung:

$$K = \frac{\sqrt{p}}{x - t^{\circ} \text{R.}}$$

K und auch x zu berechnen.

¹⁾ C. Trommer, Die Bodenkunde. Berlin 1857, S. 269—270.

²⁾ W. Knop, Lehrbuch d. Agrik.-Chemie 2. Bd. Der Kreislauf des Stoffs. Leipzig 1868, S. 14 u. f.

Die Gleichung, zu welcher Knop aber auch so gelangte, ist nur angenähert richtig, und zwar das auch nur innerhalb der engen Temperaturintervalle, innerhalb deren Knop beobachtete. Die Temperaturkurve ist keine Parabel, wie dies nach der Knopschen Gleichung zu sein scheint, wengleich sich kleine Strecken natürlich durch eine Parabel interpolieren lassen.¹⁾

Der Fehler, welcher diesen und anderen²⁾ Untersuchungen anhaftet, liegt darin, daß, wenn die Luft sich vollauf mit Wasserdampf sättigt, außer dem hygroskopisch gebundenen Wasser noch weiteres Wasser vom Boden aufgenommen wird. Dies findet durch das schon bei geringen Temperaturschwankungen eintretende Überdestillieren von Wasser statt.

Will man sich den Vorgang experimentell veranschaulichen, so braucht man nur etwas Wasser in ein Gefäß einzuschließen und dann dies an einer Seite etwas zu erwärmen. Als bald wird sich an der entgegengesetzten kalten Seite des Gefäßes Wasser kondensieren. Der Vorgang läßt sich noch durch Evakuieren des Gefäßes wesentlich beschleunigen. Die so überdestillierte Wassermenge ist, wie das Beispiel zeigt, ganz unabhängig vom Boden. Sie wird von den Hohlräumen des Bodens aufgenommen, ohne von dem Boden hygroskopisch festgehalten zu werden, und veranlaßt daher grobe Fehler bei den Hygroskopizitätsbestimmungen. — Man kann, wie wir früher (§ 11) sahen, diese Fehlerquellen vermeiden durch Herabsetzung der Dampfspannung des Wassers, indem man statt reinen Wassers eine verdünnte Schwefelsäure, und zwar von einem Gehalt von 10⁰/₀ H₂SO₄ benutzt.

Der Gehalt des Bodens an hygroskopischem Wasser richtet sich nach der relativen Feuchtigkeit der den Boden umgebenden Luft.³⁾ Stellt man so z. B. den Boden über reine konzentrierte Schwefelsäure, deren Dampfspannung nahezu null ist, so wird auch die Dampfspannung des Wasserdampfes im Boden nahezu null, d. h. der Boden wird trocken. Stellt man ihn sodann über Wasser, so nimmt er allmählich die Dampfspannung des Wassers an. Der Dampfspannungsausgleich findet, wenn große Differenzen vorliegen, anfangs sehr rasch statt, verläuft aber schließlich mit der Zeit asymptotisch. Hierfür einige Beispiele:⁴⁾

¹⁾ Vergl. H. Rodewald, Theorie der Hygroskopizität; Landw. Jahrb. 1902, S. 692.

²⁾ Z. B. E. W. Hilgard, Über die Bedeutung der hygroskopischen Bodenfeuchtigkeit für die Vegetation; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 8, S. 99.

³⁾ J. S. Sikorski, Untersuchungen über die durch die Hygroskopizität der Bodenarten bewirkte Wasserzufuhr; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 9, S. 419.

⁴⁾ A. R. v. Schwarz, Vergleichende Versuche über die physikalischen Eigenschaften verschiedener Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik, Bd. 2, S. 167.

Nach Tagen:	100 g vollkommen getrockneter			
	Moorboden	Sandboden	Lehmboden	Tonboden
	nahmen Wassergas auf in g:			
1	7,7	0,4	1,6	3,2
3	12,2	0,7	2,1	4,9
5	13,9	0,9	2,4	5,5
7	15,2	1,0	2,6	6,1
10	16,7	1,2	2,7	6,7
20	18,5	1,4	3,1	7,6
30	19,5	1,4	3,3	8,3
40	20,1	1,4	3,6	8,7
50	20,5	1,4	3,7	9,1
60	21,0	1,4	3,7	9,2
70	21,6	1,4	3,7	9,2

Der Ausgleich der Dampfspannung findet natürlich um so schneller statt, je mehr Luft und Boden gegenseitig in Berührung kommen, d. h. je besser die Luftzirkulation im Boden ist. Da diese unter sonst gleichen Umständen im gelockerten Boden gröfser ist als im festen Boden, so wird sich im ersteren der Dampfspannungsausgleich schneller vollziehen müssen. Dies hat Hellriegel¹⁾ noch durch längere Versuchsreihen bestätigt gefunden. Natürlich wird der Dampfspannungsausgleich auch um so langsamer stattfinden, je höher die Schicht des Bodens in der Glasschale ist. So fand Sikorski (l. c.), dafs lufttrockener Boden, welcher 24 Stunden in einem mit Wasserdampf gesättigten Raum gestanden hatte, bis zu den angegebenen Tiefen folgende Wassermengen in Millimeter Wasserhöhe aufnahm:

Höhe der Bodenschicht cm	Torf	Quarzsand 0,1 bis 0,071 mm	Lehmpulver < 0,25 mm	Lehmkrümel			
				0,5—1,0 mm	1—2 mm	2—4 mm	4—6,75 mm
0,5	0,061	0,002	0,072	0,055	0,071	0,080	0,084
1,5	0,159	0,017	0,184	0,144	0,184	0,166	0,183
3,0	0,185	0,029	0,188	0,169	0,227	0,191	0,197
4,5	0,195	0,037	0,215	0,175	0,223	0,198	0,213
6,0	0,195	0,039	0,207	0,162	0,228	0,201	0,217
Versuchstemperatur ° C.:	13,8	18,1	16,9	16,7	19,1	19,0	18,0

¹⁾ H. Hellriegel. Beiträge zu den naturw. Grundlagen des Ackerbaues. Braunschweig 1883, S. 713—717.

Sikorski schließt aus diesen Zahlen, daß höchstens eine Bodenschicht von 6 cm für die hygroskopische Bindung von Wasserdampf aus der Luft in Betracht kommen kann. Hätte er seine Versuche länger fortgesetzt, so würde er auch noch eine Wasseraufnahme bei den tieferen Bodenschichten gefunden haben. Praktisch haben diese Versuche keine wesentliche Bedeutung, denn bei jedem einigermaßen ausgiebigen Regen vermag sich die gesamte Bodenoberfläche bis in große Tiefen mit hygroskopischem Wasser vollauf zu bedecken.

Da der vollständige Dampfspannungsausgleich jedoch schon nach dem Schüblerschen Verfahren, bei welchem der Boden in ziemlich dünner Schicht ausgebreitet wird, ziemlich lange Zeit erfordert, so war es natürlich, daß man hier nach exakten, schnelleren Methoden suchte. Es könnten hier analog den beiden Trocknungsverfahren zwei Methoden in Betracht kommen. Die erste ist die, welche meinem Trocknungsverfahren entspricht. Es ist eine der Schüblerschen Methode analoge Versuchsanordnung, nur mit der Abänderung, daß der Raum, in welchem der Dampfspannungsausgleich stattfinden soll, luftleer gemacht wird, wodurch eine leichtere Wassergaszirkulation stattfindet. Die andere ist die dem Arntzschenschen Trockenverfahren entsprechende, welche von Ammon¹⁾ zuerst vorgeschlagen worden ist. Sie basiert darauf, daß man durch den in eine Röhre eingeschlossenen Boden langsam mit Wasserdampf gesättigte Luft durchleitet. Mit dem letzteren Verfahren hat nächst Ammon auch v. Dobeneck²⁾ eine Reihe von resultatlosen Versuchen angestellt, welche die Veränderung der Hygroskopizität mit der Temperatur zeigen sollten. Doch erst Schlösing³⁾ sollte der Nachweis gelingen, daß auch diese Art der Hygroskopizitätsbestimmung keineswegs unabhängig von der Temperatur ist.

Wäre das nämlich der Fall — so schloß Schlösing —, so müßte das Verhältnis zwischen der Spannkraft des Dampfes in der Erde (f) bei einer Temperatur t zu der maximalen Tension des Wasserdampfes in der Luft F bei der gleichen Temperatur t stets das gleiche sein:

$$\frac{f}{F} = c,$$

ganz unabhängig von der absoluten Höhe von t . — Schlösing fand nun, daß dies Verhältnis mit der Temperatur langsam stieg, daß also f ein wenig schneller wuchs als F .

¹⁾ G. Ammon, Unters. über das Kondensationsvermögen der Bodenkonstituenten für Gase; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 2, S. 1 u. f.

²⁾ A. Frh. v. Dobeneck, Unters. über das Absorptionsvermögen und die Hygroskopizität der Bodenkonstituenten; ebenda Bd. 15, S. 163 u. f.

³⁾ Th. Schlösing, Influence de la température sur l'hygroscoïcité de la terre végétale; Comtes rendus T. XCIX, pag. 215—219.

Hier die Belege:

100 g Boden enthielten	Temperatur t° C.	$\frac{f}{F}$	100 g Boden enthielten	Temperatur t° C.	$\frac{f}{F}$	100 g Boden enthielten	Temperatur t° C.	$\frac{f}{F}$		
0,82 g Wasser	9,14	0,180	1,53 g Wasser	29,47	0,446	2,83 g Wasser	19,15	0,846		
	14,15	0,185		34,30	0,464		24,25	0,844		
	19,25	0,188		2,14 g Wasser	9,20		0,656	29,19	0,851	
	24,25	0,203			14,17		0,662	34,09	0,858	
	29,18	0,209			19,15		0,663	4,64 g Wasser	9,17	0,960
	34,28	0,225			24,33		0,660		14,25	0,954
1,53 g Wasser	12,65	0,400	2,83 g Wasser	29,23	0,681	19,15	0,957			
	16,69	0,409		34,22	0,691	24,25	0,962			
	21,05	0,418		9,05	0,830	29,17	0,966			
	24,53	0,435		14,15	0,845	34,15	0,970			

Temperaturschwankungen müssen hiernach bei den Versuchen, welche nach dieser Methode ausgeführt werden, Fehler von ungefähr 0,02—0,07 % pro Grad Celsius verursachen.

Wenngleich dieser hierdurch verursachte Fehler gering ist, so kann derselbe noch nach der anderen von Rodewald und dem Verfasser¹⁾ vorgeschlagenen Methode so gut wie ganz beseitigt werden. Hier wurde die Hygroskopizität des Bodens bei konstantem Volumen, in welchem sich der Dampfspannungsausgleich vollzog, bestimmt (vergl. § 11). Bei konstantem Volumen verändert sich aber nach den theoretischen Untersuchungen von Rodewald²⁾ die hygroskopische Wassermenge selbst bei großen Temperaturschwankungen fast gar nicht. So betrug diese Veränderung bei der sehr hygroskopischen Stärke für einen Grad Celsius weniger als zwei Hundertmillionstel der zu messenden Größe.

Doch hierin liegt nicht der Vorteil unseres Verfahrens. Eine so große Genauigkeit ist in der Tat überflüssig, und die Ammonsche Methode wäre deshalb unserer Methode ganz gleichwertig, wenn nicht bei ersterer selbst bei Vorlage einer zehnpromzentigen Schwefelsäure grobe Fehler durch wohl kaum zu vermeidende Kondensationsvorgänge zu befürchten wären.

¹⁾ H. Rodewald und A. Mitscherlich, Die Bestimmung der Hygroskopizität; Landw. Versuchs-Stationen 1903, S. 433 u. f.

²⁾ H. Rodewald, Theorie der Hygroskopizität; Landw. Jahrbücher 1902, S. 692—695.

Nächst den direkten Wägungen der hygroskopisch aufgenommenen Wassermengen kann man endlich die Hygroskopizität auch dadurch feststellen, daß man die Wärmemengen mißt, welche bei der Aufnahme des hygroskopischen Wassers durch die festen Bodenteilchen entbunden werden. Es ist dies die Benetzungswärme des Bodens, auf welche bereits Schübler¹⁾ in seinem klassischen Werke aufmerksam macht. Die vollständige Benetzungswärme, welche der ganzen Hygroskopizität entspricht, erhält man, wenn man ganz trockenen Boden mit *flüssigem* Wasser übergießt. Die Benetzungswärme läßt sich nur exakt mittelst des Bunsenschen Eis-kalorimeters messen. Die Methode wurde vom Verfasser zuerst auf Boden-untersuchungen angewendet und ist in § 11 bereits eingehend beschrieben worden.²⁾

Vordem versuchte Stellwaag³⁾ die Benetzungswärme des Bodens festzustellen, indem er die Temperaturerhöhung feststellte, welche eintrat, wenn trockener Boden mit Wasser benetzt wurde. Da der betreffende Beobachter aber seine Untersuchungen in einem Wasserkalorimeter ausführte und so die spezifischen Wärmen des Bodens, der angewandten Wassermengen etc. nicht mit berücksichtigte, so haben diese Versuche meines Erachtens keinen wissenschaftlichen Wert.

Babo⁴⁾ endlich beobachtete die Temperaturerhöhung, welche beim Boden eintrat, wenn er denselben in trockenem Zustande in eine mit Wasserdampf gesättigte Atmosphäre brachte. Er fand so, daß bei humusreichen Bodenarten die Temperatur von 20° C. auf 31° C., bei humusarmen von 20° C. auf 27° C. stieg. Auch dieser Forscher berücksichtigte nicht die

¹⁾ G. Schübler, l. c. Bd. II, S. 92.

²⁾ Die Methode, die Benetzungswärme mittelst Thermoelementen zu bestimmen, ist nicht so genau wie die eiskalorimetrische.*) Sie hat u. a. zu der falschen Schlußfolgerung geführt, daß die Benetzungswärme des Sandes bei null Grad negativ sein soll,**) was nach meinen mit äußerster Aufmerksamkeit ausgeführten Versuchen nach der eiskalorimetrischen Methode nur innerhalb der sehr geringen Fehlergrenzen*) der Fall sein kann.†)

³⁾ A. Stellwaag, Unters. über die Temperaturerhöhung verschiedener Bodenkonstituenten und Bodenarten bei Kondensation von flüssigem und dampfförmigem Wasser . . . ; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 5, S. 210 u. f.

⁴⁾ Vergl. G. J. Mulder, Die Chemie der Ackerkrume. Berlin 1863, Bd. 3, S. 366.

*) Vergl. H. Rodewald, Unters. über die Quellung der Stärke. Kiel und Leipzig 1896, S. 61, und Alfred Mitscherlich, l. c. Landw. Jahrbücher 1902, S. 593.

**) G. Schwalbe, Über die beim Benetzen pulverförmiger Körper, insbesondere von Sand mit Wasser auftretende Wärmetönung, sowie Untersuchungen über das Verhalten von Wasser unter 4° bei diesem Vorgange; Ann. d. Physik, 4. Folge, Bd. 16, 1905, S. 33 u. f.

†) Alfred Mitscherlich, l. c. Journal für Landwirtschaft 1898, S. 262; ferner l. c. Landwirtschaftliche Jahrbücher 1901, S. 422.

spezifische Wärme des Bodens. Es ist zu diesen Resultaten aber ferner noch zu bemerken, daß diese außerordentlich große Temperaturerhöhung, welche v. Babo im Boden feststellte, nur zum kleinsten Teil auf die Benetzungswärme zurückzuführen ist; sie wird vornehmlich durch die infolge der Kondensation des Wasserdampfes frei werdende Wärme bedingt.

Wie in § 11 ausgeführt wurde, ist die Hygroskopizität eine der Bodenoberfläche proportionale Größe. v. Dobeneck¹⁾ wollte dies an Quarzsand von verschiedenen Korngrößen nachweisen. Doch ist ihm der Nachweis nicht gelungen, weil einmal die Siebmethode, nach welcher er die Kornsortimente feststellte, die Teilchen nicht lediglich nach der Korngröße sondert, wie wir dies in § 10 sahen, und weil ferner gerade bei groben Bodenbestandteilen, welche eine geringe Hygroskopizität besitzen, schon geringe durch Temperaturschwankungen verursachte Wasserbeschläge am Boden grobe Fehler herbeiführen.

Resultate von nach der exakten Methode ausgeführten Hygroskopizitätsbestimmungen wurden bereits auf S. 71 angeführt, worauf hier verwiesen werden mag. Sie sind im Verhältnis zu den nach der Schüblerschen Methode gefundenen Resultaten etwas niedriger, da die Kondensation von nichthygroskopischem Wasser durch die Methode nach Möglichkeit vermieden wird.

§ 30. Der Wert des hygroskopisch gebundenen Bodenwassers für die Vegetation.

Über den Wert der Hygroskopizitätsbestimmung beim Boden herrscht viel Unklarheit.

Davy, welcher zuerst der Hygroskopizität eine Bedeutung zuschreibt, sagt:

Das Vermögen des Erdreichs, Wasser aus der Luft zu verdichten, hängt innig mit der Fruchtbarkeit zusammen. Ist dies Vermögen groß, so werden die Pflanzen in trockenen Jahren mit Wasser versorgt.

Diese Anschauung wurde Jahrzehnte lang festgehalten, wofür in Sonderheit auch der Umstand gesprochen haben mag, daß sich auch ein Mann wie Liebig²⁾ zu ihr bekannte. Dieser sagte:

Wo im heißen Sommer die Oberfläche des Bodens austrocknet, ohne daß ein Ersatz aus tieferen Erdschichten durch kapillare Anziehung statthat, dort liefert die mächtige Anziehung des Bodens zu dem gasförmigen Wasser in der Luft die Mittel zur Erhaltung der Vegetation.

¹⁾ l. c. Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 15, S. 197—199.

²⁾ F. Haberlandt, Der allgemeine landwirtschaftliche Pflanzenbau. Wien 1879. S. 431.

Sachs¹⁾ war der erste, der hierüber experimentell Versuche anstellte. Diese wurden in folgender Weise ausgeführt: Eine im Topf kultivierte Pflanze wurde eine Zeitlang nicht mehr begossen, so daß sie anfang zu welken. Sodann wurde der Topf über einer größeren Schale mit Wasser aufgestellt und derart mit einer tubulierten Glasglocke überdeckt, daß der obere Teil der Pflanze zum Tubus herausragte und hier somit nach außen Wasser verdunsten konnte. Es zeigte sich, daß die Blätter wieder turgeszent wurden, und daß die Pflanze nur durch das gasförmig auf den Boden übergehende Wasser monatelang am Leben erhalten wurde, ohne jedoch irgend welche neuen Organe bilden zu können. — Wie wir vorher sahen, treten bei dieser Versuchsanordnung, welche der Schüblerschen entspricht, neben der Oberflächenattraktion des Bodens für Wasserdampf auch Wasserdampfkondensationen am Boden sowie an den in der Glocke befindlichen Pflanzenteilen ein, wodurch der Pflanze dies notdürftige Wasser, welches der geringen Verdunstung einer verhältnismäßig kleinen Blattoberfläche entsprach, zugeführt werden kann. Ein Beweis dafür, daß die Pflanze von hygroskopisch gebundenem Wasser lebte, wurde durch diesen Versuch noch nicht erbracht.

Erst zehn Jahre später wurde diese Frage von zwei Forschern: Ad. Mayer²⁾ und R. Heinrich³⁾ von neuem bearbeitet. Beide stellten die Wassermenge fest, welche der Boden noch enthielt in dem Augenblick, wo die Pflanzen welkten. Dieses Welkwerden der Pflanze ist aber, wie Ad. Mayer⁴⁾ richtig sagt, noch keineswegs auf den Mangel an Wasserzufuhr zurückzuführen. Man kann dasselbe schon erreichen, wenn man die Verdunstung anormal steigert, insofern dann die Wasseraufnahme durch die Pflanzenwurzel und die Wasserleitung in der Pflanze nicht mit der Verdunstung gleichen Schritt zu halten vermag. Es mußte demnach bei diesen Versuchen die Wasserverdunstung von Boden und Pflanze, wenn die letztere nahe am Welkwerden war, möglichst stark eingeschränkt werden. Die Versuche beider Forscher gaben übereinstimmend das Resultat, daß die Pflanze schon anfängt zu welken, wenn der Boden noch mehr als die hygroskopisch gebundene Wassermenge zurückhält. Ein bestimmter Wassergehalt des Bodens oder auch eine der Hygroskopizität proportionale Wassermenge wurde aus später klarzulegenden Gründen nicht gefunden.

¹⁾ Sachs, Handbuch der Experimental-Physiologie der Pflanze. Leipzig 1865, S. 174.

²⁾ Ad. Mayer, Studien über die Wasserverdichtung in der Ackererde; Biedermanns Zentralblatt Bd. XI, S. 243.

³⁾ R. Heinrich, Die Absorptionsfähigkeit der Bodenarten für Wasserdampf und deren Bedeutung für die Pflanzen; ebenda Bd. XII, 1877, S. 16.

⁴⁾ Ad. Mayer, Lehrbuch der Agrikultur-Chemie, 2. Aufl. Heidelberg 1876, Bd. II, S. 134.

Auch der Verfasser¹⁾ hat diese Frage nochmals einer experimentellen Prüfung unterzogen, und zwar einmal, weil die nach der Schüblerschen Methode gefundenen Resultate der Hygroskopizitätsbestimmung zu hoch waren, und ferner, um nach Möglichkeit nicht nur den Wassergehalt des Bodens festzustellen in dem Zeitpunkte, wo die Pflanzen anfangen zu welken, sondern auch in dem Augenblicke, wo die Pflanzen gerade abstarben, d. h. so sehr durch die Trockenheit des Bodens gelitten hatten, daß sie sich auch nachher bei starkem Begießen des Bodens mit Wasser nicht mehr erholen konnten. Diese Grenze war leidlich genau zu erhalten. Es zeigte sich, daß hier der Wassergehalt der Bodenarten innerhalb der großen Fehler dieser Versuche um die entsprechende Menge des von diesen Bodenarten hygroskopisch gebundenen Wassers schwankte.

(Siehe die Tabelle auf Seite 164.)

Es ergab sich aus diesen Versuchen, daß die Pflanzen anfangen zu welken, wenn der Boden noch ungefähr die dreifache Menge des hygroskopisch gebundenen Wassers besaß, daß sie aber abstarben, sobald der Boden nur noch die hygroskopisch gebundene Wassermenge enthielt. Die Beobachtungen, welche bei Pflanzen „kurz vor dem Absterben“ derselben gemacht wurden, waren einschränkende Vorversuche. Die Pflanzen welkten hier infolge der Trockenheit so stark, daß man annehmen mußte, daß sie auch bei neuer starker Wasserzufuhr absterben würden; jedoch vermochten sie sich in diesen Fällen wieder zu erholen und, wenn auch infolge der Wachstumsstörung sehr kümmerlich, weiter zu wachsen.

In einigen Fällen enthielt der Boden nicht mehr ganz die hygroskopisch gebundene Wassermenge. Das könnte darauf zurückzuführen sein, daß der Boden zu stark Wasser verdunstete; doch ist dies deshalb nicht anzunehmen, weil die verdunstende Erdoberfläche zum Bodenvolumen in diesen Fällen sehr gering war: die Bodensäule, welche zur Untersuchung ihres Wassergehaltes herangezogen wurde, wurde nicht oben weggenommen, sondern senkrecht aus dem Gefäß der ganzen Länge nach herausgestochen. Es blieb also, wenn wir die ganze Größe nicht als Versuchsfehler, die hier sicher sehr bedeutend sind, auffassen wollen, nur noch die Möglichkeit übrig, daß die Pflanze doch noch etwas hygroskopisches Wasser aufnehmen vermochte.

Betrachtet man die Frage vom rein physikalischen Gesichtspunkte aus, so ist es eine bekannte Tatsache, daß sich die Spannung des Wasserdampfes benachbarter Körper auszugleichen sucht. Dies findet nun nicht nur zwischen den festen Bodenteilchen und der Luft, sondern auch zwischen diesen und der Pflanze statt. Ist dies so weit geschehen, daß der Boden

¹⁾ A. Mitscherlich, l. c. Landw. Jahrbücher 1901. S. 410.

Bodenart:		Wassergehalt in Prozenten des trockenen Bodens:						Bemerkungen.		
		Moorboden	Humoser Sandboden	Sandboden	Lehmiger Sandboden	Sandiger Lehmboden	Strenger Tonboden			
		Hygroskopizität ¹⁾								
		18,88	2,01	1,05	1,54	2,37	23,81			
I. Hafer	1.	64,99	6,58	4,11	4,67	5,70	—	fing an zu welken.		
	2.	a	25,84	2,54	1,32	1,98	2,61	—	kurz vor dem Absterben.	
		b	26,19	2,48	1,41	2,21	2,80	—		
		Mittel	26,02	2,51	1,37	2,10	2,71	—		
	3.	a	25,1	2,10	0,94	—	2,37	—	beim Absterben.	
		b	22,0	2,21	0,91	—	2,34	—		
		Mittel	23,6	2,16	0,93	—	2,36	—		
	II a. Rotklee . .	3.	a	20,2	3,32	1,23	1,52	2,98	17,3	beim Absterben.
			b	19,5	2,40	1,01	1,60	3,16	19,1	
c			19,7	—	—	1,67	—	—		
d		18,3	—	—	1,54	—	—			
Mittel		19,4	2,86	1,12	1,58	3,07	18,2			
II b. Weifsklee .	3.	a	18,0	1,87	1,13	—	—	—	beim Absterben.	
		b	21,1	2,71	1,00	—	—	—		
		c	17,0	—	—	—	—	—		
		d	15,2	—	—	—	—	—		
		Mittel	17,8	2,29	1,07	—	—	—		
III. Weifser Senf	1.	a	50,11	5,54	2,98	—	—	—	fing an zu welken.	
		b	50,08	5,50	2,83	—	—	—		
		Mittel	50,10	5,52	2,91	—	—	—		
	2.	a	25,6	2,83	1,77	2,21	—	—	kurz vor dem Absterben.	
		b	27,6	2,85	1,87	2,44	—	—		
		Mittel	26,6	2,84	1,82	2,33	—	—		
	3.	a	25,5	2,07	1,11	—	—	—	beim Absterben.	
		b	27,8	2,18	1,16	—	—	—		
		Mittel	26,7	2,13	1,14	—	—	—		

¹⁾ Die hier angeführten Hygroskopizitätsbestimmungen sind nach der Publikation des betr. Zahlen mittelst der exakten Methode nachbestimmt und entsprechend verändert worden.

nur noch hygroskopisch gebundenes Wasser besitzt, so wird auch in der Pflanze das Wasser so weit unter der Erscheinung des Welkwerdens verdunsten, bis auch in ihr nur noch hygroskopisches Wasser vorhanden ist. Erst wenn jetzt die Pflanze relativ trockner würde als der Boden, würde sie aus diesem noch hygroskopisches Wasser aufnehmen können. Eine Pflanze, die nur noch hygroskopisches Wasser enthält, kann dabei noch ziemlich feucht sein, da ihre mizellare, sowie ihre äußere Oberfläche relativ groß ist. Hierfür sprechen auch u. a. die hohen Resultate, welche Trommer für die Hygroskopizität des Gersten- und Roggenstrohes erhielt. Dennoch kann die Pflanze nicht mehr lebenskräftig sein, da die ganze kapillare Wasserleitung und somit die Nahrungsaufnahme in ihr unterbrochen ist und sich nie wieder herstellen kann. Demnach kann die Pflanze also erst wenn sie abgestorben ist, ihren Wassergehalt mit dem des Bodens ausgleichen, indem sie letzterem hygroskopisches Wasser entzieht. Das hygroskopisch gebundene Bodenwasser hat sonach keine Bedeutung für die Vegetation.

Wir hatten andererseits gesehen, daß die Hygroskopizitätsbestimmungen durch Destillationserscheinungen getrübt werden können. Solche Erscheinungen finden aber im Boden bei größeren Temperaturschwankungen vielfach statt. Ist der Boden nur noch mit hygroskopischem Wasser gesättigt, so vermag sich durch Bestrahlung (z. B. durch die Sonne) die obere Bodenschicht zu erwärmen. Hierdurch wird hygroskopisch gebundenes Wasser frei, was wohl teilweise als Wasserdampf in die Luft geht, welches sich aber auch teilweise in den kälteren unteren Bodenschichten kondensiert und hier zu kapillar gebundenem Bodenwasser wird. Dieses ursprünglich „hygroskopisch gebundene“ Bodenwasser kann demnach, wenn es sich an den Wurzeln der Pflanze niederschlägt, von diesen aufgenommen werden. Es könnte so die Pflanze unter Umständen erst dann absterben, wenn der Boden noch weniger als diejenige Wassermenge enthält, welche er im Höchsthalle hygroskopisch zu binden vermag.

Im allgemeinen aber hält, wie gesagt, der Boden das hygroskopisch gebundene Wasser zu fest, als daß es die Pflanze aufnehmen kann. Es hat demnach keinen Wert für diese.

Wenn wir trotzdem die Hygroskopizität des Bodens bestimmen und hiernach den Wert eines Bodens beurteilen wollen, so geschieht dies lediglich aus dem Grunde, weil uns die Hygroskopizität einen Maßstab für die *Bodenoberfläche* bietet. Der Erkenntnis der grundlegenden Bedeutung dieser spezifischen Bodeneigenschaft, welche ich wiederholt hervorgehoben habe, verdankt auch die Hygroskopizität die exakte Ausgestaltung der Methode zu ihrer Bestimmung.

§ 31. Die Kapillaritätsercheinungen.

Wir denken uns jede Substanz aus lauter gleichartigen kleinsten Teilchen, sogen. Molekülen ztsammengesetzt, welche eine gegenseitige Anziehungskraft (Kohäsion) aufeinander ausüben. Da nun die Moleküle verschiedener Substanzen verschieden groß sind und verschieden großen Abstand voneinander haben, so wird die Anziehungskraft derselben bei verschiedenen Substanzen verschieden groß sein. Kommen so zwei verschiedene Substanzen in Berührung miteinander, so werden an den Grenzflächen sich die verschiedenartigen Moleküle gegenseitig anziehen, und es wird sich sodann die Form der Substanzen, sofern dieselbe leicht veränderungsfähig ist, mehr oder weniger umgestalten, je nachdem die Moleküle der einen Substanz stärker oder weniger stark die der anderen Substanz anziehen. Die Gleichgewichtslage einer Flüssigkeit z. B. wird so überall da gestört werden, wo dieselbe an ein anderes Medium, sei es an eine feste Substanz, an eine andere Flüssigkeit oder an ein Gas, angrenzt, und zwar wird hier

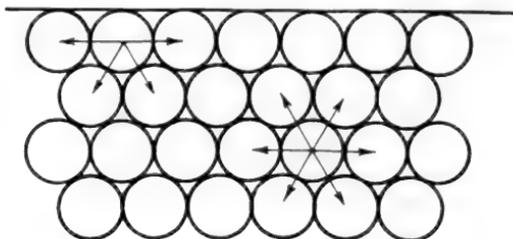


Fig. 24. Kapillaritätsercheinungen.

die Störung dadurch eintreten, daß die angrenzende Substanz entweder eine geringere oder eine größere Anziehung auf die Flüssigkeitsmoleküle ausübt, als diese aufeinander. Man sagt, die „Adhäsion“ der betr. Substanz zu unserer Flüssigkeit ist geringer oder größer als die „Kohäsion“ der Flüssigkeit. Ist sie geringer, so werden die Anziehungskräfte, von welchen die Grenzmoeküle unserer Flüssigkeit aus dieser herausgezogen werden, geringer sein; mithin müssen (Fig. 24) die diesen entgegengesetzt wirkenden Anziehungskräfte einen Zug auf die an der Grenzfläche befindlichen Moleküle ausüben, welcher ins Innere unserer Flüssigkeit gerichtet ist. Da diese Zugkraft überall an der Oberfläche der Flüssigkeit die gleiche ist, so muß die Flüssigkeit mithin das Bestreben haben, eine möglichst kleine Oberfläche zu bilden. Ist dieselbe so frei von allen anderen auf sie einwirkenden Kräften, so muß sie demnach kugelförmige Teilchen bilden, da bei der Kugel alle Teilchen dem Mittelpunkte möglichst nahe sind. Das Verhältnis von Oberfläche zum Volumen ist hier ein Minimum. Wirken aber noch andere Kräfte auf die Flüssigkeit ein, wie dies stets der Fall sein wird, so z. B. die Schwerkraft, so werden diese wiederum einen bestimmenden anderen Einfluß auf die Gestalt der Flüssigkeit ausüben. So finden wir in unserem Beispiele die mannigfaltigen Gebilde, welche wir u. a. im Regentropfen¹⁾ beobachten können.

¹⁾ P. Lenard. Über Regen; Meteorolog. Zeitschr. 1904. 6. Heft, S. 253 u. f.

Ist die Flüssigkeit in feste Wände eingezwängt, so wird sie sich diesen zunächst in ihrer Gestalt anschmiegen. An ihrer freien Oberfläche aber wird sie sich auch in dem Falle, daß die Adhäsion der festen Wand zu ihr geringer ist als ihre Kohäsion, kugelförmig krümmen. Diese kugelförmige Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche, den sog. „Meniskus“, können wir z. B. beim Quecksilber, welches in Glasröhren eingeschlossen ist (wie beim Barometer oder Thermometer), sehr gut beobachten. In welcher Weise die Flüssigkeit in dem Falle ihre Oberfläche kleiner zu gestalten sucht, ersieht man u. a. auch an dem Sinken des Quecksilbers in einem in diese Flüssigkeit eingetauchten engen Glasrohre. (Fig. 25.)

Ist die Anziehungskraft der festen Wand zu den Flüssigkeitsmolekülen aber andererseits größer als die der Flüssigkeitsmoleküle unter-

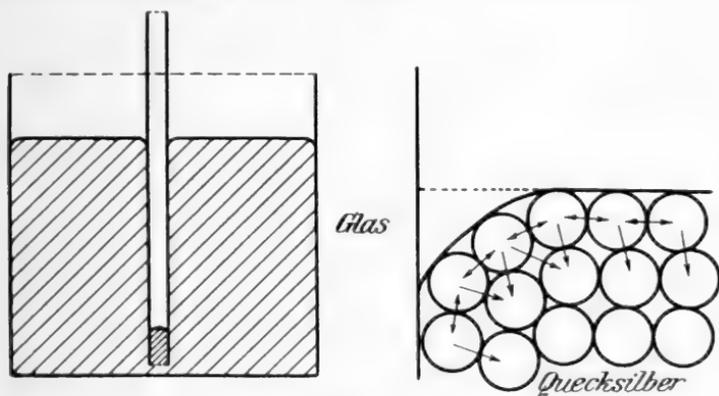


Fig. 25. Kapillaritätserscheinungen.

einander, d. h. benetzt die Flüssigkeit die feste Wand, so werden die Flüssigkeitsteilchen an der festen Wand emporgezogen, und es bildet sich dann eine konkav gekrümmte Flüssigkeitsoberfläche, ein konkaver „Meniskus“. Wirkt ferner hierbei die Adhäsionskraft der festen Wand auf eine nur geringe Flüssigkeitsoberfläche ein, so vermag diese eine ganze Flüssigkeitssäule in die Höhe zu ziehen. Wir beobachten so u. a., daß Wasser in engen Glasröhren, den sogen. „Kapillarröhren“, oder zwischen eng gestellten ebenen Platten emporsteigt. (Fig. 26.)

Da wir es beim Boden ausschließlich mit Wasser oder sehr wässerigen Salzlösungen und fast ausschließlich mit benetzbaren festen Substanzen zu tun haben, so dürften vornehmlich diese Kapillarerscheinungen die für die Bodenkunde wesentlichsten sein. Ich glaube in meinen weiteren Ausführungen deshalb auf diese besonders eingehen zu müssen.

Die Höhe, bis zu welcher das Wasser emporgehoben werden kann, bezeichnen wir als Steighöhe (h). Nach dem Vorhergesagten ist leicht ein-

zusehen, daß diese Steighöhe des Wassers von dem Abstände der festen Wände voneinander abhängen muß, und zwar werden die Adhäsionskräfte soweit anziehend und so emporsaugend auf das Wasser wirken, bis ihnen das Gewicht der emporgehobenen Wassersäule das Gleichgewicht hält. Nach experimentellen Befunden ist nun in Kapillarröhren das Produkt aus dem Radius der Röhre (r) und aus der Steighöhe (h) stets das gleiche, und zwar bei Wasser gleich 15. Man bezeichnet es als die Kapillaritätskonstante des Wassers (a^2). Also

$$r \cdot h = a^2 \quad (15)$$

besagt demnach u. a., daß in einem Kapillarrohre von 1 mm Radius die Steighöhe des Wassers 15 mm beträgt.

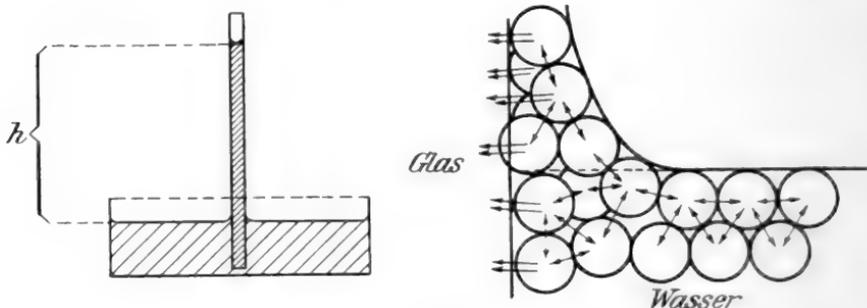


Fig. 26. Kapillaritätserscheinungen.

Für planparallele Wände, welche den Abstand (d) voneinander haben, hat man dieselbe Gleichung aufstellen können:

$$d \cdot h = a^2. \quad (16)$$

Da dieselbe so für die extremen Fälle, d. h. für stark gekrümmte wie für ebene, senkrechte Wände gültig ist, so darf man annehmen, daß sie allgemeine Gültigkeit für das Verhalten des Wassers zwischen einander sehr nahe stehenden, senkrechten Wänden haben muß.

Im Boden gibt es aber keine senkrechten Wände, sondern nur vielgestaltige Hohlräume, welche sich zwischen den festen Bodenteilchen befinden; bei diesen ist es nicht möglich, auf diesem Wege das Zurechtbestehen dieser Gleichungen zu beweisen. Ich habe deshalb zwei weitere Größen mit herangezogen, welche schon für sich vom pflanzenphysiologischen Gesichtspunkte aus Interesse beanspruchen, nämlich einmal die kapillar emporgehobene Wassermenge (w_c) und ferner die Größe der mit kapillarem Wasser bedeckten Oberfläche der festen Substanz (F).¹⁾

¹⁾ Alfred Mitscherlich. Unters. über die physikalischen Bodeneigenschaften; Landw. Jahrb. 1901, S. 415 u. f.

Zwischen diesen Größen besteht nämlich in zylindrischen Röhren mit dem Radius „ r “ die Gleichung:

$$\frac{w_c}{F} = \frac{r^2 \pi \cdot h}{2r \pi \cdot h}$$

oder

$$\frac{w_c}{F} = \frac{r}{2}. \quad (17)$$

Setzen wir in diese Gleichung (17) den Wert für r aus Gleichung (15) ein, $r = \frac{a^2}{h}$, und lösen wir dann dieselbe nach F hin auf, so ergibt sich:

$$F = \frac{2h \cdot w_c}{a^2}. \quad (18)$$

Desgleichen finden wir für planparallele Platten von der beliebigen Länge l :

$$\frac{w_c}{F} = \frac{h \cdot d \cdot l}{2 \cdot h \cdot l}$$

oder

$$\frac{w_c}{F} = \frac{d}{2}. \quad (19)$$

Wenn wir hier für d ebenfalls den in der Gleichung (16) angenommenen Wert $d = \frac{a^2}{h}$ einsetzen und die Gleichung (19) dann ebenso auflösen, so erhalten wir:

$$F = \frac{2h \cdot w_c}{a^2}, \quad (18)$$

dieselbe Gleichung (18), die wir soeben aus den Kapillarröhren gefolgert hatten.

Diese Gleichung dürfte demnach für alle kapillaren Hohlräume Gültigkeit haben, sofern dieselben senkrechte Wände besitzen. Sie hat aber noch weitere Gültigkeit, denn sie setzt nicht einmal die senkrechten Wände voraus. Wie sich aus der obigen Entwicklung ergab, ist nämlich nicht der senkrechte Verlauf der festen Wände das Maßgebende, sondern vielmehr der in allen Horizontalschnitten gleichweite Abstand der festen Wände voneinander. Haben wir so ein Gemisch von lauter gleichen kugelförmigen Teilchen, und legen wir hier beliebige Horizontalschnitte hindurch, so ist es möglich, daß wir dieselben derart aufeinanderlegen können, daß sie einander decken, sofern nur entweder der Horizontalschnitt beliebig groß gewählt wird, oder die festen Teilchen entsprechend klein genug sind. Also auch für diesen Fall muß unsere Kapillaritätsgleichung (18) Gültigkeit besitzen. — Dasselbe wird ferner auch der Fall sein, wenn die festen Teilchen selbst in der Größe und auch in der Gestalt noch verschieden sind, allerdings unter der Bedingung, daß dieselben ideal gut gemischt und ideal gleichmäßig gelagert sind.

Soweit die Kapillaritätsgleichung (18) für den Boden in Betracht zu ziehen ist, habe ich sie experimentell zu bestätigen versucht. Zu diesem Zwecke mußten die drei Größen w_c , h und F experimentell be-

stimmt werden. Zur Bestimmung der Steighöhe wurden die Sandarten etc. in ein Glasrohr, welches unten mit einem Lappen zugebunden wurde, eingefüllt und so in Wasser eingestellt. Die Steighöhe h wurde, sobald das Wasser nicht mehr anstieg, mit einem Zentimetermaßstab gemessen. Zur Bestimmung der aufgesaugten Wassermenge wurde ein möglichst großer Teil des nassen Bodens aus dem Steigrohr ausgefüllt, und der Wassergehalt desselben pro Gramm Boden festgestellt. Die Oberfläche des Sandes wurde in der auf S. 72 angegebenen Weise pro Gramm Boden bestimmt.

Der erste Versuch, welcher mit Schrotkörnern ausgeführt wurde, ergab:

$$F = 3,871 \text{ qcm}; \quad w_c = 0,0609 \text{ g}; \quad h = 4,5 \text{ bis } 5,0 \text{ cm.}$$

Ist demnach unsere Kapillaritätsgleichung (18) richtig, so müßte sein:

$$3,871 = \frac{2 \cdot 0,0609 \cdot (4,5 \text{ bis } 5,0)}{0,15}$$

oder $3,654 < 3,871 < 4,060,$

was auch in der Tat der Fall ist.

Der zweite Versuch wurde mit reinem tertiären Quarzsande ausgeführt. Er ergab:

$$F = \left\{ \begin{array}{l} > 94,31 \text{ qcm,} \\ < 130,12 \text{ qcm;} \end{array} \right. \quad w_c = 0,268 \text{ g}; \quad h = 30,2 \text{ cm};$$

demnach: $\left. \begin{array}{l} > 94,31 \\ < 130,12 \end{array} \right\} = \frac{2 \cdot 0,268 \cdot 30,2}{0,15} = 107,9$

oder $94,31 < 107,9 < 130,12.$

Zum dritten Versuche wurde Seesand herangezogen, welcher in Form und Korngröße wesentliche Unterschiede aufwies. Er ergab:

$$F = \left\{ \begin{array}{l} > 71,52 \text{ qcm,} \\ < 98,70 \text{ qcm;} \end{array} \right. \quad w_c = 0,263 \text{ g}; \quad h = 20,5 \text{ cm};$$

folglich: $\left. \begin{array}{l} > 71,52 \\ < 98,70 \end{array} \right\} = \frac{2 \cdot 0,263 \cdot 20,5}{0,15} = 71,90$

oder $71,52 < 71,90 < 98,70.$

Wir sehen somit, daß durch die hier ausgeführten drei Versuche die Richtigkeit unserer Gleichung für die vorliegenden Anwendungen durchaus experimentell bestätigt wird.

Leider sind der Gültigkeit dieser Kapillaritätsgleichung beim Boden aber enge Grenzen gesetzt, und zwar durch die Ungleichartigkeit des Bodens.

Diese Ungleichartigkeit des Bodens tritt einmal in den Bodenpartikelchen selbst auf, ferner aber auch in der schlechten Mischung der verschiedenartigen Bodenteilchen.

Schließen die Bodenteilchen größere Hohlräume in sich ein, in welchen sich keine anderen Bodenteilchen einlagern können — wir veranschaulichten uns dies durch die Glasperlen (Fig. 18) — so bilden sich

notwendig zwei verschiedene Steighöhen gleichzeitig aus. Die kleinere derselben entspricht bei unserem Beispiel der Glasperlen dem Radius des Perlenloches. Von da ab, wo diese aufhört, werden wir somit bei durchsichtigen Perlen eine starke optische Brechung beobachten; die zweite höhere Steighöhe wird durch die zwischen den einzelnen Perlen befindlichen kapillaren Hohlräume bedingt, deren mittlerer Abstand kleiner ist als der Radius des Perlenloches. — Solange man hier die bei den einen kapillaren Hohlräumen benetzte Oberfläche und die kapillar in diesen emporgehobene Wassermenge bestimmen kann und ebenso dieselben Größen in den anderen Kapillaren dann zu berechnen vermag, wird man finden, daß auch jetzt noch für jeden einzelnen Fall unsere Gleichung (18) angenäherte Gültigkeit besitzt. Beim Boden aber könnten sich in derartige größere Hohlräume andere feinere feste Bodenteilchen einlagern. Es könnten auch Hohlräume von verschiedener Größe und Weite auftreten, so daß hierdurch die Erscheinung vollkommen unbestimmbar wird. Es ist dann weder eine Bestimmung der verschiedenen Steighöhen möglich noch eine Bestimmung der einzelnen Oberflächen usw. In diesem Falle ließe sich also die Kapillaritätsgleichung nicht anwenden.

Während der soeben beschriebene Fall praktisch keine Bedeutung beanspruchen dürfte, da man in den einzelnen Bodenteilchen nur äußerst selten einmal einen größeren Hohlraum beobachten kann, kommt der andere Fall, daß die Bodenteilchen engere kapillare Hohlräume einschließen, als die sind, welche sich zwischen den einzelnen festen Teilchen bilden, relativ häufig vor. In diesem Falle werden wir nur *eine* Steighöhe haben; denn in den festen Bodenteilchen kann, wenn die äußere Steighöhe erreicht ist, das Wasser auch nur noch um den Durchmesser eines festen Teilchens höher ansteigen; sodann gelangt es wieder in die weite, äußere Kapillare, deren Steighöhe erschöpft war. Dann braucht aber das Verhältnis $\frac{F}{w_c}$ nicht immer in gleicher Weise zu variieren wie h , mithin kann hier auch unsere Gleichung nicht mehr zu Recht bestehen. — Da solche engen Kapillaren, wie wir in § 11 e sahen, in den Humussubstanzen vorhanden sind, so dürfen wir also auf alle Bodenarten, die humose Teilchen besitzen, keine Anwendung von dieser Gleichung machen.

Wir nehmen ferner an, daß die Teilchen keine inneren Hohlräume besitzen, wie wir dies u. a. bei Ton, Kalk und Sand vermuten, und wollen nun den Einfluß der schlechten Mischung der festen Teilchen auf die Kapillarität des Bodens untersuchen.

Sind nebeneinanderliegende Bodenschichten in vertikaler Richtung gleich in horizontaler Richtung verschieden, befindet sich so z. B. im Lehmboden eine Sandader, so werden wir nebeneinander zwei verschiedene Steighöhen haben: im Sand die niedrige des Sandes und im Lehm die

dem Lehm entsprechend höhere. Oberhalb der Steighöhe des Sandes kann kein Wasser *kapillar* aus dem Lehm in den Sand übertreten, da hier die kapillare Steighöhe des Sandes erschöpft ist. (Fig. 27.)

Anders liegen die Verhältnisse, wenn die horizontalen Bodenschichten verschiedenartig sind, wenn z. B. Krume und Untergrund variieren.

Haben wir unten weitere kapillare Hohlräume (Sand), so vermag das Wasser nur dann in die engeren Hohlräume darüber einzudringen, wenn

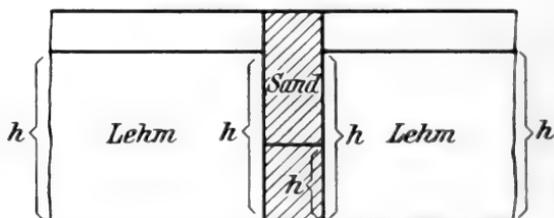


Fig. 27. Kapillaritätserscheinungen im Boden.

die kapillare Steighöhe in dem Sande noch nicht erreicht wird. Das Wasser steigt dann so hoch, bis die kapillare Steighöhe des dichter gelagerten Lehmes erreicht ist. (Fig. 28.)

Anscheinend haben hier die feinen Kapillaren eine viel größere Wassersäule zu tragen, da sie sich nach unten in den Sand erweitern.

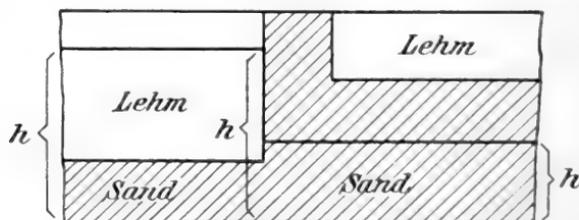


Fig. 28. Kapillaritätserscheinungen im Boden.

Das ist aber in Wirklichkeit nicht so der Fall, wie man leicht an einem einfachen Experiment beobachten kann. Füllt man ein Wasserglas mit Wasser, und kehrt man dasselbe dann im Wasser um, so kann man dasselbe bis an den Rand aus dem Wasser herausziehen, ohne daß Luft eintritt. Hier trägt der *Luftdruck* die ganze Wassersäule. Bringt man am Boden des Glases z. B. mittelst eines sehr feinen Bohrers eine Kapillare an, so kann man das Experiment genau in der gleichen Weise wiederholen. Auch hier wird, solange die Steighöhe der geschaffenen Kapillare

nicht erschöpft ist, keine Luft eintreten, mithin das Glas voll Wasser bleiben. Der Meniskus trägt hierbei aber nicht die ganze im Glase befindliche Wassersäule, sondern nur den Teil derselben, welcher senkrecht unter ihm ist; die Hauptmenge trägt nach wie vor der Luftdruck.

Ist umgekehrt Sand auf Lehm gelagert, so vermag das Wasser nur dann in den Sand aufzusteigen, wenn die kapillare Steighöhe des Sandes noch nicht erreicht ist. (Fig. 29.)

Dafs in diesen Fällen ein Zurechtbestehen der Kapillaritätsgleichung unmöglich ist, ist leicht einzusehen.

Die Kapillaritätserscheinungen im Boden sind aber noch weit komplizierter dadurch, dafs Wasser einerseits nicht nur von unten ansteigt, sondern auch von oben durchsickert, wie vornehmlich dadurch, dafs die kapillaren Hohlräume nicht nur mit Wasser, sondern mit Wasser und Luft gleichzeitig angefüllt werden.

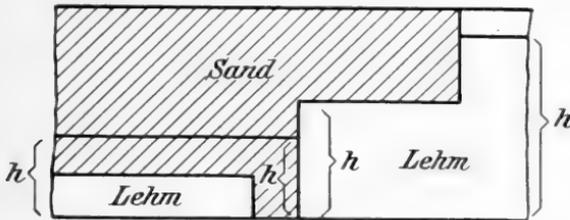


Fig. 29. Kapillaritätserscheinungen im Boden.

Im horizontal liegenden Kapillarrohre bilden sich an beiden Seiten eines Wasserfadens die Menisken in umgekehrter Richtung aus (Fig. 30, a). Ein solcher Wasserfaden befindet sich im Gleichgewicht und läßt sich durch die kleinste hinzutretende Kraft — sofern die Wandung der Kapillare mit Wasser benetzt ist — beliebig in dem gleichweiten Rohre verschieben. Dies können wir z. B. durch Neigen mittelst der dabei wirksam werdenden Schwerkraft erreichen. Stellen wir das Rohr senkrecht (Fig. 30, b), so kann aber auch jetzt noch die Wassermenge festgehalten werden; denn beim Neigen kehrt sich der untere Meniskus um, so dafs jetzt beide in gleichem Sinne wirken, nämlich das Wasser zurückhalten.

Beobachten wir nun noch den Fall, dafs sich die kapillaren Hohlräume zu nichtkapillaren erweitern und dann wieder verengen. Die kapillare Steighöhe in solchen Räumen ist sehr gering (Fig. 30, c), sie hört bei der ersten Erweiterung des Rohres auf. Dringt aber das Wasser durch irgend welchen Druck bis zur nächsten kapillaren Verengung, so kann hier die ganze Wassersäule festgehalten werden, sofern jetzt die Wassermenge nicht höher gehoben ist, als der Steighöhe dieser verengten Kapillare entspricht (Fig. 30, d).

Es wird sich die aufgenommene Wassermenge dann ebenfalls in dem Rohre halten, wenn wir dasselbe auch aus dem Wasser herausnehmen (Fig. 30, d). Würden wir die oberste Verengung des in der Figur wiedergegebenen Rohres sehr eng ausziehen, so könnte auf diese Weise auch der oberste Meniskus die gesamte in das Rohr einzufüllende Wassermenge in gleicher Weise tragen. Reicht der Druck, mit welchem das Wasser in den größeren Hohlraum zurückgestaut wird, nur so weit, daß dieser ca. $\frac{3}{4}$ voll wird,

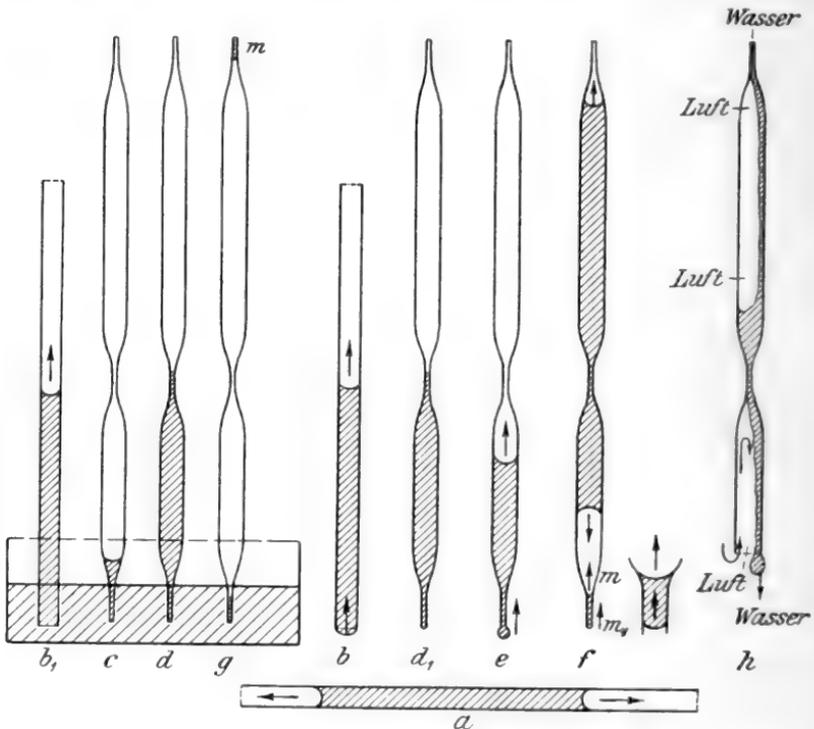


Fig. 30. Kapillaritätserscheinungen im Boden.

so vermag, sobald dieser Druck nachläßt, der weite Meniskus diese Wassersäule nicht zu halten und das Wasser wird wieder so weit ausfließen, bis ein engerer Meniskus der Wassersäule das Gleichgewicht hält (Fig. 30, c). Nehmen wir aber, bevor der Druck wieder nachläßt, unser Rohr aus dem Wasser, so kann der untere Meniskus infolge Tropfenbildung die Kraft besitzen, das Wasser am und in dem Glasrohre zurückzuhalten (Fig. 30, e). Zerstört man aber den Tropfen resp. den Meniskus, welcher die Wassersäule trägt, so läuft das Wasser genau wie vorher (Fig. 30, c) aus.

Treten Wasser und Luft gleichzeitig in unser Rohr ein, so können kleine Menisken (Fig. 30, *f* [*m* u. *m*₁]) große Wassermengen zurückhalten.

Ebenso können aber auch kleine Menisken vollkommen verhindern, daß Wasser in ein Rohr eintritt, sofern nicht der Druck, unter welchem das Wasser einzudringen sucht, den hindernden Meniskus zerstört (Fig. 30, *g* [*m*]). Kann neben Wasser gleichzeitig Luft in einen weiteren Hohlraum eindringen, so fließt das Wasser an der Wandung des Hohlraumes herab, ohne diesen selbst anzufüllen (Fig. 30, *h*). Dieser letzte Fall dürfte bei allen grobkörnigen Bodenarten eintreten. Er zeigt, daß für die Kapillaritätserscheinungen die weiten Hohlräume nicht in Betracht zu kommen brauchen.

Ziehen wir nun aus diesen einfachen Beispielen die Nutzenanwendung für die praktische Bodenkunde, so ergibt sich:

1. Die Steighöhe ist in den Bodenarten am höchsten, welche sich aus den feinsten Bodenteilchen zusammensetzen, welche also m. a. W. die größte äufere Oberfläche besitzen. Sie nimmt ab mit der Zunahme des Bodens an größeren Bestandteilen.
2. Regenwasser wird nur in kapillaren Hohlräumen vom Boden zurückgehalten, und zwar um so mehr, je feiner die Kapillaren sind. In nicht kapillare Hohlräume kann es unter Umständen nicht eindringen (ad Fig. 30, *g*), unter Umständen auch eindringen und zurückgehalten werden (ad Fig. 30, *d*, *f*), in den meisten Fällen wird es jedoch in denselben glatt ablaufen (ad Fig. 30, *h*).

Die Leitung des Wassers im Boden muß um so schneller vor sich gehen, je geringer die Reibung des Wassers an den Wänden der festen Bodenteilchen ist, je kleiner also die benetzte Oberfläche (F) im Verhältnis zu dem durchgeleiteten Wasservolumen (w_c) ist. Da nun, wie wir sahen,

$$\frac{F}{w_c} = \frac{2h}{a^2} \quad (18)$$

ist, so wird die Wasserleitung um so schneller vor sich gehen, je geringer die Steighöhe des Wassers im Boden ist. Die höchste Steighöhe des Wassers im Boden wird so am langsamsten erreicht werden.

Mafsgebend für alle Kapillarerscheinungen sind die kapillaren Hohlräume, welche von den festen Bodenteilchen gebildet werden, und somit auch die Struktur des Bodens. Wir sahen in § 25, daß auch das Wasser einen Einfluß auf die Struktur des Bodens ausüben kann, insofern durch die atmosphärischen Niederschläge die Krümelstruktur des Bodens in Einzelkornstruktur übergeführt werden kann. Noch eine andere Veränderung des Hohlraumvolumens des Bodens durch das Wasser kann aber, wie wir später sehen werden, auch einen erheblichen Einfluß auf die Kapillaritätserscheinungen ausüben, und zwar beruht diese darin, daß das Wasser die einzelnen Bodenteilchen so stark aneinanderzieht, daß eine kapillare Wasserleitung so gut wie unmöglich wird. Will man sich diesen Vorgang

der kapillaren Anziehung durch ein Experiment veranschaulichen, so nimmt man eine ebene Glasplatte, stellt diese unten in Wasser und befestigt sie so in senkrechter Stellung. Nähert man dieser nun eine andere ebene Platte, welche gleichfalls unten in das Wasser eintaucht, so wird man die anziehende Kraft, welche die zwischen beiden Platten kapillar aufsteigende Flüssigkeit in der Oberflächenspannung auf diese Platte ausübt, sehr gut wahrnehmen können. Einzelne Bodenarten können sich durch einen derartigen Prozeß, welcher das Hohlraumvolumen auf diese Weise verengt, vollkommen gegen das Eindringen des Wassers verschließen.

Da die Veränderlichkeit des Hohlraumvolumens einen großen Einfluß auf alle Kapillaritätserscheinungen ausübt, so ist unschwer einzusehen, daß auch die praktisch anstellbaren Versuche über dieselben große Schwankungen in den Resultaten ergeben werden.

§ 32. Die Wasserkapazität.

Unter „Wasserkapazität“ eines Bodens versteht man diejenige Wassermenge, welche ein Boden zurückzuhalten vermag. Dieselbe wird entweder in Gewichtsprozenten der festen Bodenteilchen oder in Prozenten des Bodenvolumens festgestellt.

Nach unseren Betrachtungen im vorigen Abschnitte ist es leicht zu übersehen, wodurch die Wasserkapazität eines Bodens bedingt wird. Soyka¹⁾ hat den Versuch gemacht, dieselbe zu berechnen, indem er kugelförmige feste Teilchen annahm, welche in bestimmter Weise gelagert wurden. Er setzte u. a. voraus, daß diese festen Bodenteilchen von Wasserhüllen von 0,005 mm umgeben waren, und berechnete danach die Wasserkapazität von verschiedenem feinkörnigen Boden. Er mußte hier natürlich zu dem Resultat gelangen, daß die Wasserkapazität der Größe der Bodenoberfläche proportional ist und somit im umgekehrten Verhältnis zu dem Radius der Kugelteilchen zunimmt (vergl. S. 86, Beispiel 9). Die hier gemachten Annahmen treffen beim Boden nicht zu! Denn da, wo sich die festen Teilchen gegenseitig berühren, kann die Wasserhülle sich nicht gleichmäßig dicht ausbreiten. Das Bodenvolumen, welches das Wasser einnehmen kann, ist diesem vielmehr durch das Hohlraumvolumen vorgeschrieben, und dieses würde bei den von Soyka angenommenen Fällen gleicher Lagerung stets gleichgroß sein (vergl. S. 80—81, Beispiel 1 u. 2).

Wirkt aber andererseits auf das Wasser in diesem Hohlraumvolumen ein gleichmäßiger Druck ein, wie z. B. der, welcher durch die Schwere bedingt wird, so werden sich die Hohlräume alle so weit entleeren, bis der jeweilige Meniskus diesem Drucke das Gleichgewicht hält. Haben wir nun Kugel-

¹⁾ J. Soyka, Beobachtungen über die Porositätsverhältnisse des Bodens; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 8, S. 15.

teilchen, so werden die Menisken ganz unabhängig von der absoluten Größe der Kugeln an den Berührungspunkten stets die gleichen sein. Hierdurch wird dann die Wasserkapazität bestimmt durch die Anzahl der gegenseitigen Berührungspunkte der festen Teilchen. Und da nun diese, wie wir S. 89 sahen, ebenso wie die Bodenoberfläche in geometrischer Reihe zunehmen, wenn der Radius der Kugelteilchen in geometrischer Reihe abnimmt, so ergibt sich aus diesen Betrachtungen doch ein ähnliches Resultat wie das von Soyka. Je nach der Gestalt der festen Bodenteilchen und nach ihrer Aneinanderlagerung wechselt aber, wie wir sahen, die Gestalt des Hohlraumvolumens, und da diese für die Bildung der Wassermenisken, sowie für die durch die letzteren zurückgehaltenen Wassermengen maßgebend ist, so kann die Wasserkapazität nicht durch die Bodenoberfläche allein bedingt sein.

Die Wassermenge, welche ein Boden zu enthalten vermag, hängt aber nicht nur von der Größe und Gestalt des Hohlraumvolumens ab, sondern auch von der Art der Wasserzufuhr. Läßt man so z. B. das Wasser kapillar in den Boden aufsteigen, so werden die unteren Bodenschichten, da hier auch in den weiteren Haarröhrchen das Wasser aufsteigt, notwendigerweise mehr Wasser enthalten als die oberen Bodenschichten. Mit der Höhe der Bodenschicht wird so der Wassergehalt des Bodens allmählich abnehmen. Benetzt man den Boden umgekehrt von oben, so wird das Wasser zugleich der Schwerkraft folgend nach unten durchsickern, und es wird sich dann so viel Wasser in dem Boden halten, als die sich unten bildenden konvex gekrümmten Menisken zu tragen vermögen. Wiederum wird der Boden unten wasserreicher sein. Ist die Wasserzufuhr von oben aber nicht sehr groß oder die Bodensäule, welche dieselbe aufnimmt, sehr lang, so wird sich das Wasser in den Hohlräumen im Boden derart verteilen müssen, wie wir dies zuvor bei Betrachtung der Kugelteilchen gesehen haben. Diese Wasserkapazität, auf welche Adolf Mayer¹⁾ zuerst aufmerksam gemacht hat, entspricht derjenigen, welche wir in unserem gewachsenen Kulturboden vorfinden. Mayer bezeichnet dieselbe im Gegensatz zu der „größten“ Wasserkapazität, bei welcher der Boden ganz mit Wasser gesättigt ist, als „kleinste“ oder auch als „absolute“ Wasserkapazität.

Ist die Erdsäule, welche man mit Wasser übergießt, hingegen sehr kurz, so werden alle kapillaren Hohlräume mit Wasser angefüllt werden, und es wird uns dann auch auf diese Weise möglich, die „größte“ Wasserkapazität eines Bodens zu bestimmen.

Bei der Bestimmung der Wasserkapazität sind zwei Methoden in Anwendung gekommen. Die erste von diesen hat es sich zur Aufgabe

¹⁾ Adolf Mayer, Über das Verhalten erdarter Gemische gegen das Wasser; Landw. Jahrbücher 1874, S. 770.

gestellt, die „größte“ Wasserkapazität festzustellen. Sie stammt von Schübler.¹⁾ Dieser brachte eine bestimmte Menge von trockenem Boden auf ein zuvor gewogenes nasses Filter, übergoss diese mit Wasser, liefs das überschüssige Wasser abtropfen und bestimmte alsdann mittelst der Wage die Wasseraufnahme.

Die aufgenommene Wassermenge multipliziert mit 100 und dividiert durch die angewandte Menge des trockenen Bodens ergab ihm sodann die Wasserkapazität. Bei Boden, welcher sich schwer benetzen liefs, schlämmte Schübler erst eine abgewogene trockene Bodenmenge im Wasser auf und brachte diese sodann auf das Filter, wo sie sonst ebenso behandelt wurde.

Wir haben zuvor gesehen, dafs die Wasserkapazität durch die Lagerung der festen Teilchen bedingt wird. Wir wissen aber ferner, dafs ein eingeschütteter Boden sich in Krümelstruktur befindet, welche allerdings, doch nur teilweise, durch das Aufgiefsen von Wasser zerstört wird, dafs ein eingeschlämmter Boden sich aber in Einzelkornstruktur befindet. Mit-hin waren die Grundlagen, nach welchen Schübler die Wasserkapazität seiner Bodenarten bestimmte, verschiedene, die Resultate verschiedener Bodenarten demnach nicht direkt miteinander vergleichbar. Dies mochte schon Trommer²⁾ erkannt haben, welcher vorschlägt, jeden Boden erst im Wasser aufzuschlämmen und ihn dann auf das Filter überzuführen.

Es ist leicht einzusehen, dafs alle Resultate der Wasserkapazitätsbestimmung durch die Krümelbildung wie durch die Art der Einfüllung des Bodens sehr verschieden ausfallen müssen.

Einen Anhalt für die hierdurch möglichen Fehler mögen die folgenden Versuchsergebnisse von F. Haberlandt³⁾ und E. Wollny⁴⁾ geben.

(Siehe die obere Tabelle auf Seite 179.)

Um die „kleinste“ Wasserkapazität zu bestimmen, hat Wollny nach dem Vorbilde von Mayer⁵⁾ und v. Klenze⁶⁾ den Wassergehalt einer in ein Glasrohr eingefüllten Bodensäule in verschiedenen Höhen festgestellt, der er einmal von unten und einmal von oben Wasser zuführte. Da seine Bodensäule nur ein Meter hoch war, so mußte er hierbei nach den vorherigen Ausführungen zu den folgenden Resultaten gelangen. Beim Auf-

¹⁾ G. Schübler, Grunds. d. Agrikulturchemie. Leipzig 1830, II. Teil, S. 63.

²⁾ C. Trommer, Die Bodenkunde. Berlin 1857, S. 264.

³⁾ F. Haberlandt, Wissenschaftl. Unters. auf d. Geb. d. Pflanzenbaues. Wien 1875, Bd. I, S. 14.

⁴⁾ E. Wollny, Unters. über die Wasserkapazität der Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 8, S. 177 u. f.

⁵⁾ Mayer, l. c.

⁶⁾ v. Klenze, Unters. über die kapillare Wasserleitung im Boden und die kapillare Sättigungskapazität desselben mit Wasser; Landw. Jahrb. 1877, S. 124.

Wasserkapazität in Gewichtsprozenten.

Nach Wollny:	Lehm:					
Größe der Krümel (mm) .	0,0—0,25	0,5—1,0	1,0—2,0	2,0—4,0	4,0—6,75	6,75—9,0
Größte Wasserkapazität .	42,49	44,39	45,42	43,51	40,54	40,83
Kleinste Wasserkapazität .	32,23	29,27	29,23	31,32	31,28	31,31

Nach Haberlandt:	Ackerboden	Quarzsand	Moorboden
Locker eingefüllt	59,0	36,1	221,6
Eingerüttelt	45,8	28,6	157,2
Eingestampft	37,9	24,4	132,7

steigen des Wassers muß der Wassergehalt nach oben stets abnehmen, mithin kann hier keine kleinste Wasserkapazität erreicht werden. Ist die kapillare Steighöhe der engen Hohlräume bei einem Meter noch nicht erreicht, so kann der Boden hiernach verhältnismäßig viel Wasser enthalten. Beim Durchsickern des Wassers durch den Boden wird, wenn die sich unten ausbildenden Menisken eine viel höhere Wassersäule tragen können, in den oberen Bodenschichten viel Wasser zurückgehalten werden, welches unter anderen Umständen abfließen müßte; also auch dann wird die „geringste Wasserkapazität“ nicht zu bestimmen sein. Die Versuchsergebnisse, welche in sich natürlich auch große Fehler einschließen, zeigen dies. Wollny hat die folgenden Resultate in Volumprozenten wiedergegeben:

Höhe der Bodenschicht cm	Bei Wasserzufuhr von					
	unten nach einem Stehen von			oben nach einem Stehen von		
	12 Std.	36 Std.	168 Std.	12 Std.	36 Std.	168 Std.
90—100	25,5	25,7	26,2	38,2	35,5	32,4
75—90	31,6	32,0	32,3	39,5	35,2	31,3
60—75	35,6	37,5	37,7	39,6	39,4	37,4
45—60	39,7	41,4	41,8	41,6	39,7	38,6
30—45	42,4	42,4	42,7	42,2	40,8	40,6
15—30	42,9	42,4	43,5	40,5	41,7	42,3
0—15	43,5	43,3	42,9	37,6	42,4	43,8

Demnach dürfte die „kleinste“ Wasserkapazität auch nicht auf diese Weise im vorliegenden Falle zu bestimmen sein, und dies erscheint um

so weniger möglich, als nicht nur die Bodenart, sondern ebenso auch hier die Art der Einfüllung des Bodens in das Glasrohr große Differenzen ergibt. Hierfür einige Belegzahlen von Klenze (l. c.).

Lehm:	Höhe der Bodenschicht cm			
	10	20	30	40
Fein, locker	48,3	47,6	42,7	38,4
Fein, fest	43,0	42,6	41,2	42,6
Krümelig, eingerüttelt . .	40,0	35,2	34,1	32,5

Eine geringere Schwankung des Wassergehaltes des Bodens wird durch die verschieden hohe Temperatur desselben bewirkt.

So fand Haberlandt (l. c.) bei einem Ackerboden bei den verschiedenen Temperaturen t , auf welche er dieselben nebst dem zuzuführenden Wasser erwärmte, die folgende Wasserkapazität (w_c):

$t = 15^{\circ} \text{C.}$	$w_c = 53,1 \%$	$t = 50^{\circ} \text{C.}$	$w_c = 47,7 \%$
$t = 20^{\circ} \text{ „}$	$w_c = 52,6 \text{ „}$	$t = 100^{\circ} \text{ „}$	$w_c = 46,2 \text{ „}$
$t = 32^{\circ} \text{ „}$	$w_c = 51,8 \text{ „}$		

Nach unseren Betrachtungen im vorhergehenden Paragraphen läßt sich diese Erscheinung leicht erklären. Erwärmt sich ein Boden schnell — was bei einem nassen Kulturboden unter gewöhnlichen Verhältnissen nicht eintreten dürfte — so dehnt sich das Bodenwasser dementsprechend aus. Hierbei wird ein kleiner Teil des Wassers aus den engen kapillaren Hohlräumen in die weiteren austreten. Vermögen diese dann dies Wasser nicht mehr zurückzuhalten, so wird dasselbe abfließen und so der Gehalt des Bodens an Wasser geringer werden.

Dafs auch Steine im Boden die Wasserkapazität desselben verringern, da dieselben das Hohlraumvolumen einschränken, bedarf wohl keiner weiteren Belege.¹⁾

Wenngleich nun beide Bestimmungsmethoden der Wasserkapazität des Bodens große Fehler notwendig einschließen, welche vornehmlich durch die jeweilige Lagerung der Teilchen und durch die momentane Krümbildung bedingt sind, so ist es doch v. Liebenberg²⁾ und nach diesem Wollny (l. c.) möglich gewesen, den Nachweis zu führen, dafs die Wasserkapazität eines Bodens um so größer ist, je feiner die festen Bodenteilchen sind. Hierfür noch einige Wollnysche Belegzahlen:

¹⁾ E. Wollny, l. c. S. 200.

²⁾ A. Ritter v. Liebenberg. Über das Verhalten des Wassers im Boden. Inaug.-Diss. Halle 1873, S. 19.

Quarzsand:	Korngröße (mm)						
	0,01 bis 0,071	0,071 bis 0,114	0,114 bis 0,171	0,171 bis 0,25	0,25 bis 0,50	0,50 bis 1,00	1,00 bis 2,00
Größte Wasserkapazität .	32,1	32,1	28,9	26,0	24,7	23,0	21,1
Kleinste Wasserkapazität .	27,2	24,7	4,25	3,47	2,94	2,68	2,33

Auch der Verfasser¹⁾ hat die Wasserkapazität einer ganzen Reihe von Bodenarten und ferner die Benetzungswärmen derselben bestimmt und den Nachweis geführt, daß beide Größen keineswegs unabhängig voneinander sind, wenn auch die durch die Benetzungswärme gemessene Größe der Bodenoberfläche keineswegs *allein* die Größe der Wasserkapazität eines Bodens bestimmt, wie wir dies vorher sahen. Es sollen hier einige Zahlen davon nebst den Bestimmungen der Wasserkapazität der verschiedensten Bodenbestandteile wiedergegeben werden:

Wasserkapazität:	Gewichtsprozente				Hygroskopizität Gew.-Proz.
	nach Schübler	nach Trommer	nach Wollny		
			größte	kleinste	
Quarzsand . . .	25	26—32	29,1	19,4	0,0
Kalk	85	80	—	—	1,0
Ton (Kaolin) . .	87	70	55,9	45,9	5—25
Humus	181	180	253,6	106,5	25—50

Bodenarten:	Wasserkapazität	Hygroskopizität	In 1 ccm Boden beträgt	
			das Bodenwasser	die Bodenoberfläche
	Gew.-Proz.	Gew.-Proz.	ccm	$\alpha \cdot qcm$
Moorboden	126	17,0	0,72	234
Strenger Tonboden	80,9	14,0	0,69	161
Humusreicher Sandboden	52,8	4,2	0,56	75
Humoser Sandboden	23,1	1,8	0,37	46
Sandiger Lehmboden	20,2	1,6	0,34	40
Lehmiger Sandboden	21,9	1,3	0,36	32
Sandboden	18,8	0,9	0,33	23

¹⁾ A. Mitscherlich, l. c. Landw. Jahrb. 1901, S. 422 u. f.

Will man die Wasserkapazität verschiedener der Erde entnommener Bodenproben miteinander vergleichen, so gibt es nach meinem Dafürhalten nur einen gangbaren Weg. Dieser besteht darin, den Boden in Einzelkornstruktur durch Aufschlänmen überzuführen und ihn dann durch Einrütteln und Einstampfen in eine möglichst dichte Lagerung zu bringen; nur dann darf man auf einigermaßen gleichwertige Resultate rechnen. Das Verfahren, welches man hierzu einschlägt, kann das gleiche sein, welches in § 16 zur Bestimmung des Hohlraumvolumens angewandt wurde. Wir werden in dem Falle in der Tat in der Wasserkapazität das Hohlraumvolumen des Bodens feststellen.

Praktisches Interesse gewinnt die Bestimmung der Wasserkapazität jedoch erst dann, wenn wir sie im gewachsenen Boden, in der Erde selbst vornehmen, wenn wir uns Rechenschaft darüber ablegen, wie groß das vom Wasser in unserem Kulturboden eingenommene Volumen ist; denn dann wissen wir erst, wieviel Wasser der Pflanze zur Verfügung steht, und wieviel Wasser der Pflanze im günstigsten Falle zur Verfügung stehen kann.

Heinrich¹⁾ dürfte zuerst eine Methode beschrieben haben, nach welcher die Wasserkapazität des gewachsenen Bodens ermittelt werden kann. Ich will dieselbe hier mit einer kleinen Abänderung wiedergeben.

Der Boden, dessen höchste Wasserkapazität bestimmt werden soll, wird zunächst mit Wasser in seiner natürlichen Lage gesättigt. Hierzu nimmt Heinrich einen runden Blechzylinder von 20 cm im Durchmesser und 40 cm Höhe. Der untere Rand desselben wird 1—2 cm tief in den Boden getreten. Er ist deshalb aus geschärftem starken Eisenblech hergestellt und außen in entsprechender Höhe mit zwei angenieteten Trittleisten versehen. Ziemlich tief im Innern des Zylinders befindet sich ein feines Sieb, welches einen mechanischen Einfluß des oben eingegossenen Wassers auf die Struktur des Bodens abhalten soll. Der Zylinder wird, nachdem er eingetreten ist, ganz voll Wasser gegossen. Hat sich das Wasser verzogen, so bedeckt man die benetzte Stelle mit einem unten mit Blech beschlagenen Holzdeckel, um die Verdunstung des Wassers zu vermeiden. Nach 24 Stunden sticht man einen ebenfalls 20 cm im Durchmesser fassenden Blechzylinder, welcher unten zugeschärft ist, an derselben Stelle 31,7 cm tief in den Boden ein. Trittleisten in der richtigen Höhe geben wieder die richtige Tiefe. Darauf macht man diesen Zylinder seitlich frei von dem Boden, so daß man am unteren Rand des Zylinders die in diesem befindliche Bodensäule durch ein scharfes Blech abstofsen und sodann mit dem Zylinder aufnehmen kann. Der Boden ist jetzt sofort

¹⁾ R. Heinrich, Grundlagen zur Beurteilung der Ackerkrume. Wismar 1882, S. 218 u. f.

auf einer Tarierrage zu wägen, auf Papier ausgebreitet an der Luft zu trocknen und nach einigen Tagen wiederum zu wägen. Ist das Gewicht bei wiederholtem Wägen leidlich konstant, so ergibt uns die Differenz der letzten von der ersten Wägung die in 10 l Boden vorhandene Wassermenge. Multiplizieren wir das in Kilogramm festgestellte Wassergewicht noch mit 10, so haben wir die Prozente, welche das Bodenwasser im Bodenvolumen einnahm.

Man kann auch gern bei den zur Untersuchung benutzten Zylindern andere Größenverhältnisse wählen. Sehr viel enger dürfen dieselben jedoch nicht sein, da sonst der Boden beim Einstoßen derselben zu sehr in seiner Lagerung verändert wird. Das Einstoßen sollte vielleicht zweckmäßiger unter gleichzeitigem vorsichtigem Drehen geschehen. Ist die Ackerkrume nicht so tief, so daß dann ein Einstoßen des Zylinders schwierig oder unmöglich wird, so wird man vielleicht halb so hohe Zylinder wählen und sodann das Wägeresultat mit 20 statt mit 10 multiplizieren.

Das vom Wasser eingenommene Bodenvolumen ist leider bislang meines Wissens nur von Ramann¹⁾ bestimmt worden, welchem das Verdienst gebührt, gerade die natürlichen Bodenverhältnisse hier in richtiger Weise gewürdigt zu haben.

Es mögen einige Versuchsergebnisse Ramanns folgen.

Tiefe der Bodenschicht	Vom Wasser eingenommene Prozente des Bodenvolumens von Diluvialsanden:					
	1. Profil	2. Profil	3. Profil	4. Profil	5. Profil (Düne)	6. Profil
0—11 cm	8,62	8,11	6,41	22,46	15,75	3,12
20—31 "	3,83	4,26	4,46	10,77	5,97	6,66
40—51 "	3,30	4,18	4,84	10,35	7,14	6,56
60—71 "	4,54	5,32	7,00	10,89	6,49	6,82
80—91 "	4,41	7,21	6,47	13,41	8,84	6,96

Daß natürlich diese Wasserverhältnisse des gewachsenen Bodens mit den Niederschlägen und der Verdunstung im Laufe des Jahres sehr wechseln, ist allgemein bekannt. Wie groß solche Differenzen bei dem Diluvialsande sein können, mögen die folgenden Zahlen zeigen.

(Siehe die Tabelle auf Seite 184.)

Aus den umstehenden Zahlen ersieht man, wie der Wassergehalt des Bodens gegen den Herbst zu abnimmt, während er im Frühjahr ein Maximum

¹⁾ E. Ramann, Untersuchungen über Waldböden; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. XI, S. 299. — Derselbe, Der Wassergehalt der Waldböden; Zeitschr. f. Forst- u. Jagdwesen XXVII. Jahrg., 1895, S. 334 u. f.

anzuweisen scheint. Die von dem sehr geringen Boden zurückgehaltenen Wassermengen sind nicht unbedeutend. Wäre die Hygroskopizität der einzelnen Bodenschichten bestimmt worden, so könnte man aus den Zahlen entnehmen, wieviel Wasser den Pflanzen noch zu der trockensten Jahreszeit zur Verfügung stand.

Tiefe der Bodenschicht	Vom Wasser eingenommene Prozente des Bodenvolumens:											
	2. Profil						5. Profil (Düne)					
	am 12. April	am 27. April	am 14. Mai	am 24. Mai	am 24. Juni	am 24. August	am 12. April	am 27. April	am 14. Mai	am 24. Mai	am 24. Juni	am 24. August
Oberfläche	14,35	10,18	10,24	5,06	2,76	13,69	14,51	15,10	8,12	8,63	3,83	14,39
20—30 cm	8,73	10,21	7,92	5,33	6,45	3,62	8,55	14,93	8,51	5,60	4,32	3,64
40—50 "	8,62	7,20	6,91	5,17	3,36	2,95	5,47	10,79	4,99	3,74	3,20	2,88
60—70 "	7,90	6,19	5,80	5,52	3,91	4,88	5,64	6,98	5,64	4,37	—	2,52
80—90 "	8,02	6,15	4,96	4,86	5,25	4,22	6,58	6,10	5,65	5,47	4,14	3,28
100—110 "	—	5,76	5,04	4,52	5,10	3,24	—	6,15	5,76	5,87	4,22	3,42
120—130 "	—	5,89	5,26	5,13	5,73	4,08	—	5,79	5,35	4,83	5,41	4,20
140—150 "	—	5,86	5,25	4,62	4,29	3,92	—	5,62	5,01	5,51	4,97	3,05
160—170 "	—	6,11	4,65	5,01	4,41	3,57	—	6,42	8,08	5,97	5,15	3,24
180—200 "	—	6,16	4,95	5,02	4,35	3,00	—	6,28	14,54	6,15	4,83	2,86

Will man die Beobachtungen über den Wassergehalt des Bodens weiter führen und von diesen auf die Vegetation und auf das Klima Schlüsse ziehen, so wird man auf den Ramannschen Versuchen weiterbauen müssen. Meines Erachtens wäre dies eine nach jeder Richtung hin durchaus dankbare Aufgabe, welche kaum experimentelle Schwierigkeiten bieten dürfte.

H. Rodewald-Kiel hat neuerdings bei einer Diskussion auf der Naturforscher-Versammlung in Breslau (landwirtschaftliche Abteilung) eine von ihm ausgearbeitete Methode erwähnt, welche berufen ist, uns einen sehr exakten Maßstab für die Wasserkapazität des *in Einzelkornstruktur* befindlichen Bodens abzugeben. Der Boden wird bei dem Verfahren mit Wasser gesättigt und sodann das Wasser mittelst Zentrifugalkraft herausgeschleudert. Je nach der Größe der angewandten Beschleunigung wird so der Boden verschieden große Wassermengen zurückhalten können. Da zwischen den im Boden zurückbleibenden Wassermengen und der Größe der Beschleunigung eine bestimmte einfache Gesetzmäßigkeit besteht, so kann man mit Hilfe einiger Beobachtungen die Konstanten für den einzelnen Boden und mit Hilfe dieser wiederum diejenigen Wassermengen berechnen, welche der Boden bei jeder beliebigen Beschleunigung zurückzuhalten ver-

mag.¹⁾ Da die Wasserkapazität des Bodens von der Gröfse und von der Form der festen Bodenteilchen abhängt, so dürfte es vielleicht möglich sein, auch mit Hilfe dieser Methode einen Anhalt für *die Form* des Hohlraumvolumens *bei der Einzelkornstruktur des Bodens* zu gewinnen. Ob diese Gröfse aber auch für die Krümelstruktur resp. für die Art des Hohlraumvolumens bei nicht engster Lagerung der festen Bodenteilchen irgend welche Bedeutung beanspruchen kann, muß der weiteren Forschung überlassen bleiben.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß der Einfluß der Form der festen Bodenteilchen auf das Hohlraumvolumen des Bodens, sobald die Gröfse der festen Bodenteilchen sehr klein, die Bodenoberfläche also sehr groß wird, vernachlässigt werden kann.

§ 33. Die Steighöhe des Wassers im Boden.

Von welchen Bedingungen die kapillare Steighöhe im Boden abhängt, haben wir früher betrachtet. Wir sahen, daß das Wasser um so höher im Boden steigen muß, je enger die kapillaren Hohlräume sind, je feiner also die Bodenteilchen oder je größer die hierfür in Betracht zu ziehende Bodenoberfläche ist. Ferner aber sahen wir auch, daß dann die Steighöhe des Wassers im Boden um so langsamer von dem Wasser erreicht werden muß, da dementsprechend die Reibung der Wassermoleküle an den festen Wänden eine größere wird. Die höchsten Steighöhen werden so am langsamsten erreicht werden.

Praktisch sind die Versuche fast stets in der Art angestellt worden, daß man den Boden in ein Glasrohr von 1,5—3,5 cm Durchmesser einfüllte, welches unten mit einem Leinwandlappen zugebunden wurde. Diese Glasrohre wurden darauf unten in ein Gefäß mit Wasser eingestellt und sodann das Emporsteigen des Wassers im Boden über das Niveau des in dem Gefäße befindlichen Wassers an einem Zentimetermaßstab gemessen. Das Ansteigen des Wassers läßt sich auf diese Weise nur gut beobachten, wenn der Boden in das Glasrohr fest eingefügt ist und sich so womöglich in Einzelkornstruktur (wie der Sand) befindet. Sobald Krümel vorhanden sind, werden diese durch das von unten aufsteigende Wasser zerstört, der Boden setzt sich im Rohre und die Bodensäule reißt ab, da der obere Boden durch die Feuchtigkeit, welche er bereits aufgenommen hat, am Rohre adhärirt und nicht nachrutscht.

Durch möglichst weite Rohre wird man das völlige Fehlschlagen des Versuches verhindern können, da sich dann der Zusammenhang der

¹⁾ Verfasser verdankt dies Nähere einer persönlichen Unterredung mit Rodewald. Die betreffende Methode und die Resultate derselben sind leider noch nicht im Druck erschienen.

Bodensäule durch Klopfen an das Glasrohr wieder herstellen läßt. Wie diese Beobachtungen zeigen, verändert das Aufsteigen des Wassers die Lagerung des Bodens und damit das Hohlraumvolumen desselben. Wir werden also auch dadurch andere Steighöhen erhalten müssen, als solche dem Zustande des Bodens, in welchem derselbe in die Glasröhren eingefüllt war, entsprechen würden. Einigermassen übereinstimmende Resultate werden wir nach dieser zuerst von Trommer¹⁾ angewandten Methode daher nur bei Bodenarten zu erwarten haben, die sich in Einzelkornstruktur befinden und sich dementsprechend stets möglichst gleichmäßig dicht lagern lassen.

Obwohl es nun nach der vorstehenden Methode nur bei sehr geringen Ausnahmen, wie wir später sehen werden, gelungen ist, die absolute Steighöhe des Wassers in einem Boden zu bestimmen, so war es doch möglich, mit Hilfe derselben eine ganze Reihe von Erscheinungen festzustellen, welche man bereits beim Aufsteigen des Wassers beobachten kann. So sollen die folgenden Versuchsergebnisse Wollnys²⁾ zunächst dartun, wie das Wasser in einem Boden um so langsamer aufsteigt, je höher dasselbe bereits gestiegen ist. Dies ist leicht dadurch zu erklären, daß einmal die Reibung des Wassers an der Bodenoberfläche resp. an den diese bedeckenden Wassermolekülen eine größere wird, und daß ferner das Gewicht der emporgehobenen Wassersäule immer schwerer wird. — Des weiteren läßt sich aus den folgenden Zahlen ersehen, daß das Wasser um so schneller in einem Boden ansteigt, je feiner die festen Bodenteilchen sind.

Dieser Befund scheint nach den Untersuchungen, welche schon vor Wollny v. Liebenberg,³⁾ v. Klenze⁴⁾ wie namentlich Edler⁵⁾ angestellt haben, für alle gröberen Bodenarten zutreffend zu sein. — Da man die verschiedenartigen Bodenkonstituenten nicht in die gleichen Feinheitsgrade zu bringen vermag, so läßt sich dieser Versuch nicht vergleichsweise für verschiedenartige Bodenbestandteile anstellen. So viel jedoch ist sicher, daß das Wasser in einem strengen Ton am langsamsten aufsteigt, obwohl oder gerade weil dieser die feinsten Bodenteilchen besitzt. Diese vermögen die Wasserteilchen so festzuhalten, daß eine Steighöhe manchmal überhaupt gar nicht festzustellen ist. Der Ton „verschleißt sich“ gegen das Wasser. Ich habe so früher bei Bestimmung der Benetzungswärme

¹⁾ C. Trommer, Die Bodenkunde. Berlin 1857, S. 268.

²⁾ E. Wollny, Unters. über die kapillare Leitung des Wassers im Boden: Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 7, S. 269 u. f.

³⁾ v. Liebenberg, l. c. Inaug.-Diss. Halle 1873.

⁴⁾ v. Klenze, l. c. Landw. Jahrb. 1877, S. 96 u. f.

⁵⁾ Wilhelm Edler, Die kapillare Leitung des Wassers in den durch den Schöneschen Schlämmapparat abgeschiedenen hydraulischen Werten. Inaug.-Diss. Göttingen 1882.

eines sehr strengen Javaner Tones große Schwierigkeiten gehabt. Brachte ich eine 2 cm hohe Schicht von fein pulverisiertem Ton in ein Benetzungsgläschen (Fig. 9, S. 55), welches sodann evakuiert wurde, und ließ ich ferner durch Abbrechen der Spitze des Glasdeckels Wasser in dies Vakuum einströmen, so wurde trotz des Vakuums stets nur die oberste Bodenschicht benetzt, während der untere Teil derselben trocken und feinpulverig blieb. Erst dadurch, daß ich diesen Boden in Krümelstruktur von ca. Erbsengröße überführte, war ein vollständiges Benetzen desselben ermöglicht worden.

Kapillare Steighöhe des Wassers (cm)										
nach	in Sand von einer Korngröße von							in Quarz	in Humus	in Ton
	0,01—0,071 mm	0,071—0,114 mm	0,114—0,171 mm	0,171—0,25 mm	0,25—0,5 mm	0,5—1,0 mm	1,0—2,0 mm			
1/4 Stunde . . .	11,2	17,5	11,2	11,0	8,5	4,6	3,0	4,8	4,0	1,4
1/2 Stunde . . .	18,5	22,5	12,6	12,4	9,5	4,8	3,0	8,7	6,0	2,0
1 Stunde . . .	27,5	27,5	15,0	14,2	10,2	5,2	3,1	16,4	9,2	3,0
3 Stunden . . .	43,9	34,6	16,4	16,5	11,9	6,0	3,4	26,0	14,0	5,3
6 Stunden . . .	57,1	38,0	17,5	19,0	13,0	6,7	3,6	37,4	19,0	7,2
9 Stunden . . .	65,6	40,5	18,3	20,0	13,6	7,2	3,9	44,0	21,4	9,2
1 Tage	89,0	43,5	23,0	22,0	15,0	8,1	4,4	63,5	27,8	15,0
2 Tagen	99,5	45,3	25,0	22,8	16,2	8,7	4,7	82,8	33,5	19,0
4 Tagen	—	47,0	26,0	24,0	16,9	9,1	5,0	—	37,0	31,0
6 Tagen	—	48,5	26,8	24,5	17,3	9,4	5,1	—	41,9	35,2
8 Tagen	—	49,2	27,5	25,1	17,9	9,9	5,6	—	45,4	39,0
11 Tagen	—	50,7	28,4	25,8	18,1	10,1	5,9	—	—	—

Der Befund Wollnys, daß das Wasser in einem Boden um so schneller aufsteigt, je feiner die festen Bodenteilchen sind, hat so nur beschränkte Gültigkeit. Er setzt voraus, daß die feinsten Bodenteilchen noch so groß sind, daß der Reibungswiderstand, welchen das Wasser beim Aufsteigen an denselben erleidet, nicht in Betracht gezogen zu werden braucht. Gelangt dieser Reibungswiderstand aber erst zur Wirkung, so muß das Wasser um so langsamer kapillar aufsteigen, je größer derselbe ist, je feiner also die Bodenteilchen sind. Dies tritt jedoch erst dann in die Erscheinung, wenn wir die Größe der festen Bodenteilchen nicht mehr feststellen können. Es erklärt sich hierdurch, daß Humus langsamer das Wasser leitet als Quarz, und Ton wieder langsamer als der Humus, wie dies aus den letzten Zahlenspalten der vorstehenden Tabelle ersichtlich ist; denn die für die Wasserleitung und für den Leitungswiderstand in

Betracht kommende äußere Bodenoberfläche ist beim Ton am größten, sodann beim Humus und beim Quarz am geringsten.

Des weiteren hat man die zuvor beschriebene Versuchsanordnung dazu benutzt, um den Einfluß der Temperatur und den Einfluß von gelösten Salzen auf die Steighöhe zu beobachten. Es verlohnt sich hier nicht, Resultate dieser Versuche wiederzugeben, zumal den betreffenden Versuchsanstellern¹⁾ nicht nur die Unsicherheit des Experimentes, sondern auch die physikalischen Grundlagen der Erscheinung Schwierigkeiten bereitet haben. Die verschieden lange Zeit, in welcher das Wasser in einem Boden bei verschiedener Temperatur desselben aufsteigt, hängt lediglich von der bei verschiedener Temperatur verschiedenen spezifischen Zähigkeit des Wassers ab. Dieselbe beträgt bei

0° C. = 100,0	20° C. = 56,2
5° C. = 84,6	25° C. = 49,9
10° C. = 73,3	30° C. = 44,9
15° C. = 63,6	

Dementsprechend muß das Wasser bei höherer Temperatur schneller kapillar aufsteigen, bei 25° C. also ungefähr noch einmal so schnell als bei 0° C.

Sind Salze in dem Bodenwasser, so haben diese natürlich nur so lange auf die Zähigkeit der Flüssigkeit einen Einfluß, als dieselben nicht von den festen Bodenteilchen absorbiert werden.²⁾ Will man somit diese Versuche mit Salzlösungen ausführen, so ist es notwendig, am Schluss des Versuches die Konzentration der Lösung von neuem festzustellen. Im übrigen verändert sich die kapillare Leitung je nach der spezifischen Zähigkeit (z) der betreffenden Salzlösung. Diese wird am zweckmäßigsten jedesmal festgestellt werden müssen; denn sie variiert sowohl mit der Temperatur wie mit der Konzentration. Für die Abhängigkeit der spezifischen Zähigkeit (z) von der Konzentration hat Arrhenius³⁾ uns die einfache Formel $z = A^x$ gegeben, in welcher A die spezifische Zähigkeit des Salzes bei der betreffenden Temperatur und x der Konzentrationsgehalt der Lösung in Volumprozenten ist.

Um einen Anhalt für den Einfluß der Salzlösungen auf die Leitungsgeschwindigkeit derselben im Boden zu geben, möge hier die spezifische Zähigkeit (A) einiger Salzlösungen folgen, welche ich ebenso wie die vorher

¹⁾ v. Klenze, l. c. Landw. Jahrb. 1877, S. 105—110. — E. Wollny, l. c. Bd. 7, S. 306—308, Bd. 8, S. 218 u. f.

²⁾ Vergl. auch S. Krakow, Über die Prozesse der Bewegung des Wassers und der Salzlösungen im Boden; Journ. f. Landw. Bd. 48. 1900. S. 209 u. f.

³⁾ Svante Arrhenius, Über die innere Reibung verdünnter wässriger Lösungen; Zeitschr. f. physik. Chemie Bd. 1, S. 285.

für das Wasser gegebenen Zahlen den physikalischen chemischen Tabellen von Landolt und Börnstein entnehme:

Spezifische Zähigkeit (A) einiger Salzlösungen bei 25° C.

Salpetersaurer Kalk	1,117	Salpetersaures Kalium	0,975
Chlorkalk	0,978	Schwefelsaures Kalium	1,105
Chlorkalium	0,987	Schwefelsaure Magnesia	1,367
Chlormagnesia	1,202	Salpetersaures Natrium	1,066
Chlornatrium	1,097	Schwefelsaures Natrium	1,229

Von den vorstehenden Salzen werden also die drei, deren spezifische Zähigkeit kleiner als 1,000, d. h. kleiner als die des Wassers ist, ein schnelleres Ansteigen der Flüssigkeit im Boden bewirken müssen, alle anderen werden den kapillaren Aufstieg verlangsamen.

Die kapillare Steighöhe des Wassers im Boden läßt sich nur bei denjenigen Bodenarten (Sandarten) mit Hilfe der eingangs beschriebenen Methode bestimmen, bei denen die Reibung des Wassers an den festen Bodenteilchen im Verhältnis zur Kapillarkraft verschwindend klein ist, d. h. bei denen das Wasser noch schneller aufsteigt als bei den nächst größeren Bodenarten. Ist die Reibung bei dem kapillaren Aufstieg erst bemerkbar, so wird das Wasser seine höchste Steighöhe erst nach sehr langer Zeit erreichen.

Bei jedem Kulturboden, welcher derartig feine Bestandteile enthält, daß das Hohlraumvolumen im Verhältnis zu seiner Oberfläche so klein wird, daß die Reibung der Wassermoleküle an der Oberfläche bemerkbar macht, werden wir also die Steighöhe nicht mehr messen können. Das Wasser steigt in diesem so langsam an, daß es z. B. nach meinen Beobachtungen im zweiten halben Jahre nur um 0,5—1,0 cm höher geht. Unterdes verändert sich aber der Boden, es fangen Algen an zu vegetieren und Bakterien bewirken bei Humussubstanzen durch Gasbildungen, daß die kapillar gehobene Wassersäule ihre Kontinuität einbüßt. Die höchste Höhe, bis zu der man das Wasser in dieser Weise kapillar ansteigen liefs, wird wohl 2 m nicht überschritten haben. — Dies ist die Steighöhe des Wassers, welche allein vom pflanzenphysiologischen Standpunkte aus zu berücksichtigen ist.

Von theoretischem Interesse aber dürfte es sein, sich eine Vorstellung davon zu machen, wie groß die Steighöhe des Wassers im Boden würde, wenn sie sich unbehindert durch die Reibung des Wassers an den festen Bodenteilchen ausbilden könnte. Experimentell können wir dieser Aufgabe nur dadurch näher treten, daß wir dieser Reibung durch eine andere Kraft entgegenwirken.

Im ersten diesbezüglichen Versuch habe ich derart ausgeführt, daß ich an einem Glasrohre von 2,5 m Länge und 4,5 cm lichtem Durchmesser,

dessen beide Glasränder umgelegt waren, eine Öffnung mit einem Korken verschloß, sodann dasselbe mit destilliertem Wasser füllte und in *kleinen* Portionen unter Wasser aufgeschlämmten Boden einfüllte. Um ein Entmischen des Bodens hierbei möglichst zu vermeiden, liefs ich denselben langsam an der Wand des geneigten Glasrohres heruntergleiten. War das Rohr so mit Boden gefüllt, so wurde es an seinem offenen Ende mit einem Leinwandlappen verschlossen, sodann umgedreht und mit dem Leinwandlappen zu unterst senkrecht in Wasser eingestellt. Nachdem nunmehr der Korken oben entfernt war, sank das Wasser in dem Rohre. Da jetzt das zuviel emporgehobene Wasser mit seinem Gewicht der Reibung entgegenwirkte, so sank der Wasserspiegel dementsprechend schneller. Die dem Wasser von oben nachdringende Luft bewirkte eine totale Reflexion des Lichtes an der Glaswand, so dafs man darin ein Merkmal für das Sinken des Wasserspiegels hatte. Das Wasser muß bei diesem Versuch so weit sinken, bis die Kapillaritätskraft das weitere Sinken inhibiert, d. h. bis die Steighöhe erreicht ist. Da natürlich so in den weiten Kapillaren im Boden das Wasser am tiefsten sinkt, so wird man die Steighöhe des Wassers gerade in den weitesten Hohlräumen auf diese Weise feststellen. Diese Versuche gaben natürlich bei Sand ebenso wie die vorigen schnelle und gute Resultate, bei kohlensaurem Kalk und bei Lehm aber sank das Wasser gar nicht herab. Die kapillare Steighöhe dieser Substanzen mußte demnach gröfser sein als 2,5 m. Höhere Steigrohre anzuwenden war unmöglich, und so suchte ich statt des Wasserdrucks mit Luftdruck der Reibung der Flüssigkeit an den festen Wänden entgegenzuwirken.

Statt die Kraft zu messen, welche ein Meniskus haben muß, um eine Wassersäule von bestimmter Höhe zu tragen, kann man ebensogut die Kraft messen, welche erforderlich ist, diesen Meniskus zu zerstören, d. h. das Wasser auf das alte Niveau herabzudrücken. Hierzu diente mir der in der nebenstehenden Figur wiedergegebene einfache Apparat (Fig. 31).

Er besteht aus einem weiten Biegerohr (*a*), welches als Manometer dient, und einem daran angesetzten ca. 1,5 cm weiten Ansatzrohr (*b*), dessen Rand unten umgelegt wurde. Kurz vor der Ansatzstelle ist noch ein kleines Biegerohrstück (*c*) angesetzt, dessen freie Öffnung mit einem dickwandigen Schlauch versehen wurde, der mit einem Quetschhahn verschlossen werden kann. Es wird in das weite Rohr ein Wattebausch (*d*) eingeführt und sodann der zu untersuchende Boden (*e*) hineingebracht, worauf das Rohr unten mit einem Leinwandläppchen und mit einem passenden Drahtnetz (*f*) verschlossen wird. Darauf wird in den freien Schenkel des Manometers Wasser resp. Quecksilber eingefüllt, bis beide ungefähr je 50 cm langen Schenkel gut zur Hälfte damit angefüllt sind, und hierauf die freie Öffnung verschlossen. So stellt man den Apparat in eine Schale mit Wasser und saugt dieses von *c* aus langsam in den Boden hinein. Hat sich der

Boden dann unter Wasser abgesetzt — unter Umständen ist gleich ein Einschlämmen desselben vorzuziehen — so gibt man von c aus langsam einen Überdruck hinein, bis das Wasser über dem Boden verschwunden ist. Jetzt öffnet man den freien Schenkel des Manometers und gibt durch c einen so großen Überdruck, daß die Flüssigkeit des Manometers bis fast an die Öffnung des freien Schenkels steigt. Der Druck und somit das Manometer wird nun allmählich sinken, bis demselben die Menisken im Boden das Gleichgewicht halten.

Alsdann liest man die Druckhöhe ab, welche der kleinsten Steighöhe in dem Boden entsprechen wird. Es empfiehlt sich nicht, den Druck so zu steigern, daß Luft durch den Boden durchgepreßt wird, da einmal die Hohlräume unten durch die Blasenbildung anormal erweitert werden und ferner der ganz nasse Boden unten im Wasser flutet, d. h. sich leicht verschiebt.

Man muß dementsprechend zu zu kleinen und inkonstanten Werten gelangen.

Läßt man unten keine Luftblasen austreten, so kommt man andererseits zu Werten, welche dadurch fehlerhaft sind, daß noch eine geringe Steighöhe im Boden vorhanden ist, die man nicht mit bestimmt. Ich halte jedoch diesen Fehler nur für beachtenswert bei größeren Sandarten.

Ich habe den vorstehend beschriebenen Apparat nur für Sandarten benutzt und kam schon hier zu dem Resultat, daß, wenn ich das Manometer mit Quecksilber füllte, ein Druck von 54 cm nicht ausreichte, um das Wasser aus den weitesten Kapillaren eines aus Fürstenwalde stammenden Formsandes herauszupressen. Die kapillare Steighöhe in diesem Sande

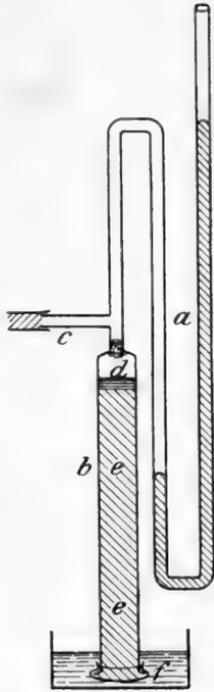


Fig. 31. Steighöhenmesser.

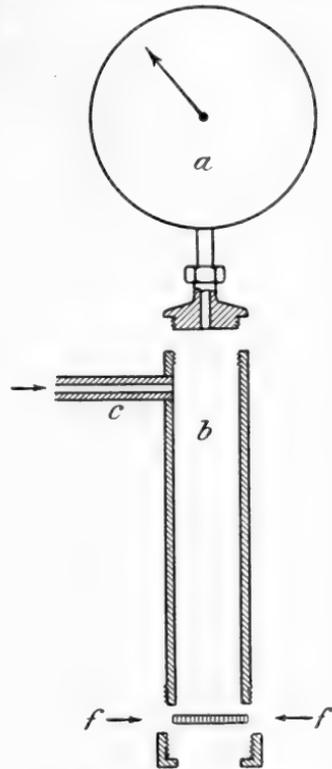


Fig. 32. Steighöhenmesser.

würde somit wenigstens $54 \cdot 13,5 = 7,29$ m betragen. Wenn demnach dieser Apparat auch noch nicht gestattet, die höchsten Steighöhen zu messen, so dürfte er doch insofern instruktiv sein, als er bei verschiedener Einstellung durch den wechselnden erforderlichen Druck zeigt, wie verschieden sich diese weitesten Menisken in den verschiedenen Höhen der Bodensäule gestalten. Um noch größere Steighöhen bestimmen zu können, liefs ich mir nach dem gleichen Prinzip einen Apparat aus Messing anfertigen (Fig. 32). Das Quecksilbermanometer wurde hier durch ein Federmanometer (*a*) ersetzt, welches bis 15 Atmosphären Druck anzeigt, mithin eine Steighöhe des Wassers von 154 m zu bestimmen gestattet. Das Leinwandläppchen wurde durch eine gebrannte Tonplatte (*f*) ersetzt. Bei dem Ansatzstück (*c*) konnte der Überdruck eingeleitet werden. Das Messingrohr (*b*) war zur Aufnahme des nassen Bodens bestimmt. Es wurde die Tonplatte natürlich gleichfalls mit Wasser gesättigt und in Wasser gestellt. Bislang vermochte ich den Druck nur bis auf 3,5 Atmosphären zu steigern, da mir zur weiteren Steigerung desselben die erforderlichen Hilfsmittel fehlten. Doch schon hierbei stellte sich heraus, dafs dieser Druck nicht imstande war, die Wasser-menisken aus der gebrannten Tonplatte herauszupressen; mithin mußte schon in gebranntem Ton die Steighöhe des Wasser über 36 m betragen.

In den bisher besprochenen Versuchen lag der Wunsch vor, die kleinste und die größte Steighöhe des Wassers im Boden experimentell zu bestimmen. Für homogenes gleichartiges Material, wie z. B. Sand, kohlen-saurer Kalk und reine Tonsubstanz, fallen beide Steighöhen zusammen, sofern diese Substanzen in allen Schichten gleichartig gelagert sind. Wie wir aber zuvor in § 31 sahen, hat für diese Substanzen auch unsere Kapillaritätsgleichung

$$h = \frac{a^2 \cdot F}{2w_c}, \quad (18)$$

in welcher *h* die Steighöhe, *F* die Oberfläche, *w_c* die Wasserkapazität und *a²* die Kapillaritätskonstante des Wassers war, ihre Gültigkeit. Da nun die letzte dieser Gröfsen bekannt ist (= 0,15), die anderen sich nach früher angegebenen Methoden experimentell feststellen lassen, so dürfte es wohl von Interesse sein, die mittleren Steighöhen solcher Substanzen zu berechnen.

Wir kommen hier zu den folgenden Resultaten:¹⁾

Substanz:	<i>F</i> qcm pro g	<i>w_c</i> g H ₂ O pro g	<i>h</i> cm	<i>h</i> km
Reiner kohlen-saurer Kalk .	154 280	0,871	13 285	0,13
Reiner Kaolinton	726 740	1,260	43 260	0,43
Ausgeschlämmter Lehmton	1 989 400	0,713	209 200	2,09
Strenger Ton aus Java . .	5 671 820	1,392	305 700	3,06

¹⁾ Alfred Mitscherlich, Unters. über die physikalischen Bodeneigen-schaften; Landw. Jahrb. 1901, S. 421.

Diese Steighöhen sind ganz außerordentlich groß, und man kann so sehr wohl verstehen, daß die bislang mit Kalk und Ton gemachten Steighöhenbestimmungen zu keinem Resultate führen konnten. Andererseits ist es hierdurch aber auch erklärlich, daß der Reibungswiderstand, welchen das Wasser an der Oberfläche solcher Bodenarten findet, so groß wird, daß in der Tat keine Steighöhe mehr beobachtet werden kann.

Bei unseren gewachsenen Kulturböden dürfte nur ein Versuch vorliegen, welcher uns ein Bild davon geben kann, wie das Wasser in einem Diluvialsande kapillar aufsteigt.

Es mögen die Beobachtungen hier wiedergegeben werden:

Tiefe der Bodenschicht	Wassergehalt eines Diluvialsandes in Volumprozenten ¹⁾ am				
	27. April	14. Mai	24. Mai	24. Juni	24. August
Oberfläche	13,34	23,28	7,79	9,99	8,88
20—30 cm	10,43	8,97	5,20	5,48	3,97
40—50 "	7,04	8,19	4,79	4,36	2,55
60—70 "	4,96	6,93	5,62	5,15	2,66
80—90 "	9,36	7,39	6,35	6,15	3,53
100—110 "	8,65	16,21	8,28	10,87	3,75
120—130 "	6,92	23,27	20,52	14,04	4,16
140—150 "	?	24,37	24,52	24,05	4,62
160—170 "	27,80	25,03	25,83	25,20	10,09
180—200 "	29,65	26,30	27,10	31,10	16,85

Die unterste Schicht ist hier offenbar auch noch keineswegs mit Wasser gesättigt. Es ist deshalb bedauerlich, daß nicht noch tiefere Bodenschichten auf ihren Wassergehalt hin untersucht wurden. Im allgemeinen scheint im vorliegenden Falle das Grundwasser dem Boden stets noch bis zu einer Höhe von 80 cm unter der Erdoberfläche Wasser zugeleitet zu haben, was, wenn wir den Boden bei 2 m Tiefe als mit Wasser gesättigt betrachten, einer Steighöhe von 1,20 m entsprechen würde.

Auch bei der Bestimmung der Steighöhe des Wassers im Boden muß uns wieder die Frage beschäftigen, welchen Einfluß die Temperatur und eventuell im Wasser gelöste Salze²⁾ auf die absolute Größe derselben

¹⁾ E. Ramann, l. c. Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 11. S. 327.

²⁾ Experimentelle Versuche konnten hier keine einwandfreien Resultate ergeben, so die von Emanuel Groß, Über den Einfluß der künstlichen Düngemittel auf das Verhalten des Wassers im Boden; Zeitschrift für das landwirtschaftliche Versuchswesen in Österreich Bd. VI, 1903, S. 80 u. f.

auszuüben vermögen. Wie wir zuvor sahen, wird zwischen den gleichen festen Wänden die Steighöhe lediglich durch die Kapillaritätskonstante der Flüssigkeit bestimmt; denn

$$r \cdot h = a^2; \quad (15)$$

r soll konstant sein, folglich variiert h nur mit a^2 . Eine Übersicht über die Kapillaritätskonstanten wird uns so unsere Frage beantworten. Ich entlehne dieselben wiederum den Tabellen von Landolt und Börnstein.

Kapillaritätskonstanten (a^2) einiger Flüssigkeiten in qmm.

Von Wasser	von 0° C. = 15,41
„ „	„ 5° „ = 15,26
„ „	„ 10° „ = 15,13
„ „	„ 15° „ = 14,98
„ „	„ 20° „ = 14,84
„ „	„ 25° „ = 14,70
„ „	„ 30° „ = 14,56
„ einer Chlorkaliumlösung	„ 0° „ = 13,71
„ „ Kaliumkarbonatlösung	„ 0° „ = 14,16
„ „ Siliziumchloridlösung	„ 0° „ = 3,01.

Aus den Zahlen ist zu entnehmen: Je höher die Temperatur des Bodens ist, um so geringer muß die kapillare Steighöhe des Wassers in dem Boden sein; dieselbe wird so bei 27° C. um ungefähr 5% niedriger sein müssen als bei 0° C. Des ferneren ergibt sich aus den Zahlen, daß durch die Lösung von Salzen die Steighöhe des Wassers im Boden geringer wird.¹⁾ Dies hängt jedoch ganz von der Salzart und von der Konzentration der Lösung ab. Auf die Gesetzmäßigkeiten, welche zwischen der Kapillaritätskonstanten und der Temperatur der Flüssigkeit einerseits und ferner zwischen der Kapillaritätskonstanten und der Konzentration einer Salzlösung andererseits existieren, kann ich hier nicht näher eingehen.

§ 34. Die Durchlässigkeit des Bodens für Wasser.

Die Menge Wasser, welche in der Zeiteinheit durch einen Boden fließt, wird bedingt durch den Querschnitt des Hohlraumvolumens des Bodens und ist somit eine bei jedem Boden sowohl wie auch bei jeder Lagerung eines und desselben Bodens verschiedene Größe. Ferner ist sie abhängig von der Reibung, welche das Wasser an der Oberfläche der festen Bodenteilchen erleidet, durch welche das Wasser hindurchfließt, und somit von der Gestalt des Hohlraumvolumens, sodann von der Länge der Boden-

¹⁾ Erwin Blanck, Über die Diffusion des Wassers im Humusboden; Landw. Versuchs-Stationen LVIII, 1903, S. 145. findet so, daß Humussäuren im Boden die Wasseraufnahme verzögern.

säule, und endlich wird sie durch den Druck bestimmt, unter welchem das Wasser durch den Boden durchgeprefst wird.

Haben wir einen Boden, dessen ganzes Hohlraumvolumen mit Wasser gesättigt ist, so sind die Beziehungen zwischen diesen Größen verhältnismäßig leicht zu übersehen. Wir wollen hierfür zur leichteren Veranschaulichung erst die Versuchsanordnung und die experimentellen Resultate von v. Welitschkowsky¹⁾ und von Wollny²⁾ folgen lassen.

Das Versuchsmaterial befindet sich in einem zylindrischen Gefäße, welches unten mit einem feinen Drahtnetz verschlossen ist und oben in eine Muffe ausläuft. Oberhalb der Muffe kann man noch mehrere gleichartige Röhren von gleicher Länge nacheinander aufsetzen, um die Bodensäule dementsprechend zu verlängern. An den Einsatzstellen werden dieselben luftdicht eingekittet. In die Muffe der obersten dieser Röhren legt man ein feines Drahtnetz und setzt darauf ein passendes Glasrohr ein, welches alle 10 cm eine Ausflußöffnung besitzt, die man mit Korken verschließen kann. Oben läßt man in das Rohr Wasser einfließen. Dieser Wasserzufluß von oben darf nicht viel stärker sein als der Wasserabfluß aus dem Boden, so daß das überschüssige Wasser durch denjenigen Ausfluß abgehen kann, welcher in der Höhe offen gelassen ist, in der man die über dem Boden stehende Wassersäule konstant halten will. Das durch den Boden abfließende Wasser kann man durch einen Glastrichter in einen entsprechenden Mefszylinder einlaufen lassen.

Es mögen hier zunächst die Resultate, welche Welitschkowsky gefunden hat, folgen.

(Siehe die Tabelle auf Seite 196.)

In den umstehenden Zahlen ist mit l die Höhe der Bodenschicht und mit h die Höhe der über der Bodenschicht befindlichen Wassersäule bezeichnet. Für den vorliegenden Fall hat Poiseuille³⁾ das Gesetz gefunden, daß die Ausflußmenge des Wassers in der Zeiteinheit m proportional ist dem Wasserdruck $(l + h)$ und umgekehrt proportional der Höhe der Bodensäule, also

$$m = \alpha \frac{l + h}{l}.$$

Zerlegen wir die rechte Seite dieser Gleichung in zwei Teile, so ergibt sich die Formel:

¹⁾ D. v. Welitschkowsky, Experimentelle Untersuchungen über die Permeabilität des Bodens für Wasser; Archiv für Hygiene 2. Bd., 1884, S. 499—510.

²⁾ E. Wollny, Untersuchungen über die Permeabilität des Bodens für Wasser; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 14, S. 13 u. f.

³⁾ Mem. prés. Tome 9 Paris 1846.

Bei Sandarten geforderte Wassermengen in Liter pro Minute:																
<i>l</i> cm . . .	100	75	50	25	100	75	50	25	100	75	50	25				
	<i>h</i> cm	Korngröße des Sandes 0,33—1 mm				Korngröße des Sandes 1—2 mm				Korngröße des Sandes 2—4 mm				Korngröße des Sandes 4—7 mm		
10	0,096	0,098	0,106	0,131	1,011	1,103	1,172	1,376	6,435	6,618	6,747	7,288	11,015	11,365	11,703	12,791
20	0,105	0,109	0,123	0,175	1,093	1,245	1,351	1,767	6,849	7,143	7,463	8,570	11,650	12,206	12,872	14,909
30	0,112	0,121	0,141	0,216	1,176	1,386	1,529	2,135	7,237	7,681	8,178	9,841	12,285	13,065	14,049	—
40	0,119	0,133	0,160	0,259	1,263	1,525	1,711	2,511	7,630	8,205	8,889	11,110	12,920	13,962	15,191	—
50	0,126	0,144	0,179	0,306	1,349	1,671	1,886	2,882	8,034	8,742	9,594	12,398	13,555	14,775	16,347	—
60	0,135	0,155	0,198	0,348	1,436	1,814	2,065	3,259	8,425	9,281	10,293	13,673	14,190	15,633	—	—
70	0,143	0,167	0,218	0,390	1,525	1,959	2,252	3,639	8,823	9,806	11,012	14,939	14,825	16,473	—	—
80	0,151	0,178	0,237	0,435	1,613	2,099	2,422	4,014	9,217	10,320	11,705	16,190	15,462	—	—	—
90	0,159	0,189	0,255	0,477	1,702	2,240	2,598	4,386	9,615	10,837	12,426	—	—	—	—	—
100	0,167	0,201	0,273	0,521	1,789	2,385	2,776	4,759	10,015	11,340	13,137	—	—	—	—	—
<i>k</i>	0,0008	0,0011	0,0018	0,0043	0,0086	0,0143	0,0179	0,0376	0,0398	0,0525	0,0710	0,1272	0,0635	0,0835	0,1161	0,2118
α	0,087	0,089	0,090	0,089	0,923	0,956	0,992	1,003	6,039	6,110	6,039	6,027	10,380	10,586	10,549	10,673
α im Mittel	0,089				0,969				6,054				10,547			

$$m = \alpha \frac{l}{l} + \frac{\alpha \cdot h}{l}$$

oder

$$m = \alpha + \frac{\alpha}{l} \cdot h.$$

Bei ein und derselben Höhe der Bodenschicht (l) wird $\frac{\alpha}{l}$ konstant (k) und die Gleichung geht in die Form

$$m = \alpha + k \cdot h$$

über.

Die Größen α und k lassen sich leicht aus den vorher mitgeteilten Zahlen berechnen. Man findet k durch Subtraktion zweier in vertikaler Reihe stehender Zahlen und durch Division der Differenz durch den Höhenunterschied des Wasserspiegels. Die Rechnung vollzieht sich nach der Gleichung:

$$m_1 = \alpha + k \cdot h_1$$

$$m_2 = \alpha + k \cdot h_2$$

$$\frac{m_1 - m_2 = k(h_1 - h_2)}{m_1 - m_2 = k(h_1 - h_2)}$$

oder

$$k = \frac{m_1 - m_2}{h_1 - h_2}.$$

In derselben entsprechen m_1 und h_1 und ferner m_2 und h_2 je denselben Beobachtungen.

Die für jeden Boden und für jede Lagerung typische Konstante α , welche vollkommen unabhängig von der Höhe der Bodenschicht ist, ergibt sich dann direkt aus einer Beobachtung

$$\alpha = m - k \cdot h.$$

Wie aus den Werten, welche ich so aus den Welitschkowskyschen Resultaten berechnen konnte, hervorgeht, war α in der Tat unabhängig von der Höhe der Bodenschicht und für die einzelnen Bodenarten konstant. Bei den Wollnyschen Versuchen ist k in den einzelnen Fällen, wo es theoretisch dasselbe sein soll, stets numerisch konstant gefunden worden. α hingegen variiert sehr, da es Wollny bei dem feineren Bodenmaterial, mit welchem er seine Versuche anstellte, offenbar nicht gelang, den Boden in den einzelnen vergleichbaren Fällen gleichmäßig zu schichten, und da für den absoluten Wert der Konstanten α die dichteste Schicht in einer Bodensäule maßgebend ist. Dennoch seien die von mir aus den Wollnyschen Zahlen berechneten Werte hier mit wiedergegeben, um zu zeigen, innerhalb welcher Grenzen die Konstanten bei verschiedenen Bodenarten schwanken.

(Siehe die Tabelle auf Seite 198.)

Auffallend ist die geringe Wasserdurchlässigkeitskonstante bei dem Kaolin, welche angenähert null ist. Da nun, wie wir vorher sahen, für die Wasserdurchlässigkeit einer Bodensäule die engst gelagerte Schicht maßgebend ist, so muß u. a. auch schon eine sehr dünne Tonschicht, sobald

Konstanten für die Permeabilität verschiedener Bodenarten für Wasser.

Bodenart:	Korndurchmesser mm	Höhe der Bodenschicht:					
		10 cm		20 cm		30 cm	
		α	k	α	k	α	k
Für Quarzsand	0,010—0,071	0,206	0,003 8	0,176	0,001 1	0,148	0,000 3
	0,071—0,114	1,490	0,070 4	1,426	0,029 8	1,272	0,015 3
	0,114—0,171	14,995	0,559 4	13,895	0,252 2	12,541	0,137 1
	0,171—0,250	13,760	1,581 0	15,366	0,841 3	15,245	0,543 3
	0,25—0,50	22,580	3,536 0	25,511	2,151 3	26,698	1,528 8
	0,5—1,0	71,60	8,890	73,05	5,870	73,46	4,632
	1—2	178,13	13,33	152,15	10,46	144,22	9,35
	0,01—2,00	1,985	0,088 7	1,931	0,035 1	1,705	0,019 7
Für Kalksand	0,010—0,071	0,173	0,004 7	0,153	0,001 7	0,130	0,000 8
	0,071—0,114	1,425	0,062 5	1,334	0,026 8	1,165	0,015 9
	0,114—0,171	7,887	0,158 7	6,937	0,057 9	6,062	0,025 4
	0,171—0,250	17,046	0,310 1	14,439	0,170 6	12,842	0,095 7
	0,010—0,250	1,271	0,063 4	1,260	0,025 9	1,085	0,016 0
Für Kaolin		0,0106	0,000 42	0,0060	0,000 25	0,0000	0,0000 01
Für Torf	0,010—0,114	0,0181	0,000 54	0,0154	0,000 20	0,0112	0,0000 07
	0,010—0,25	0,0230	0,008 45	0,0437	0,003 82	0,0302	0,002 19

diese kontinuierlich fest eingelagert ist, die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens stark herabmindern.

So verminderten derartige sich dichter lagernde Substanzen, welche in einer Schicht von 1—5 cm in die Mitte einer 20 cm hohen Bodensäule eingebracht wurden, die Durchlässigkeit dieses Bodens nach Versuchen von Wollny in folgender eklatanter Weise:

Bodenart	Einlagerung cm	Über- stehen- der Wasser- druck cm	Ge- förderte Wasser- menge in l in 10 Std.	Bodenart	Einlagerung cm	Über- stehen- der Wasser- druck cm	Ge- förderte Wasser- menge in l in 10 Std.		
Torf, 0,171—0,250 mm	kohlens. Kalk in einer Schicht von	0	50	22,053	Quarzsand, 0,5—1,0 mm	Lehm pulver- förmig in einer Schicht von	0	50	366,561
		1	50	6,653			1	50	7,431
		3	50	2,772			3	50	0,224
		5	50	3,431			5	50	0,142
Quarzsand, 0,25—0,50 mm	Kaolin in einer Schicht von	0	100	240,641	Quarzsand, 0,5—1,0 mm	Eisenoxyd in einer Schicht von	0	50	366,561
		1	100	29,280			1	50	1,332
		3	100	24,390			3	50	0,415
		5	100	2,050			5	50	0,376

Sahen wir nun schon vorher, wie auch bei Besprechung der Steighöhen, daß strenger Ton ganz undurchlässig für Wasser wird, so zeigen diese Versuche, daß hierzu schon eine außerordentlich geringe Schicht genügt. Hierdurch ist erklärlich, daß solche Tonschichten, wenn sie auch nur 5 cm stark sind, das Bett für unsere unterirdischen Wasserläufe abgeben müssen, welche im Sande dahinfließen, und ferner, daß der unterirdische Strom (resp. beim Brunnen der Zuflufs) um so größer sein muß, je stärker einmal das Gefälle dieser Tonschichten ist und je durchlässiger ferner der Sand für Wasser ist, d. h. je grobkörniger derselbe ist.

Daß ein Boden, der sich in Krümelstruktur befindet, durchlässiger ist als ein anderer, insofern er weitere Hohlräume besitzt, und daß ferner Steine die Durchlässigkeit des Bodens vermindern, insofern sie das Hohlraumvolumen verringern, glaube ich nicht erst durch Versuchsergebnisse¹⁾ bekräftigen zu brauchen.

Für die Durchlässigkeit eines und desselben Bodens bei verschiedener Temperatur sowie bei Gegenwart wasserlöslicher Salze sind die früher bei der Schnelligkeit des Aufsteigens des Wassers im Boden angeführten Momente maßgebend.

¹⁾ E. Wollny, l. c. Bd. 14, S. 27, 28.

Für verschiedene Bodenarten ist die Durchlässigkeit für Wasser von Flügge¹⁾ bestimmt worden. Derselbe stampfte den zu untersuchenden Boden in glasierte Tonröhren von 1 m Länge und 160—170 qcm Oberfläche fest ein, liefs das Wasser 1 cm überstehen und mafs die Filtratmenge pro Minute und Kubikzentimeter. Er fand hierbei für

reinen groben Kies unmeßbar groß	1 Teil Kies + 2 Teile Sand +	
feinkörnigen Sand I . . . 103,0	1 Teil Lehm	7,4
„ „ II . . . 87,3	1 Teil Sand I + 1 Teil Lehm	2,1
feinsten Sand 25,7	Lehm und Ton	0,0.
3 Teile Sand + 1 Teil Lehm	15,5	

Versuche über die Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser von oben in den Boden eindringt, wurden zuerst von v. Liebenberg²⁾ und v. Klenze³⁾ ausgeführt. Ersterer schichtete über eine trockene Bodensäule eine Wasserschicht von 1 Zoll und beobachtete die Geschwindigkeit, mit welcher dies Wasser vom Boden aufgenommen wurde. Letzterer hielt über dem Boden eine Wasserschicht von 1 cm konstant und beobachtete so das Eindringen des Wassers in denselben. Die Beobachtungen sind leider infolge der Unmöglichkeit, den Boden in ein Rohr gleichmäfsig einzuschütten, so sprunghaft, dafs sich eine Gesetzmäfsigkeit aus denselben nicht ableiten läfst. Bekanntlich hängt die Geschwindigkeit (v), mit welcher das Wasser aus einer Öffnung ausfliefst, von der Höhe der Wassersäule (h) und von der Beschleunigung (g) in folgender Weise ab:

$$v = \sqrt{2g \cdot h}.$$

Diese Gesetzmäfsigkeit muften wir auch im vorliegenden Falle wiederfinden.

Bei allen bislang besprochenen Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Bodens für Wasser stand eine verschieden hohe Wasserschicht stets über dem Boden in der gleichen Höhe. Die für diese Annahme besprochenen Verhältnisse werden nun sofort andere, sobald das Wasser ganz in den Boden eindringt. In dem Augenblick, wo das geschieht, bilden sich wieder die Menisken in den Hohlräumen und die Kapillaritätskräfte treten somit in Wirksamkeit. Versuche von Wollny⁴⁾ wurden in der Art an gestellt, dafs auf eine Bodensäule, welche oben mit einem feinen Draht-

¹⁾ C. Flügge, Die Bedeutung von Trinkwasseruntersuchungen für die Hygiene: Zeitschrift für Biologie Bd. 13, 1877, S. 465.

²⁾ A. v. Liebenberg, Über das Verhalten des Wassers im Boden. Inaug.-Diss. Halle 1873.

³⁾ v. Klenze, l. c. Landw. Jahrb. Bd. 6, 1877, S. 113 u. 114.

⁴⁾ E. Wollny, Untersuchungen über die kapillare Leitung des Wassers im Boden; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 7, S. 269 u. f., und zweite Mitteilung; ebenda Bd. 8, S. 206 u. f.

netz bedeckt war, kontinuierlich Wasser tropfte, und zwar wurde hierbei besonders darauf geachtet, daß das Wasser nie über dem Boden überstand. Wollny beobachtete nun die Geschwindigkeit, mit welcher jetzt das Wasser in den Boden eindrang. Ich lasse einen Auszug aus den Beobachtungsreihen hier folgen:

Eindringen des auftropfenden Wassers in den Boden (in cm).

Nach Std.	Quarzsand			Quarzsand			Lehm- pulver < 0,25 mm	Lehm- krümel		Boden- konstituenten		
				locker	dicht	sehr dicht		0,5—1 mm	6,75—9 mm	Quarz	Hu- mus	Ton
	0,01 bis 0,071 mm	0,071 bis 0,114 mm	0,114 bis 0,175 mm	0,01—0,071 mm								
0,5	23,5	58,0	100+	14,0	11,0	9,9	6,9	12,0	12,3	8,8	3,2	3,0
1	35,0	97,5	—	20,3	15,5	14,2	10,9	25,7	24,8	13,0	4,6	3,9
2	52,0	—	—	31,2	22,4	20,4	15,4	51,9	49,5	19,5	6,2	5,0
4	76,0	—	—	47,5	33,0	29,0	22,6	100,2	99,9	24,8	8,4	6,6
ca. 7	100+	—	—	69,2	44,2	38,8	27,9	—	—	39,2	12,9	9,8
„ 10	—	—	—	80,0	54,9	46,0	34,9	—	—	47,0	16,4	10,9
„ 24	—	—	—	—	80,0	67,7	57,1	—	—	65,7	18,3	17,0
„ 48	—	—	—	—	—	80+	87,2	—	—	90,9	25,8	24,8
„ 72	—	—	—	—	—	—	100+	—	—	—	33,9	30,7

Bei den vorstehenden Versuchen ist der Boden nicht wie bei den vorhergehenden mit Wasser gesättigt, sondern es ist das Hohlräumvolumen auch mit Luft erfüllt. Die Wassertropfen werden somit zunächst von den engsten Kapillarräumen aufgesaugt werden. Sind diese aber durch Menisken verschlossen, so wird sich das Wasser den Weg aufsuchen, wo es möglichst rasch abfließen kann, d. h. die weitesten Hohlräume. Sind diese so weit, daß die Reibung der Wassermoleküle an den festen Wänden unberücksichtigt bleiben kann, so wird die Abflusgeschwindigkeit allein von dem mittleren Durchmesser dieser Hohlräume abhängig sein. Dieser war, wie wir früher sahen, für gleichgestaltete Teilchen bei gleicher Lagerung abhängig von der Korngröße, und so finden wir auch bei den Wollnyschen Versuchen, daß im groben Quarzsande das Wasser entsprechend schneller durchfließt. Da bei dichter Lagerung das Hohlräumvolumen kleiner, der mittlere Durchmesser desselben mithin auch entsprechend geringer wird, so ergibt sich ebenso aus der Gestalt der Hohlräume der Wollnysche Befund, daß das Wasser bei dichtester Lagerung am langsamsten durchfließt, ebenso wie der Befund, daß das Wasser im Lehm-pulver langsamer durchgeht als in den Lehmkrümeln. Daß bei Lehmkrümeln ganz unabhängig von ihrer Größe das Wasser stets gleich schnell abgeleitet wird, mußte anfangs befremden. Hier hätte aber Wollny die Durchleitungs-

geschwindigkeit ebensowenig wie beim groben Sande messen können, wenn nicht die Krümel erst die inneren feinen Hohlräume mit Wasser sättigten, ehe das überflüssige Wasser abzuziehen vermag. Da aber bei gleicher Lagerung in einem Bodenvolumen stets die gleiche Menge fester Teilchen von gleicher Größe vorhanden ist, und da ferner in den gleichen Gewichtsmengen von Lehmkrümeln angenähert im Innern dieser Krümel die gleichen Hohlraumvolumina vorhanden sind, unabhängig von der absoluten Größe der Krümel, so mußten diese zu ihrer Sättigung stets angenähert die gleichen Mengen Wasser gebrauchen, bevor das Wasser abfließen konnte.

Die langsame Durchlässigkeit des Humus für Wasser ist auf die analoge Erscheinung zurückzuführen. Er läßt zwar zwischen den festen Teilchen weitere Hohlräume, jedoch vermögen diese selbst das Wasser in viel höherem Maße noch als der Lehm aufzunehmen, ehe sie dasselbe ablaufen lassen. Ist Humusboden daher einmal mit Wasser gesättigt, so leitet er das Wasser ganz außerordentlich schnell; ist er dies nicht, so muß die Leitung des Wassers dementsprechend langsam vor sich gehen. Anders der Ton. Hier sind die Teilchen so fein, daß die Hohlräume sehr eng werden. Es wird somit die Reibung der Wasserteilchen an den Wänden des Hohlraumvolumens entsprechend groß, und zwar vermag dies, wie wir sahen, so weit zu gehen, daß Ton überhaupt das Wasser nicht mehr zu leiten vermag.

Es treten uns so bei diesen Versuchen mannigfaltige Erscheinungen entgegen, welche durch das physikalisch verschiedenartige Material, welches unsere festen Bodenteilchen bildet, begründet sind.

Ich möchte hieran anschließend gleich eine Erscheinung besprechen, welche bei uns in der Praxis von größter Wichtigkeit ist. Sie betrifft die Fähigkeit des Bodens, das eindringende Regenwasser zurückzuhalten.

Haben wir einen gleichmäßig gelagerten Boden, so hält dieser das eindringende Wasser nur an den Stellen zurück, wo sich die festen Bodenteilchen berühren, da sich hier entsprechend enge Menisken bilden. Je mehr derartige Berührungspunkte demnach im Boden sind, um so größer ist die in einem Bodenvolumen zurückgehaltene Wassermenge. Dieselbe wird so durch die Größe der Bodenteilchen oder durch die Größe der äußeren Bodenoberfläche bedingt. Werden die Bodenteilchen sehr klein, so werden die Berührungspunkte sehr zahlreich und dementsprechend kann im äußersten Falle alles Wasser zurückgehalten werden oder, was dasselbe besagt, kein Wasser mehr durch den Boden hindurchgehen, wie wir dies beim strengen Ton gesehen haben. Wollen wir in dem Falle dem Wasser Abzug verschaffen, was für die Vegetation durchaus erforderlich ist, so müssen wir zwischen den engen Hohlräumen künstlich weite Hohlräume schaffen, und das tun wir durch die Bodenbearbeitung in der Krümelbildung. Hier halten die festen Krümel das erforderliche Wasser zurück,

und zwar, wie wir sahen, die kleinen angenähert ebensoviel wie die großen Krümel, und das weitere Wasser vermag in den nichtkapillaren Hohlräumen abzuziehen. Beim Humus sind die festen Teilchen gröber; die äußere Oberfläche desselben ist gering, demnach kann das Wasser hier schneller abziehen als beim Ton. Die einzelnen Humusteilchen vermögen aber ebenso wie die Tonkrümel das erforderliche Wasser aufzunehmen und zurückzuhalten. Bei Bodenarten, welche keine solche Krümel bilden und an ihren Berührungspunkten zu wenig Wasser für unsere Pflanzen zurückzuhalten vermögen, ist der Untergrund dafür maßgebend, wie weit das Wasser in den Boden eindringt, resp. wo es zurückgehalten werden kann. Bekanntlich fließen weite kapillare Hohlräume in engere aus, engere in weitere aber

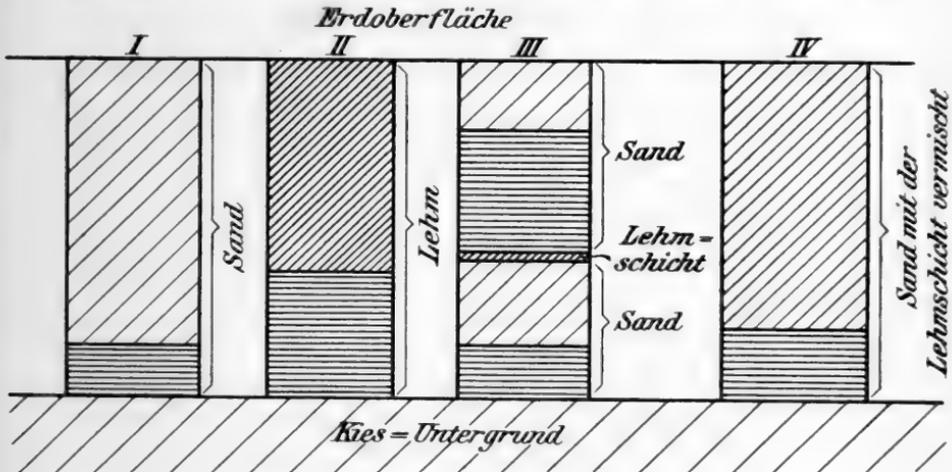


Fig. 33. Zum Eindringen des Wassers in den Boden.

nur unter einer Druckwirkung. Folgt so auf den Sand z. B. eine Lehm- oder Tonschicht, so mag diese, wenn sie auch noch so dünn ist, sofern sich nur wieder unten nach dem Sande hin die engen Menisken vollkommen ausbilden können, einem so großen Wasserdrucke zu widerstehen, als den sich bildenden engen Menisken entspricht. Würde man den Lehm oder Ton mit dem darüber liegenden Sande vermengen, so würde zwar die Krume, da die Anzahl der gegenseitigen Berührungspunkte der festen Bodenteilchen zunimmt, dementsprechend mehr Wasser halten können; diese Wassermenge kann aber verschwindend klein sein gegen die, welche zuvor durch die dünne Lehm-Schicht den Pflanzen im Untergrunde zurückgehalten wurde. Die beifolgende Fig. 33 mag das Gesagte veranschaulichen. Ich will annehmen, daß in 2 m Tiefe Kies lagert, so daß die engeren Kapillaren infolge der durch die darunter liegende Bodenschicht nicht zerstörten Menisken eine

Wassersäule tragen können, welche ihrer Steighöhe angenähert entspricht (I und III). Die schrägen Linien zeigen je nach ihrer Dichtigkeit die an den Berührungspunkten festgehaltenen Wassermengen an, die wagerechten Linien bedeuten, daß die entsprechende Bodenschicht mit Wasser gesättigt ist.

Die Krume, welche sich in Kultur befindet, ebenso wie die Boden-decke, die Streu usw., die viele feine Bodenbestandteile enthalten, vermögen so an sich das Wasser in größeren Mengen zurückzuhalten, während der darunter liegende Boden bedeutend wasserärmer sein kann. Dies ersahen wir schon aus den Ramannschen Beobachtungsergebnissen.

Welcher Teil der Niederschlagsmengen im Einzelfalle der Pflanze zur Verfügung stehen kann und, wieviel von denselben durch die gute Wasserleitungsfähigkeit eines Bodens, d. h. dadurch, daß das Wasser zu tief hindurchfiltriert, den Pflanzen zur Ausnutzung eventuell verloren geht, von dem wird einer der folgenden Paragraphen berichten, welcher im allgemeinen das Verhalten der Pflanze zum kapillar festgehaltenen Bodenwasser behandeln soll.

§ 35. Die Wasserverdunstung aus dem Boden.

Die Wasserverdunstung aus dem Boden wird einmal bedingt durch die für die Wasserverdunstung maßgebenden atmosphärischen Faktoren und ferner durch die Größe der Oberfläche des Bodens, an welcher das Wasser verdunsten kann.

Die Größe der Wasserverdunstung ist von der relativen Feuchtigkeit der Luft (r) abhängig, d. h. von dem Verhältnis des Wassergehaltes, welchen die Luft momentan besitzt (m), zu dem Wassergehalt, welchen die Luft bei der entsprechenden Temperatur im Höchsthalle enthalten könnte (M), also $r = \frac{m}{M}$. Direkt proportional ist die Verdunstung der Differenz $M - m$; denn je mehr Feuchtigkeit die Luft noch aufzunehmen vermag, um gesättigt zu werden, um so mehr Wasser verdunstet. Zum Belege hierfür einige Beobachtungsergebnisse:¹⁾

(Siehe die Tabelle auf Seite 205.)

Im Mittel ergab sich zwischen der in der Atmosphäre an der vollständigen Sättigung der Luft fehlenden Wassermenge und der verdunsteten Wassermenge ein Verhältnis von $1,23 \pm 0,01$.

Haberlandt²⁾ hat zuerst bei seinen Versuchen „Über die Verdunstung des Wassers im Boden“ die relative Feuchtigkeit mit bestimmt, doch liefs

¹⁾ Alfred Mitscherlich, Ein Verdunstungsmesser; Landw. Versuchsstationen 1904, S. 72.

²⁾ Friedr. Haberlandt, Unters. auf dem Gebiete des Pflanzenbaues. Wien 1875, Bd. 2, S. 25 u. f.

seine Versuchsanordnung eine Verarbeitung der Resultate nach dieser Richtung hin nicht zu.

Zeitdauer einer Beobachtung 24 Stunden.

Temperatur sowie relative Feuchtigkeit wurden registriert.

r	Mittlere Temperatur	1 cbm Luft enthält Wasser (m) g	Es fehlen in 1 cbm Luft zur Sättigung an Wasser ($M - m$) g	Verdunstung der freien Wasseroberfläche in 0,1 mm	Verhältnis
59,5	11,1	6,31	4,29	3,44	1,25
58,2	12,5	6,37	4,57	3,59	1,27
55,0	12,6	6,05	4,95	3,90	1,27
55,0	12,3	5,94	4,86	3,85	1,26
55,9	12,0	5,93	4,67	3,53	1,32
35,2	18,9	5,66	10,42	8,69	1,20
32,5	19,6	5,45	11,31	9,67	1,17
32,6	17,5	4,83	9,98	8,67	1,15
35,5	12,3	6,00	4,80	3,78	1,25
61,0	12,5	6,67	4,26	3,41	1,25
68,8	11,5	7,07	3,21	2,79	1,15

Nehmen wir aber an, wir hätten bei unseren Versuchen stets die gleiche relative Feuchtigkeit der Luft und stets die gleiche Windgeschwindigkeit oder, was dasselbe besagen will, wir hätten in der Zeiteinheit bei einer freien Wasseroberfläche stets dieselbe Verdunstung, so wird die verschieden starke Verdunstung des Wassers aus dem Boden lediglich von dem Boden selbst abhängen. Für diese Verdunstungsmengen sind in Betracht zu ziehen:

1. der Wassergehalt der Bodenoberfläche, die mit der Atmosphäre in Berührung kommt,
2. die Größe der Bodenoberfläche, an welcher das Wasser verdunsten kann, und
3. die Ersetzung des verdunsteten Wassers durch die Wasserleitung im Boden.

Es ist leicht möglich, den ersten und den dritten dieser Faktoren maximal zu gestalten, so daß das Resultat dementsprechend nur durch die Größe der mit Wasser gesättigten, an die Atmosphäre angrenzenden Bodenschicht bedingt wird. Die hierzu erforderliche Versuchsanordnung ist sehr einfach.

Wir legen über eine mit Wasser beschickte Schale eine Glasscheibe und über diese eine doppelte Schicht nassen Filtrierpapiers, welches mit zwei freien Enden in die Schale eintaucht. Dasselbe wird sodann möglichst vollständig mit einer möglichst dünnen Schicht Boden bedeckt.

Der ganze Apparat wird sodann gewogen. Der Gewichtsverlust desselben nach einiger Zeit gibt uns die Gröfse der durch den Boden in dieser Zeit verdunsteten Wassermenge. Auf diese Weise kann man die Wasserverdunstung verschiedener Bodenarten studieren. Da hier die Wasserleitung und die Wasserkapazität nicht berücksichtigt zu werden braucht, so wird die Verdunstung nur von der Erdoberfläche und, insofern diese bei allen Bodenarten gleichartig gestaltet werden kann, nur von der Bodenoberfläche abhängen. — Die Fläche, an welcher die Verdunstung stattfindet, ist, wenn der Boden vollkommen mit Wasser gesättigt ist, viel gröfser als die freie Wasseroberfläche, welche dieselbe Erdfläche einnimmt. So verdunsteten nach meinen Beobachtungen¹⁾ glatte Flächen von gebranntem Ton die 1,29 fache resp. 1,94 fache Wassermenge wie die diesen entsprechenden freien Wasseroberflächen.

Im allgemeinen wird sie um so gröfser sein, je feiner die Bodenpartikelchen sind. Das Verhältnis der Korngröfse zur Gröfse der Wasserverdunstung ist von Eser²⁾ experimentell geprüft worden. Er fand, dafs, wenn man die von dem feinsten Sand verdunsteten Wassermengen gleich 100 setzte, die gröbereren Sandsorten folgende Wassermengen verdunsteten:

Korngröfse des

Sandes . .	0,0—0,071	0,071—0,114	0,114—0,171	0,171—0,25	0,25—0,5	0,5—1,0	1,0—2
Verdunstung .	100	100,6	96,6	95,7	86,1	29,9	22,2

Diese Beobachtungen dürften zu einer weiteren Verarbeitung nicht ausreichend sein.

Sobald also die Erdoberfläche rauh oder uneben ist, wird die Verdunstung des Wassers aus dem Boden dieser Oberfläche entsprechend gröfser werden. Insonderheit wird aber auch durch die Vegetation selbst die für die Verdunstung in Betracht kommende Erdfläche wesentlich vergrößert. Setzt man die Verdunstung des Wassers bei der ebenen, glatten Bodenfläche gleich 100, so wird die Verdunstung des Wassers unter sonst gleichen Umständen bei verschiedener Beschaffenheit der Erdfläche nach Beobachtungen verschiedener Forscher wie folgt variieren.

(Siehe die Tabelle auf Seite 207.)

Über die Wasserverdunstung bei verschiedenen Bodenarten, bei denen die Wasserleitung konstant gemacht ist, liegen leider nur sehr wenige Beobachtungen vor, welche hier folgen mögen:³⁾

¹⁾ Alfred Mitscherlich, l. c. Landw. Versuchs-Stationen 1904. S. 68.

²⁾ Carl Eser, Unters. über den Einfluß der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bodens auf dessen Verdunstungsvermögen: Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 7. S. 46, 49, 90. — Meister, Physikalische Eigenschaften der Erdarten: Programm zum Jahresbericht der kgl. landw. Central-schule Weihestephan 1857/58. — A. Vogel, Sitzungsberichte der kgl. bayer. Akademie der Wissenschaften, II. Klasse. X. Bd., 2. Abteilung.

³⁾ Eser, l. c. S. 55, 91, 98, 99.

	Versuch		Mittel
	1	2	
Kulturboden	100	100	100
Feiner Sand	35,9	35,6	35,8
Grober Sand	32,8	32,5	32,7

Beschaffenheit der Erdoberfläche:	Versuch			Mittel	Beobachter ¹⁾
	1	2	3		
Gewellte Erdoberfläche . . .	129	127	—	128	Eser
Gewölbte Erdoberfläche  . . .	117	111	—	114	Eser
Rauhe Erdoberfläche  . . .	109	103	—	106	Eser
Gras	139	—	—	139	Eser
Rasen	306	242	209	252	Meister
Klee	253	255	—	254	Vogel
Hafer	308	303	—	306	Vogel
Weizen	286	299	—	293	Vogel
Roggen	290	292	—	291	Vogel
Gerste	281	292	—	286	Vogel

Bei ein und demselben Boden üben natürlich auch alle Verhältnisse, welche auf die Erwärmung desselben einen Einfluß haben, auch einen solchen auf die Wasserverdunstung aus, so die Farbe des Bodens, die Neigung der Erdoberfläche, ihre Exposition wie ihre Inklinatlon. Hierfür einige Beispiele:²⁾

	Verdunstungsmengen von Wasser bei verschiedener Farbe des Bodens:				
	weiß	gelb	braun	grau	schwarz
Versuch 1	100	105	118	125	133
Versuch 2	100	108	120	125	130
Mittel	100	107	119	125	132

	Wasserverdunstung aus einem Boden bei Süd-Exposition und einer Inklinatlon von			
	0°	10°	20°	30°
Im Sommer	100	123	127	125
Im Herbst	100	111	123	133

¹⁾ Siehe Anmerkung 2 auf S. 206.

²⁾ Eser, l. c. S. 55, 91, 98, 99.

Wasserverdunstung von Anfang Juni bis Mitte Oktober aus einem Boden bei einer Exposition				
Inklination von	nach			
	Süden	Osten	Westen	Norden
15°	100	86,2	84,1	70,9
30°	100	80,7	73,2	52,7

Bei gleicher Erdoberfläche hängt die Verdunstung des Wassers aus dem Boden, wie wir sahen, unter sonst gleichen Umständen von dem Wassergehalte des Bodens und der Wasserleitungsfähigkeit desselben ab. Wie die folgenden Zahlen zeigen, geht die Wasserverdunstung dem Wassergehalte des Bodens angenähert proportional.¹⁾

Verdunstungsmengen bei verschiedenem Wassergehalt des Bodens.

	Wassergehalt des Bodens in Prozenten der Wasserkapazität									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Quarzsand .	100	88,2	80,5	70,8	60,3	50,2	40,5	29,9	20,4	10,4
Kalksand .	100	90,2	81,2	70,0	60,5	50,3	40,5	29,7	20,0	10,4

Ist nun der Wassergehalt des Bodens durch die verdunsteten Mengen geringer geworden, so muß dementsprechend auch die Wasserverdunstung geringer werden, falls das Wasser nicht sofort der Bodenoberfläche wieder zugeleitet wird. Demnach wird in einem Boden auf die Dauer die Verdunstung um so geringer sein müssen, je schlechter die Wasserleitung in demselben ist.

Ist die Wasserleitung von dem Grundwasserstand aus in Betracht zu ziehen, so muß demnach die Wasserverdunstung eines Bodens um so geringer werden, je tiefer das Grundwasser steht, je höher es also kapillar hinaufgeleitet werden muß. Eser hat derartige Versuche mit einem Quarzsande angestellt und kam dabei zu den folgenden Resultaten:

Höhe der Bodenschicht über dem Grundwasser . . .	30 cm	25 cm	20 cm	15 cm	10 cm
Verdunstete Wassermengen	18,0	22,1	29,7	62,5	100.

Die Art der Abnahme der Verdunstungsmengen hängt von der Schnelligkeit des kapillaren Wasseraufstiegs in dem Boden ab. Leider sind hierüber keine vergleichenden Versuche angestellt worden. — Dafs je nach der Tiefe, bis zu welcher der Boden Wasser enthält, auch die Verdunstungsmengen zunehmen, vorausgesetzt, dafs die Wasserleitung, wie bei Kalksand, schnell vor sich geht, bedarf wohl keiner weiteren Belege. Geht die Wasserleitung hingegen sehr langsam vor sich, so wird die Tiefe der wasserhaltenden Schicht keinen großen Einfluß auf die Verdunstungsmengen ausüben können.

¹⁾ Berechnet nach Eser, l. c. S. 39/40.

Im allgemeinen wird das Hohlraumvolumen enger und die Wasserleitung dementsprechend besser, wenn ein Boden dicht gelagert ist, sofern nur bei der Wasserleitung dabei noch nicht die Reibung der Wassermoleküle an den festen Wänden zu groß wird; dementsprechend wird also auch die Verdunstungsmenge des Wassers aus einem solchen Boden bei dichter Lagerung eine größere sein. Eser hat hier Versuche mit Bodenarten angestellt, die er verschieden dicht einstampfte. Nimmt man an, daß das Hohlraumvolumen im geringsten Falle 30 % des Bodenvolumens betrug, so wechselte die Verdunstung mit dem Hohlraumvolumen in folgender Weise:

Bodenart:	Hohlraumvolumen:					
	30 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %
Kalksand	100	99,8	91,4	90,3	83,8	70,7
Grobgesiebter Ackerboden . .	100	93,8	87,9	80,1	78,9	70,6
Feingesiebter Ackerboden . . .	100	83,2	77,5	71,6	67,0	64,2

Man ersieht aus den vorstehenden Zahlen, daß bei den feineren Bodenarten viel schneller die Verdunstung durch die Erweiterung des Hohlraumvolumens herabgedrückt werden kann als bei gröberen Bodenarten. Der Grund hierfür liegt darin, daß bei den feineren Bodenarten sich infolge der Krümelbildung leicht größere Hohlräume bilden, welche für die kapillare Wasserleitung nicht in Betracht kommen. Krümelbildung muß demnach auch die Wasserverdunstung aus dem Boden einschränken. Eser fand so folgende Verdunstungsmengen bei Lehm:

	Lehmstaub	Lehmkrümel (mm)				
		0,5—1,0	1—2	2—4	4—6,75	6,75—9
Versuch 1 .	100	92,4	87,8	92,0	85,9	93,1
Versuch 2 .	100	100,9	78,9	100,2	65,8	66,2

In der Praxis stehen uns nun, um die Wasserleitung des Bodens zu stören und hiermit gleichzeitig die Wasserverdunstung einzuschränken, den Boden also feuchter zu erhalten, zwei Wege offen. Beide beruhen darauf, daß wir die kapillaren Hohlräume, in denen das Wasser nach der Erdoberfläche geleitet werden kann, durch weitere nichtkapillare Hohlräume unterbrechen. Dies vermögen wir nun entweder dadurch zu erreichen, daß wir die oberste Schicht unseres Bodens umdrehen, d. h. den Boden schälen, oder dadurch, daß wir irgend eine Deckschicht, z. B. aus Mist, Stroh, Streu oder Gründünger, auf den Boden aufbringen. In beiden Fällen

schaffen wir zwischen der Bodenschicht, in der die kapillaren Hohlräume nach oben ausmünden, und zwischen der Erdoberfläche eine Isolierschicht, welche nicht wesentlich durch die Luftbewegung beeinflusst ist und so sehr langsam ihren Wasserdampf an die Atmosphäre abgibt, während sie selbst mit Wasserdampf aus dem Boden gesättigt ist. Wie außerordentlich groß der Einfluß der Bodenbearbeitung sowohl wie namentlich der der Waldstreu auf die Erhaltung der Feuchtigkeit im Boden ist, ergeben die folgenden Zusammenstellungen.

Verdunstungsmengen.

Boden:	Versuch		Mittel	Beobachter ¹⁾
	1	2		
<i>Unbehackt</i>	100	100	100	} Eser
Behackt	79,6	76,2	77,9	
"	83,5	84,4	84,9	Wollny
<i>Brache ohne Streudecke</i>	100	100	100	} Ebermayer
" mit Streudecke	26,3	28,2	27,2	
" " Buchenlaub	55,4	11,0	—	} Ebermayer u. Eser
" " Fichtennadeln	40,5	10,8	—	
" " Kiefernadeln	33,0	15,3	—	
" " Strohdecke v. 5,0 cm	9,9	—	—	
" " " " 2,5 "	18,1	—	—	} Eser
" " " " 0,5 "	41,7	—	—	

Die vorliegenden Resultate zeigen, daß schon eine ganz geringe Bodendecke von 0,5 cm die Verdunstung des Wassers aus dem Boden auf über die Hälfte herabdrücken kann. Hier liegt die Hauptbedeutung unserer Waldstreu für den Boden. Die Zahlen lehren am deutlichsten, daß ein reines Ausrechnen der Streu namentlich auf wasserärmeren Forstböden durchaus zu verwerfen ist.

Sie lehren uns ferner, daß es bei wasserarmen Bodenarten zweckmäßig ist, bald nach der Ernte *flach* zu schälen, um so dem Boden noch möglichst viel Wasser zur Wintersaat zu erhalten.

Sind die atmosphärischen Verhältnisse für eine starke Verdunstung sehr günstig, so vermögen Bodenarten, welche sonst viel Wasser fassen, dies aber sehr schlecht leiten, in ihrer obersten Schicht vollkommen lufttrocken zu werden, so daß sie kein kapillar gebundenes Wasser mehr in derselben enthalten. Ist ein solcher Boden eingesät, so können infolge

¹⁾ C. Eser, l. c. Bd. 7, S. 52, 87. — E. Ebermayer, Die gesamte Lehre von der Waldstreu . . . Berlin 1876, S. 182. — E. Wollny, Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 3, S. 330.

dieser starken Verdunstung und der darauf folgenden Trockenheit die angekeimten Samen abspringen, und es kann auf diese Weise unter Umständen die wertvolle Aussaat vollkommen verloren gehen. In diesem Falle hilft man sich mit einer Bodendecke. Moorboden wird so, um die Verdunstung einzuschränken und den kostbaren Klee- und Grassämereien ein gleichmäßig feuchtes Keimbett zu erhalten, mit einer schwachen Sanddecke von 3—5 cm überfahren. Ist der Keimungsprozess dann gut vollzogen, die Saat aufgegangen und in dem unter dem Sande liegenden Moore eingewurzelt, so hat die Sanddecke keine praktische Bedeutung mehr für diese Moorbienkultur; denn die Verdunstung des Wassers aus dem Boden wird jetzt nicht mehr durch den Boden und seine Erdoberfläche, sondern durch den Pflanzenbestand, die Pflanzenoberfläche, bedingt.

Den Einfluss einer 1 cm hohen Sandschicht auf die Wasserverdunstung zweier Kalksandböden zeigen die folgenden Zahlen:¹⁾

Bodenart:	Unbedeckt	Mit einer 1 cm hohen Sandschicht bedeckt:						
		Versuch						Mittel
		1	2	3	4	5	6	
Humoser Kalksandboden	100	71,6	27,8	41,7	31,6	39,3	34,1	41,2
Reiner Kalksandboden	100	82,5	59,1	42,1	34,4	38,7	41,2	49,7

Beim Moorboden, für den mir leider keine diesbezüglichen Zahlen bekannt sind, ist der Einfluss der Sanddecke auf die Wasserverdunstung des Bodens ein bedeutend größerer.

Eine andere Bodenbedeckung, welche sich leicht an den unteren Boden überall anlegt, ja auch schon ein *ganz flaches* Pflügen des Moorbodens selbst, wird hier dieselben Dienste verrichten können wie die Sanddecke.

Es ist uns so für die Bodenbearbeitung noch eine zweite Aufgabe gestellt, betreffend die Wasserversorgung der Pflanze. Wir haben den Zeitpunkt der Bodenbearbeitung nicht nur danach zu wählen, dass Gare und Frost gleichzeitig eingreifen und den Boden mürbe gestalten können, sondern auch danach, dass wir dem Boden nach Möglichkeit für die bestmögliche Einwirkung von Gare und Frost, sowie für unsere Kulturpflanzen das erforderliche Wasser zu erhalten suchen.

Salzlösungen setzen die Dampfspannung des Wassers und somit die Wasserverdunstung herab. Ist n die Anzahl der Moleküle eines Salzes, welche in einer bestimmten Anzahl N von Wassermolekülen gelöst ist, so

¹⁾ Vergl. E. Wollny, Unters. über den Einfluss der oberflächlichen Abtrocknung des Bodens auf dessen Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 3, S. 328, 329.

wird die Dampfspannung dieser Lösung p' in folgender Weise von der Dampfspannung des Wassers p bei der gleichen Temperatur abweichen:

$$\frac{p - p'}{p'} = \frac{n \cdot i}{N}$$

Hierbei ist noch der Dissoziationsgrad des Salzes (i) zu berücksichtigen, welcher angibt, in welchem Verhältnis die Anzahl der Moleküle eines Salzes durch die Dissoziation vergrößert wird.

Dieser Dissoziationsgrad läßt sich bei den verschiedenen Salzen durch das elektrische Leitungsvermögen eines Salzes bestimmen. Er beträgt bei Lösungen, die nicht dissoziieren (z. B. in solchen von Rohrzucker) 1,00, bei einer Chlorkaliumlösung u. a. 1,87.

Wollen wir so z. B. die Dampfspannung einer 5⁰/₁₀igen Chlorkaliumlösung bei 0⁰ C. bestimmen, so haben wir die folgende Rechnung auszuführen:

$$\frac{4,57 - p'}{p'} = \frac{5}{\frac{74,7}{95}} \cdot 1,87.$$

Es ergibt sich aus dieser $p' = 4,46$ mm.

Für eine 10⁰/₁₀ige Chlorkaliumlösung ist $p' = 4,35$ „

Für eine solche bei 20⁰ C., wo $p = 17,36$ mm ist, ist $p' = 16,58$ „

Durch eine 5⁰/₁₀ige Chlorkaliumlösung wird also die Dampfspannung des Wassers um 2,4⁰/₁₀, durch eine 10⁰/₁₀ige um 5,0⁰/₁₀ herabgedrückt. Diese Größen sind aber, wie man sieht, verschwindend klein gegen die Veränderung der Spannung des Wasserdampfes mit der Temperatur.

Soweit der Einfluß gelöster Salze auf die Verdunstung des Bodenwassers experimentell geprüft worden ist,²⁾ haben die Versuche durchaus zu keinen befriedigenden Ergebnissen geführt. Da bei gleichzeitig angestellten vergleichenden Versuchen aber auch die Erdoberfläche, an welcher die Verdunstung stattfindet, vollkommen gleich groß in jedem einzelnen Versuch sein muß, eine Aufgabe, die nur mit großen Fehlern gelöst werden kann, so dürfte es überhaupt schwierig sein, auf diese Weise brauchbare Resultate zu erhalten.

Bei den Wollnyschen Versuchen, wo der Boden teils mit Wasser, teils mit 5 oder 10⁰/₁₀igen Salzlösungen verschiedener Art beschickt wurde, betrug der wahrscheinliche Fehler der Verdunstungsabnahme, welche durch diese Salzdüngungen überhaupt festzustellen war, 37,2⁰/₁₀ dieser gemessenen Größe.³⁾

¹⁾ Unter Benutzung von Walther Nernst, Theoretische Chemie. Stuttgart, 2. Aufl., 1898, S. 149 u. 351.

²⁾ Carl Eser, l. c. Bd. 7, S. 92—96. — E. Wollny, Unters. über den Einfluß der Salze auf die Bodenfeuchtigkeit: Mitteilungen vom landwirtsch. Versuchsfelde der technischen Hochschule in München IV.

³⁾ Alfred Mitscherlich, Ein Beitrag zur Erforschung der Einwirkung

Wie aus dem Boden Wasser verdunstet, so kann sich andererseits aber auch am Boden Wasser kondensieren. Die Verdunstung des Wassers an der Erdoberfläche tritt namentlich morgens ein, da die aufgehende Sonne den Boden schneller erwärmt als die Luft. Wird die Luft dann gleichfalls wärmer, so daß sie nicht mehr allen Wasserdampf zu fassen vermag, so kondensiert sich dieser. Es bilden sich Nebel, welche teilweise oder vollkommen wieder auf den Erdboden niederfallen (Tau). Im Laufe des Tages ist aber die Temperatur des Erdbodens höher als die der Luft; er gibt somit wieder Wasserdampf an die Atmosphäre ab. In der Nacht hingegen strahlt der Boden wiederum mehr Wärme aus; er wird kälter als die Luft, wodurch sich dann Wasserdampf aus der Atmosphäre an seiner Oberfläche kondensieren wird.

Diese Vorgänge, welche sich zwischen Atmosphäre und Boden abspielen, finden auch in ganz der gleichen Weise im Boden selbst statt und spielen hier sicher eine weit größere Rolle, als allgemein angenommen wird. Die im Boden befindliche Luft ist, sofern in demselben kapillar gebundenes Wasser vorhanden ist, stets mit Wasserdampf gesättigt. Erwärmt sich nun die oberste Erdschicht, so wird mehr Wasserdampf entbunden, welcher sich zum Teil in den kälteren unteren Bodenschichten wieder kondensiert. Erkaltet in der Nacht die obere Erdschicht wieder, so wird sich andererseits Wasserdampf aus den unteren wärmeren Bodenschichten daselbst kondensieren. So kann durch Verdunstung und Kondensation im Boden eine Wasserbewegung stattfinden, welche die der kapillaren Wasserleitung, welche leicht durch dazwischen eingetretene Luft oder Gase unterbrochen sein kann, ganz wesentlich übertrifft. Im Gegensatz zur kapillaren Wasserleitung wird sich diese Wasserbewegung im Boden vornehmlich in den weiten, nicht kapillaren Hohlräumen abspielen, welche wir künstlich bei der Bodenbearbeitung durch die Krümelstruktur herzustellen suchen. Von außerordentlich großer Bedeutung ist diese Wasserbewegung für das Aufgehen unserer Samen, welche wir gerade in diese weiteren Hohlräumen einbringen, und denen somit nicht viel Wasser auf kapillarem Wege zugeführt werden kann.

§ 36. Die Ausnutzung des kapillar gebundenen Bodenwassers durch die Pflanze.

Im Anschluß an die vorhergehenden Untersuchungen wollen wir jetzt versuchen festzustellen, wie die Pflanze das kapillar gebundene Bodenwasser auszunutzen vermag. Daß die Pflanze das Bodenwasser mittelst der Wurzel aufnimmt und es sodann an ihrer Oberfläche wieder verdunstet, ist für uns

der Salzlösung auf die physikalischen Bodeneigenschaften; Fühlings Landw. Zeitung 51. Jahrg., 16. Heft.

eine allbekannte Tatsache; geht doch auf dem gleichen Wege die Aufnahme der Nährstoffe von statten, insofern diese mit dem Wasser durch den osmotischen Prozeß in die Pflanze gelangen, jedoch dann bei der Wasserverdunstung in dieser zurückbleiben. So ist die Wasseraufnahme und -Abgabe eine Wachstumsfrage für die Pflanze. Wird die Verdunstung und damit die Wasseraufnahme vollkommen verhindert, so vermag die Pflanze zwar noch weiter zu leben, aber nicht weiter zu wachsen. — Es muß uns so zunächst interessieren, wieviel Wasser die Pflanze zu ihrem bestmöglichen Gedeihen nötig hat, d. h. wieviel Wasser hierzu im Minimum die Pflanze aus dem Boden aufnehmen und sodann wieder verdunsten muß.

Hellriegel¹⁾ fand, daß die Verdunstungsgröße keinen Einfluß auf die physiologischen Funktionen der Pflanze, auf ihre Produktion und Gesamtentwicklung ausübt, solange die Bodenfeuchtigkeit innerhalb normaler und günstiger Grenzen erhalten wird.

W. Wollny²⁾ kultivierte gleichzeitig in drei Gewächshäusern, in denen er die relative Feuchtigkeit auf 88⁰/₀, 58⁰/₀ und 41⁰/₀ hielt, die gleichen Kulturpflanzen und fand, daß alle Pflanzenarten in der feuchten Luft, wo die Verdunstung am geringsten sein mußte, die höchsten Erträge ergaben. Je feuchter also das Klima ist und je geringer somit die Anforderungen sind, welche die Pflanze an den Wassergehalt des Bodens stellen muß, um so besser gedeihen die Pflanzen. —

Die Wasserverdunstung durch die Pflanze findet einmal durch die oberste Zellschicht ihrer oberirdischen Organe statt. Diese, die „Kutikula“, ist zwar bei einzelnen Pflanzen, wie bei den Kakteen, so gut wie undurchlässig für Wasser, bei unseren Kulturpflanzen aber dürfte sie, je nach der Pflanzenart, mehr oder weniger stark durchlässig sein. Ferner besitzt die Pflanze für die Transpiration auf der Unterseite ihrer Blätter mehr oder weniger zahlreiche Spaltöffnungen, die sie jedoch bei günstigen atmosphärischen Verdunstungsbedingungen zu schließen vermag, um so einer zu starken Wasserentziehung vorzubeugen. Immerhin vermag sie aber die Verdunstung durch die Kutikula keineswegs aufzuheben, was man am besten an dem Welkwerden der Pflanzen erkennen kann. Bei ein und derselben Pflanzenart wird so die Verdunstung je nach der Größe ihrer gesamten Blattoberfläche, d. h. je nach der Üppigkeit ihres Wachstums, eine andere sein; sie wird außerdem je nach den atmosphärischen Verdunstungsbedingungen variieren, wodurch wieder die Ansprüche, welche eine Pflanze

¹⁾ H. Hellriegel, Beiträge zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Ackerbaues. Braunschweig 1883, S. 461—501.

²⁾ Walter Wollny. Untersuchungen über den Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf das Wachstum der Pflanze; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 397 u. f.

in den verschiedenen Jahren an den Wassergehalt des Bodens stellt, in großen Grenzen schwanken können.

Versuche von E. Wollny,¹⁾ deren Ergebnisse uns gleichzeitig einen Anhalt für die Größe der Wasserverdunstung im Münchener Klima geben, bestätigen dies. Dieselben wurden in folgender Weise angestellt: Die Pflanzen wurden in Zinkkästen kultiviert, welche mit winterfeuchter Erde beschickt waren. Das Gewicht dieser mit Erde versehenen Kästen (G) wurde festgestellt. Es wurden ferner beobachtet die Regenmengen während der Vegetationszeit (R) und die durch den Boden des Gefäßes abfließenden Sickerwassermengen (S). Nach Beendigung des Versuches wurde das Gefäß von neuem gewogen (G_1) und die Gewichts Differenz gegen die erste Wägung ($G - G_1 = \pm g$) berechnet. Es betrug sodann die durch die Pflanze verdunstete Wassermenge V :

$$V = R - (S \pm g).$$

Die Gewichtszunahme, welche das Gefäß infolge der Gewichtszunahme der kultivierten Pflanze erleidet, kann, sofern dasselbe groß, d. h. tief genug ist, als Größe zweiter Ordnung vernachlässigt werden.

(Siehe die Tabelle auf Seite 216.)

Die umstehenden Zahlen zeigen ferner, daß diejenigen Wassermengen, welche die Pflanze aus dem ursprünglichen Wasservorrat des Bodens verdunstete ($\pm g$), verhältnismäßig gering sind. Sie betragen im Höchsthalle bei dem einen Erbsenversuch 71,2 mm, d. s. 13% der von der Pflanze während der Vegetationszeit verdunsteten Wassermengen. Da der Boden im Höchsthalle ferner 85,3 mm Wasser mehr aufnehmen konnte (Versuch mit Sommerroggen), was ungefähr 19,7% der von der Pflanze während der Vegetationszeit verdunsteten Wassermenge entspricht, so vermochte jeder durchgreifendere Regenfall der Pflanze ca. $\frac{1}{3}$ der für ihr Gedeihen erforderlichen Wassermenge im Boden zur Verfügung zu stellen. Treten demnach auf dem von Wollny benutzten Boden drei ausgiebige Regengüsse in den richtigen Zeitintervallen während der Vegetationszeit ein, so vermag derselbe die Pflanzen in ausgiebiger Weise mit Wasser zu versorgen.

Bei einem anderen Boden, der doppelt soviel Wasser zurückzuhalten vermag, genügt natürlich schon die Hälfte dieser Regenmenge; bei einem Boden, der nur halbsoviel Wasser zurückzuhalten vermag, sind hingegen sechs solcher Regenfälle in den richtigen Zeitintervallen erforderlich.

Hieraus ergibt sich, daß der Wasservorrat im Boden, die Wasserkapazität des Bodens eine für den Pflanzenwuchs ganz außerordentlich

¹⁾ E. Wollny, Untersuchungen über die Wasserverbrauchsmengen der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 4, S. 93 u. f.

Feldfrucht:	Zahlen in mm Wasserhöhe:			Feldfrucht:	Zahlen in mm Wasserhöhe:		
	R	S	$g = V$		R	S	$g = V$
Erbsen	374,9	51,6	+ 47,5 = 370,5	Sommerroggen	571,1	71,8	- 30,3 = 469,1
"	374,9	48,4	+ 41,8 = 368,0	"	571,1	52,8	- 85,3 = 433,1
"	571,1	83,8	- 19,8 = 467,6	Winterroggen	343,0	24,0	+ 51,5 = 370,5
"	476,5	3,3	+ 71,2 = 544,4	Gerste	376,7	50,1	+ 44,8 = 371,3
"	465,5	49,6	+ 33,8 = 449,7	"	408,4	83,9	+ 64,5 = 389,1
Bohne	647,9	137,7	- 61,3 = 449,0	Hafer	376,7	48,4	+ 54,5 = 382,8
Pferdebohne	489,3	125,2	+ 30,8 = 394,9 ¹⁾	"	489,3	85,5	+ 21,0 = 424,8
"	571,1	210,8	- 4,5 = 355,8 ¹⁾	"	647,9	105,4	+ 19,8 = 562,2
Wicke	374,9	54,9	+ 42,8 = 362,6	"	630,4	20,5	+ 68,9 = 678,9
"	602,2	45,2	- 9,0 = 548,0	"	571,1	40,9	- 40,8 = 489,5
Weisse Lupine	376,7	49,5	+ 39,8 = 366,9	Weisse Kolbenhirse	705,9	231,6	- 5,5 = 468,8 ¹⁾
Gelbe "	489,3	154,2	- 35,3 = 299,8 ¹⁾	Gras	563,7	103,7	- 1,0 = 459,0
Rotklee	563,7	50,0	+ 27,8 = 541,0	"	563,7	117,0	+ 5,5 = 452,2
"	590,4	131,8	- 19,5 = 439,1	Sommerrüben	487,3	50,0	- 8,8 = 446,1
"	705,9	166,5	+ 48,3 = 587,7	"	432,9	9,2	+ 14,8 = 438,4
Espartette	563,7	54,0	+ 23,0 = 532,6	Mohn	571,1	126,1	- 31,0 = 414,1

¹⁾ Bei diesen Versuchen entwickelten sich die Pflanzen nicht normal.

große Rolle spielt. Ein Boden, welcher eine nur geringe Wasserkapazität besitzt, wird in einem trockenen Klima oft Missernten ergeben, während ein Boden mit hoher Wasserkapazität auch da vorzügliche Ernten zu liefern vermag, da er die Pflanzen noch bis zum nächsten Regenfall mit Wasser zu versorgen vermag. Von verschiedenartigen Kulturpflanzen, sowie von verschiedenen Sorten der gleichen Kulturpflanze muß diejenige die höchsten Anforderungen an die Wasserkapazität (d. h. an die Güte) des Bodens stellen, welche die größte Blattoberfläche besitzt, da diese dementsprechend unter sonst gleichen Umständen die größten Wassermengen verdunsten wird.

Es dürfte den Anschein haben, als ob wir so in der Wasserkapazität des Bodens einen ganz anderen Maßstab für die Güte des Bodens haben als in der Bodenoberfläche. In Wirklichkeit ist dies, obwohl beide Größen nicht identisch sind, doch keineswegs der Fall, denn die Wasserkapazität ist, wie wir vorher (S. 181) sahen, keineswegs unabhängig von der Bodenoberfläche. Je größer die Bodenoberfläche ist, um so feiner sind die Bodenteilchen und um so mehr Wasser kann sich zwischen diese einlagern und wird zwischen diesen festgehalten, da dementsprechend die Anzahl der Berührungspunkte in der Volumeneinheit des Bodens zunimmt, an denen sich zunächst das Bodenwasser kapillar festhält. Von der Größe der Bodenoberfläche ist ferner die Krümelstruktur des Bodens abhängig und von dieser wiederum unter sonst gleichen Umständen der momentane Wassergehalt des Bodens.

Die von einem Boden zurückgehaltene Wassermenge wird einmal der Wasserkapazität des Bodens und ferner der Höhe der Bodenschicht proportional sein. Ist der Regenfall sehr ausgiebig, so wird ein Teil des Wassers nicht mehr von dem Boden in für die Pflanzenwurzel erreichbarer Tiefe zurückgehalten. Diese Wassermengen, die sogen. „Sickerwassermengen“, gehen somit unnutzbar verloren. Über diese Sickerwassermengen sind zahlreiche Versuche¹⁾ angestellt worden, welche jedoch kein allgemeineres Interesse beanspruchen dürfen. Die Sickerwassermengen werden bedingt durch die Stärke des Regenfalles und den momentanen Wassergehalt des Bodens, sowie durch die Tiefe der in Betracht zu ziehenden Bodenschicht und durch die Wasserkapazität derselben. Auch die Wasserleitungsfähigkeit des Bodens resp. die Wasserverdunstung an der Erdoberfläche müssen hier mit in Betracht gezogen werden.

Im allgemeinen müssen die Sickerwassermengen stets geringer sein als die Niederschlagsmengen, da ein Teil des Niederschlagswassers gleich an der Erdoberfläche verdunstet. Beobachtet man aber beide Größen in gleichen Zeitintervallen und so auch zu einer Zeit, wo der Boden noch

¹⁾ U. a. E. Wollny, Unters. über die Sickerwassermengen in verschiedenen Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 11, S. 1 u. f.

infolge der Einwirkung des Frostes (S. 134) Wasser abgibt, so kann man natürlich auch finden, daß dem Boden in diesem Zeitraum mehr Wasser durch Absickern entzogen wird, als ihm durch den Regen zugeführt wurde. Eine derartige Beobachtung hat u. a. v. Möllendorff¹⁾ bei lehmigem Sandboden im März gemacht.

Darüber, ob im Winter oder im Sommer mehr Wasser im Boden versickert, gehen die Resultate verschiedener Beobachter sehr auseinander. Nimmt man an, daß die Lagerung des Bodens und auch sein Wassergehalt Winter und Sommer der gleiche ist, so wird notwendigerweise im Verhältnis zur Niederschlagsmenge um so weniger Wasser versickern, je mehr Wasser wiederum in die Atmosphäre verdunstet. Da nun im Sommer im allgemeinen diese Verdunstungsbedingungen günstiger sind als im Winter, so werden im Winter dementsprechend die Sickerwassermengen größere sein, sofern nicht ein Gefrieren des Wassers das Absickern desselben verhindert. So fand Ebermayer,²⁾ daß in Prozenten zur Niederschlagsmenge folgende Wassermengen in den verschiedenen Jahreszeiten versickerten.

Im	Bei einer Bodenschicht von		
	1 Fufs Mächtigkeit	2 Fufs Mächtigkeit	4 Fufs Mächtigkeit
Frühjahr	55	56	64
Sommer	19	14	11
Herbst	54	51	49
Winter.	94	89	99
Jahresmittel	54	50	53

Die Sickerwassermengen haben für uns praktisch deshalb so viel Interesse, weil durch sie ein Teil der wasserlöslichen Pflanzennährstoffe ungenutzt verloren geht. Wieviel dies ist, hängt in jedem Falle unter sonst gleichen Umständen von der Löslichkeit des betreffenden Salzes, sowie von der Menge des Sickerwassers ab, welche aber, wie wir sahen, nicht allgemein festzustellen ist.

Wir hatten im Vorhergehenden angenommen, daß die Pflanze dem Boden alles kapillar gebundene Wasser entziehen kann, und zwar ganz ohne Berücksichtigung der Bodenart. Ist dies der Fall, so müssen die Pflanzen unabhängig von dem absoluten Wassergehalt des Bodens stets gleich gute

¹⁾ Georg v. Möllendorff, Die Regenverhältnisse Deutschlands. Görlitz 1862. S. 144.

²⁾ E. Ebermayer, Die physikalische Einwirkung des Waldes auf Luft und Boden. Berlin 1873, S. 215.

Erträge liefern; auch dürfte für sie in dieser Beziehung sonst die Art des Bodens gleichgültig sein. Von vornherein ist anzunehmen, daß es für die Pflanze durchaus nicht gleichgültig ist, wieviel kapillar gebundenes Wasser der Boden enthält; denn die Pflanzenwurzel muß, damit sie dasselbe aufnehmen kann, mit diesem selbst in ständiger Berührung sein. Da dies dann am meisten der Fall sein wird, wenn der Boden möglichst mit Wasser gesättigt ist, so werden die Pflanzenerträge zunächst um so höher sein müssen, je größer der Wassergehalt des Bodens ist. Ist ein Boden nun aber dauernd mit Wasser gesättigt, so ist die Gefahr des Sauerwerdens desselben groß. Sicher ist ferner die Krümelbildung und somit das Eindringen der Pflanzenwurzel in den Boden wesentlich erschwert, so daß wir bei zu hohem Wassergehalte des Bodens wiederum gar keine oder nur geringere Erträge erwarten müssen. Über denjenigen Wassergehalt des Bodens, welcher für die Pflanze am günstigsten ist, entscheidet der Versuch. Dieser wurde u. a. von Hellriegel, Heinrich und Wollny derart an- gestellt, daß der Boden in den Vegetationsgefäßen mit einer bestimmten Wassermenge beschickt wurde. Dieser Wassergehalt wurde alle 24 Stunden durch Ersetzen des Verdunstungswassers wieder hergestellt. Setzt man den bei einem bestimmten Wassergehalt für einen Boden erhaltenen Höchst- ertrag einer Pflanze gleich hundert, so gestalteten sich die Erträge bei einem anderen Wassergehalte des Bodens wie folgt:

(Siehe die Tabelle auf Seite 220.)

Was zunächst die absolute Größe der Wasserkapazität anbelangt, so ist diese in den Versuchen zu gering bemessen. Bei 100 % ist der Boden keineswegs ganz mit Wasser gesättigt, so daß das ganze Hohlraum- volumen damit angefüllt ist. Wäre das der Fall, so würde das Wasser in den Gefäßen stagnieren, sauer werden und somit, wie gesagt, eine Pflanzenproduktion unmöglich sein. Es ist bei dieser Bestimmung zweierlei nicht beobachtet worden. Nämlich einmal der Umstand, daß das Hohl- raumvolumen des in die Kulturgefäße in Krümelstruktur eingebrachten Bodens ein größeres ist als bei dem zur Bestimmung der Wasserkapazität unter Wasser gesetzten Boden, resp. daß sich das Hohlraumvolumen eines Bodens durch Aufgießen und Aufsaugenlassen von Wasser keineswegs mit Wasser sättigt, und ferner der Umstand, auf den bereits Wollny auf- merksam macht, daß die durch die Wasserverdunstung innerhalb 24 Stunden eintretende Verringerung des Wassergehaltes des Bodens nicht berück- sichtigt wurde. Schliesslich ist auch von dem kapillar gebundenen Boden- wasser noch das hygroskopisch gebundene in Abzug zu bringen, da dieses für die Pflanze nicht aufnehmbar ist (§ 30).

Wenn man die großen Fehler berücksichtigt, welchen die um- stehenden Resultate unterliegen, so muß man aus diesen folgern, daß die

verschiedenen Kulturpflanzen keine wesentlich verschiedenen Ansprüche an den Wassergehalt verschiedener Bodenarten stellen. Im allgemeinen dürften unsere Kulturpflanzen dann Maximalerträge geben, wenn 50 % des Hohlraumvolumens eines Bodens mit kapillar gebundenem Bodenwasser ausgefüllt sind. Hierbei scheint die absolute Menge des im Boden enthaltenen Wassers und somit die Bodenart selbst, sofern das verdunstete Wasser täglich ergänzt wird, nicht in Betracht zu kommen, so daß unsere vorhergehenden Betrachtungen über die in verschiedenen Bodenarten der Pflanze zur Verfügung stehenden Wassermengen dennoch zu Recht bestehen.

Erträge bei verschiedenem Wassergehalte des Bodens.¹⁾

Bodenart:	Kulturpflanze	Anzahl der vorliegenden Beobachtungen	Wassergehalt des Bodens in % der Wasserkapazität:				
			20	40	60	80	100
Diluvialsand + 4 % Humus + 2 % Kalk	Sommerroggen	8	30,7	71,4	92,8	77,6	19,7
Quarzsand	"	2	25,4	55,2	100,0	—	—
Lehm	"	2	24,1	77,0	100,0	—	—
Torf.	"	2	31,2	61,2	100,0	—	—
Quarzsand	Gerste	1	73,3	100,0	95,2	83,3	—
Torfboden	Heu	1	1,3	11,3	100,0	83,0	50,9
Diluvialsand + 4 % Humus + 2 % Kalk	Erbse	3	14,1	50,3	87,4	100,0	9,3
Quarzsand	"	2	39,0	67,3	100,0	—	—
Lehm	"	2	8,2	56,0	100,0	—	—
Torf.	"	2	16,0	56,3	100,0	—	—
Diluvialsand + 4 % Humus + 2 % Kalk	Pferdebohne	1	16,0	48,4	63,9	100,0	33,8
Desgl.	Sommerraps	6	30,2	74,0	92,3	64,2	11,2
Desgl.	Kartoffel	2	15,8	48,2	89,0	100,0	62,5

Schlufsbemerkung.

Will man für das Verhalten des Wassers im Boden spezifische Eigenschaften der festen Bodenteilchen als grundlegend ansehen, so können als

¹⁾ H. Hellriegel, Wieviel Wasser beanspruchen unsere Getreidearten zur Produktion einer vollen Ernte: Amtliches Vereinsblatt für die Mark Brandenburg 1871, S. 60 (Befund für Gerste); vergl. auch R. Heinrich, Grundlagen zur Beurteilung der Ackerkrume. Wismar 1882, S. 29 (Befund für Heu). Alle anderen Zahlen wurden berechnet aus der Abhandlung von E. Wollny, Der Einfluß des Wassers auf das Produktionsvermögen der Kulturpflanzen; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 56 u. f., 95 u. f.

solche nur diejenigen in Betracht kommen, welche für die Bildung des Hohlraumvolumens maßgebend sind, nämlich die Größe der Oberfläche und die Gestalt der festen Bodenteilchen.

Beide Größen bedingen, wie wir in früheren Kapiteln sahen, die Größe der Oberfläche und die Gestalt des Hohlraumvolumens. Die Gestalt des Hohlraumvolumens aber wechselt sehr mit der Aneinanderlagerung der verschieden geformten festen Teilchen schon bei ein und demselben Boden. Die Größe der Oberfläche der festen Teilchen ist aber stets identisch mit der Größe der Oberfläche des Hohlraumvolumens und so für ein und denselben Boden spezifisch. Sie muß somit auch die Grundlage für das Verhalten der verschiedenen Bodenarten zum Wasser geben. Betrachten wir daraufhin das vorliegende Kapitel, so ist zunächst die Bodenoberfläche der Hygroskopizität, d. h. dem Gehalte des Bodens an hygroskopischem Wasser direkt proportional; von ihr wird auch die Wasserkapazität der verschiedenen Bodenarten in erheblichem Maße mitbedingt. Je größer die äußere Bodenoberfläche ist, um so höher ist ferner, wie wir sahen, die Steighöhe des Wassers im Boden, sofern diese Oberfläche nicht derartig groß wird, daß die Reibung der Wasserteilchen an ihr ein kapillares Aufsteigen des Wassers mehr und mehr oder auch vollkommen verhindert. *Von allen spezifischen Bodeneigenschaften dürfte deshalb auch für das Verhalten des Bodens zum Wasser die Größe der Bodenoberfläche die größte Bedeutung haben.*

Kapitel IV.

Die Bodenluft und ihr Verhalten zum Bodenwasser und zu den festen Bodenteilchen.

§ 37. Die Bodenluft und ihre Bedeutung für die Vegetation.

Nach unserer eingangs gegebenen Definition des landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich nutzbaren „Bodens“ wurde nächst den festen Bodenteilchen und dem Wasser noch die Luft als ein für den Pflanzenwuchs erforderlicher Bodenbestandteil angeführt.

Den Sauerstoff der Luft hat die Pflanzenwurzel zum Atmungsprozess nötig, jedoch genügen hierfür offenbar sehr geringe Mengen; es wäre sonst z. B. nicht möglich, Kulturpflanzen auch direkt im Wasser zu züchten, wo ihnen doch nur der im Wasser gelöste Sauerstoff der Luft zur Verfügung steht. Dafs dies aber möglich ist, beweisen die zahlreich angestellten Wasserkulturen.¹⁾ Der Wert, welchen die Luft als Bodenbestandteil besitzt, ist mehr ein indirekter. Ist nicht genügend Luft im Boden, so verfaulen die Humussubstanzen²⁾ und es bilden sich sodann freie Säuren, welche schon in sehr geringen Mengen giftig auf unsere Kulturpflanzen wirken.³⁾ Bei Gegenwart von Luft hingegen vermag der auf die Tätigkeit anaerob lebender Bakterien zurückzuführende „Fäulnisprozess“ nicht vor sich zu gehen. Die Humussubstanzen oxydieren; es findet der „Verwesungsprozess“ statt, welcher als Endprodukt die Kohlensäure liefert, welche in die Luft entweicht. Infolge dieses letzteren Prozesses finden wir, dafs die Bodenluft nicht die gleiche Zusammensetzung wie die atmosphärische Luft besitzt, sondern dafs dieselbe je nach der Menge der verwesten Substanzen sauerstoffärmer und kohlensäurereicher ist. Die ersten Untersuchungen hierüber dürften von Boussingault⁴⁾ stammen, welcher

¹⁾ Vergl. u. a. W. Knop, Lehrbuch der Agrikulturchemie. Leipzig 1868, Bd. I, S. 572 u. f.

²⁾ E. Wollny, Die Zersetzung der organischen Stoffe. Heidelberg 1897, S. 140 u. f.

³⁾ G. Stiehr, Über das Verhalten der Wurzelhärchen gegen Lösungen. Inaug.-Diss. Kiel 1903, S. 61 u. f.

⁴⁾ Boussingault et Léwy, Mémoire sur la composition de l'air confiné dans la terre végétale; Ann. de Chimie et de Physique III. série. tome XXXVII p. 1—50.

die Luft verschiedener Bodenarten auf ihren volumprozentigen Gehalt an Kohlensäure, Sauerstoff und Stickstoff untersuchte. Die Resultate dieser Untersuchungen mögen hier folgen:

Bodenart:	Volumprocente der Bodenluft an		
	Kohlen- säure	Sauerstoff	Stickstoff etc.
Leichter Sandboden, vor 10 Tag. gedüngt	9,74	10,35	79,91
Möhrenfeld, lange vorher gedüngt . .	0,93	19,50	79,57
Weinbergländ	1,06	19,72	79,22
Waldland (Krume)	0,79	19,66	79,55
„ (Untergrund)	0,87	19,61	79,52
Feuchter Sand, 5 Tage nach der Düngung	0,97	19,69	79,34
Spargelfeld	0,74	19,02	80,24
„ frisch gedüngt	1,54	18,80	79,66
Komposterde, sehr humusreich . . .	3,64	16,45	79,91
Artischockenfeld (strenger Tonboden) .	0,88	19,71	79,41
Luzerneboden	1,06	20,03	78,91
Topinamburfeld	0,72	19,97	79,31
Altes Weideland	1,79	19,41	78,80
Warmer Treibhausboden	0,97	19,66	79,37
Atmosphärische Luft	0,03	20,77	79,23

Eine Reihe von Forschern haben diese Resultate bestätigt. Auch sie fanden ein erhebliches Schwanken im Kohlensäuregehalt der Bodenluft, je nach dem Gehalt an frischem Dünger; doch zeigten sich auch bereits deutliche Unterschiede nicht nur bei verschiedenen Bodenarten, sondern auch bei ein und demselben Boden je nach der Bestellung¹⁾ und auch je nach der Jahreszeit.²⁾ Dies ist dadurch zu erklären, daß die Tätigkeit der Verwesungsbakterien um so größer ist, je höher die mittlere Tagestemperatur ist. Hierfür einige Zahlen von Wollny:³⁾

(Siehe die Tabelle auf Seite 224.)

Wollny folgert aus diesen Versuchen, daß die Verwesung um so besser auch vor sich gehe, je größer der Wassergehalt des Bodens sei.

¹⁾ J. Moeller. Über die freie Kohlensäure im Boden; Forsch. a. d. Geb. der Agrikulturphysik Bd. 2, S. 330.

²⁾ E. Ebermayer, Unters. . . . über den Einfluss verschiedener Bodenarten auf die Zusammensetzung der Bodenluft; ebenda Bd. 13, S. 15—49.

³⁾ E. Wollny, l. c. S. 143.

Ich glaube, daß zu dieser Schlußfolgerung die Zahlen der Tabelle einer Umarbeitung bedürfen; denn wenn z. B. das Hohlraumvolumen dieses Bodens 60 % betragen hätte, so würden bei einem Wassergehalt des Bodens von 6,79 % bei 50° C. $53,21 \times 2,517 = 134$ Volumenteile Sauerstoff, bei einem Wassergehalt des Bodens von 26,79 % würden $33,21 \times 8,152 = 271$ Volumenteile und bei einem solchen von 46,79 % würden $13,21 \times 9,748 = 129$ Volumenteile Sauerstoff in Kohlensäure übergeführt sein. Dies würde allerdings nur dann eintreten, wenn die Bodenluft vollkommen abgeschlossen von der atmosphärischen Luft wäre — eine Annahme, die in Wirklichkeit nicht zutrifft. Jedoch ist, wie wir später sehen werden, die Gasleitungsfähigkeit im Erdboden und die Gasdiffusion aus dem Erdboden sehr gering, und zwar um so geringer, je wasserhaltiger der Boden ist, wodurch die Wollnysche Schlußfolgerung noch fraglicher erscheinen muß. Wenn Wollny bei höherem Wassergehalt des Bodens eine an Kohlensäure reichhaltigere Luft gefunden hat, so kann dies somit wohl daran liegen, daß die Oxydation der Humussubstanzen schneller vor sich gegangen ist; es kann dies aber ebenfalls darin seinen Grund haben, daß die Kohlensäure in der Bodenluft nicht so schnell durch den Sauerstoff der Luft ersetzt wurde, was schliesslich zur Folge haben kann, daß die Verwesung wegen mangelnden Sauerstoffs ganz aufhört, dies gerade in dem Falle, wo die Bodenluft statt des gesamten Sauerstoffs Kohlensäure enthalten würde, mithin an dieser außerordentlich reich ist.

Wassergehalt des Bodens (Komposterde) %	Volumprozent Kohlensäure in der Bodenluft bei einer Bodentemperatur von				
	10° C.	20° C.	30° C.	40° C.	50° C.
6,79	0,203	0,322	0,686	1,469	2,517
26,79	1,838	5,424	6,350	8,006	8,152
46,79	3,507	6,149	8,212	9,186	9,748

Der hohe Gehalt der Bodenluft an Kohlensäure übt keinen bemerkenswerten Einfluß auf die Vegetation aus. Vom Standpunkt der Bodenkunde aus aber hat er für uns deshalb besonderes Interesse, weil er uns einen Anhalt für den Luftwechsel, sowie für die Schnelligkeit der Zersetzung der organischen Bodenbestandteile zu geben vermag.

Da das Verhalten der Bodenluft auch im Hohlraumvolumen des Bodens studiert werden muß, dies aber, wie wir zuvor sahen, selbst bei ein und demselben Boden großen Schwankungen unterworfen ist, so wird man auch bei allen Erscheinungen, welche sich mit dem Verhalten der Luft im Boden beschäftigen, zu keinen exakten Resultaten gelangen können.

§ 38. Die Gasabsorption durch den Boden.

Ebenso wie wir dies bei dem Wasserdampf ausführlich besprochen haben (§ 29), können auch andere Dämpfe, d. h. Gase, welche bei gewöhnlicher Temperatur nicht weit von ihrem Kondensationspunkte entfernt sind, an der Bodenoberfläche verdichtet werden. Für andere Gase ist eine derartige Absorption durch den Boden nicht nachzuweisen, wie dies u. a. schon Schübler¹⁾ für den Sauerstoff festgestellt hat. Die Absorptionsfähigkeit eines trockenen Bodens für Gase ist um so größer, je geringer die Dampfspannung des Gases ist; sie wird demnach bei ein und demselben Gase um so größer sein, je niedriger die Temperatur des Bodens ist.²⁾ Auch bei der Kondensation anderer Gase wird ebenso wie bei der des Wassergases eine Temperaturerhöhung des Bodens eintreten. Diese ist nach Beobachtungen von Stellwaag³⁾ bei Ammoniakgas sogar recht erheblich. Bei Kohlensäure hingegen war sie nur in einzelnen Fällen noch nachweisbar.

Im allgemeinen gehören die Untersuchungen über die Gasabsorptionsfähigkeit des trocknen Bodens mit zu den subtilsten Experimentaluntersuchungen, und dürfte es wohl diesem Umstande zuzuschreiben sein, daß die Resultate verschiedener Forscher⁴⁾ eine recht geringe Übereinstimmung aufweisen. Für die praktische Bodenkunde haben diese Untersuchungen *kein* Interesse, und glaube ich deshalb hier kein Belegmaterial wiedergeben zu brauchen.

Sollen in einem Boden Pflanzen wachsen können, so muß derselbe, wie wir in einem früheren Paragraphen (§ 30) sahen, wenigstens das hygroskopisch gebundene Wasser vollständig enthalten, d. h. es muß die Bodenoberfläche mit einer Molekülschicht Wasser bedeckt sein. Leiten wir jetzt Gase durch den Boden, so werden diese *nicht von den festen Bodenteilchen, sondern von dem Wasser absorbiert*, mit welchem sie lediglich in Berührung kommen. Demnach muß die Gasabsorption eines feuchten Bodens, welche pflanzenphysiologisch allein in Betracht kommen kann, um so größer sein, je mehr hygroskopisches und kapillares Wasser der Boden zurückzuhalten vermag, und ferner um so größer, je leichter und vollkommener ein Gas vom Wasser absorbiert wird.

Was die letzte Voraussetzung anbelangt, so absorbiert nach den physikalisch-chemischen Tabellen von Landolt und Börnstein ein Volumen Wasser bei 20° C.:

¹⁾ G. Schübler, Grundsätze d. Agrikulturchemie Bd. II, S. 82—83.

²⁾ Belegzahlen bei v. Dobeneck, l. c. Forsch. a. d. Geb. der Agrikulturphysik Bd. 15, S. 205.

³⁾ Stellwaag, l. c. Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 5, S. 224—225.

⁴⁾ Vergl. Ammon, l. c. ebenda Bd. 2, S. 32, 35, 38 und v. Dobeneck, l. c. ebenda Bd. 15, S. 216—217.

	0,0284	Volumina	Sauerstoff
oder	0,0140	„	Stickstoff
„	0,0170	„	Luft
„	0,9014	„	Kohlensäuregas
„	654,0	„	Ammoniakgas.

Demnach werden von 100 Gewichtsteilen Wasser folgende Gewichtsteile Gas absorbiert:

	0,004	Sauerstoff
oder	0,002	Stickstoff
„	0,002	Luft
„	0,178	Kohlensäure
„	49,809	Ammoniak.

Die gewöhnlichen Bodenarten enthalten nun ca. 2—4 % hygroskopisches Wasser. Demnach kann bei denselben in diesem Feuchtigkeitszustand höchstens eine Absorption von Ammoniakgas, und zwar in der Höhe von 1—2 % zu beobachten sein.

So konnte es nicht wundernehmen, daß Schlösing¹⁾ bei feuchtem Boden keine Absorption der Kohlensäure nachweisen konnte; und obwohl Wollny seinerzeit dies Resultat anzweifelte, so sollte es später doch von einem seiner Schüler bestätigt werden. Dieser letztere, v. Dobeneck,²⁾ stellte aber seinerseits die erhebliche Absorptionsfähigkeit des feuchten Bodens für Ammoniakgas fest, dessen Resultate hier folgen mögen.

(Siehe die Tabelle auf Seite 227.)

100 g Wasser sollten 49,8 g Ammoniakgas absorbieren. v. Dobeneck fand hier überall etwas höhere Zahlen. Die Differenz dürfte wohl stets auf die bei diesen Versuchen unvermeidlichen Kondensationen zurückzuführen sein. Nur beim „Humus“, welcher aus Torf durch Extraktion mit Äther und Alkohol und durch Auskochen mit Salzsäure gewonnen war, dürften auch nach Ansicht des Versuchsanstellers chemische Vorgänge das Resultat vollkommen verschleiern.

Die physikalische Absorption des Ammoniakgases durch das Bodenwasser ist pflanzenphysiologisch von großer Bedeutung, weil dieses Gas, welches einen Hauptnährstoff der Pflanze bildet, vielfach im Boden unter der Einwirkung von Bakterien entsteht und sicher größtenteils ungenutzt in die Luft entweicht, wenn es nicht so stark vom Bodenwasser resorbiert würde. Will man der Gasabsorption des Bodens für den Land- und Forstwirtschaft eine Bedeutung beimessen, so dürfte dies wohl nur im Hinblick auf

¹⁾ Th. Schlösing. Über die Kondensation der Gase durch die Ackererde; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 7, S. 325.

²⁾ v. Dobeneck, l. c. ebenda Bd. 15, S. 217.

die durch das Bodenwasser bewirkte Absorption des Ammoniakgases geschehen.

Feuchtes Ammoniakgas wurde über feuchten Boden geleitet und von diesem bei 20° C. absorbiert.

	Bodenart:					
	Quarz	Kaolin	Humus	Kalk		
	Wassergehalt:					
	23,0 %	21,2 %	49,5 %	22,5 %		
100 g Boden absorbierten . . . Oder berechnet auf das Bodenwasser: 100 g Wasser absorbierten	12,2 g 53,0 g	11,8 g 55,7 g	38,9 g 78,6 g	12,3 g 54,7 g		
Pro	<i>Kaolin</i> absorbierte ferner bei einem Wassergehalt von					
	0 %	11,7 %	21,2 %	30,3 %	41,1 %	53,7 %
100 g Boden resp. pro 100 g Wasser	3,26 g (49,8 g)	6,62 g 56,60 g	11,79 g 55,70 g	16,38 g 54,00 g	21,83 g 53,10 g	27,87 g 51,90 g

§ 39. Die Luftkapazität des Bodens.

Unter Luftkapazität des Bodens versteht man das Volumen, welches die Bodenluft einnimmt, ausgedrückt in Prozenten des Bodenvolumens. Die Bestimmungsmethode ist die folgende. Man hebt ein bestimmtes Volumen Boden aus der Erde, wie zu der Bestimmung der Wasserkapazität, trocknet dies und bestimmt so das von dem Bodenwasser eingenommene Volumen (w_c). Aus dem Gewicht der festen Bodenteilchen berechnet man ferner mit Hilfe des von diesen festgestellten spezifischen Gewichtes das von ihnen eingenommene Volumen (v). Zieht man diese beiden Volumina von dem Gesamtbodenvolumen (V) ab, so ist die Differenz das von der Bodenluft eingenommene Volumen l :

$$V - (v + w_c) = l.$$

Die Luftkapazität L ist demnach:

$$L = \frac{l \cdot 100}{V}.$$

Ist der Boden trocken, so entspricht die Luftkapazität dem in Prozenten des gesamten Bodens ausgedrückten Hohlraumvolumen. Je nachdem dieses Hohlraumvolumen nun zufällig durch die Aneinanderlagerung der festen Teilchen verhältnismäßig groß oder klein ist, je nachdem muß

sich auch die Luftkapazität des Bodens ändern, und je nachdem ferner dieses Hohlraumvolumen mit mehr oder weniger Wasser angefüllt ist, ist die Luftkapazität des Bodens eine andere. Ist das Hohlraumvolumen des Bodens ganz mit Wasser angefüllt, ist also $w_c = V - v$, so ist das Luftvolumen im Boden (l) und somit die Luftkapazität (L) desselben gleich null.

Man sieht daraus, daß die Luftkapazität des Bodens eine außerordentlich wechselnde Größe ist; wenn ich dennoch hier einige Resultate¹⁾ wiedergebe, so geschieht dies, einmal um zu zeigen, welche Größen die Luftkapazität im Höchsthalle bei verschiedenen Bodenarten erreichen kann, und ferner um nachzuweisen, daß bei der Wollnyschen größten Wasserkapazität der Boden keineswegs ganz mit Wasser gesättigt ist, sondern je nach der Krümelstruktur mehr oder weniger Luft enthält. Es dient dies zur Erhärtung meiner Auslegung der Wollnyschen Resultate (§ 36), daß die Pflanzen am besten gedeihen, wenn 50% des Hohlraumvolumens mit Wasser angefüllt sind. Wir werden danach also auch die höchsten Erträge von einem Boden erzielen, wenn seine Luftkapazität ca. 50% beträgt, und zwar werden diese Höchsterträge schneller abnehmen, wenn die Luftkapazität eine größere, als wenn sie kleiner als 50% wird, wie sich dies aus der Tabelle auf Seite 220 ergibt.

(Siehe die obere Tabelle auf Seite 229.)

Die nebenstehenden Resultate zeigen zunächst, daß vergleichende Bestimmungen der Luftkapazität verschiedener Bodenarten bei größter Wasserkapazität große Fehler aufweisen — Fehler, welche in gleicher Weise der Wasserkapazitätsbestimmung anhaften; denn es ist natürlich, daß, je größer die Sandkörner sind, um so mehr nichtkapillare Hohlräume auftreten, mithin die Luftkapazität um so größer wird. Es liegt aber meines Erachtens kein Grund dafür vor, daß die Luftkapazität, wenn die Luft einmal ganz vom Wasser verdrängt ist, wieder höher wird, wenn die festen Bodenteilchen sehr fein werden, wie dies die Resultate mit Quarzsand dartun. Die Ergebnisse zeigen ferner, daß die Luftkapazität mit der Größe der Bodenkrümel wächst, und daß dieselbe beim Sand den geringsten, dann beim Ton und beim Humus endlich den größten Schwankungen unterliegt kann.

Steine im Boden verringern die Luftkapazität und auch das Hohlraumvolumen des Bodens proportional dem von ihnen eingenommenen Bodenvolumen. Dies ergibt sich schon durch die bloße Anschauung, wie auch durch eine Neuverarbeitung Wollnyscher Resultate.²⁾ Diese waren derart angestellt worden, daß einem humosen Kalksand verschiedene Mengen

¹⁾ E. Wollny. Unters. über die Luftkapazität der Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 8, S. 368—370.

²⁾ E. Wollny, l. c. Bd. 8, S. 370.

Bodenart und Korngröße in mm:	Im trockenen Boden:	Bei größter Wasserkapazität:			
	Luft- kapazität	Volumen der festen Boden- teilchen	Volumen des Wassers	Volumen der Luft	
Quarzsand	0,010—0,071	47,9	52,1	44,1	3,8
	0,071—0,114	46,9	53,1	44,0	2,9
	0,114—0,171	43,3	56,7	42,5	0,8
	0,171—0,250	41,8	58,2	40,0	1,8
	0,250—0,500	40,6	59,4	38,7	1,9
	0,500—1,000	39,1	60,9	36,8	2,3
1,000—2,000	38,2	61,8	34,5	3,7	
Lehmpulver < 0,25	53,0	47,0	52,4	0,6	
Lehmkrümel	0,05—1,00	59,3	40,7	47,4	11,9
	1,00—2,00	59,7	40,3	48,0	11,7
	2,00—4,00	60,6	39,4	45,0	15,6
	4,00—6,75	60,5	39,5	41,9	18,6
	6,75—9,00	61,8	38,2	41,0	20,8
Quarz	41,5	58,5	41,2	0,3	
Humus	75,4	24,6	75,4	0,0	
Ton	58,3	41,7	58,3	0,0	

Steine zugesetzt wurden, und daß sodann immer wieder von neuem die Luftkapazität des Bodens bestimmt wurde, welche derselbe im trockenen Zustande besaß.

Steine im Liter Boden g	Luftkapazität	Steine in Volum- prozenten des Bodens	Verringerung der Luftkapazität
0,0	53,1	0,0	0,0
62,5	51,9	2,4	1,2
125,0	50,2	3,3	2,9
250,0	47,2	6,6	5,9
375,0	42,8	9,9	10,3

Die hier auftretenden Differenzen sind auf die unvermeidlichen Fehler zurückzuführen, welche sich bei der Einfüllung des Bodens in ein Volumenmaß infolge der verschiedenen zufälligen Lagerung einstellen.

§ 40. Das Leitungsvermögen des Bodens für Luft.

Was für die Leitungsfähigkeit des Wassers im Boden gilt, trifft ebenso für die der Luft zu. Auch die Luftmenge (L), welche durch den Boden in der Zeiteinheit hindurchgeht, ist proportional dem Druck (p), mit welchem dieselbe durchgepresst wird, und bei gleichmäßig gelagertem und gleichartigem Boden umgekehrt proportional der Länge der Bodenschicht (h), durch welche sie hindurchgehen muß. Also:

$$L = \frac{p}{h} \cdot c,$$

worin c der Proportionalitätsfaktor ist.

Dies Gesetz, welches schon Renk,¹⁾ Ammon²⁾ und v. Welitschkowsky³⁾ experimentell festzustellen suchten, hat erst durch Wollny⁴⁾ seine exakte Bestätigung für den Boden gefunden. Es soll deshalb die Wollnysche Versuchsanordnung hier kurz skizziert werden. Fig. 34 *b* ist ein 5 cm weites und 125 cm langes Rohr, in welches der zu untersuchende Boden eingefüllt wird. Dasselbe ist unten mit einem feinen Drahtnetz verschlossen. Von oben (a) aus wird die durch ein Gebläse erzeugte Prefsluft hineingelassen. Der Druck p wird an einem oben in der Nähe des Luftzutritts befindlichen, mit gefärbtem Wasser versehenen Manometer (m) abgelesen. Da die Höhe der Bodenschicht h direkt gemessen werden kann, so war nur noch erforderlich, die durchgepresste Luftmenge (L) zu bestimmen. Dies geschah dadurch, daß die Luft vor dem Eintritt in das Versuchsrohr eine Gasuhr passieren mußte. Um die Temperatur ferner konstant zu halten und auch die Abhängigkeit der Luftleitung von der Höhe der Temperatur beobachten zu können, wurde das Versuchsrohr noch

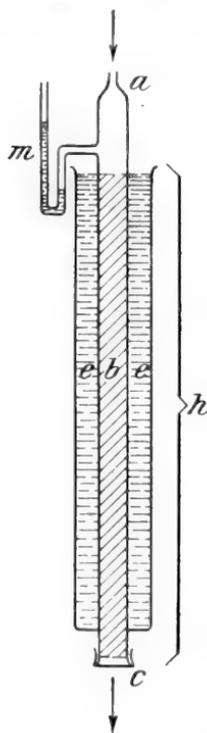


Fig. 34. Zum Durchdringen der Luft durch den Boden.

mit einem mit Wasser gefüllten Blechmantel (e) umgeben, welcher beliebig erwärmt und dann durch zweckentsprechend angebrachte Termoregulatoren

¹⁾ Friedr. Renk, Über die Permeabilität des Bodens für Luft; Zeitschr. f. Biologie Bd. 15, S. 205 u. f.

²⁾ Georg Ammon, Unters. über die Permeabilität des Bodens für Luft; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 3, S. 209 u. f.

³⁾ D. v. Welitschkowsky, Beitrag zur Kenntnis der Permeabilität des Bodens für Luft; Archiv für Hygiene Bd. 2, S. 483 u. f.

⁴⁾ E. Wollny, Unters. über die Permeabilität des Bodens für Luft; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 16, S. 193—222.

auf konstanter Temperatur erhalten werden konnte. Bei Versuchen, bei welchen gleichzeitig auch die durchgeleitete Luft erwärmt werden sollte, wurde diese erst durch Bleirohre, welche in ein entsprechend warmes Wasserbad eingelegt waren, hindurchgeführt.

Von den Resultaten dieser Versuchsanordnung seien die folgenden wiedergegeben.

Bei einer Höhe der Bodenschicht von 10 cm und einem Wasserdruck von 10 cm wurden die folgenden Luftmengen in Liter pro Stunde gefördert:

Bodenart und Korngröße in mm:		LiterLuft	Bodenart und Korngröße in mm:		LiterLuft
Quarzsand	0,010—0,071 . . .	1,95	Kaolin		0,88
	0,071—0,114 . . .	35,25	Torf		163,70
	0,114—0,171 . . .	77,12	Lehmpulver, { locker . . .		72,00
	0,171—0,250 . . .	140,00	0,0—0,25 { fest . . .		2,37
	0,250—0,500 . . .	358,25	Lehmkrümel, { locker . . .		1740,00
	0,500—1,000 . . .	713,00	0,5—4,0 {		
	1,000—2,000 . . .	2883,60			

Bei den Versuchen zur Untersuchung der Abhängigkeit der Permeabilität des Bodens von der Temperatur (*t*) erhielt Wollny die folgenden Resultate (in Liter Luft pro Stunde usw.):

<i>t</i>	Quarzsand von 0,171 bis 0,25 mm Korngröße	Differenz	<i>t</i>	Torf	Differenz
0°	29,14	1,74	0°	94,3	4,7
10°	27,40		10°	89,6	
20°	25,59	1,81	20°	84,6	5,0
30°	23,70	1,89	30°	79,6	5,0
40°	21,73	1,97	40°	74,4	5,2

Es scheint nach den Resultaten dieser Versuche

$$t_0 - t_1 = c (L_1 - L_0)$$

zu sein, oder wenn wir diese Gleichung der Geraden auf die gewöhnliche Form bringen:

$$L = a \cdot t + k.$$

Dieselbe lautet somit

- für den Quarzsand $L = (-0,186 \cdot t + 29,14)$ l pro Stunde,
- für den Torf $L = (-0,500 \cdot t + 94,30)$ l pro Stunde.

Sie besagt, dafs die durch einen Boden bei konstantem Druck und konstantem Volumen durchgehenden Luftmengen proportional mit der Temperatur des Bodens abnehmen.

Dieser Befund Wollnys läfst sich wohl durch das Gasgesetz erklären. Wollny bestimmte nämlich die durch den Boden durchgeleiteten Luftmengen stets bei gleicher Temperatur, bevor er sie erwärmte und durch den ebenfalls erwärmten Boden hindurchleitete. Das Charlessche (oder Gay-Lussacsche) Gesetz besagt nun, dafs die von derselben Menge Gas eingenommenen Volumina bei konstantem Druck proportional mit der Temperatur wachsen. Somit wird die ursprünglich durch den Boden durchgeleitete Luftmenge um je 10° C. Erwärmung stets um einen gleichen Betrag an seinem Volumen zunehmen; mithin wird ein wärmeres Gas langsamer durch den Boden hindurchgehen als ein kaltes, da sein Volumen entsprechend gröfser ist, oder es mufs in der Zeiteinheit eine geringere Menge eines Gases durch den Boden hindurchgehen, wenn dasselbe erwärmt ist, und zwar mufs die Differenz zu der Menge des um 1° C. kälteren Gases stets die gleiche sein.

Die Differenzen sind bei den Wollnyschen Resultaten für je 10° Temperaturdifferenz nicht absolut dieselben. Sie scheinen mit höherer Temperatur zuzunehmen. Dies kann darin begründet sein, dafs sich auch die festen Bodenteilchen bei der Erwärmung ausdehnen und hierdurch das Hohlraumvolumen des Bodens, wenn auch nur in sehr geringen Grenzen, ein anderes wird.

Wie sich aus einem Vergleich der beiden zuletzt wiedergegebenen Tabellen ersehen läfst, hat der Einflufs der Höhe der Temperatur auf die durch den Boden durchgehenden Luftmengen keine praktische Bedeutung. Die hier beobachteten Unterschiede sind verschwindend gering gegen diejenigen, welche durch die Gestalt des Hohlraumvolumens bei verschiedenen Bodenarten und auch bei verschiedener Lagerung (Struktur) eines und desselben Bodens auftreten.

Ferner übt auch die Schichtung des Bodens, sowie sein augenblicklicher Wassergehalt einen sehr erheblichen Einflufs auf die Luftdurchlässigkeit des Bodens aus.

Im allgemeinen richtet sich die durch den Boden von verschiedener Schichtung durchgehende Luftmenge nach der Länge und dem Durchmesser der Kapillaren, welche in der dichtgelagertsten Bodenschicht resp. bei den feinsten Bodenbestandteilen vorhanden sind. So liefsen bei 5,0 cm Wasserdruck folgende Bodensäulen die folgenden Luftmengen (in Liter pro Stunde) hindurch:

(Siehe die Tabelle auf Seite 233.)

Ebenso vermag eine nur 1 bis 5 cm starke Schicht sehr feinkörnigen Bodenmateriales, wie von kohlenurem Kalk oder von Lehm pulver, die die

Luft sonst vorzüglich leitenden Bodenarten fast vollkommen undurchlässig für Luft zu machen.

	Quarzsand von einer Korngröße von					
	0,25 bis 0,5 mm		0,5 bis 1,0 mm		1 bis 2 mm	
Obere Schicht 25 cm	—		—		—	
Untere „ 25 „	0,01 bis 0,071 mm	0,01 bis 0,071 mm	0,071 bis 0,114 mm	0,071 bis 0,114 mm	0,114 bis 0,171 mm	0,114 bis 0,171 mm
Luftmengen . . .	2,25	1,15	9,15	8,92	24,6	23,8

Alle Mittel, welche das Hohlraumvolumen des Bodens somit in einer Schicht, durch welche die Luft hindurch muß, verengen, so auch das Feststampfen des Bodens und das Walzen desselben, wirken verlangsamen auf die Luftdurchleitung ein. Von allen natürlichen Faktoren hat aber das Wasser in dieser Beziehung den größten Einfluß, insofern dies direkt die Hohlräume ganz für den Luftzutritt abzuschließen vermag. Wir haben im vorhergehenden Kapitel gesehen, wie groß die Kraft ist, mit welcher das Wasser im Boden kapillar festgehalten werden kann, und es ergibt sich hieraus, daß feinkörnige Bodenarten, sobald sie mit Wasser gesättigt sind, unter gewöhnlichen Druckverhältnissen undurchlässig für Luft sind. In kapillar mit Wasser gesättigten, grobkörnigem Sande, in welchem das Wasser eine Steighöhe von 10 cm in der weitesten Kapillare erreicht, wird somit der Wasserdruck, mit welchem man durch diesen Luft durchpressen kann, über 10 cm groß sein müssen (vergl. § 33, S. 190, und Fig. 31). In welcher gesetzmäßigen Weise die Durchlüftbarkeit eines Bodens mit dessen Wassergehalt abnimmt, läßt sich wegen der großen Fehler, welche die Versuchsanstellung bedingt, nicht ermitteln. Theoretisch muß diese Abnahme ähnlich verlaufen wie die Zunahme der wasserhaltenden Kraft des Bodens (vergl. § 32, S. 181).

Beim gewachsenen Boden ist die Durchlüftungsfähigkeit von Heinrich¹⁾ gemessen worden. Dieser treibt einen aus starkem Eisenblech gefertigten prismatischen Kasten von einer quadratischen Grundfläche von 10 × 10 cm 10 cm tief in den Boden ein, an welcher Stelle außen als Merkmal 5 cm breite Eisenblechstreifen im rechten Winkel angesetzt sind. Oben ist der Kasten bis auf eine seitlich angebrachte Öffnung, durch welche die Luft eingepreßt wird, verschlossen. Bei dieser Zuleitung ist auch das erforderliche Manometer angebracht, wie dies auch Fig. 31 zeigt. Heinrich beobachtete nun die Zeit, welche erforderlich war, bis unter einem bestimmten konstanten Druck 10 l Luft durchgepreßt wurden.

¹⁾ R. Heinrich, Grundlagen zur Beurteilung der Ackerkrume. Wismar 1882, S. 125—126, 222.

Hierbei zeigte sich, daß z. B. bei mit Wasser gesättigtem lehmigen Boden bei 20 mm Quecksilberdruck keine Luft hindurchging; war aber der Druck einmal erst so weit gesteigert, bis Luft durch den Boden hindurchging (z. B. auf 40 mm Quecksilberdruck), so trat dies auch dann bei 20 mm Quecksilberdruck ein. Es ist dies die gleiche Beobachtung, welche wir in § 33 S. 191 festgestellt haben. Diese Unsicherheit zeigt sich bei all diesen Untersuchungen. Praktisch sollte man deshalb im vorliegenden Falle so verfahren, daß man den Druck nie über die maximalen Barometerstandschwankungen (= ca. 20 mm Quecksilber) steigert. Aber auch so müssen, je nach der zufälligen Lagerung der festen Bodenteilchen, erhebliche Schwankungen auftreten, wie dies auch die Resultate von Heinrich zur Genüge ergeben. So fand dieser, daß bei einem naturtrockenen Sandboden die 10 l Luft in den folgenden Zeiträumen hindurchgingen:

- | | |
|---------------------------|--|
| 1. Bei 20 mm Wasserdruck | a) in 12 Min. 52 Sek. = reduziert auf 10 mm Wasserdruck in 25 Min. 44 Sek. |
| 2. „ 20 „ „ | b) in 17 Min. 9 Sek. = reduziert auf 10 mm Wasserdruck in 34 Min. 18 Sek. |
| 3. „ 20 „ „ | c) in 16 Min. 9 Sek. = reduziert auf 10 mm Wasserdruck in 32 Min. 18 Sek. |
| 4. „ 40 „ „ | a) in 8 Min. 34 Sek. = reduziert auf 10 mm Wasserdruck in 34 Min. 16 Sek. |
| 5. „ 40 „ „ | b) in 8 Min. 13 Sek. = reduziert auf 10 mm Wasserdruck in 32 Min. 52 Sek. |
| 6. „ 2 „ Quecksilberdruck | a) in 5 Min. 0 Sek. = reduziert auf 10 mm Wasserdruck in 13 Min. 30 Sek. |
| 7. „ 2 „ „ | b) in 5 Min. 13 Sek. = reduziert auf 10 mm Wasserdruck in 14 Min. 5 Sek. |

In der Natur findet der Luftwechsel im Boden durch die Schwankungen des Luftdruckes, wie auch insonderheit durch Temperaturdifferenzen statt. Hat sich ein Boden bei Tage sehr erwärmt, und kühlt sich abends die Luft in der Atmosphäre sehr ab, so wird die warme Bodenluft in die Atmosphäre übergehen, und die kalte atmosphärische Luft an ihre Stelle treten. Folgt nach hohem Luftdruck ein geringerer, so wird ebenso Bodenluft in die Atmosphäre eintreten und umgekehrt. Auch der Wechsel der Höhe des Grundwasserstandes kann einen Luftwechsel im Boden hervorrufen, ebenso wie das Niederschlagswasser Bodenluft verdrängt, und entsprechend der Wasserverdunstung atmosphärische Luft in den Boden eintritt.

Wie gering der Luftwechsel im Boden im allgemeinen ist, ersieht man am besten an der Schnelligkeit der Diffusion des sich im Boden bildenden Kohlensäuregases in die Atmosphäre. — Bevor ich hierfür einige Zahlen gebe, möchte ich vorausschicken, daß nach Girard¹⁾ unter gleichen

¹⁾ Girard, Mémoires de l'Académie de l'Institut de France T. V.

Druckverhältnissen die Ausflußgeschwindigkeit verschiedener Gase die gleiche ist, mithin für Kohlensäure wie für die Luft die gleichen Gesetze gelten,¹⁾ vorausgesetzt natürlich, daß die Kohlensäure resp. die Gase nicht vom Boden absorbiert werden.

Ebermayer²⁾ fand, daß an zwei Stellen *a* und *b*, die nur einige Schritte voneinander entfernt lagen, der gleiche Boden folgende Kohlensäuremengen in je 1000 cem Bodenluft in 1 m Tiefe unter der Erdoberfläche aufwies:

Beobachtung:	a) Im nackten, unbearbeiteten Boden	b) Unter Akazien- gebüsch	In freier Luft 2 m über dem Boden
Vom Januar bis April	9,87	4,59	0,37
Vom Mai bis August	23,11	14,29	0,46
Im Mittel	16,49	9,44	0,41

Weit instruktiver noch als die vorstehenden Zahlen sind die Resultate von Salger,³⁾ welcher den Kohlensäuregehalt des Bodens in der Nähe einer Versitzgrube, in welche die Abfälle aus der Anatomie der Erlanger Universität gelangten, untersuchte. Salger entnahm aus dem Boden die Luft mittelst je zweier Bleirohre, welche 1½ resp. 3 m in den Boden eingelassen waren. Teilweise wurde nach der ersten Untersuchung die Grundluft mittelst eines Bunsenschen Aspirators aus dem Boden einen Tag lang ausgepumpt und am Tage nach der Ventilation der Kohlensäuregehalt von neuem bestimmt. Es waren hier in tausend Teilen Luft folgende Kohlensäuremengen:

In einer Erdtiefe von	Versuch 1				Versuch 2			
	nahe der Versitzgrube		20 m von der Versitzgrube		nahe der Versitzgrube		20 m von der Versitzgrube	
	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
	Ventilation		Ventilation		Ventilation		Ventilation	
1,5 m	7,33	4,83	5,70	—	8,64	4,34	6,47	4,04
3,0 m	9,27	9,19	3,90	—	14,86	15,34	10,27	9,84

¹⁾ Vergl. F. Hannén, Unters. über den Einfluß der physikalischen Beschaffenheit des Bodens auf die Diffusion der Kohlensäure; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 15, S. 6 u. f.

²⁾ E. Ebermayer, Mitteilungen über den Kohlensäuregehalt der Waldluft und des Waldbodens im Vergleich zu einer nicht bewaldeten Fläche: ebenda Bd. 1, S. 159.

³⁾ C. Salger, Bodenuntersuchung mit besonderer Berücksichtigung der Ventilation auf die Kohlensäuremenge im Boden. Inaug.-Diss. Erlangen 1880.

Bei 3 m Tiefe hat der Luftwechsel keinen Einfluß auf den Kohlensäuregehalt der Bodenluft gehabt. Es trat an die Stelle der ausgepumpten Bodenluft keine Luft von oben herein. Dies ist bei einer Tiefe von 1,5 m offenbar der Fall gewesen. Betrachtet man hier die Kohlensäurequelle als eine kontinuierlich gleichmäßig fließende, so ist es doch wunderbar, daß bei einer Entfernung von 20 m von dieser, in einer Tiefe, wo man mit keiner neuen Kohlensäurequelle rechnen kann, noch solche Kohlensäuremengen angehäuft waren. Es spricht dies meines Erachtens deutlich dafür, daß der Luftwechsel in den tieferen Bodenschichten ganz außerordentlich langsam vor sich geht.

Schlufsbemerkung.

Da Wasser und Luft das Hohlraumvolumen im Boden anfüllen, so muß auch das Verhalten der Luft im Boden von denselben Faktoren abhängig sein wie das Verhalten des Wassers in diesem, nur in umgekehrter Weise. Wollen wir somit auch hier eine Abhängigkeit zwischen dem Verhalten des Bodens zur Luft und den spezifischen Eigenschaften der festen Bodenteilchen aufsuchen, so würde von den letzteren auch hier wieder vornehmlich die Größe der Bodenoberfläche in Betracht kommen. — Da nun das Wasser in einem Boden um so fester gehalten wird, je größer die Bodenoberfläche ist, so folgt hieraus für die Luft, daß die Luftkapazität eines Bodens und die Durchlässigkeit des Bodens für Luft um so größer ist, je kleiner die Bodenoberfläche, und zwar insonderheit die äußere Bodenoberfläche ist. Demnach muß in grobkörnigem Boden die Luftkapazität und die Luftdurchlässigkeit am größten, in strengem Tonboden am geringsten sein. Das sind in der Praxis allbekannte Tatsachen, die keines Beweises bedürfen.

Kapitel V.

Das Verhalten des Bodens zur Wärme.

§ 41. Der Einfluss der Bodenwärme auf die Vegetation.

Während wir bislang die einzelnen Bodenbestandteile und ihre Beziehungen zueinander betrachteten, soll im folgenden Kapitel der Boden als variables Ganzes aufgefasst und auf sein Verhalten zur Wärme hin untersucht werden. Der Einfluss, welchen die Bodenwärme auf die Vegetation ausübt, ist dem Praktiker bekannt. In einem „kalten Boden“ erwacht die Vegetation im Frühjahr viel später als in einem „warmen Boden“; da aber in jedem Falle die Vegetationszeit mit der Wärmeabnahme der Atmosphäre aufhören muss, so ist die Folge hiervon, dass in „kalten Bodenarten“ die Vegetationszeit kürzer ist als in „warmen Bodenarten“, mithin der Boden auch nicht dementsprechend ausgenutzt werden kann.

Dass einzelne unserer Kulturpflanzen einen warmen Boden verlangen oder vielmehr in einem kalten Boden sehr viel geringere Erträge ergeben, ist eine bei Gerste, Luzerne und Gurken, Wein u. a. oft konstatierte Tatsache. Der Einfluss der Wärme eines Bodens auf die Vegetation lässt sich schwer experimentell feststellen, denn mit der Wärme des Bodens variiert, wie wir gleich sehen werden, auch der Wassergehalt desselben in ganz erheblicher Weise.

§ 42. Die spezifische Wärme oder die Wärmekapazität des Bodens.

Die spezifische Wärme eines Bodens setzt sich zusammen aus den spezifischen Wärmen der einzelnen Bodenbestandteile, und zwar variiert sie je nach den Mengen, in welchen die einzelnen Bestandteile im Boden vertreten sind. Da wir aus pflanzenphysiologischen Gründen stets das Bodenvolumen zugrunde legten, so wollen wir dasselbe auch bei den folgenden Berechnungen beibehalten.

Wie wir in § 7 sahen, beträgt die spezifische Wärme eines Kubikzentimeters fester Masse von:

Quarzsand	0,517 cal.
Kalk	0,582 „
Ton	0,576 „
Torf	0,601 „

Die spezifische Wärme eines Kubikzentimeters Wasser beträgt bekanntlich 1,00 cal., die eines Kubikzentimeters Luft 0,000 306 oder für unsere Berechnungen rund 0,000 cal.

In § 39 sahen wir ferner, daß Quarz im trockenen Zustande eine Luftkapazität von 41,5 % besitzt. Danach beträgt die spezifische Wärme desselben pro Volumeneinheit:

$$\frac{58,5 \cdot 0,517 + 41,5 \cdot 0}{100} \text{ cal.} = 0,302 \text{ cal.}$$

Bei Humus, welcher eine Luftkapazität von 75,4 % besaß, ist dieselbe:

$$\frac{24,6 \cdot 0,601 + 75,4 \cdot 0}{100} \text{ cal.} = 0,148 \text{ cal.,}$$

bei Ton im trockenen Zustande:

$$\frac{41,7 \cdot 0,576 + 58,3 \cdot 0}{100} \text{ cal.} = 0,240 \text{ cal.}$$

Im allgemeinen aber müssen wir auch mit dem Wassergehalte des Bodens rechnen. Nehmen wir deshalb an, der Boden enthalte im Hohlraumvolumen 50 % Wasser und 50 % Luft, so gestaltet sich die Rechnung für den Quarzsand wie folgt:

$$\frac{58,5 \cdot 0,517 + 20,75 \cdot 0 + 20,75 \cdot 1}{100} \text{ cal.} = 0,510 \text{ cal.}$$

In derselben Weise ergibt sich für den Humus 0,525 cal. und für den Ton 0,532 cal. Man ersieht aus diesen Zahlen den kolossalen Einfluß, welchen der Wassergehalt des Bodens auf die spezifische Wärme desselben ausübt, und daß somit lediglich die Wassermenge, welche ein Boden zu fassen vermag, nicht die Verschiedenheit in der spezifischen Wärme der verschiedenen festen Bodenteilchen hier in Betracht gezogen werden muß; damit wird diese Bodeneigenschaft auf die früher eingehend erörterten Bodeneigenschaften, nämlich auf die Gestalt und die Größe des Hohlraumvolumens des Bodens und auf den momentanen Wassergehalt desselben zurückgeführt. Es sollen deshalb hier nur einzelne berechnete Werte folgen:

Bodenart:	Spezifische Wärmen in cal. pro cem Boden bei einem Wassergehalte des Bodens von										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	% des Hohlraumvolumens										
Sand . .	0,302	0,344	0,385	0,427	0,468	0,510	0,551	0,592	0,634	0,676	0,717
Humus . .	0,148	0,223	0,300	0,374	0,449	0,525	0,600	0,676	0,751	0,826	0,902
Ton . .	0,240	0,298	0,357	0,415	0,473	0,532	0,590	0,648	0,706	0,765	0,823

Nach den vorstehenden Zahlen ist der Humus der Boden, welcher sich im trocknen Zustande am schnellsten, im nassen Zustande am langsamsten erwärmt. Der Sand ist gerade umgekehrt im trocknen Zustande der kälteste, im nassen Zustande der wärmste Boden. Ton hält zwischen den Extremen die Mitte. Bei einem mittleren Wassergehalte bestehen zwischen den verschiedenen Bodenarten keine nennenswerten Unterschiede. Dafs natürlich auch der momentane Strukturzustand des Bodens hier eine wesentliche Rolle spielt, ergeben ähnliche Berechnungen wie die vorstehenden, die sich mit Hilfe des im vorliegenden Buche niedergelegten Zahlenmaterials leicht anstellen lassen.

§ 43. Die Wärmeleitungsfähigkeit des Bodens.

Die Versuche über die Wärmeleitungsfähigkeit des Bodens sind leider stets¹⁾ so angestellt worden, dafs man sich von dem Gehalt des Bodens an festen Teilchen, an Wasser und an Luft keine Rechenschaft ablegte. Die Resultate dieser Versuche fordern deshalb kein allgemeines Interesse. — Die Wärme verteilt sich von der Wärmequelle aus gleichmäfsig im Boden nach allen Seiten hin. Sie wird also im Boden geleitet werden je nach dem Volumen, welches von Wasser, Luft und festen Bodenteilchen eingenommen wird. Man ersieht so leicht, dafs hier genau die gleichen Berechnungen statthaben müssen wie bei der Berechnung der spezifischen Wärme des Bodens im vorigen Paragraphen. Als Mafs für die Wärmeleitungsfähigkeit einer Substanz diene uns (§ 8) die Wärmemenge k in cal., welche durch eine ebene Platte aus der betreffenden Substanz von 1 cm Dicke durch jeden Quadratzentimeter in der Sekunde hindurchgeht, wenn beide Seiten der Platte eine um 1° C. verschiedene Temperatur haben.

Die Wärmeleitungsfähigkeit k der verschiedenen Bodenbestandteile beträgt:²⁾

die der festen Bodenteilchen	0,001—0,006
die des Bodenwassers	0,00124
die der Bodenluft	0,00005.

¹⁾ Vergl. u. a.: Frdr. Haberlandt, Über Wärmeleitung im Boden; Wissenschaftl. praktische Untersuchungen auf dem Gebiete des Pflanzenbaues. Wien 1875, Bd. I, S. 33. — A. v. Littrow, Über die relative Wärmeleitungsfähigkeit verschiedener Bodenarten und den betreffenden Einfluss des Wassers; Sitzungsber. d. k. Akademie d. Wissenschaften, II. Abteil., Wien 1875, Januarheft. — E. Pott, Unters. betreffend die Fortpflanzung der Wärme im Boden durch Leitung; Landw. Versuchs-Stationen Bd. XX, S. 273 u. f. — Frdr. Wagner, Unters. über das relative Wärmeleitungsvermögen verschiedener Bodenarten; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 6, S. 1 u. f.

²⁾ Nach E. Riecke, Lehrbuch der Physik. Leipzig 1902, Bd. II, S. 625.

Die Wärmeleitungsfähigkeit von Ton und Humus ist leider nicht bekannt; auch läßt sich diese aus den vorliegenden Beobachtungen nicht berechnen, da nie angegeben wurde, wie groß das von der Luft eingenommene Bodenvolumen ist. Hingegen kann man für den Quarzsand die Wärmeleitungsfähigkeit feststellen. Dieselbe beträgt für reine Quarzsubstanz $k = 0,0009$ cal. parallel und $0,0042$ cal. senkrecht zur Achse. Nimmt man an, daß die Sandkörner hier jede beliebige Lagerung einnehmen, so ist das Mittel $k = 0,00255$ cal. der wahrscheinlichste Wert. Demnach beträgt die Wärmeleitungsfähigkeit des trockenen Quarzsandes, welcher 41,5 Volumprocente Luft enthält:

$$k = \frac{58,5 \cdot 0,00255 + 41,5 \cdot 0,00005}{100} \text{ cal.}$$

oder $k = 0,00151$ cal.

Ist das Hohlraumvolumen zu $x\%$ mit Wasser angefüllt, so wird

$$k = \frac{58,5 \cdot 0,00255 + (41,5 - x \cdot 41,5) \cdot 0,00005 + x \cdot 41,5 \cdot 0,00124}{100}$$

Nach dieser Gleichung berechnet sich für den Quarzsand bei verschiedenem Wassergehalte die folgende Wärmeleitungsfähigkeit:

	Procente Wasser ($x =$)					
	0	10	20	30	40	50
k . . .	0,00151	0,00156	0,00161	0,00166	0,00171	0,00176
	60	70	80	90	100	
k . . .	0,00181	0,00186	0,00191	0,00196	0,00201	

Die Wärmeleitungsfähigkeit des Bodens nimmt also proportional mit dem Wassergehalte desselben zu. Es besteht so für den Quarzsand die Gleichung:

$$k = 0,000006 \cdot x + 0,00151$$

oder allgemein: $k = a \cdot x + c$,

deren Bedeutung sich aus den vorhergehenden Berechnungen ersehen läßt. a und c sind für den einzelnen Boden typische Größen; c wird vornehmlich durch die spezifische Wärmeleitung der festen Bodenteilchen, a durch die Größe des Hohlraumvolumens des Bodens bedingt.

Der Einfluß der Größe des Hohlraumvolumens ist also auch hier keineswegs unerheblich. Wir werden somit stets mit anderer Lagerung, mit anderer Struktur und ebenso mit anderem Wassergehalte des Bodens andere Resultate erwarten müssen — Resultate, die oft um 50—100% voneinander abweichen.

Die Bestimmung der Wärmeleitungsfähigkeit eines Bodens geschieht zweckmäßig in der Weise, wie dieselbe von Wagner (l. c.) angegeben ist. Ich lasse die Beschreibung der Methode hier folgen.

Der Apparat besteht aus zwei Hauptteilen:

1. aus einem zylindrischen Teil zur Aufnahme des zu untersuchenden Materiales und
2. aus einem Blechkasten, welcher zur Herstellung einer konstanten Wärmequelle dient.

Für den ersten Teil wählte Wagner einen Kautschukzylinder von 32,5 cm Länge, 10 cm lichtem Durchmesser und 2 cm Wandstärke, welcher vorn und hinten offen war und in einen Ebenholzzylinder von 2 cm Wandstärke eingeschoben wurde. Die vordere Öffnung der so hergestellten Röhre kann durch eine dicht aufsitzende 10 mm starke Kupferplatte und die hintere durch einen gut abschließenden, aufschraubbaren 5 cm starken Holzdeckel verschlossen werden. Das zu untersuchende Material wird nach Einsetzen der Kupferplatte von hinten gleichmäßig in das Rohr eingefüllt und sodann nach Vorlage eines Flanellappens der Holzdeckel aufgeschraubt. Der ganze Apparat wird nun derart in einen später mit Sägespähnen auszufüllenden Holzkasten eingelegt, daß nur die Kupferplatte nach außen frei bleibt. Mit dieser wird ein mit Öl gefülltes Gefäß mit einer gleichen Kupferplatte in genaue Berührung gebracht. Dies Ölbad wird mittelst Thermostaten auf konstanter Temperatur erhalten und dient so als Wärmequelle. Von der Kupferplatte aus wird somit die Wärme durch den Boden nach hinten (nach dem Holzdeckel) zu geleitet. Um dies beobachten zu können, werden senkrecht auf der Achse des Zylinders 6 Thermometer bis zur Mittellinie desselben eingesenkt; die hierzu erforderlichen Öffnungen in den Isolationsmänteln werden luftdicht abgeschlossen. Das erste Thermometer befindet sich 1 cm von der Kupferplatte entfernt, die folgenden sind in einem Abstand von je 6 cm voneinander angebracht.

Angenommen, wir hätten nun eine Wärmequelle von 100°C . und eine Lufttemperatur von 20°C ., so würde, falls von dem Boden keine Wärme nach außen abgegeben wird, bald das 2., 3., 4., 5. und 6. Thermometer 100°C . Temperatur anzeigen. Nun findet aber dauernd aus dem Boden eine Wärmeabgabe an die Umgebung statt, welche von der Oberfläche unseres Kautschukzylinders und der Temperaturdifferenz, welche zwischen dieser und der Luft herrscht, bedingt wird. Hierdurch wird, wenn die Wärme dauernd in gleicher Weise zu- und abströmt, ein stationärer Zustand eintreten, bei welchem das erste Thermometer schon längst nicht mehr 100 , sondern vielleicht 70°C . anzeigt; das zweite Thermometer, welches von dem ersten sechsmal so weit als das erste von der Wärmequelle entfernt ist, würde, wenn die Temperatur in gleicher Weise weiter abnehmen würde, um $30 \times 6^{\circ}\text{C}$. abnehmen müssen. Da jetzt aber die Temperaturdifferenz zwischen dem Kautschukzylinder und seiner Umgebung nicht mehr 80°C ., sondern nur 50°C . beträgt, so wird die Temperaturabnahme dementsprechend geringer sein. Das zweite Thermometer stellt

sich so vielleicht auf 36° C., das dritte auf $26,7^{\circ}$ C., das vierte auf $22,3^{\circ}$ C., das fünfte auf $20,9^{\circ}$ C. und das sechste auf $20,4^{\circ}$ C. ein. Würde unser Apparat sehr lang sein, so würden wir schliesslich an einem Thermometer 20° C., unsere Lufttemperatur, ablesen.

Aus der Beobachtung der stationären Temperatur und der Entfernung des betreffenden Thermometers von der Wärmequelle aus läßt sich nach Forbes¹⁾ die Gröfse k ermitteln. Da ich im allgemeinen der verschiedenen Wärmeleitungsfähigkeit der Bodenarten keine pflanzenphysiologische Bedeutung zumesse, so muß ich es mir hier versagen, auf die theoretische Ableitung der Beziehungen, welche zwischen k und den beobachteten Gröfsen bestehen, einzugehen.

Ähnlich wie bei den vorstehenden Versuchen läßt sich auch die Temperatur im gewachsenen Boden in verschiedenen Tiefen bestimmen. Nach Schubert²⁾ vermag man auch aus den so zwischen verschiedenen Tiefen gefundenen Temperaturdifferenzen eine Wärmeleitungsfähigkeitskonstante (a^2) zu ermitteln, deren Gröfse anzeigt, mit wie grofser Stärke und Schnelligkeit Temperaturänderungen in die Tiefe dringen. Die Gröfse a^2 entspricht unserer durch die spezifische Wärme der Volumeneinheit Boden (φ) dividierten Gröfse k , also

$$a^2 = \frac{k}{\varphi}.$$

a^2 ergibt sich aus der Erkenntnis, dafs sich die Bodentemperatur ϑ (in Zentigraden) mit der Zeit t (in Minuten) proportional (a^2) der Beschleunigung verändert, mit welcher die Wärme in die Bodentiefe x (in Zentimetern) geleitet wird, also aus der Differenzialgleichung:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a^2 \frac{d^2\vartheta}{dx^2}.$$

Als Beobachtungsmaterial für die Schwankungen der Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen mögen die Monatsmittel aus den Jahren 1876—1890 folgen, aus welchen Schubert a^2 berechnete.

(Siehe die Tabelle auf Seite 243.)

Die vorstehenden Resultate zeigen, dafs die Wärme in den tieferen Bodenschichten schneller geleitet wird, was, wie wir früher sahen, auf die

¹⁾ Forbes, Philos. Transaction of Edinburg. Royal Society vol. XXIII und XXIV. Vergl. Adolph Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik. Leipzig 1875, Bd. 3, S. 281—285.

²⁾ J. Schubert, Der jährliche Gang der Luft- und Bodentemperatur und der Wärmeaustausch im Erdboden. Berlin 1900, S. 29—36. — Derselbe, Zur Theorie der Wärmeleitung im Erdboden; Physikal. Zeitschrift 1. Jahrg., S. 442—445.

dichtere Lagerung der festen Bodenteilchen im Untergrunde zurückgeführt werden muß.

Monat:	Feldstation:			Waldstation:		
	Tiefe 60 cm	Tiefe 90 cm	Tiefe 120 cm	Tiefe 60 cm	Tiefe 90 cm	Tiefe 120 cm
Januar	1,19	1,99	2,73	2,39	3,28	3,98
Februar	0,90	1,47	2,05	1,92	2,60	3,15
März	1,76	2,05	2,38	2,47	2,91	3,21
April	5,99	5,44	5,09	5,13	4,88	4,73
Mai	11,17	10,18	9,36	8,73	7,97	7,39
Juni	15,39	14,25	13,23	12,40	11,24	10,41
Juli	17,23	16,27	15,34	14,38	13,28	12,38
August	17,04	16,47	15,89	14,79	14,01	13,33
September	14,66	14,68	14,63	13,59	13,30	12,94
Oktober	10,25	10,91	11,39	10,27	10,77	11,02
November	5,76	6,67	7,52	6,71	7,61	8,21
Dezember	2,84	3,77	4,64	4,01	5,04	5,75
Jahr:	8,68	8,68	8,69	8,07	8,07	8,04
a^2 :	0,630 0,646		0,359 0,469			
	0,638			0,419		

Zur Erkenntnis der Wärmeleitungsfähigkeit physikalisch verschiedener, gewachsener Bodenarten mögen die folgenden Resultate Schuberts, welche aus analogen Beobachtungsreihen berechnet wurden, dienen:

(Siehe die Tabelle auf Seite 244.)

Es ergibt sich aus diesen Berechnungen, daß die verschiedenen Bodenarten keine typischen Unterschiede in der Wärmeleitung erkennen lassen; denn beinahe die größten Extreme in der Wärmeleitung $a^2 = 0,33$ und $a^2 = 0,75$ finden sich bei ein und derselben Bodenart. Im übrigen zeigen auch diese Zahlen, daß in den tieferen Bodenschichten die Wärmeleitung eine größere ist.

In den vorstehenden Betrachtungen haben wir den Grund für die Fortbewegung der Wärme im Boden immer als die „Wärmeleitung des Bodens“ bezeichnet. Wir dürfen uns aber nicht darüber täuschen, daß die Wärmeleitung im Boden etwas anderes ist als die in einem Gestein oder die in einem Metallstabe. Es ist nicht fraglich, daß die reine Erscheinung, wie wir sie in den eben genannten Fällen vor uns haben, beim

Wärmeleitungs-konstanten a^2 ($\text{cm}^2/\text{min.}$) nach Schubert.

Beobachtet in:	Feldstation:			Waldstation:			Mittel	Bodenart:
	Tiefe 60—90 cm	Tiefe 90—120 cm	Tiefe 60—120 cm	Tiefe 60—90 cm	Tiefe 90—120 cm	Tiefe 60—120 cm		
Kurwien	0,26	0,31	0,28	0,27	0,46	0,37	0,33	Sand. Mittel 0,41
Lintzel	0,40	0,48	0,44	0,37	0,47	0,42	0,43	
Hagenau	0,43	0,54	0,49	0,21	0,37	0,31	0,40	
Eberswalde	0,72	0,68	0,70	—	—	—	—	Lehmiger Sand. Mittel 0,53
Eberswalde	—	—	—	0,34	0,51	0,45	0,56	
Fritzen	0,55	0,61	0,58	0,34	0,46	0,40	0,49	
Schou	0,48	0,75	0,62	0,73	1,05	0,89	0,75	Ton
Carlsberg	0,35	0,42	0,39	0,21	0,35	0,28	0,33	
Hadersleben	0,46	0,56	0,51	0,30	0,66	0,48	0,49	Lehm
Mariental	0,41	0,42	0,41	0,81	0,97	0,89	0,65	Ton
Friedrichsrode	0,24	0,26	0,25	0,17	0,22	0,20	0,22	Kalk
Neumath	0,36	0,44	0,40	0,41	0,43	0,42	0,41	
Mittel für reine und lehmige Sandböden:	0,46	0,54	0,50	0,36	0,52	0,44	0,47	

Boden durch andere Erscheinungen, so durch die der Wärmestrahlung wie auch durch die Fortpflanzung der Wärme durch Verdunstung und Kondensation beeinflusst wird. Die Wärmeverteilung durch Verdunstung und Kondensation, welche mit der Wasserverteilung im Boden Hand in Hand geht, wird an der Erdoberfläche besonders in Wirksamkeit treten. Erwärmt sich die Erdoberfläche unter der Einstrahlung der Sonne, so wird Wasser verdunsten, womit Wärme gebunden wird, mithin die Erdschicht kälter werden muß. Das verdunstete Wasser kondensiert sich nun wieder in den unteren kälteren Erdschichten, wodurch wiederum die Wärme daselbst frei, mithin der Boden erwärmt wird. So dringt auch mit Hilfe des Wassers die Wärme in die tieferen Bodenschichten ein.

Alle diese Momente sind in den Schubertschen Beobachtungen, wo direkt die Temperatur des gewachsenen Bodens gemessen wird, mit enthalten. Zeigen sich demnach hier bei pflanzenphysiologisch verschiedenen Bodenarten in der Wärmeleitungsfähigkeit derselben nur Unterschiede, welche innerhalb der Schwankungen der Wärmeleitung einer und derselben Bodenart liegen, so ist dies ein deutliches Zeichen dafür, daß wir vom pflanzenphysiologischen Standpunkte aus der Wärmeleitungsfähigkeit der verschiedenen Bodenarten keine große Bedeutung beimessen dürfen.

§ 44. Die Wärme-Absorption und -Emission des Bodens.

Schubert hatte bei den vorstehend besprochenen Untersuchungen nur die Bodentemperaturen verarbeitet, welche in einer größeren Tiefe als 60 cm festgestellt wurden. Hierzu veranlaßte ihn der Umstand, daß die höheren Bodenschichten infolge der Wärme-Absorption und -Emission tägliche Perioden in der Bodentemperatur zeigen, welche die vorbesprochene Wärmeleitungsfähigkeit des Bodens nicht mehr scharf zu bestimmen gestatten. Um ein Bild für den Verlauf dieser Tagesperioden in den verschiedenen Bodentiefen zu geben, mögen die folgenden Zahlen von Müttrich¹⁾ hier folgen. Dieselben wurden auf einer Freilandstation im Mittel vom 15.—30. Juli 1889 beobachtet. Die Temperaturen sind in Celsius-Graden wiedergegeben.

(Siehe die Tabelle auf Seite 246.)

Die vorstehenden Zahlen geben uns ein Bild davon, wie die täglichen Temperaturschwankungen in der Tiefe des Bodens abnehmen. An der Bodenoberfläche sind dieselben am größten (11,3° C.), in einer Tiefe von 60 cm betragen sie nur noch 0,1° C. Es zeigt sich ferner, daß die Bodenoberfläche wärmer ist als die Luft. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß nicht die Wärmeleitung für die Erwärmung des Bodens maßgebend sein kann, was sich ja aus der geringen Wärmeleitungs-

¹⁾ Müttrich, Festschrift für die 50jährige Jubelfeier der Forstakademie Eberswalde. 1880, S. 152.

fähigkeit und aus der geringen Wärmekapazität der Luft leicht ersehen läßt, sondern daß dem Boden die Wärme auf anderem Wege zugeführt werden muß, und zwar durch die Wärmestrahlung. Sie bedingt somit das Wärme-Absorptions- und -Emissionsvermögen des Bodens vornehmlich.

Zeit:	Luft	Tiefe der Bodenschicht:			
		Oberfläche	15 cm	30 cm	60 cm
12 h nachts	13,8	16,7	19,4	17,9	15,9
2 h "	12,9	15,6	18,4	17,6	15,9
4 h "	12,5	15,1	17,8	17,3	15,9
6 h "	14,7	15,9	17,4	17,0	15,9
8 h "	18,0	17,5	17,5	16,8	15,9
10 h "	21,1	22,7	18,7	16,6	15,9
12 h mittags	22,0	25,0	20,5	16,6	15,8
2 h "	22,6	26,4	22,1	17,0	15,8
4 h "	22,4	25,9	22,9	17,4	15,8
6 h "	21,2	22,3	22,6	17,7	15,8
8 h "	17,6	19,8	21,7	18,0	15,8
10 h "	14,8	17,8	20,5	18,1	15,9
Mittel:	17,8	20,1	20,0	17,3	15,9

Nach dem Kirchhoffschen Gesetz¹⁾ ist das Verhältnis zwischen Emissionsvermögen und Absorptionsvermögen für alle Körper bei derselben Temperatur dasselbe.

Dies trifft für den Boden deshalb nicht zu, weil hier die Wärmestrahlen, welche aufgenommen werden, meist von anderer Wellenlänge sind als die, welche abgegeben werden, insofern die ersteren meist mit den sichtbaren Lichtstrahlen identisch sind, während die letzteren für uns unsichtbar sind, und zwar durchweg längere Wellenlängen haben als die ersteren. Da die Wärmestrahlen denselben Gesetzen unterworfen sind wie die Lichtstrahlen, so werden auch sie von einer Wolken- oder Dunstschicht absorbiert. Diese verhindert somit die Einstrahlung und Ausstrahlung und mildert so die starken Temperaturdifferenzen in ganz wesentlicher Weise. Da die Wärme-Absorption und -Emission der Temperaturdifferenz zwischen dem Wärme ausstrahlenden und dem Wärmestrahlen aufnehmenden Körper proportional ist, so werden sich insonderheit nasse Bodenarten vor der starken Wärmeausstrahlung in den Weltenraum, dessen

¹⁾ G. Kirchhoff, Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. Pogg. Ann. CIX, 1860, S. 275.

Temperatur wir zu -273° C. annehmen, durch die Nebelbildung sehr schützen können. Es liegt auf der Hand, daß dies jeder nasse Boden ganz in derselben Weise tun kann und somit bei nassen und feuchten verschiedenartigen Bodenarten kein erheblicher Unterschied in der Wärmeausstrahlung existiert, sobald die Bedingungen für die Wasserverdunstung und Nebelbildung günstig sind. Gerade wie die Lichtstrahlen werden auch die Wärmestrahlen von einem sich in der Farbe dem Weiß nähernden Körper mehr reflektiert als absorbiert, mithin wird die Wärmeaufnahme eines hellen Bodens geringer sein als eines solchen von dunklerer Farbe.¹⁾ Auch der Winkel, in welchem die Strahlen auf einen Körper auftreffen, ist für die Erwärmung nicht indifferent. Je senkrechter die Wärmestrahlen auftreffen, um so mehr werden dieselben absorbiert, um so weniger werden sie reflektiert werden. Ein Boden, welcher so mit der Erdoberfläche möglichst senkrecht zu dem auffallenden Sonnenstrahl gerichtet ist, wird dementsprechend die meiste Wärme absorbieren können. Endlich wird ein Boden noch um so mehr Wärmestrahlen aufnehmen und abgeben, je größer die Erdoberfläche ist. Diese entspricht unter sonst gleichen Umständen der Bodenoberfläche. Je nasser nun ein Boden ist, um so kleiner wird dieselbe werden, um so mehr nähert sich die ein- und ausstrahlende Fläche der ebenen Wasseroberfläche. Nasse Bodenarten werden sich so in dieser Beziehung, wenn sie auch sonst physikalisch sehr verschieden sind, kaum unterscheiden. Da die Erdoberfläche aber je nach der Bodenbearbeitung sehr variiert, so wird auch die momentane Art dieser Bodenbearbeitung einen größeren Einfluß auf die Wärme-Absorption und -Emission des Bodens ausüben als die spezifische physikalische Beschaffenheit desselben.

Da ferner aber, sobald der Boden bewachsen ist, die Wärme-Absorption und -Emission nicht mehr von der Bodenart, sondern fast lediglich von dem Pflanzenwuchs bedingt wird, und zwar sowohl von der Pflanzenart als auch von ihrer Wüchsigkeit, insofern die Pflanzenoberfläche die Wärme-Ein- und -Ausstrahlung übernimmt, so kann alsdann die Bodenart dafür gar nicht mehr in Betracht kommen.

Als Beleg hierfür mag die vielfach gemachte Beobachtung dienen, daß im bewaldeten Boden die Temperaturschwankungen geringer sind,²⁾ und daß der bewaldete Boden durchschnittlich kälter ist als der unbe-

¹⁾ E. Wollny, Unters. über den Einfluß der Farbe des Bodens auf die Erwärmung desselben; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 1, S. 43 u. f., ferner Bd. 2, S. 327 u. f.

²⁾ Ebermayer, Die physikalischen Einwirkungen des Waldes . . . 1873, S. 67. — Derselbe, Über die Ermittlung der Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschiede zwischen Wald und Feld; Forstlich naturwissenschaftliche Zeitschrift IV. Jahrg. München 1895, S. 119.

waldete, da der Waldbestand die Wärme-Absorption des Bodens verhindert. Hierfür einige Zahlen von Nördlinger:¹⁾

	Die mittlere Temperatur ist im Walde niedriger als auf freiem Felde um Grade Celsius:				Mittel
	im Frühling	im Sommer	im Herbst	im Winter	
Im Fichtenwalde . . .	1,4	2,0	0,8	0,6	1,2
„ Kiefernwalde . . .	1,2	1,5	0,9	0,7	1,1
„ Laubwalde	0,4	1,3	0,5	0,2	0,6

Je dichter das Walddach ist, um so größer ist demnach der Unterschied in der Erwärmung des Bodens gegen die Erwärmung des unbewaldeten Bodens.

Man ersieht hieraus, ein wie geringer pflanzenphysiologischer Wert der Wärme-Absorption und der Wärme-Emission des Bodens zukommt, und halte ich es deshalb für berechtigt, die Untersuchungsmethoden hier zu übergehen, zumal dieselben zum Teil keineswegs als einwandfrei bezeichnet werden müssen. Ich verweise diesbezüglich auf die einschlägigen Arbeiten.²⁾

Schlussbemerkung.

Das Verhalten des Bodens zur Wärme wird bedingt durch die Wärmekapazität und die Wärmeleitungsfähigkeit der verschiedenartigen festen Bodenteilchen, des Wassers und der Luft, sowie auch durch die Farbe und die Beschaffenheit der Erdoberfläche. Unstreitig übt aber auch hier das Hohlraumvolumen und der Umstand, ob dasselbe mehr Wasser oder mehr Luft enthält, einen viel bedeutenderen Einfluss auf das Verhalten des Bodens zur Wärme aus als die genannten spezifischen Eigenschaften der verschiedenartigen festen Bodenteilchen. Es muss somit diejenige spezifische Eigenschaft der festen Bodenteilchen, welche für die Bildung des Hohlraumvolumens, und somit für das Verhalten des Bodens zum Wasser und zur Luft hauptsächlich in Betracht kommt, auch für das Verhalten des Bodens zur Wärme vornehmlich maßgebend sein. Das ist aber, wie wir sahen, die Größe der Bodenoberfläche.

¹⁾ Th. Nördlinger, Der Einfluss des Waldes auf die Luft- und Bodenwärme: Forstwissenschaftliches Zentralblatt VIII. Jahrg., 1886, S. 255.

²⁾ Adolf Ritter von Liebenberg, Unters. über die Bodenwärme. Habilitationsschrift. Halle 1875, S. 25 u. f. — C. Lang, Über die Wärme-Absorption und -Emission des Bodens: Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 1, S. 379 u. f. — J. Ahr, Unters. über die Wärmeemission der Bodenarten; ebenda Bd. 17, S. 397 u. f.

ZWEITER ABSCHNITT.

Die chemische Beschaffenheit der Bodenprobe.

Kapitel VI.

Die chemischen Bodeneigenschaften.

§ 45. Die chemischen Bodeneigenschaften in ihrer Beziehung zu der Pflanze.

In chemischer Beziehung kann für die Pflanze nur der Teil des Bodens in Betracht kommen, welchen sie aus demselben in ihren Organismus aufzunehmen vermag. Das sind, wenn wir von den Pflanzengiften, welche in unseren Kulturbodenarten glücklicherweise keine erhebliche Rolle spielen, absehen, die Pflanzennährstoffe. Von allen die wesentlichsten sind nach der berühmten Entdeckung von Justus v. Liebig¹⁾ Stickstoff, Phosphorsäure, Kali und Kalk. Auch Magnesiaverbindungen und andere Salze sind für die Pflanze erforderlich; doch kommen die letzteren wohl stets in solchen Mengen im Boden vor, daß sie hier keine Berücksichtigung zu finden brauchen. Erwähnt sei noch, daß nach Loew²⁾ der Pflanzenertrag auch von dem quantitativen Verhältnis abhängen soll, in welchem Kalk und Magnesia sich im Boden befinden. Diese Untersuchungen bedürfen jedoch noch weiterer Bestätigung. Ist einer dieser Nährstoffe im Boden nicht vorhanden, so kann die Pflanze nicht existieren. Ihr Wachstum richtet sich nach dem berühmten Liebigschen „Gesetze des Minimums“ nach demjenigen dieser Nährstoffe, welcher sich verhältnismäßig in geringster Menge im Boden vorfindet, vorausgesetzt, daß sich alle anderen Wachstumsbedingungen so gut wie möglich gestalten.

¹⁾ Justus v. Liebig u. a. in: Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie. Braunschweig 1846.

²⁾ Oskar Loew, Über die Abhängigkeit des Maximalertrages von einem bestimmten quantitativen Verhältnis zwischen Kalk und Magnesia im Boden: Landw. Jahrb. 1902, 31. Bd., S. 561 u. f.

Wenn ich dennoch den Wert des Bodens nicht von seinem Gehalte an diesen Pflanzennährstoffen abhängig gemacht wissen will,¹⁾ so hatte dies zunächst darin seine Begründung, daß wir dem Boden diese Nährstoffe jedes Jahr in ausreichender Menge zuzuführen vermögen, ohne hierdurch unökonomisch zu wirtschaften. — In der Forstwirtschaft geschieht dies zwar bislang erst versuchsweise; hier, wie bei allen Raubbaukulturen werden die Erträge noch wesentlich von den chemischen Bodeneigenschaften mitbedingt. Auf wie lange, ist aber nur eine Frage der Zeit.

Doch noch ein anderer Umstand veranlaßt mich, nicht die chemischen Bodeneigenschaften als wertbestimmende Faktoren bei der Bodenklassifikation einzuführen; das ist der, daß der Wert eines und desselben Nährstoffes im Boden für den Pflanzenwuchs sehr verschieden sein muß, je nach der chemischen Verbindung, in welcher er vorkommt, und daß sich dieser Wert so im Boden selbst verändert, mithin inkonstant ist.

Dieser letzte Punkt wird verständlich werden, wenn wir uns ein Bild davon zu machen suchen, wie die Aufnahme der Nährstoffe durch die Pflanze stattfindet, d. h. wie die Pflanzenwurzel zu den einzelnen Nährstoffen gelangt, um dieselben auf osmotischem Wege aufnehmen zu können. Wir müssen zu diesem Zweck die Pflanzennährstoffe im Boden in zwei Gruppen einteilen, nämlich einmal in solche, welche wasserlöslich sind, und ferner in solche, welche im Wasser unlöslich sind. Die ersteren werden der Pflanzenwurzel durch das Wasser zugeführt. Die Pflanzenwurzel braucht keinen wesentlichen Arbeitsaufwand zu leisten, um sie zu erlangen; die letzteren sind nur da von der Pflanzenwurzel aufnehmbar, wo diese dieselben direkt berührt. An diesen Stellen vermag die Wurzel sich dieselben dadurch aufnehmbar zu gestalten, daß sie diese durch Ausschleiden von Säuren oder dergleichen²⁾ in Lösung überführt. Den nicht in Wasser löslichen Nährstoffen muß also die Pflanzenwurzel nachgehen.³⁾ Hierzu muß sie aufgenommene Energiemengen verwenden und damit Arbeit leisten. Je weniger weit die Wurzel hierbei in den Boden eindringen muß, um mit den zu ihrem Wachstum erforderlichen Nährstoffen so eine möglichst große Berührungsfläche zu bilden, um so mehr Energie vermag sie aber naturgemäß auf das oberirdische Wachstum zu verwenden wie auf die Bildung von Reservestoffen, oder m. a. W. um so größer werden unter sonst gleichen Umständen unsere Erträge sein müssen. Sind diese Nährstoffe so in verschiedenen Bodenarten in gleichen Mengen vorhanden,

¹⁾ Vergl. § 2.

²⁾ Vergl. u. a. Prianschnikow, Zur Frage über die Wurzelabscheidungen; Berichte der deutschen botanischen Gesellschaft XXII, S. 184—191.

³⁾ Vergl. u. a. H. Thiel, l. c. Inaug.-Diss. und R. Heinrich, Grundlagen zur Beurteilung der Ackerkrume. Wismar 1882, Tafel IV.

so muß demnach in dieser Beziehung der Boden für die Pflanze der beste sein, welcher eine möglichst große Oberfläche besitzt, da hier diese Nährstoffe am feinsten verteilt sein müssen. Da aber auch die wasserlöslichen Salze in demjenigen Boden am besten der Pflanze erhalten bleiben, welcher das meiste Wasser zurückzuhalten vermag, und welcher das Wasser am schlechtesten durchfließen läßt, was wiederum vornehmlich durch *die Größe der Bodenoberfläche* bedingt wird, so sehen wir, daß auch für die Nährstoffaufnahme diese physikalische Bodeneigenschaft von grundlegender Bedeutung ist.

Nach dem Vorhergehenden werden somit von den Pflanzennährsalzen die wasserlöslichen einen viel größeren Wert für die Vegetation besitzen als die wasserunlöslichen. Dies ist eine Erfahrung, welche der Praktiker vielfach gemacht hat. Ein Boden kann noch so reich an wasserunlöslichen Nährstoffen sein, es wird sich dann trotzdem noch eine Düngung von wasserlöslichen Nährstoffen in den Erträgen sehr bemerkbar machen. Resultate von Vegetationsversuchen, mit welchen man diesen Befund zahlenmäßig belegen könnte, sind meines Wissens nur von König¹⁾ und Haselhoff angestellt worden. Sie mögen hier folgen:

Es wurden geerntet an	Es wurden sämtliche Nährstoffe in ausreichenden Mengen zugeführt, und zwar davon in löslicher Form:				
	100 %	50 %	25 %	10 %	0 %
Gerste { a	100	60,4	55,1	38,3	34,8
{ b	100	93,6	71,7	47,3	9,5
Pferde- { a	100	89,3	136,0	138,0	102,0
bohnen { b	100	98,4	126,0	104,0	105,0

Man sieht, daß die Versuchsfehler sehr groß sind, so daß diese die zu erwartende Erscheinung bei den Versuchen mit Pferdebohnen ganz verdecken. Bei der Gerste ist sie trotzdem deutlich zu bemerken. Diese letzteren Zahlen werden noch durch die folgenden bestätigt:

(Siehe die Tabelle auf Seite 252.)

Wenngleich der sehr viel größere Wert der wasserlöslichen Pflanzennährstoffe deutlich hervortritt, so ist doch auch der der wasserunlöslichen Salze stets mit zu berücksichtigen. Natürlich ist ein Boden um so ertragreicher, je mehr er auch an diesen Nährstoffen besitzt, und je leichter

¹⁾ J. König und E. Haselhoff, Aufnahme der Nährstoffe aus dem Boden durch die Pflanze; Landw. Jahrb. Bd. 23, 1894, S. 1028, und J. König. Bestimmung der Fruchtbarkeit und des Nährstoffbedürfnisses des Ackerbodens; Landw. Versuchs-Stationen Bd. LXI, 1905, S. 391.

löslich dieselben für die Pflanzenwurzel sind. Hierbei haben wir aber bislang keine Methode, welche uns die Nährstoffe so zu lösen vermag wie die Pflanze; denn es hat sich herausgestellt, daß unsere verschiedenen Kulturpflanzen eine ganz verschiedene Fähigkeit besitzen, sich diese Nährstoffe aufnehmbar zu gestalten. — So viel jedenfalls steht fest, daß, je mehr wasserunlösliche Nährstoffe ein Boden enthält, und je feiner diese im Boden verteilt sind, desto geringer der Mehrertrag sein wird, welchen man mit einer Düngung mit wasserlöslichen Salzen erzielen kann. Trotzdem aber wird sich dieser wohl stets nachweisen lassen.

Pflanzenenertrag auf einem	Es wurden von der Volldüngung gegeben in löslicher Form:			
	100 ‰	75 ‰	50 ‰	0 ‰
künstlichen Bodengemisch	100	89	76	13
Sandboden	100	94	88	83
lehmigen Sandboden	100	84	78	75
Lehmboden	100	93	93	81

Meines Erachtens sollte der besondere Wert der wasserlöslichen Nährstoffe viel größere Berücksichtigung in unserer Düngerlehre finden. Es ist falsch, zuviel künstlichen Düng zu geben, in der Ansicht, daß das, was die Pflanze nicht in dem Jahre der Düngung aufnimmt, doch chemisch absorbiert wird und so dem Boden erhalten bleibt. Durch die chemische Absorption geht unser wasserlösliches Düngemittel in den wasserunlöslichen Zustand über, und die Wirkung, welche es dann auszuüben vermag, entspricht meist nicht dem in der Düngung angelegten Kapital! — Man soll deshalb die künstliche Düngung nach Möglichkeit stets nur für das laufende Jahr dem Boden einverleiben. Oft, aber jedesmal wenig düngen!

Im allgemeinen vermag die Pflanze nur so wenig Düngsalze von dem in dem Boden befindlichen Vorrat auszunutzen, daß eine Düngung meist überhaupt überflüssig erscheinen dürfte, *wenn nicht diese Beschaffenheit der Düngsalze eine so große Rolle spielte.*

Wie gering die Ausnutzung der im Boden befindlichen Pflanzennährstoffe ist, davon legen die von Emmerling¹⁾ berechneten Ausnutzungskoeffizienten der Phosphorsäure für Hafer das beredteste Zeugnis ab.

Die Zahlen wurden in folgender Weise ermittelt:

Ein Boden enthalte in 100000 Gewichtsteilen 50 Teile Phosphorsäure. Die Krumentiefe betrage 30 cm, das Volumengewicht des Bodens 1,2; dann beträgt der Phosphorsäurevorrat pro Hektar $50 \times 30 \times 1,2 = 1800$ kg.

¹⁾ A. Emmerling, Agrikultur chemische Untersuchungen. Eine Festschrift. Dezember 1895. Druck von L. Handorf in Kiel. S. 212, 213.

Der Ausnutzungskoeffizient beträgt für denselben Boden 0,85 bis 0,97 $\frac{0}{0}$, folglich beträgt die im oberirdischen Haferertrag erscheinende Phosphorsäuremenge 0,85 bis 0,97 $\frac{0}{0}$ von 1800 kg = 15,3 bis 17,5 kg.

Diese Ausnutzungskoeffizienten schwanken nach Emmerling zwischen 0,4 und 4,6 $\frac{0}{0}$; sie sind um so größer, je reicher ein Boden an Phosphorsäure ist und je besser der Boden ist, d. h. je größer seine Oberfläche ist, und je besser dementsprechend die Verteilung der Phosphorsäure im Boden ist. Dies ist ein Befund, der vollkommen mit dem Vorbesprochenen in Einklang steht.

Die Folge, welche wir aus unseren Betrachtungen für die chemische Bodenanalyse ziehen müssen, widerspricht fast allen bisherigen Anschauungen. — Wir kommen zu dem Resultate, dass *keine* Salzsäure von irgendwelcher Konzentration, keine Zitronensäure, Essigsäure etc. etc. uns genau diejenigen Mengen Nährstoffe aus dem Boden aufzulösen vermag, welche die Pflanze aus demselben aufnehmen kann. Würden wir selbst eine Säure herstellen, welche genau derjenigen entspricht, mit welcher sich die Pflanze die Nährstoffe aufzulösen vermag, so würde hier doch unser Säureextrakt *viel zu viel* Nährstoffe enthalten; denn die Säurelösung berührt die *ganze* Bodenoberfläche, die Pflanzenwurzel vermag stets nur einen sehr *geringen Bruchteil* derselben zu berühren. Dazu kommt noch ferner, wie gesagt, daß die verschiedenen Pflanzen eine verschieden große Fähigkeit zu haben scheinen, sich die im Boden befindlichen Pflanzennährstoffe mit ihren Wurzeln aufzuschließen (vergl. J. König, l. c.), so daß man für jede Pflanze zur Extraktion des Bodens noch eine Säure von anderer dieser entsprechender Konzentration wählen müßte.

Diesem Umstande ist es meines Erachtens zuzuschreiben, daß die chemische Bodenanalyse bis heute noch zu keinem brauchbaren Resultate geführt hat. Noch heute gilt von ihr das, was Trommer¹⁾ vor ungefähr 50 Jahren von ihr sagte:

„Die eigentliche spezielle chemische Analyse des Bodens kann sich nur auf ihr Resultat beschränken. Es leuchtet ein, daß eine so mühsame Arbeit für die Praxis lange nicht den Nutzen haben kann, den man sich davon geträumt hat. Selbst der Gewinn, den man aus der Ermittlung der statistischen Verhältnisse zwischen dem Boden und seinen Erträgen zu gewinnen hofft, bleibt ein zweifelhafter.“

Meines Erachtens dürfte nur dann eine chemische Bodenanalyse praktischen Wert beanspruchen, wenn sich durch diese eine künstliche Düngung nachweisen läßt!

Das ist bislang nicht möglich gewesen; ja es ist nicht einmal gelungen, mittelst dieser Bodenanalyse festzustellen, ob sich einer der Pflanzen-

¹⁾ C. Trommer, Die Bodenkunde. Berlin 1857, S. 428.

nährstoffe in zu geringer Menge im Boden vorfindet, so dass er diesem zur Erzielung eines möglichst hohen Pflanzenertrages zugeführt werden muß. — Dies aber war ja wesentlich für die Düngelehre, und so nahm man in der Not seine Zuflucht zur Untersuchung der auf einem Boden gewachsenen Pflanze. Man untersuchte das Produkt, um sich über die Eigenschaften *eines* Faktors (unter der Vernachlässigung aller anderen Faktoren!) zu unterrichten!¹⁾

Adolf Mayer²⁾ sagt hierzu mit Recht:

„Es ist vielleicht nichts *mehr* imstande zu zeigen, daß es so aussichtslos mit der (chemischen) Bodenanalyse steht, als daß von den Agrikulturchemikern (u. a. Hellriegel, Liebscher) geradezu der Vorschlag gemacht wird, das von gewissen Pflanzen Aufgenommene als Maßstab des für die Pflanze Verfügbaren gelten zu lassen, d. h. also doch die direkte Wahrnehmung an Stelle der theoretischen Deduktion zu setzen und so bewußt oder unbewußt den Bankrott der Theorie in dieser Hinsicht als vollständig zu erklären.“

Da diese Art der Analyse jetzt eine Tagesfrage ist, so will ich hier auf die Resultate derselben näher eingehen. Der Haferertrag z. B. soll nach Atterberg³⁾ in folgender Weise über das Fehlen der erforderlichen Menge eines notwendigen Nährstoffes Auskunft geben:

„Man vergleicht die bei der Analyse (der Ernte) gefundenen prozentischen Gehalte der Nährstoffe mit dem entsprechenden Mittel- und Minimumgehalte des Hafers. Der Nährstoff, dessen Gehalt am tiefsten unter dem Mittelwert steht oder ihn am wenigsten übersteigt und dem Minimalgehalte sich am meisten nähert, befindet sich im Minimum.“

Dies mag in der Tat der Fall sein, wenn wir, wie Atterberg, alle anderen Vegetationsfaktoren nach Möglichkeit konstant setzen und so u. a. vom Boden *ganz* absehen, indem wir zu Wasserkulturen übergehen. Aber auch hier kommt besagter Forscher nur zu dem Resultat:

„Aus diesen Beispielen geht hervor, daß die Ziffern der Haferanalyse zu Wahrscheinlichkeitsschlüssen über den relativen Vorrat der Nährstoffe im Boden berechtigen können. Stets sind jedoch diese Schlüsse mehr oder weniger unsicher.“

¹⁾ Die Anregung hierzu ging von Hellriegel, Heinrich und Liebscher aus. Vergl. die erste größere Zusammenfassung: Ad. Helmkampff, Untersuchungen über die Feststellung des Düngungsbedürfnisses der Ackerböden durch die Pflanzenanalyse: Journ. f. Landw. Bd. XL, 1892.

²⁾ Adolf Mayer, Lehrbuch der Agrikulturchemie. Heidelberg 1886, Bd. 2, S. 77.

³⁾ Albert Atterberg, Die Variation der Nährstoffgehalte beim Hafer; Journal für Landwirtschaft Bd. 49, 1901, Satz 4, S. 160—161.

Stellen wir aber die Versuche im Kulturboden an, so hat schon die Witterung der einzelnen Jahre einen so wesentlich verschiedenen Einfluß auf die Aufnahme der Nährstoffe durch die Pflanze, daſs v. Seelhorst,¹⁾ welcher die Versuche Liebschers weiter fortführte und hier den Nachweis erbrachte, daſs die Witterung der einzelnen Monate in einschneidender Weise den Stickstoffgehalt der Ernte beeinflussen kann, zu dem Schlusse kommen mußte, daſs *für die Verhältnisse der Praxis die Bestimmung des Düngerbedürfnisses aus der Pflanzentrockensubstanz unbrauchbar ist*. Tollens²⁾ spricht sich ähnlich darüber aus. —

Sehr umfangreiche Untersuchungen zur Beantwortung der gleichen Frage hat ferner Stahl-Schroeder³⁾ ausgeführt. Dieser sucht die Pflanzenanalyse als Ersatz für die chemische Bodenanalyse noch zu halten, indem er l. c. S. 267 sagt:

„Im großen und ganzen hat es den Anschein, wie wenn die vorgeschlagene Methode ziemlich gute Resultate bezüglich der Bestimmung des Düngerbedürfnisses geben wird, besonders wenn es sich darum handeln wird, festzustellen, annähernd wie große Mengen des einen oder anderen Nährstoffes der zu prüfende Boden enthält. Doch ist die Anwendung dieser Methode nicht überall möglich, da dieselbe mit der Anstellung eines Vegetationsversuches verbunden ist.“

Stahl-Schroeder übersieht hierbei, daſs, wenn der Praktiker erst hierzu einen Vegetationsversuch anstellen soll, er lieber gleich einen Düngungsversuch anstellen wird. Dann aber kann es ihm ganz gleich sein, wieviel Pflanzennährstoffe sein Boden bereits enthält.

Godlewski⁴⁾ endlich kommt auch auf Grund seiner Arbeiten zu dem folgenden Resultat:

¹⁾ J. Wilms und C. v. Seelhorst, Beitrag zur Lösung der Frage, ob der Wassergehalt des Bodens die Zusammensetzung der Pflanzentrockensubstanz an Stickstoff und Asche beeinflusst; Journal für Landwirtschaft Bd. 46, 1898, S. 413 u. f. — C. v. Seelhorst, H. Behn und J. Wilms, Weitere Beiträge zu der Frage: Ist die Pflanzenanalyse imstande, die Düngerbedürftigkeit des Bodens festzustellen; ebenda Bd. 50, 1902, S. 322 u. f.

²⁾ B. Tollens, Die Aschenbestandteile der Pflanze, ihre Bestimmung und ihre Bedeutung für die Agrikulturchemie und Landwirtschaft; Journal für Landwirtschaft 1902, Bd. 50, S. 276.

³⁾ M. Stahl-Schroeder, Kann die Pflanzenanalyse uns Aufschluß über den Gehalt an assimilierbaren Nährstoffen im Boden geben; ebenda 1904. Bd. 52, S. 31 u. f. und S. 193 u. f.

⁴⁾ E. Godlewski, Über das Nährstoffbedürfnis einiger Kulturpflanzen und über die Abhängigkeit der Zusammensetzung der geernteten Pflanzensubstanz von der chemischen Beschaffenheit des Bodens; Zeitschrift für das landwirtschaftliche Versuchswesen Österreichs 1901, Bd. IV, S. 479 u. f.

„Eine sichere Entscheidung nach den Ergebnissen der Ernteanalyse über die im Boden im Minimum sich befindenden Nährstoffe wird erst dann möglich werden, wenn die Abhängigkeit zwischen der Zusammensetzung der Ernten und der chemisch-physikalischen Beschaffenheit des Bodens besser als dies heute der Fall ist, erforscht sein wird.“

Mit diesen Worten erkennt der Verfasser das Unmögliche, was darin liegt, die Pflanzenanalyse für die Bodenanalyse einzusetzen, an und kehrt zur Bodenanalyse zurück, indem er es für erforderlich hält, die chemisch-physikalische Beschaffenheit des Bodens besser zu erforschen.

Nur Hanamann¹⁾ scheint bis jetzt branchbarere Resultate nach der Methode erhalten zu haben. Er glaubt dies dadurch erreicht zu haben, daß er nicht die ganze Pflanze, nicht die Wurzel, sondern bei Gerste nur das Stroh der Ernte auf seinen Nährstoffgehalt untersuchte. Daß aber auch diese Resultate bei wechselnder Witterung zu großen Fehlern führen müssen, ist als sicher anzunehmen.

Abgesehen von dem Einfluß, welchen die Witterung auf die Nährstoffaufnahme durch die Pflanze ausübt, wird aber auch stets noch die physikalische Beschaffenheit des Bodens selbst und die Ausbreitung des Wurzelsystems der einzelnen Pflanze für die Größe der Nährstoffaufnahme in Betracht kommen, was schon zuvor eingehend erörtert wurde.

Kehren wir von diesem meines Erachtens mißlungenen Unternehmen zu der chemischen Analyse des Bodens zurück, so möchte ich hier doch die Annahme aussprechen, daß, wenn die künstliche Düngung einen derartig großen Einfluß auf die Erträge eines Bodens ausübt, wie dies allgemein bekannt ist, daß sie dann auch im Boden irgendwie chemisch nachweisbar sein muß. Vielleicht ist sie es schon, wenn man nur den Gehalt des Bodens an wasserlöslichen Nährstoffen in exakter Weise bestimmt.

Vom ökonomischen Standpunkte aus halte ich es stets für angebracht, dem Boden höchstens so viel *wasserlösliche* Nährstoffe jährlich zuzuführen, als einer *mittleren*, in dem Jahre zu erwartenden Ernte entspricht. Sind die anderen Vegetationsbedingungen dann in dem Jahre günstig, so wird sich die Pflanze auch noch die weiter erforderlichen Nährstoffe löslich machen können. Statt der direkten Düngung von wasserlöslichen Nährsalzen kann man auch solche Salze düngen, welche Nährsalze, die sich bereits im Boden befinden, wasserlöslich zu machen vermögen. Sind wasserlösliche Nährsalze im Boden vorhanden, so kann die Düngung dementsprechend geringer bemessen werden.

¹⁾ F. Hanamann. Beiträge zur Ausbildung einer Methode behufs Feststellung des Düngungsbedürfnisses des Ackerbodens durch die Pflanzenanalyse; Zeitschrift für das landwirtschaftliche Versuchswesen Österreichs 1904, Bd. VII, S. 805 u. f.

Die chemische Bodenanalyse wird sich demnach meines Erachtens zunächst darauf beschränken können, die wasserlöslichen Nährstoffe festzustellen. Eine weitere Aufgabe für sie ist es dann ferner, zu untersuchen, durch welche Düngung eventuell im Boden festgebundene Nährstoffe wasserlöslich gemacht werden können, und wie diese Düngergabe zweckmäßig zu geben ist.

Ob diese chemische Bodenanalyse überhaupt noch einmal praktische Bedeutung erlangen wird, oder ob wir uns hier lediglich auf die zeitraubenden und umständlichen Vegetations- (Düngungs-)Versuche beschränken müssen, welche uns stets nur einen Anhalt über die Bedürftigkeit des einen Versuchs-Bodens unter den vorliegenden Witterungsverhältnissen geben können, das muß uns die Zukunft lehren.

§§ 46—50. Die chemische Bodenanalyse.

§ 46. Die Vorbereitung der Bodenprobe.

Wie im Vorhergehenden besprochen, soll uns hier nur der Wasserextrakt des Bodens beschäftigen. Da das Bodenwasser aber ebenso wie die Bodenluft kohlenstoffhaltig ist, so empfiehlt es sich, den Boden nicht mit destilliertem, sondern mit kohlenstoffhaltigem Wasser zu extrahieren, welches man sich nach König¹⁾ zweckmäßig in der folgenden Weise bereitet: 1500 ccm destilliertes Wasser werden bei gewöhnlicher Temperatur und mittlerem Luftdruck vollständig mit Kohlensäure gesättigt und darauf mit 4500 ccm destilliertem Wasser verdünnt, so daß man eine zu einem Viertel mit Kohlensäure gesättigte Lösung erhält.

Von dem zu untersuchenden lufttrockenen Feinboden (< 1,5 mm), dessen Wassergehalt vorher festgestellt war, werden 1500 g trockener Boden in einer gut verschließbaren Flasche abgewogen und mit 6000 ccm unseres kohlenstoffhaltigen Wassers übergossen und umgeschüttelt. Der Boden bleibt mit dem Wasser 3 Tage lang unter häufigem und regelmäßig wiederholtem Rollen der Flasche auf einer weichen Unterlage in Berührung; darauf werden 4000 ccm der Flüssigkeit, entsprechend einem Wasserextrakt von 1000 g trockenem Boden, möglichst klar abgehebert; dieselben bleiben darauf noch 24 Stunden lang in einer luftdicht verschlossenen Flasche ruhig stehen und werden alsdann durch ein doppeltes Filter unter Bedecken des Trichters abfiltriert. — Ist das Filtrat noch nicht klar, so dampft man dasselbe unter Zusatz von Salzsäure auf etwa 300—400 ccm ein, filtriert von dem ausgeschiedenen Ton ab und bringt sodann das Filtrat wieder auf 4000 ccm. Von diesen 4000 ccm der salz-

¹⁾ J. König, Die Untersuchung landwirtschaftlich und gewerblich wichtiger Stoffe. Berlin 1891, S. 23—24.

sauren Flüssigkeit, welche 1000 g des trockenen Bodens entsprechen, wird die Bestimmung der einzelnen Pflanzennährstoffe ausgeführt.

Ob es angemessen ist, die Wassereextraktion mehrere Male (nach Ulbricht¹⁾ viermal) zu wiederholen, bedarf noch weiterer Untersuchungen. — Das Verfahren würde derart auszuführen sein, daß man die zuerst abgehobenen 4000 ccm Flüssigkeit durch 4000 ccm kohlenstoffhaltiges Wasser ersetzt und den Boden nun in gleicher Weise wie zuvor behandelt. Nimmt man hier wieder 4000 ccm nach drei Tagen ab, so sind in diesen zunächst natürlich diejenigen Nährstoffe zu $\frac{2}{3}$ enthalten, welche in den vorigen 2000 ccm, welche wir im Boden zurückließen, gelöst waren, d. s. $\frac{2}{3}$ der Nährstoffe, welche durch die erste Behandlung aus 500 g trockenem Boden extrahiert wurden. Zieht man diese von den in den 4000 ccm enthaltenen Nährstoffen ab, so erhält man jetzt diejenigen Nährstoffmengen, welche aus 1000 g trockenem Boden durch den zweiten Wasseraufguß gelöst wurden, usf.

§ 47.²⁾ Die Bestimmung der Phosphorsäure.

Wir nehmen 80 ccm unserer Lösung, entsprechend 20 g trockenem Boden, kochen dieselbe nach Zusatz von Salpetersäure $\frac{1}{2}$ Stunde lang, filtrieren ab und dampfen zur Trockene ein. Der Rückstand wird mit Salpetersäure und Wasser aufgenommen, die Lösung in eine Porzellanschale filtriert, mit 100 ccm Molybdänsäurelösung³⁾ versetzt und 20 bis 25 Minuten lang auf dem kochenden Wasserbade erhitzt. Alsdann wird abfiltriert, mit verdünnter Molybdänlösung oder salpetersaurem Ammon⁴⁾ durch Dekantieren und auf dem Filter ausgewaschen, der in der Schale befindliche Niederschlag mit verdünntem (1:3) erwärmten Ammoniak gelöst, die Lösung durch das gleiche, zuvor benutzte Filter filtriert und zuerst mit Ammoniak, später mit heißem Wasser nachgewaschen. Das Filtrat, das nicht mehr als 100 ccm betragen soll, wird jetzt so lange tropfenweise mit konzentrierter Salzsäure versetzt, bis der entstehende gelbe Niederschlag sich nicht mehr sogleich, sondern erst sehr allmählich

¹⁾ R. Ulbricht, Ein Beitrag zur Methode der Bodenanalyse; Landw. Versuchs-Stationen Bd. 5, S. 207.

²⁾ In meinen Ausführungen in §§ 47—50 lehne ich mich an die Zusammenstellung dieser Methoden von E. Wein, Agrikulturchemische Analyse, Stuttgart 1889, S. 22, 23, an.

³⁾ *Molybdänlösung*: 1 l einer Lösung von 150 g kristallisiertem molybdänsauren Ammon wird in 1 l reiner Salpetersäure von 1,20 spez. Gewicht gegossen. — Die *verdünnte Lösung* enthält: 40 Teile Molybdänlösung, 10 Teile Salpetersäure und 50 Teile Wasser.

⁴⁾ *Salpetersaures Ammon*: 750 g Ammoniumnitrat werden mit Wasser zu 1 l gelöst; bei der verdünnten Lösung werden 100 g Salz zu 1 l gelöst.

löst; nach vollständigem Erkalten wird vorsichtig und immer in *kleinen Mengen* Magnesiamixtur¹⁾ zugesetzt, um so einen kristallinischen Niederschlag zu erzeugen. Es sind ca. 10 ccm Magnesiamixtur erforderlich. Nach einiger Zeit wird so viel konzentriertes Ammoniak zugesetzt, bis die Flüssigkeit stark danach riecht.

Nach *mindestens* einstündigem Stehen wird der Niederschlag abfiltriert, mit verdünntem (1:3) Ammoniak ausgewaschen, getrocknet und zuerst schwach, später auf dem Gebläse so lange geglüht, bis er vollständig weiß ist. Erreicht man dies nach längerem Glühen nicht, so läßt man erkalten, gibt einen Tropfen konzentrierte Salpetersäure darauf, raucht diese vorsichtig weg und glüht von neuem. Aus dem gewogenen Niederschlag berechnet man die Phosphorsäure (P_2O_5) durch Multiplizieren mit dem Faktor 0,638.

§ 48. Die Bestimmung des Kalis.

400 ccm unserer Lösung, entsprechend 100 g trockenem Boden, werden mit 200—300 ccm konzentrierter Salzsäure versetzt, zum Kochen erhitzt und 1 Stunde lang in mäßigem Kochen erhalten, darauf mit 300 ccm heißem Wasser verdünnt, nach einigem Stehen durch ein doppeltes Filter filtriert, mit kochendem Wasser (zuerst durch Dekantieren) ausgewaschen und das Filtrat nach Zusatz von 10 ccm Salpetersäure zur Trockene verdampft. Der Rückstand wird bei 100° C. einige Zeit getrocknet, mit Salzsäure befeuchtet und wieder getrocknet, dann abermals mit Salzsäure befeuchtet, mit Wasser digeriert. Die Kieselsäure wird abgeschieden und das Filtrat wieder auf 400 ccm gebracht.

Sodann werden 20 ccm dieser Lösung, entsprechend dem Extrakt von 5 g trockenem Boden, unter Erwärmen mit Ammoniak und kohlen-saurem Ammoniak gefällt, die Flüssigkeit abfiltriert, der Niederschlag gut mit heißem Wasser ausgewaschen, das Filtrat in einer Platinschale zur Trockene eingedampft, die organische Substanz und die Ammonsalze durch schwaches und vorsichtiges Glühen vollständig verjagt, der Rückstand mit wenig Wasser gelöst, die Lösung filtriert und abermals eingedampft, wieder mit wenig Wasser aufgenommen und mit Platinchlorid versetzt, welches vollständig frei von Platinchlorür sein muß. Man dampft dann die Lösung auf dem Wasserbade bis fast zur Trockene ein, übergießt sie mit 90%igem Alkohol und läßt sie so lange stehen, bis sich das Kaliumplatinchlorid abgesetzt hat. Der Niederschlag wird darauf durch ein zuvor bei 100° C. getrocknetes und gewogenes Filter abfiltriert, erst mit Alkohol und dann mit Äther ausgewaschen und schließlicly bei 100° C. getrocknet.

¹⁾ *Magnesiamixtur*: 110 g Chlormagnesium + 140 g Chlorammonium werden in 1300 ccm Wasser gelöst und die Lösung mit Ammoniak von 0,96 spez. Gewicht zu 2 l aufgefüllt.

Das so erhaltene Gewicht des Kaliumplatinchlorides gibt durch Multiplikation mit 0,194 Kali (K_2O).

§ 49. Die Bestimmung des Kalkes.

10 ccm der für die Kalibestimmung vorbereiteten 400 ccm Lösung, entsprechend einem Extrakt von 2,5 g trockenem Boden, werden mit Ammoniak übersättigt. Der entstandene Niederschlag wird durch tropfenweisen Zusatz von Salzsäure von 1,1 spez. Gewicht bis zur schwach sauren Reaktion gelöst; sodann wird erwärmt und langsam mit oxalsaurem Ammoniak ausgefällt.

Der Niederschlag von oxalsaurem Kalk wird nach einigen Stunden, sowie er kristallinisch geworden ist, abfiltriert, mit heißem Wasser ausgewaschen und getrocknet, zuerst auf dem Bunsenbrenner, dann 10 Minuten lang auf dem Gebläse geglüht und, nachdem er im Exsikkator über konzentrierter Schwefelsäure erkaltet ist, als Ätzkalk (CaO) gewogen.¹⁾

§ 50. Die Bestimmung des Stickstoffs nach Kjeldahl, Modifikation von Ulsch.

20 ccm unseres ursprünglichen Wasserextraktes, entsprechend 5 g trockenem Boden, werden in einem Rundkolben mit 30 ccm Phosphorschwefelsäure,²⁾ einer Messerspitze voll Kupferoxyd und 5 Tropfen 10%iger Platinchloridlösung versetzt und zuerst gelinde, später unter lebhaftem Sieden so lange erhitzt, bis die Flüssigkeit vollständig klar und grün geworden ist. Sollte die Schaumbildung zu stark sein, so kann man sie durch eine kleine Beigabe von Paraffin in die Flüssigkeit dämpfen. Nach dem Erkalten verdünnt man die Flüssigkeit, spült sie in einen Erlenmeyerschen Kolben über, versetzt sie mit Kalilauge und Schwefelkaliumlösung³⁾ und destilliert nun das Ammoniak, in welches vorher auch der Salpeterstickstoff übergeführt war, unter Anwendung eines Kühlers in 50 ccm einer $\frac{1}{4}$ Normalschwefelsäure über.

Die Säure wird dann mit $\frac{1}{4}$ Normalalkali zurücktitriert, um festzustellen, wieviel Säure das Ammoniak gebunden hat. Um bei der

¹⁾ Da der Ätzkalk sehr hygroskopisch ist, können die vorstehend besprochenen Kalkbestimmungen nur dann sichere Resultate liefern, wenn man jede Wasseraufnahme durch die gebrannte Substanz verhindert. Um dies zu umgehen, empfiehlt es sich, da, wo es auf eine sehr exakte Kalkbestimmung ankommt, denselben in kohlen-sauren Kalk überzuführen und als solchen zu wägen. Zu dem Zweck wird der oxalsaure Kalk im Rose-Tiegel im Kohlen-säurestrome geglüht. Multipliziert man die Menge des gefundenen kohlen-sauren Kalkes mit 0,56, so erhält man die Ätzkalkmenge.

²⁾ *Phosphor-Schwefelsäure*: In 2 l konzentrierte Schwefelsäure bringt man langsam und unter Umrühren 250 g Phosphorsäure-Anhydrid ein.

³⁾ *Schwefelkaliumlösung*: 250 g Schwefelkalium in 1 l Wasser gelöst.

Destillation Stofsen zu vermeiden, bringt man in den Destillationskolben etwas Zink; auch empfiehlt es sich, um zu verhüten, daß Kalilauge mit in die Vorlage herübergerissen wird, zwischen dem Kühler und dem Destillationskolben einen Kugelrückflusskühler einzuschalten.

Will man feststellen, wieviel Salze überhaupt durch die Wasserextraktion in Lösung gegangen sind, um daraus zu beurteilen, ob ein zwei-, drei- oder vierfaches Extrahieren des Bodens mit kohlenensäurehaltigem Wasser erforderlich ist, so bringt man 5 ccm der Lösung in einen Porzellantiegel, den man zweckmäßig im Vakuum über konzentrierter Schwefelsäure aufstellt, um so die Lösung einzudampfen. Diese Trockensubstanzbestimmung dürfte im vorliegenden Falle die einfachste und gleichzeitig die genaueste sein.

§ 51. Die physikalische Absorption der Pflanzennährstoffe.

Wir wollen nun annehmen, daß die chemische Analyse ergeben hätte, daß dem Boden weitere Nährstoffmengen zugeführt werden müssen. Wir geben diese Düngung zu Anfang der Vegetationsperiode, sind uns aber dessen bewußt, daß sie die Pflanze nicht sofort ausnutzen kann. Es fragt sich nun, wie diese Stoffe dem Boden erhalten bleiben.

Zunächst wird der erste Regenfall die Dungsalze nicht sofort vollständig auflösen, und wird so ein Teil der Salze im Boden zurückgehalten; die aufgelösten Salze werden aber andererseits, wenn der Boden sehr wasserdurchlässig ist, bei einem ausgiebigen Regenfall in den Untergrund abgeführt werden und so für die Pflanze verloren gehen. Dies wird um so mehr der Fall sein müssen, wenn es häufig regnet, oder wenn die Düngung für mehrere Jahre auf einmal dem Boden einverleibt wird, sofern nicht der Boden die Fähigkeit besitzt, diese Salze festzuhalten oder zu absorbieren, was jedoch glücklicherweise größtenteils der Fall ist.

Wir unterscheiden im allgemeinen zwei Arten dieser Bodenabsorption, die physikalische und die chemische. Physikalisch können die Dungsalze nur dadurch im Boden festgehalten werden, daß sie sich an der Bodenoberfläche niederschlagen oder verdichten. Die chemische Bodenabsorption besteht darin, daß die Nährstoffe chemisch durch die festen Bodenteilchen gebunden werden.

Die physikalische Bodenabsorption ist in der Literatur so oft besprochen worden, daß ich es für erforderlich halte, hier in einem besonderen Paragraphen auf dieselbe einzugehen, obwohl ich der Ansicht bin, daß dieselbe im Boden keine erhebliche Rolle spielt.¹⁾

¹⁾ Alfred Mitscherlich, l. c. Landw. Jahrb. 1901, S. 409 u. f. Vergl. auch die Bemerkung in Adolf Mayers Lehrbuch der Agrikulturchemie. Heidelberg 1901, 2. Teil, 1. Abteilung, S. 98 erster Absatz.

Zwar ist bekannt, daß Kolloidstoffe, wie auch die Tonsubstanzen (vergl. S. 49), tierische Kohle usw., Farbstoffe auf ihrer Oberfläche verdichten können, jedoch ist es meines Erachtens falsch, wenn man von dieser Erscheinung aus auch gleich auf eine ähnliche Absorption der Pflanzennährsalze schließen will. Hierüber muß das Experiment entscheiden.

Vermag ein Boden die Salze aus einer Salzlösung an seiner Oberfläche zu verdichten, so ist die notwendige Folge hiervon, daß die über dem Boden überstehende Flüssigkeit in ihrer Konzentration zurückgehen muß. Die diesbezüglichen Versuche mußten mit einem Salze ausgeführt werden, welches nicht chemisch vom Boden gebunden wurde. Als solches schien der Kalisalpeter am geeignetsten zu sein. Ferner war, um die Konzentrationsänderung möglichst groß zu gestalten, möglichst wenig Flüssigkeit im Verhältnis zur Bodenmenge anzuwenden. Die Versuche selbst wurden in folgender Weise angestellt:

Vier 150 ccm fassende Kölbchen wurden mit je der gleichen Menge Boden ungefähr zur Hälfte gefüllt. Sodann wurde in jedes Kölbchen die gleiche Menge Flüssigkeit dazugegeben, und zwar so viel, daß ca. 5 bis 10 ccm über dem Boden standen. Zwei Kölbchen wurden so mit destilliertem Wasser, die anderen beiden mit einer 1,96 %igen Kalisalpeterlösung übergossen. Die so präparierten Gläschen wurden alsdann luftdicht verschlossen und unter häufigem Umschütteln 48 Stunden lang stehen gelassen. Hierauf wurde die überstehende Flüssigkeit unter möglichster Vermeidung der Wasserverdunstung in einen zuvor gewogenen Porzellantiegel infiltriert und gewogen, dann im Vakuum über konzentrierter Schwefelsäure zur Trockene eingedampft und wieder gewogen. Auf diese Weise wurde nach Abzug des Wasserextraktes, welcher sich aus den einen Parallelbestimmungen ergab, von neuem der prozentische Gehalt der Kalilösung festgestellt. Da lufttrockener Boden zu den Versuchen angewandt wurde, so mußte das sich in diesem befindliche Bodenwasser die gleiche Konzentration wie die Salzlösung annehmen, wodurch letztere naturgemäß geringer wurde.

Die Resultate der Versuche waren im Mittel der Parallelversuche¹⁾ die folgenden:

(Siehe die Tabelle auf Seite 263.)

Wie die nebenstehenden Zahlen zeigen, ist die Konzentration der Kalisalpeterlösung in *keinem* Falle bei den sieben verschiedenen Bodenarten geringer geworden. Es zeigen sich im Gegenteil geringe Zunahmen in fünf Fällen, welche wohl darauf zurückgeführt werden müssen, daß sich die Konzentration der Salzlösung in den 48 Stunden noch nicht vollständig mit dem hygroskopisch gebundenen Bodenwasser ausgeglichen hat.

¹⁾ Vergl. l. c. S. 412.

Von einer physikalischen Absorption, d. h. von einer Flächenattraktion kann somit im vorliegenden Falle bei den sieben verschiedenen Bodenarten nicht die Rede sein, hingegen vermag das hygroskopisch gebundene Bodenwasser die Nährstoffe mit der Salzlösung auszutauschen; wäre das nicht der Fall, so müßte die Konzentration der Salzlösung in jedem Falle 1,96 % betragen. Da hier die Diffusion aber anscheinend sehr langsam vor sich geht, so wird ein Boden, welcher einmal im hygroskopischen Wasser Nährstoffe aufgenommen hat, diese auch entsprechend länger zurückzuhalten vermögen, und er wird somit um so mehr Nährstoffe in dieser Weise „physikalisch“ zurückhalten, je größer seine Hygroskopizität, je größer also mit andern Worten die Bodenoberfläche ist.

Bodenart: ¹⁾	Moorboden	Humusreicher Sandboden	Humoser Sandboden	Sandboden	Lehmiger Sandboden	Sandiger Lehmboden	Strenger Tonboden
Angewandte trockene Bodenmenge (g)	30,0	40,0	50,0	50,0	50,0	40,0	40,0
Angewandte Flüssigkeitsmenge (g)	45,0	40,0	30,0	20,0	20,0	20,0	60,0
Darin Kalisalpeter (g)	0,725	0,770	0,577	0,386	0,385	0,383	1,083
Mithin Konzentration der angewandten Kalisalpeterlösung (‰)	1,61	1,93	1,93	1,93	1,93	1,92	1,81
Konzentration der über den Boden überstehenden Kalisalpeterlösung nach 48 Stunden nach Abzug des Wasserextraktes (‰)	1,69	1,95	1,95	1,93	1,93	1,95	1,83

Ob eine Oberflächenattraktion bei anderen Nährsalzen, wie z. B. bei Ammoniaksalzen, eintritt, dürfte hiernach mindestens fraglich erscheinen. Sollten nicht hier noch uns unbekanntere Vorgänge, welche vielleicht mit der Dissoziation dieser Salze zusammenhängen, vorliegen, so wird demnach die Absorption dieser Salze nicht eine physikalische, sondern eine chemische sein.

van Bemmelen glaubt auf Grund seiner zahlreichen Versuche,²⁾ daß kolloidale (gallertartige) Körper, sog. Gehls, Salze durch Oberflächen-

¹⁾ Vergl. die mechanische Analyse dieser Bodenarten S. 35.

²⁾ Vergl. J. M. van Bemmelen, Die Absorptionsverbindungen und das Absorptionsvermögen der Ackererde; Landw. Versuchs-Stationen Bd. 35, S. 73. 1. Abschnitt. — Derselbe, ebenda S. 69 u. f.

attraktion zu binden vermögen. Ist dies in der Tat der Fall, so dürfte dies doch für die praktische Bodenkunde meines Erachtens keine praktische Bedeutung haben, da diese Gehls, wie z. B. das Kieselsäuregehl, nach Versuchen des Verfassers¹⁾ nur in sehr geringen Mengen im Kulturboden vorkommen dürften.

Bringt man aber vielleicht das Ausflocken der Tonsubstanzen in Salzlösungen mit dieser Absorption in Zusammenhang, so kann es vielleicht denkbar sein, daß beim Ausflocken Salzmoleküle eingeschlossen und so gebunden werden. — Die Schwierigkeit der Trennung der physikalischen Vorgänge von den chemischen wird voraussichtlich noch viel Arbeit erfordern, bis wir die Vorgänge theoretisch deuten können. Für die praktische Bodenkunde genügt jedoch die Tatsache der Absorption.

§ 52. Die chemische Absorption der Pflanzennährstoffe.

Tritt zu einem Körper, welcher sich im chemischen Gleichgewicht befindet, ein anderer Körper, so kann eine chemische Reaktion ausgelöst werden, indem sich Bestandteile des einen Körpers mit solchen des anderen zu neuen Körpern vereinigen. Der Endzustand dieser chemischen Reaktion ist wiederum ein Gleichgewichtszustand, welcher durch die Art der einzelnen Körper und durch die Massen derselben, welche aufeinander einwirken können, bedingt wird. Infolge dieser chemischen Massenwirkung wird Säure durch Base und Base durch Säure gebunden, die schwächere Säure resp. Base von der stärkeren aus ihren Verbindungen herausgeworfen usw. — Es ist naheliegend, dieses Gesetz der chemischen Massenwirkung auch auf die Absorption der Pflanzennährstoffe durch den Boden anzuwenden.

Jedoch werden hier die Verhältnisse dadurch kompliziert, daß ein Teil der in Wasser gelösten Nährstoffe chemisch absorbiert wird und hierdurch aus der Lösung ausscheidet, andere feste Stoffe aus dem Boden dagegen in Lösung übergehen können, und daß so die Massenverhältnisse in der Lösung durch diese Veränderung der Phasen dauernd andere werden.

Meines Erachtens ist auch die Theorie der chemischen Absorption der Nährsalze durch den Boden noch keineswegs geklärt. Für die praktische Bodenkunde genügt es aber, zunächst festzustellen, welche Salze durch den Boden absorbiert werden können. Hierfür liegen zahlreiche Versuche²⁾ vor, welche u. a. sehr gut von Adolf Mayer³⁾ und von

¹⁾ Alfred Mitscherlich, l. c. Landw. Jahrbücher 1901, S. 443—445.

²⁾ Vgl. insbesondere die grundlegenden Arbeiten von J. M. van Bemmelen, Das Absorptionsvermögen der Ackererde: Landw. Versuchs-Stationen Bd. 21, S. 135 u. f. und Bd. 23, S. 265 u. f.

³⁾ Adolf Mayer, Lehrbuch d. Agrikulturchemie. Heidelberg 1901, 2. Teil, 1. Abteilung, S. 99—100.

E. Ramann¹⁾ zusammengestellt sind. Man hat hier folgendes festgestellt:

Kalium wird im allgemeinen sehr stark absorbiert, und zwar zunächst durch wasserhaltige Doppelsilikate,²⁾ deren Basen dafür in Lösung gehen. So kann eine Kalilösung aus einem Tonerde-Kalksilikat den Kalk verdrängen und so ein Tonerde-Kalisilikat bilden.

Das Kalium aus Kaliumkarbonat und Kaliumhydroxyd kann durch Humussäuren, welche schwerer lösliche Salze bilden, gebunden werden.

Kalisilikat und kohlsaurer Kalk verbinden sich zu zeolithartigen Verbindungen.

Phosphorsäure bildet mit Tonerde, Eisenoxyd, Kalk und Magnesia unlösliche Salze. Sie wird so z. B. von kohlsaurem Kalk und von Eisenoxydhydrat gebunden. Auch die Doppelsilikate vermögen sich — und zwar je basischer sie sind, um so mehr — wegen ihrer unbestimmten Sättigungskapazität an der Phosphorsäureabsorption zu beteiligen.

Kalk wird als kohlsaurer, humussaurer, phosphorsaurer oder kiesel-saurer Kalk im Boden festgehalten.

Stickstoff wird als Ammoniak ähnlich dem Kalium durch Kohlen-säure, Humussäuren³⁾ und Kieselsäure gebunden. Letzteres in der Form von einem wasserhaltigen Doppelsilikat. Das kohlsaurer Ammoniak, welches wir regelmässig in der Jauche finden, dürfte meist durch Humussäuren im Boden absorbiert werden (vergl. S. 226, 227).

Ist in einem Boden kohlsaurer Kalk vorhanden, so verhalten sich die Salze mit starken Mineralsäuren nach Ad. Mayer zum Teil auch wie freie Basen oder wie Karbonate, da eine teilweise, aber unter Mitwirkung der Absorption fortschreitende Umsetzung der beiden genannten Körper eintritt.

Für die praktische Bodenkunde hat es ein Interesse zu wissen, wieviel von den einzelnen Pflanzennährstoffen ein Boden zu absorbieren vermag. Hierüber muß nach unseren jetzigen Kenntnissen in jedem Einzelfalle das Experiment entscheiden, denn die chemische Absorptionsfähigkeit eines Bodens ist von allen bislang bestimmten Größen unabhängig. Die Versuche hierfür sind in der gleichen Weise anzustellen, wie dies bei der Bestimmung der physikalischen Absorption ausgeführt wurde, nur mit dem

¹⁾ E. Ramann, Forstliche Bodenkunde und Standortlehre. Berlin 1893, S. 137—139.

²⁾ Eichhorn, Einige Beiträge zu den Absorptionserscheinungen in den Ackererden; Landw. Jahrbücher 1875, Bd. 4, S. 1 u. f.

³⁾ Alfred König, Über das Absorptionsvermögen humoser Medien; Landwirtschaftliche Jahrbücher 1882, Bd. XI, S. 1 u. f. — Humusboden binden Kali ungefähr ebenso stark wie Ammoniak. Phosphorsäure wird nur, insoweit Mineralbestandteile vorhanden sind, die mit dieser Säure unlösliche Salze bilden, gebunden.

Unterschiede, dafs man die überstehende Salzlösung nach dem Versuch quantitativ auf ihren Gehalt an dem betreffenden zugeführten Nährstoff hin zu untersuchen hat.

Dafs die chemische Absorption der Ackererde von der praktischen Wertschätzung des Bodens unabhängig ist,¹⁾ ersieht man deutlich aus dem umfangreichen Material, welches Emmerling²⁾ in seiner Festschrift niedergelegt hat.

Dieser bestimmte die Absorptionskoeffizienten des Bodens für Phosphorsäure, indem er 24 Stunden lang 100 ccm einer Lösung von Monokalziumphosphat auf 50 g Boden (lufttrockene Feinerde) bei Zimmertemperatur einwirken liess. Die angewandten 100 ccm Lösung enthielten rund 0,14 g Phosphorsäure. Nach dem Versuch wurde sofort filtriert und die noch in Lösung befindliche Phosphorsäure ermittelt. In ähnlicher Weise bestimmte Emmerling auch den Absorptionskoeffizienten des Bodens gegen Ammoniak. Auf 50 g Boden liess er 24 Stunden lang 100 ccm einer Chlorammoniumlösung einwirken, welche rund 0,14 g Stickstoff enthielt.

Die folgenden Resultate mögen zeigen, wie diese so ermittelten Absorptionskoeffizienten innerhalb der gleichen (praktisch festgestellten) Bodenklasse bei verschiedenen Böden schwankten.

(Siehe die Tabelle auf Seite 267.)

Berechnet man das Mittel und die wahrscheinlichen Schwankungen für sämtliche von Emmerling ausgeführte Beobachtungen bei den einzelnen Bodenklassen, so ergibt dies:

(Siehe die Tabelle auf Seite 268.)

Wenn man berücksichtigt, dafs 50⁰/₀ aller Beobachtungen³⁾ entweder unter dem Mittel (m) abzüglich der wahrscheinlichen Schwankung (r) oder über dem Mittel (m) zuzüglich der wahrscheinlichen Schwankung (r) liegen, also kleiner als $(m - r)$ oder gröfser als $(m + r)$ sein müssen, so läfst sich leicht übersehen, dafs die zwischen den Mitteln der einzelnen Bodenklassen gefundenen Differenzen wertlos sind, da die wahrscheinliche Schwankung durchschnittlich von der Gröfse dieser Differenz ist. Das besagt aber m. a. W., dafs die chemische Absorptionsfähigkeit von der Bonitätsklasse des Bodens und somit — da diese durch die physikalischen Bodeneigenschaften bestimmt wird — auch von den physikalischen Bodeneigenschaften unabhängig ist.

Wollen wir uns ein Bild von der Gröfse dieser chemischen Absorption machen, so geben dieses die nachstehenden Zahlen. Sie bedeuten,

¹⁾ Vergl. Knop, Die Bonitierung der Ackererde. Leipzig 1872.

²⁾ A. Emmerling, l. c. S. 68—185 und S. 232—239.

³⁾ Vergl. den § 64 S. 312.

dafs 100 g Feinerde x mg Phosphorsäure resp. Stickstoff absorbieren. Berechnet man die Krumentiefe zu 30 cm und das Bodengewicht zu 1,2, so würde der Boden pro Quadratcentimeter $x \times 30 \times 1,2$ mg Phosphorsäure resp. Stickstoff oder pro Hektar $x \times 36$ dz Phosphorsäure resp. Stickstoff absorbieren können. Wenngleich diese Zahlen insofern viel zu hoch gegriffen sind, weil unter natürlichen Verhältnissen die im Wasser gelösten Nährstoffe keineswegs so lange und so gut in Wechselbeziehung mit dem Boden treten können, so geben sie immerhin eine Vorstellung von der Bedeutung dieser chemischen Bodenabsorption, welche zuerst von dem Engländer H. S. Thomson¹⁾ um 1850 beobachtet wurde, dann aber bei uns durch die Arbeiten Liebig's vollauf anerkannt und vielleicht auch überschätzt werden sollte.

Versuch	Absorptionskoeffizienten (mg) bei					
	Lehmboden 2. Kl.		Sandboden 6. Kl.		Marschboden 2. Kl.	
	für Phosphorsäure	für Stickstoff	für Phosphorsäure	für Stickstoff	für Phosphorsäure	für Stickstoff
1	100	85	40	30	94	91
2	97	84	41	32	85	90
3	120	51	86	15	162	141
4	103	71	153	23	108	124
5	88	64	112	21	104	101
6	76	62	96	31	50	64
7	67	35	156	53	80	63
8	100	51	90	22	104	82
9	94	59	164	30	117	84
10	135	53	172	38	119	88
11	94	94	—	—	119	92
12	121	68	—	—	—	—
13	133	66	—	—	—	—
14	75	70	—	—	—	—
15	95	59	—	—	—	—
16	51	122	—	—	—	—
17	70	58	—	—	—	—
Im Mittel	95	68	111	30	104	102
Wahrscheinliche Schwankung \pm	15,0	12,3	36,1	6,5	17,1	17,8

¹⁾ Vergl. Adolf Mayer l. c. S. 92, Journ. of the Roy. Agric. Soc. 1850, T. XI, p. 68.

Bodenklasse:	Zahl der Bestimmungen	Absorptionskoeffizienten der verschiedenen Bodenklassen			
		für Phosphorsäure		für Stickstoff	
		im Mittel	wahrsch. Schwankung +	im Mittel	wahrsch. Schwankung +
<i>Lehmboden</i> (diluvial):					
2. Klasse (inkl. 2.—3.) . . .	17	95	15,0	68	12,3
3. Klasse (inkl. 3.—4.) . . .	33	95	12,1	57	12,7
4. Klasse (inkl. 4.—5.) . . .	17	109	16,4	57	17,6
5. Klasse	5	97	17,5	36	6,1
leichter	6	101	19,5	32	10,4
mittlerer, milder oder guter	3	96	15,9	55	11,7
schwerer	4	107	21,5	95	16,1
<i>Sandboden:</i>					
4. Klasse (inkl. 3.—4. und 4.—5.)	9	106	20,4	39	7,6
5. Klasse (inkl. 5.—6.) . . .	11	98	14,6	35	8,9
6. Klasse (inkl. 6.—7.) . . .	10	111	36,1	30	6,5
<i>Marschboden:</i>					
2. Klasse	11	104	17,1	102	17,8
3. Klasse	19	88	25,6	77	14,1
4. Klasse	3	178	48,6	95	4,8
schwerer	3	107	14,1	100	10,7
der Wiedingharde	3	140	23,5	92	5,9

O. Kellner¹⁾ bestimmt die im absorbierten Zustande im Boden vorhandenen Nährstoffe (Kali und Kalk), indem er den Boden mit einer gesättigten Salmiaklösung extrahiert. Er bringt hierzu 20 g Boden in eine größere Platinschale, setzt 50 ccm einer in der Kälte gesättigten Salmiaklösung zu und digeriert dies sodann unter häufigem Umrühren mit einem Platinspatel eine halbe Stunde lang auf dem Wasserbade. Nach dem Absetzen des Bodens wird die überstehende Lösung abfiltriert, mit heißem Wasser nachgespült und sodann der Boden zum zweiten Male in gleicher Weise behandelt. Nach 15—20 fachem Extrahieren wird beim Abdampfen über der Flamme das Filtrat keinen Rückstand mehr hinterlassen. Die Filtrate werden nun alle in einer Literflasche vereinigt; diese wird bis

¹⁾ O. Kellner, Quantitative Bestimmung einiger im Boden vorhandenen absorptiv gebundenen Basen und Versuche über die Frage, ob die Pflanze nur gelöste und absorbierte oder auch stärker gebundene unlöslichere Nährstoffe aufnehmen kann; Landw. Versuchs-Stationen Bd. XXXIII, S. 359 u. f.

auf die Marke aufgefüllt, und es wird sodann in 250 ccm dieser Lösung, entsprechend 5 g Boden, der Kaligehalt, resp. in 125 ccm derselben, entsprechend 2,5 g Boden, der Kalkgehalt festgestellt.

Kellner hat dies Verfahren vorgeschlagen von der Ansicht ausgehend, daß die Pflanzen die Nährstoffe nur im gelösten oder im absorptiv gebundenen Zustande aufnehmen können, daß für dieselben hingegen die in schwerlöslichen Verbindungen vorhandenen Nährstoffe keinen Wert besitzen.

Es unterliegt ja keinem Zweifel, daß die Pflanzenwurzel einen Teil der wasserunlöslichen Nährstoffe sich *nicht* aufzuschließen vermag; welcher Teil dies aber ist, läßt sich durch Vegetationsversuche meines Erachtens nicht ermitteln, da, wie früher ausgeführt, die Pflanzen auch von den für sie aufschließbaren Nährstoffen nur diejenigen aufnehmen können, mit welchen ihre Wurzel in direkte Berührung kommt. So dürfte auch diesen Untersuchungen Kellners ebenso wie den zahlreichen Versuchen, den Boden mit irgend einer entsprechenden Säure zu extrahieren, keine wesentliche Bedeutung für die Bodenkunde zukommen. — Daß im allgemeinen die vom Boden chemisch absorbierten Nährstoffe besser von der Pflanze ausgenutzt werden können als die ursprünglich im Boden vorhandenen chemisch gebundenen Stoffe, dürfte keinem Zweifel unterliegen. Es läßt sich dies leicht damit begründen, daß, da die Absorption an der ganzen Bodenoberfläche stattfinden kann, die absorbierten Salze sehr gleichmäßig und fein im Boden verteilt sein müssen, und zwar viel zweckmäßiger als die im Urgestein enthaltenen Pflanzennährstoffe, welche sich teilweise im Innern der festen Bodenteilchen befinden.

§ 53. Die Möglichkeit, chemisch absorbierte Pflanzennährstoffe durch die Düngung in Lösung überzuführen.

Wir hatten zuvor gesehen, daß die Pflanzennährstoffe, sobald sie nicht mehr wasserlöslich, sondern chemisch an die festen Bodenteilchen gebunden sind, nicht den gleichen Wert für die Pflanze haben wie zuvor, weil die Pflanzenwurzel dieselben nicht in gleicher Weise aufzunehmen und auszunutzen vermag. Dadurch, daß das Düngesalz chemisch von dem Boden absorbiert wird, verliert es also an Wert. Es ist uns nun aber gerade wieder in der chemischen Absorptionsfähigkeit des Bodens die Möglichkeit gegeben, die im Boden gebundenen Pflanzennährstoffe wasserlöslich zu machen. Insonderheit gilt dies für das Kalium. Führt man so einem Boden starke Düngungen von Kalk-, Magnesium- oder von Natriumsalzen zu, so vermögen die Basen dieser Salze das Kalium aus den Doppelsilikatverbindungen herauszuwerfen und in Lösung überzuführen. So kann das Natrium das Kalium ersetzen, wie dies vielfach behauptet wird; deshalb vermag ferner eine Kalkdüngung die Erträge momentan so wesentlich

zu steigern. Aus dem gleichen Grunde bewahrheitet sich hier das alte Sprichwort, daß starke Kalkdüngung „reiche Väter aber arme Söhne“ gibt; denn mit dieser Düngung können wir einen Luxusverbrauch an Kali herbeiführen, welches, einmal in Lösung gebracht, ausgelaugt werden kann. Der Acker wird so an Kali arm und, falls nicht Kalidüngung in späteren Jahren erfolgt, müssen dementsprechend die Erträge zurückgehen. Die große Ertragssteigerung, welche die Kalkdüngung gewöhnlich zur Folge hat, dürfte vornehmlich hierin ihre Begründung finden.

Es muß hier wiederum der chemischen Analyse überlassen bleiben, im Einzelfalle festzustellen, wieviel Kali man aus einem Boden z. B. durch eine bestimmte Kalkdüngung in Lösung überführen kann, damit man dann danach, ohne einen Luxusverbrauch an Kali zu treiben, die Kalkdüngung berechnen kann. Versuche dieser Art sind meines Erachtens sicher lohnenswert, wenngleich sie deshalb schwer ausführbar sind, weil die Kalksalze als solche im allgemeinen schwer wasserlöslich sind, mithin auch die Zeit mit in Rechnung gezogen werden müßte.

§ 54. Der Einfluß der Organismen auf die chemischen Bodeneigenschaften.

Als in den letzten 30 Jahren die bakteriologische Forschung mit ihren glänzenden, insonderheit auf medizinischem Gebiete erzielten Erfolgen die Augen aller Welt auf sich lenkte, glaubten auch die Landwirte in ihr den Schlüssel für die meisten noch ungelösten Fragen gefunden zu haben. Es unterliegt auch keinem Zweifel, daß wir der Bakteriologie mit den größten Erfolg verdanken, welchen wir seit Liebig's Zeiten auf dem Gebiete der Land- und Forstwirtschaft errungen haben: die Erkennung des Wertes der Leguminosen als Stickstoffquelle für den Boden. Aber es dürfte ebenso unzweifelhaft sein, daß infolge dieser großen Entdeckung Hellriegel's¹⁾ bei vielen Fachgenossen eine Überschätzung des günstigen Einflusses der Bodenbakterien auf das Pflanzenwachstum Platz gegriffen hat. Wie zu Liebig's Zeiten der Pflanzenertrag lediglich durch die im Boden vorhandenen Nährstoffe bedingt wurde, so sollen jetzt womöglich die Erträge von der Anzahl der im Boden vorhandenen Bakterien abhängig sein usf. — Daß hier wie da eine gewisse Abhängigkeit besteht, ist nicht zu leugnen! Denn sind die physikalischen und chemischen Lebensbedingungen für die Kulturpflanze gut, so werden sie voraussichtlich auch für die Bakterien gut sein, also: wo viel Bodenbakterien, da höhere Pflanzenerträge!

Über die große Hilfe, welche uns die Bakterien bei der Bodenbearbeitung in der „Gare“ des Bodens leisten, haben wir früher (§ 26) ge-

¹⁾ H. Hellriegel und H. Wilfarth. Untersuchungen über die Stickstoffnahrung der Gramineen und Leguminosen: Zeitschrift des Vereins für die Rübenzuckerindustrie, Beilageheft Nov. 1898 Berlin.

sprochen. Hier interessiert uns ihre chemische Tätigkeit. Diese ist dreierlei Art: Einmal vermögen Bakterienarten dem Boden Nährstoffe zuzuführen, ferner vermögen Bakterienarten die Nährstoffe im Boden in andere Formen überzuführen, und schliesslich vermögen andere wieder Nährstoffe dem Boden zu entziehen.

Der Pflanzennährstoff, um den es sich hier vornehmlich handelt, welcher aus dem den Boden umgebenden Medium, der atmosphärischen Luft, gebunden werden und andererseits auch wieder aus dem Boden als Gas in diese entweichen kann, ist der Stickstoff. Folgende Tabelle mag einen Anhalt für diese Umwandlungen des Stickstoffs durch die verschiedenen Bakterienarten geben.

<i>Bakterienart</i>	<i>verwandelt</i>	<i>in</i>
Clostridium Pastorianum (Winogradsky)	den freien Stickstoff der Luft ¹⁾	gebundenen Stickstoff,
Azotobacter chroococcum (Beyerink)		
Bacterium Nitrosomonas (Winogradsky)	Ammoniakstickstoff	{ Nitritstickstoff (Prozess der Nitrifikation),
Nitrobacter (Winogradsky)		
Bacterium Stutzeri	Nitratstickstoff	{ Nitritstickstoff und in freien Stickstoff,
Bacterium pyocyaneum		
Bacterium denitrificans (Stocklasa)	Nitritstickstoff ²⁾	{ freien Stickstoff (Prozess der Denitrifikation)

und viele andere Arten.

Über die Bedeutung all dieser freilebenden Bakterienarten für die Pflanzenerträge können wir auch heute noch herzlich wenig aussagen. Wir wissen nur, daß jede Stickstoffanreicherung des Bodens ein Gewinn für uns ist, jede Stickstoffentbindung einen Verlust bedeutet. Ob aber dieser Stickstoffgewinn und -Verlust überhaupt eine Bedeutung erlangen kann, wissen wir nicht. Hier fehlt es an quantitativen Arbeiten, welche leider ganz außerordentlichen Schwierigkeiten schon deshalb unterliegen, weil sich der durchschnittliche Gehalt eines Bodens an Pflanzennährstoffen schon nur mit angenäherter Genauigkeit feststellen läßt, und die Beeinflussung desselben durch die Bakterien im Vergleich zu diesem stets nur eine Größe zweiter Ordnung sein wird.

Es ist naheliegend, daß die stickstoffbindenden Bakterien ihre Arbeit ausgiebiger leisten können, wenn der Boden möglichst viel mit der atmosphärischen Luft in Berührung kommt, da diese den Bakterien den Stickstoff liefert; insofern würden wir in möglichst ausgedehnter Schwarz-

¹⁾ Vers.-Stat. LVI, S. 203.

²⁾ Vers.-Stat. L, S. 65, 115.

brache die beste Kulturbedingung finden. Wer aber bürgt uns dafür — ganz abgesehen davon, daß diese Methode außerordentlich unökonomisch ist¹⁾ —, daß nicht ebenfalls durch den Zutritt der Luft auch gewisse denitrifizierende Bakterien am besten gedeihen, welche ebensolche Mengen Stickstoff wieder in freien Luftstickstoff überführen? Wer bürgt uns dafür, daß diese nicht im Einzelfalle auch noch eine weit größere Tätigkeit als die ersteren entwickeln? Es ist möglich, daß uns auch hier die nächste Zeit größere Einsicht schaffen wird; groß jedenfalls kann der Einfluß dieser Bakterien nicht sein, da sonst auch die Praxis unbewußt empirisch mehr für die Kultur dieser Bakterien getan hätte.

Die Gründüngung.

Einen viel größeren Einfluß auf die Nutzbarmachung der Nährstoffe haben unsere Kulturpflanzen selbst, wenn wir dieselben dazu benutzen, die Nährstoffe für die folgende Kulturpflanze vorzubereiten, d. h. wenn wir sie unterpflügen oder „grün düngen“. Hierzu eignet sich zunächst jede Pflanze, die in kurzer Vegetationsperiode möglichst große Grünmasse liefert. Sie nimmt die wasserlöslichen Nährstoffe in sich auf und hält dieselben im Boden zurück, sie schließt mit ihren Wurzelsystem schwer lösliche Nährstoffe auf und gibt diese dann in leichter löslicher Form bei ihrer Verwesung an die auf die Gründüngung folgende Kulturpflanze ab.

Noch größer ist der chemische Nutzen, welchen wir aus der Gründüngung der Leguminosen erzielen, da diese Pflanzen vermittelt einer Symbiose mit dem Bakterium *radicicola leguminosarum* sich unter Bildung von Wurzelknöllchen den Stickstoff der Luft direkt nutzbar machen und so in sich aufgespeichert der nächstfolgenden Kulturpflanze im Boden zur Verfügung stellen. Nimmt man an, daß diese Gründüngungspflanzen nur so viel Stickstoff aus dem Boden entnehmen, als sie in ihren Wurzeln wiederum im Boden zurücklassen, so daß der in den oberirdischen Pflanzenteilen befindliche Stickstoff dem Boden durch die Pflanzen aus der Atmosphäre neu zugeführt wird, so würden dieselben danach den Boden mit den folgenden Stickstoffmengen anreichern:

(Siehe die Tabelle auf Seite 273.)

Daß die Leguminosen, auch wenn ihnen gar kein Stickstoff im Boden zur Verfügung steht, sehr gut gedeihen können, hat Hellriegel schlagend nachgewiesen. Es ist somit für diese Kulturpflanzen der Stickstoffgehalt des Bodens gleichgültig. Zu diesen Kulturpflanzen gehören

landwirtschaftlich: außer den in der Tabelle angeführten: alle Kleearten,
Luzerne, Esparsette, Bohne und Linse,
forstwirtschaftlich: die Akazie (*Robinia pseudacacia*).

¹⁾ Th. Pfeiffer, Stickstoffsammelnde Bakterien, Brache und Raubbau. Berlin 1904, S. 32 u. f.

Leguminosen:	Heuertrag ¹⁾	Gehalt	Stickstoff-
	pro ha	an Stickstoff ¹⁾	anreicherung
	D.-Ztr.	‰	pro ha
			D.-Ztr.
Serradella	24—60	2,2	0,53—1,32
Gelbe Lupine	32—40	2,7	0,86—1,08
Weisse Lupine }	30—60	2,7	0,81—1,62
Blaue Lupine }			
Wicke	32—64	2,3	0,74—1,47
Erbse	30—50	2,3	0,69—1,15

Auch bei der Erle (*Alnus*) hat Hiltner²⁾ dieselben Wurzelknöllchen festgestellt, und andere Pilze, die Mykorrhizien³⁾, vermögen anscheinend den Nadelhölzern und vielen Laubhölzern, wie den Eichen und Rotbuchen, an deren Wurzelspitzen sie korallenartige Gebilde erzeugen, die gleichen Dienste in der Symbiose mit ihnen zu leisten.

Inwieweit tierische Organismen, wie z. B. der Regenwurm, sich daran beteiligen, die Nährstoffe für die Pflanze aufnehmbarer zu gestalten, darüber liegen meines Wissens keine einwandfreien Untersuchungen vor.

§ 55. Die Pflanzengifte im Boden.

Jedes Salz, welches im Übermafs in Lösung geht, so dafs die Konzentration der Lösung eine solche Höhe erreicht, dafs der osmotische Druck derselben gröfser ist als der Turgor der Wurzelhärcchen, welche die Nährstoffe aufnehmen sollen, übt einen giftigen Einflufs auf die Pflanze aus. Es tritt in den Pflanzenzellen eine Loslösung des Protoplasmas von der Zellwand („Plasmolyse“) ein; die Pflanzen vermögen dann weder Nährstoffe noch Wasser aufzunehmen, sie vertrocknen oder, wie man in der Praxis sagt: „zuviel künstlicher Dünger verbrennt die Pflanzen“. Die Konzentration der Salzlösungen, bei welcher diese Erscheinung eintritt, beträgt

¹⁾ Aus H. Thiel, Landw. Kalender von O. Mentzel und A. v. Lengerke. Berlin 1905, 1. Teil, S. 85 u. 93.

²⁾ L. Hiltner, Über die Bedeutung der Wurzelknöllchen von *Alnus glutinosa* für die Stickstoffernährung dieser Pflanze; Landw. Versuchs-Stationen Bd. 46, S. 153. — F. Nobbe und L. Hiltner, Über das Stickstoffsammelungsvermögen der Erlen und Elaeagnaceen; Naturw. Zeitschr. f. Land- und Forstwirtschaft 2. Jahrg., S. 366—369.

³⁾ Vergl. u. a. L. Hiltner, Beiträge zur Mycorrhizafrage I; ebenda 1. Jahrg., S. 9—25. — Ferner v. Tubeuf, Beiträge zur Mycorrhizafrage II; ebenda 1. Jahrg., S. 67—82.

nach Knop¹⁾ 5 pro Mille. Stiehr²⁾ kommt hier bei Versuchen, die er mit Keimpflänzchen angestellt hat, zu ähnlichen Resultaten.

Abgesehen von dieser physikalischen Vergiftung der Pflanzen können aber bestimmte Salze, sowie auch freie Säuren und Basen schon bei geringerer Konzentration giftige Wirkungen derart ausüben, daß sie die Pflanzenzelle sofort abtöten. Die Plasmaströmung hört alsdann auf, das Protoplasma erscheint fixiert, ohne daß Plasmolyse eingetreten wäre. Einen derartig vergiftenden Einfluß üben u. a. folgende Stoffe aus (vergl. Stiehr, l. c.):

Freie Mineralsäuren in einer Konzentration von über	0,075—0,15 ‰
Freie organische Säuren in einer Konzentration von über	0,2 —0,4 „
Freie Basen in einer Konzentration von über	1,0 —2,0 „
Kupfersulfat ($\text{CuSO}_4 + 5 \text{ aq}$) in einer Konzentration von über	1,0 ‰
Eisensulfat ($\text{FeSO}_4 + 7 \text{ aq}$) in einer Konzentration von über	2,0 „
Chlormagnesia ($\text{MgCl}_2 + 6 \text{ aq}$) in einer Konzentration von über	1,5 „
Schwefelsaure Magnesia ($\text{MgSO}_4 + 7 \text{ aq}$) in einer Konzentration von über	3,0 „
Karnallit ($\text{K}_2\text{Mg}_2\text{Cl}_6 + 12 \text{ aq}$) in einer Konzentration von über	3,0 „

Für Perchlorate war eine derartige Giftigkeit nicht nachzuweisen.

Während wir bei der künstlichen Düngung, insonderheit von leicht wasserlöslichen Salzen schon aus ökonomischen Gründen dafür Sorge tragen, daß nicht zu große Mengen auf die Flächeneinheit kommen, kann uns die Natur zuweilen den Boden durch Salzquellen oder auch namentlich durch Meerwasser-Überschwemmungen vergiften. Durch diese Naturereignisse kann das Bodenwasser eine derartige Konzentration annehmen, daß unsere Kulturpflanzen nicht mehr gedeihen können, vielleicht mit Ausnahme einer einzigen Grasart, der Salzschwaden (*Glyceria distans*), deren Turgor noch einer sehr starken Salzlösung zu widerstehen vermag. — Solche Ländereien sind schwer wieder kulturbar zu machen. Die Beseitigung der Gefahr einer Wiederholung des Naturereignisses und sodann das allmähliche Auslaugen des Bodens im Laufe der Jahre sind die einzigen Mittel.

Häufiger schon finden wir Ländereien, deren Boden sauer ist (die Reaktion läßt sich am blauen Lackmuspapier leicht nachweisen). Der

¹⁾ Wilhelm Knop, Lehrbuch der Agrikulturchemie. Leipzig 1868, Bd. I, S. 606.

²⁾ G. Stiehr, Über das Verhalten der Wurzelhärchen gegen Lösungen. Inaug.-Diss. Kiel 1903, S. 24.

Grund für diese Säure ist fast ausschließlich das stagnierende Grundwasser. Wir finden die Erscheinung meist bei Moorböden. Freie Humussäuren oder durch Oxydation von Eisenkies frei gewordene Schwefelsäure sind meist die Ursache der Reaktion. Auf derartig sauren Tieflandmoorwiesen verschwinden fast alle Kulturpflanzen: alle besseren Gräser, alle Kreuziferen und Leguminosen und Getreidearten;¹⁾ Unkräuter: Carex-Arten, Moos- (Sphagnum-) Arten und die Ackerdistel (*Cirsium arvense*) vermögen den Platz zu behaupten. — Auch hier muß man erst die Neubildung des Giftes, der Säure, durch Entwässerung des Bodens verhindern, sodann die freie Säure durch Düngung von Kalksalzen abstopfen. Gewöhnlich wird schon dann sofort ohne weitere kulturtechnische Maßnahmen (Übersandung) für unsere Kulturpflanzen ein geeigneter Standort geschaffen sein.

Von den weiteren Giftsalzen haben wir insonderheit noch die Magnesiumsalze zu erwähnen. Leider wissen wir von ihrem schädlichen Einflusse noch verhältnismäßig wenig. Das einzige, was hierüber bekannt sein dürfte, ist, daß eine starke Kalk- oder Kalidüngung, durch welche Magnesium aus dem Boden infolge der chemischen Umsetzung in Lösung übergeführt wird, unter Umständen für unsere Kulturpflanzen schädlich wirken kann. Nach den Untersuchungen von Stiehr zeigte sich übrigens der Spörgel (*Spergula arvensis*) gegen die Giftwirkung der Magnesiumsalze immun, während Timothee (*Phleum pratense*), Schwedenklee (*Trifolium hybridum*) und Mohn (*Papaver somniferum*) sehr stark auf dieselben reagierten, es ist möglich, daß auch noch für andere Kulturpflanzen die Magnesiumsalze keine Giftwirkung besitzen, wie überhaupt unsere verschiedenen Kulturpflanzen gegen die verschiedenen Pflanzengifte verschieden widerstandsfähig zu sein scheinen.

¹⁾ Vergl. Walter Maxwell, Die relative Empfindlichkeit von Pflanzen gegenüber dem Säuregehalt des Bodens; Landw. Vers.-Stat. Bd. L, S. 325 u. f.

DRITTER ABSCHNITT.

Der gewachsene Boden.

Kapitel VII.

Die Eigenschaften des gewachsenen Bodens und ihre Schwankungen.

(Der Standort der einzelnen Pflanze.)

§ 56. Der gewachsene Boden und der Bodenwert.

In den vorhergehenden Kapiteln hat uns vornehmlich die der Erde entnommene Bodenprobe beschäftigt. Sie kann aber keineswegs allein einen Mafsstab für die Höhe der von einem Boden zu erwartenden Pflanzenerträge abgeben. Steht bald unter dem Boden, welchem wir die Probe entnahmen, festes Gestein an, so wird der Boden, wenn er auch noch so gut ist, keinen passenden Standort für unsere Kulturpflanzen abgeben; ist der Boden jährlich Überschwemmungen ausgesetzt, so wird dies ebenfalls nicht der Fall sein können; kurz, es gibt eine ganze Reihe von Faktoren, welche für die Beurteilung des Bodenwertes mit berücksichtigt werden müssen, welche man aber nur am gewachsenen Boden selbst beurteilen kann. Zu diesen Faktoren gehören die physikalischen Eigenschaften des Bodens, die der Krume und die des Untergrundes, ferner die Tiefe der Krumenschicht, endlich die Wasserverhältnisse des Untergrundes und die Neigung der Erdoberfläche. Alle diese Bodeneigenschaften müssen, da sie den Bodenwert bedingen sollen, unabänderlich gegeben sein, oder es muß zu ihrer Veränderung ein größeres Kapital aufgewendet werden, welches aber dann zur Folge hat, daß die Erträge dauernd oder doch auf lange Zeit gehoben werden, so daß der durch diesen Kapitalsaufwand herbeigeführte Mehrertrag den Zinsen resp. den Zinsen und der erforderlichen Amortisation des angewandten Kapitals entspricht. Durch derartige „Meliorationen“ wird dann das Bodenkapital selbst vergrößert, der Bodenwert

gehoben. Ist es möglich, durch solche Melioration die Erträge dauernd derart zu steigern, daß dieselben schon nach einigen Jahren die Unkosten der Melioration decken, so haben wir in dem Falle ein Beispiel für die Bildung einer Grundrente, welche jedoch auch als „Unternehmergeinn“ bezeichnet werden kann; denn, wird ein derartig melioriertes Stück Land verkauft, so läßt sich der Verkäufer hierbei die Grundrente kapitalisiert auszahlen, und sie existiert somit nicht mehr für das meliorierte Grundstück. Der Verkaufswert ist dann dementsprechend gestiegen.

Auch ohne Meliorationen unterliegen aber die genannten Bodeneigenschaften größeren und geringeren Schwankungen, und es muß hier auch unsere Aufgabe sein, diese Schwankungen zu untersuchen, da sie die Grenze für die Genauigkeit geben, mit welcher sich der Bodenwert beurteilen läßt.

Schließlich ist bei der Beurteilung des Bodenwertes noch zu berücksichtigen, daß keineswegs der Boden allein die Höhe der Pflanzenerträge bedingt, sondern daß diese ebenso auch von dem Klima abhängen. In Gegenden, in denen die Niederschlagsmengen groß sind (im See- und im Gebirgsklima), kann ein leichter, geringerer Boden noch sehr gute Erträge ergeben, während derselbe in einem trockenen Klima (Binnenlandklima) meist Mißernten hervorbringt. Das Klima ist unabänderlich gegeben und ebenso wie der Boden an den Ort gebunden, an welchem der Boden lagert, auf welchem unsere Kulturpflanzen ihre Erträge zeitigen sollen. Auch das Klima unterliegt großen Schwankungen in den einzelnen Jahren und verursacht hierbei auch große Schwankungen in den einzelnen Ernteergebnissen, welche wir bislang fast stets als unvermeidlich hinnehmen müssen. Vielleicht daß die Zukunft uns aber noch lehren wird, wie wir durch geeignete Bodenkultur die durch den Einfluß des Klimas herbeigeführten Ertragsschwankungen geringer zu gestalten vermögen.

§ 57. Die Ackerkrume oder die Krumenschicht.

Mit „Ackerkrume“ bezeichnen wir die oberste von der darunterliegenden physikalisch verschiedene Erdschicht. Ihr kommt bei weitem die größte Bedeutung des Bodenwertes zu, denn sie bildet den Standort für jede auch noch so schwach bewurzelte Pflanze. Sie bildet schon das Keimbett des Samens. Die Pflanzenwurzel breitet sich hauptsächlich in der Krumenschicht aus, nicht nur, weil sie in dieser vornehmlich die Nährstoffe vorfindet, sondern weil sie sich hier auch mit dem geringsten Energieaufwande verästeln, verzweigen, kurz in jeder Weise auszudehnen und auszubreiten vermag. Ist der Boden selbst unbearbeitet, wie der Waldboden, ist die Krumenschicht nicht derart vorbereitet, daß der Pflanzenwurzel die Arbeit, welche sie zum Wachsen zu leisten hat, teilweise abgenommen ist, so wird sich trotzdem auch dann die Pflanzenwurzel möglichst nahe

unter der Erdoberfläche ausbreiten, weil sie hier weniger Widerstand findet, nur geringere Bodenmassen emporzuheben braucht. Durch die „Kultur“, durch die Bestellung, wie namentlich durch die organische Düngung wird diese oberste Erdschicht günstiger gestaltet als der übrige darunterliegende Boden, sofern dieser derselben geologischen Entstehung angehört. Alle Momente, welche für die Wasserkapazität in Betracht kommen, werden verbessert, und da diese oberste Erdschicht somit mehr Wasser zurückhalten wird als die unteren, so werden auch die Pflanzenwurzeln hauptsächlich hier ihre Nahrung suchen. Hierfür spricht eine alte Erfahrung aus der gärtnerischen Praxis: Wenn man seine Pflanzen am Abende von heißen Tagen begießt, so soll man lieber seltener, dann aber stark gießen. Denn gießt man öfters, aber stets wenig, so wird nur die alleroberste Erdschicht naß, und dementsprechend entwickeln sich hier hauptsächlich die Pflanzenwurzeln. Setzt man dann aber einmal mit Gießen aus oder wird die Verdunstung am Tage außerordentlich groß, so werden, da die oberste Erdschicht austrocknet, die Pflanzen besonders stark an Wassermangel leiden, was notwendig Wachstumsstörungen zur Folge hat. Gießt man hingegen stets, wenn man gießt, stark, so wird ein Teil der Wurzeln auch in etwas tiefere Erdschichten, die bei großer Dürre nicht austrocknen, eindringen, weil sie auch dort Wasser vorfinden.

Die Tatsache also, daß die Pflanzenwurzel sich in der Krumenschicht bildet und sich in dieser vornehmlich verbreitet, verlangt, daß wir dieser Bodenschicht die größte pflanzenphysiologische Bedeutung an dem Boden beimessen. Alle anderen Momente dürfen vornehmlich nur auf den Einfluß zu untersuchen sein, welchen sie auf diese Krumenschicht ausüben.

Wir wollen nun sehen, in welchen Grenzen die Güte unseres Krumenbodens schwanken kann und welchen Einfluß die Güte der Krume eines Bodens auf die Erträge unserer Kulturpflanzen auszuüben vermag.

Als Maßstab für die Güte des Bodens soll uns hier die Größe der Bodenoberfläche dienen, da wir im Verlaufe des Buches sahen, daß von dieser spezifischen Bodeneigenschaft alle für den Pflanzenwuchs wesentlichen Bodeneigenschaften mitbedingt werden. Wir messen die Größe der Bodenoberfläche durch die ihr proportionale Hygroskopizität.

Jährliche Schwankungen in der Größe der Bodenoberfläche müssen, wie wir zuvor sahen, durch die organische Düngung und durch die allmähliche Zersetzung derselben herbeigeführt werden. Wir wollen jetzt untersuchen, wie groß diese jährlichen Schwankungen sein können. Diesen Berechnungen soll das folgende Beobachtungsmaterial zugrunde gelegt werden.

Hygroskopizitäten verschiedener Bodenarten usw.

(Gewichtsprocente Wasser.)

Frischer Sand	0,00 bis 0,50
Sandboden	0,50 „ ca. 1,00

Lehmiger Sandboden	1,00	bis ca.	1,50
Sandiger Lehmboden	1,50	" "	2,00
Guter Kulturboden	2,00	" "	6,00
Strenger Lehmboden	6,00	" "	8,00
Strenger Tonboden (Java)	23,81		
Moorboden	10,00	" "	20,00
Pferdekot	28,39		
Kuhkot	42,54		
Roggenstroh	35,21		
Weizenstroh	41,23		
Erbsenstroh	49,67		
Heu	52,87.		

Multipliziert man die vorstehenden Zahlen mit $a = 40,6$,¹⁾ so sollen die Zahlen Quadratmeter Oberfläche pro Doppelzentner Boden bedeuten.

Nehmen wir gemäß diesen Zahlen an, wir hätten einen Sandboden von einer Oberfläche = $1 \cdot a$ qm und wir düngten diesen mit Rinderdung von der Oberfläche = $40 \cdot a$ qm, so fragt es sich, wie groß wird die durch diese Düngung bewirkte Oberflächenvergrößerung des Bodens sein.

Bei einer Krumentiefe von 30 cm und einem Volumgewicht des Bodens von 1,5 beträgt die Bodenmasse eines Hektars 45000 dz und die Oberfläche, wenn wir die eines Doppelzentners äquivalent 1 setzen, $45000 \cdot a$ qm.

Eine volle Stalldüngung ist nach Thaer²⁾ eine solche von 320 dz pro Hektar; in dieser sind 80 dz Trockensubstanz mit einer Oberfläche äquivalent $40 \cdot a$ qm. Mithin beträgt die Oberfläche des zugeführten Düngers entsprechend $3200 \cdot a$ qm. Durch diese Düngung wird mithin die Bodenoberfläche um 7% vergrößert.

Eine solche Stalldüngung kann also bei derartig leichten Bodenarten Schwankungen in der Bodenoberfläche im Mittel von 7% verursachen. Bei Lehmbodenarten, die eine Oberfläche äquivalent 2% Hygroskopizität haben, werden diese Schwankungen nur halb so groß sein usf.

Nehmen wir an, wir hätten auf dem gleichen Boden Erbsen angebaut, um dieselben als Düngung unterzupflügen — für Lupinen z. B. werden diese Zahlen sehr ähnlich ausfallen —, so ergeben diese in einer mittleren Ernte³⁾ von 40 dz Heu pro Hektar, d. s. $34,4$ dz Trockensubstanz. Die Oberfläche dieser Düngung ist dementsprechend $50 \cdot 34,4 \cdot a$ qm = $1720 \cdot a$ qm.

¹⁾ Über die Größe 40,6 vergl. § 11 d, S. 71.

²⁾ Albrecht Thaer, Grundsätze der rationellen Landwirtschaft. Stuttgart 1837, 1. Bd., S. 260.

³⁾ Vergl. H. Thiel, Landwirtschaftlicher Kalender von Mentzel und v. Lengerke. Berlin.

Eine derartige Gründung wird also Schwankungen im Mittel von 4 0/0 in der Gröfse der Bodenoberfläche derartig leichter Bodenarten hervorrufen. Sind die erzielten Gründungsmassen doppelt so grofs, so kann die Veränderung der Bodenoberfläche die durch die Stalldüngung herbeigeführte Gröfse erreichen. Bei einem Boden, welcher eine gröfsere Bodenoberfläche besitzt, wird die durch die Gründung hervorgerufene Schwankung der Gröfse der Bodenoberfläche dementsprechend kleiner werden.

Durch die unvermeidliche ungleichmäfsige Verteilung des organischen Düngers im Boden kann naturgemäfs die Schwankung in den für die Bodenoberfläche erhaltenen Resultaten noch viel erheblicher werden. Entnimmt man die zur Untersuchung heranzuziehende Probe gerade an einer Stelle, wo zufällig viel Dünger hingekommen ist, so kann die Hygroskopizität des Bodens um 2000, ja um 4—5000 0/0 heraufgehen; entnimmt man die Probe hingegen einer Stelle, wo zufällig kein Dünger hingelange, so findet man die gleiche Hygroskopizität wie vor der Düngung. Man ersieht hieraus, wie wesentlich es ist, dafs eine Probeentnahme in zweckmäfsiger Weise vorgenommen wird. Wir werden deshalb auf das bei der Probeentnahme einzuschlagende Verfahren noch im nächsten Kapitel näher einzugehen haben.

Nächst der Düngung kann ferner auch die Zersetzung der im Boden vorhandenen organischen Substanzen im Laufe der Jahre eine Veränderung in der Hygroskopizität des Bodens herbeiführen, einen Rückgang, welcher andererseits durch die jährlich produzierten und im Boden verbleibenden Wurzeln unserer Kulturpflanzen aufgehalten werden kann.

Um die Gröfse dieser Schwankungen kennen zu lernen, wurden von sechs verschiedenen Bodenarten je acht gleiche Parzellen gebildet, welche jahraus jahrein stets in gleicher Weise mit Roggen bestellt wurden. Nach der Ernte wurde jedesmal von den je acht Parzellen eine Probe entnommen und diese Proben zu einer Mittelprobe vereinigt auf ihre Hygroskopizität hin untersucht. Es ergaben sich hier die folgenden Resultate:

Hygroskopizität von einem	Versuchsjahr:			
	1902	1903	1904	1905
Sandboden	1,06	1,07	1,10	1,07
lehmigen Sandboden	1,40	1,39	1,37	1,32
sandigen Lehm Boden	2,09	2,30	2,09	2,02
milden humosen Lehm Boden	3,19	3,06	2,98	3,04
strengen Lehm Boden	6,54	6,36	6,33	6,15
Tiefland-Moorboden	18,42	16,70	16,67	15,48

Der Rückgang in der Hygroskopizität zeigt sich besonders bei den humusreichen Bodenarten, welche vor der ersten Bestellung mit Roggen

als „Wiesenboden“ vom Luftzutritt, welcher die schnellere Verwesung bedingt, mehr oder weniger abgeschlossen waren.

Exakte Vegetationsversuche, aus welchen man ersehen kann, in welcher Weise die Pflanzenerträge von der physikalischen Beschaffenheit der Ackerkrume abhängen, sind bis auf einige Vorversuche, welche der Verfasser seit einigen Jahren auf seinem Versuchsfelde angestellt hat,¹⁾ bislang noch nicht ausgeführt worden. — Sie unterliegen großen Schwierigkeiten; denn ebenso wie es beim Erproben der Wirkung eines bestimmten Düngemittels darauf ankommt, daß man alle übrigen Pflanzennährstoffe für die zu erzielende Maximalernte im Maximum gibt, damit die Höhe der Erträge nur durch die Mengen des zu prüfenden Düngemittels bedingt werden, ebenso muß es hier darauf ankommen, alle anderen für den Pflanzenwuchs in Betracht kommenden Bodeneigenschaften, sowohl die chemischen, wie auch die physikalischen, für die Erzielung höchster Erträge so günstig wie möglich zu gestalten, denn nur dann wird die Höhe des Ertrages durch die physikalische Beschaffenheit der Krume normiert werden können. Die Pflanzennährstoffe müssen bei derartigen Versuchen somit *alle* in solchen Mengen gegeben werden, als die Pflanze diese für einen maximalen Ertrag bedarf. Die physikalischen Bodeneigenschaften sind, soweit sie nicht mit der physikalischen Beschaffenheit der Ackerkrume in Zusammenhang stehen, so gut wie möglich für den Pflanzenwuchs zu gestalten. Letzteres gelingt uns aber vorläufig, wo wir von dem Einfluß dieser physikalischen Bodeneigenschaften auf die Vegetation noch so wenig wissen, fast ausschließlich auf dem Wege des Ausprobierens.

Da endlich die Erträge nicht nur von dem Boden, sondern auch von der jeweiligen Witterung abhängen, so müssen diese auf den verschiedenen Bodenarten auch in verschiedenen Jahren verschieden hoch ausfallen. Über die Art der Anstellung derartiger Versuche soll später berichtet werden (§ 66). Hier sollen nur die Resultate folgen, welche der Verfasser bislang für Roggen erhalten hat, und welche wohl deshalb als gut gelungen angesehen werden dürfen, weil die Erträge eine wohl bislang kaum erreichte Höhe aufweisen; ein Zeichen, daß es geglückt war, die Ertragsbedingungen — soweit dies die in den verschiedenen Jahren herrschende Witterung zuließ — äußerst günstig zu gestalten. Die Versuchsergebnisse der Jahre 1903, 1904 und 1905 gestalteten sich im Mittel von je acht gleichen Versuchen, wenn man die in Gramm pro 0,2 qm gefundenen Resultate in Doppelzentner pro Hektar umrechnet, folgendermaßen:

(Siehe die Tabelle auf Seite 282.)

Ich habe die umstehenden Versuchsergebnisse dadurch übersichtlicher zu gestalten versucht, daß ich die Mittel in Fig. 35 in Koordinaten ein-

¹⁾ Alfred Mitscherlich, Landwirtschaftl. Vegetationsversuche; Landw. Jahrbücher 1903, S. 773 u. f.

getragen habe. Es zeigt sich hier deutlich, wie die Erträge mit der Größe der Bodenoberfläche proportionalen Hygroskopizität zunehmen. Die geringen Abweichungen einiger Jahresmittel, welche sich vorfinden, liegen, wie dies aus den Einzelversuchen hervorgeht, innerhalb der Fehlergrenzen der Versuche, welche leider, wie dies bei Vegetationsversuchen wohl stets der Fall sein wird, sehr weite sind.

Bodenart:	Hygroskopizität	Kornerträge:				Stroherträge (inkl. Spreu):				Korn- und Stroherträge:			
		1903	1904	1905	Mittel	1903	1904	1905	Mittel	1903	1904	1905	Mittel
Wald-Sandboden . . .	1,06	40,4	55,4	33,5	43,1	90	125	78	97	130	180	111	141
Lehmiger Sandboden .	1,40	40,5	52,6	25,9	39,7	98	119	69	95	139	171	95	135
Sandiger Lehmboden .	2,09	45,2	57,8	24,5	42,5	91	123	50	88	136	180	85	130
Humoser, mild. Lehmboden (Wieseboden 1. Klasse)	3,19	64,5	67,4	40,0	57,3	134	146	98	126	198	214	138	183
Strenger Lehmboden .	6,54	75,1	70,8	35,2	60,4	136	141	71	116	211	212	107	177
Tiefeland-Moorboden .	18,42	77,5	75,0	58,7	70,4	148	135	124	136	225	210	182	206

Würden die Versuche mit einer anderen Kulturpflanze angestellt worden sein, so würde sich der Kurvenverlauf, welcher uns die Art der Abhängigkeit anzeigt, anders gestalten. Bei Weizen z. B. wird der geringere Boden geringere, der bessere Boden höhere Erträge liefern. Dies dürfte wohl vornehmlich damit zu begründen sein, daß der Weizen eine größere Blattoberfläche entwickelt als der Roggen, mithin unter sonst gleichen Umständen mehr Wasser an die Atmosphäre verdunsten muß und somit größere Ansprüche an den Wassergehalt des Bodens stellt. Die Kurve muß also dementsprechend steiler ansteigen und wird die Roggenkurve in dem Punkte schneiden, wo die Bodenarten gleicher Hygroskopizität gleich hohe Weizen- und Roggenernten ergeben. Die Bodenarten höherer Hygroskopizität würden wir dann vielleicht als „Weizenböden“, die niederer Hygroskopizität als „Roggenböden“ bezeichnen können.

Im übrigen zeigt ein Vergleich der in den verschiedenen Jahren erzielten Ernteerträge, daß die Witterung einen sehr wesentlichen, und zwar einen bei den verschiedenen Bodenarten sehr verschieden großen Einfluß ausübt. Die großen Schwankungen im Jahre 1905 sind so voraussichtlich auf anormale klimatische Verhältnisse, und zwar auf einen sehr starken Spätfrost, zurückzuführen. Es ist leicht einzusehen, daß derartige Versuche mit ein und derselben Kulturpflanze viele Jahre hintereinander in gleicher Weise fortgesetzt werden müssen, wenn man zu brauchbaren Mittelzahlen gelangen will. Aus diesem Grunde dürfen die hier angeführten Ergebnisse zunächst nur als solche von Vorversuchen angesprochen werden.

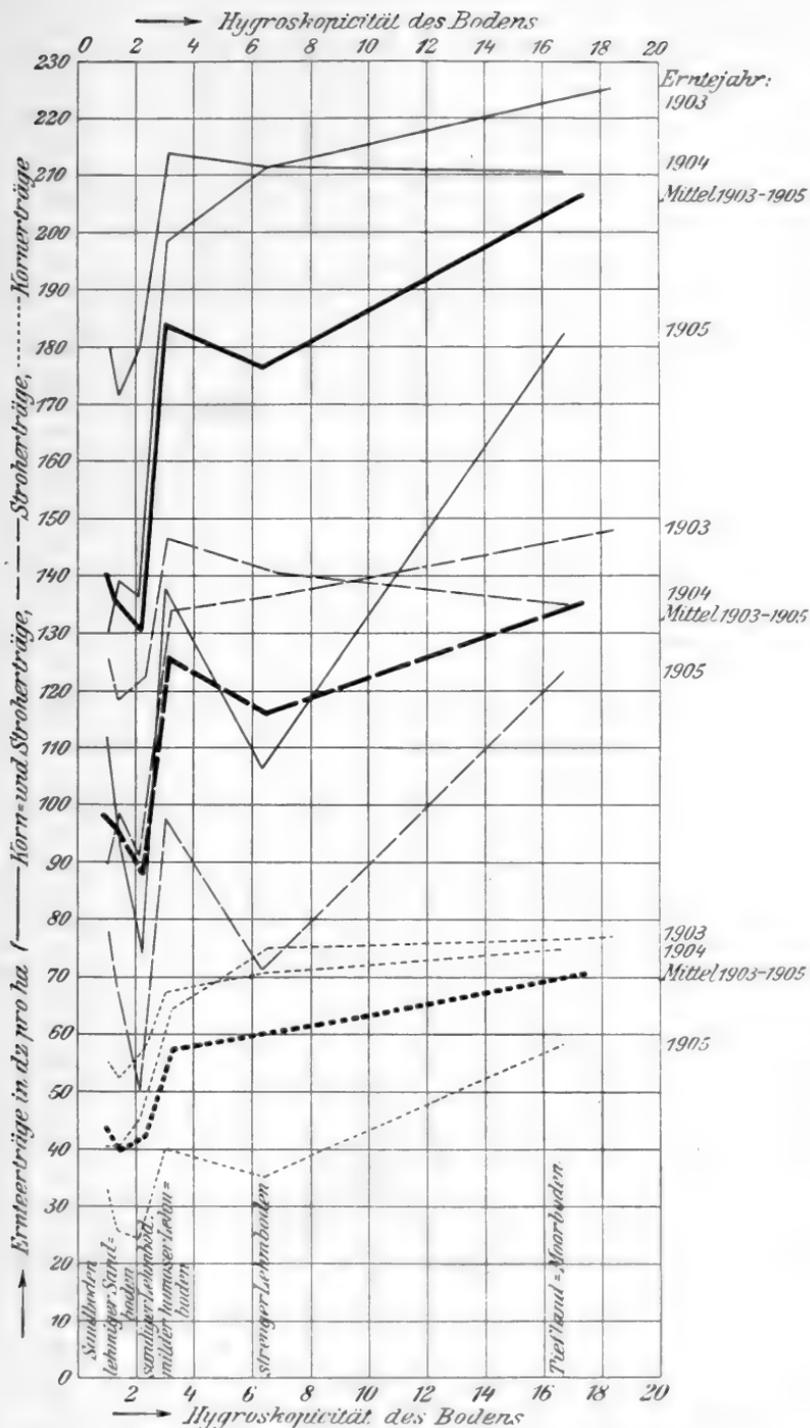


Fig. 35. Abhängigkeit der Roggenerträge von der Größe der Bodenoberfläche.

§ 58. Die Tiefe der Krume.

Es ist eine in der Praxis allbekannte Erfahrung, daß die Erträge eines Bodens um so höher sind, je tiefer die Krume, d. h. die bearbeitete oberste Erdschicht ist. Wir haben in früheren Paragraphen (§§ 24 u. 27) gesehen, daß je besser der Boden bearbeitet ist, um so geringer der Energieaufwand ist, welchen die Pflanzenwurzel leisten muß, um ihre Funktionen zu erfüllen, daß mithin um so mehr Energie für das oberirdische Pflanzenwachstum verfügbar ist. Je leichter nun die Pflanzenwurzel in die erforderliche Tiefe des Bodens eindringen kann, d. h. je tiefer der Boden durch die Bearbeitung gelockert ist, um so bessere Erträge müssen wir erwarten. Diese Ertragssteigerung kann natürlich nicht der Krumentiefe proportional gehen, denn es ist eine bekannte Tatsache, daß die Pflanze viel weniger Wurzeln in die tieferen Bodenschichten hineinzuenden pflegt. Es wird mithin die durch die Bearbeitung des Bodens bewirkte Ertragssteigerung bei größerer Tiefe allmählich verschwinden. Nur Vegetationsversuche können diese Frage betreffend die Größe der Ertragssteigerung infolge der tieferen Krumenschicht lösen, und derartige exakte Versuche fehlen leider ganz.

Zur Untersuchung des Einflusses des Bodenvolumens auf die Erträge hat Lemmermann¹⁾ in Kulturgefäßen, wo den Pflanzen also gar kein Untergrund zur Verfügung stand, sehr verdienstvolle Versuche angestellt. Die Resultate derselben, welche in Gefäßen von gleicher Oberfläche angestellt wurden, waren die folgenden:

Höhe der Bodenschicht resp. der Gefäße (cm)	Senfertrag in g (luft- trockene Masse)	Ertrag in ‰, bezogen auf den Maximalertrag
33	61,9	100
25	57,4	92
17	45,8	74

Ob diese Versuche direkt auf den gewachsenen Boden übertragen werden können, muß zunächst dahingestellt bleiben.

Für den gewachsenen Boden hat Wollny²⁾ eine ganze Reihe von Versuchen angestellt, welche jedoch sonst nicht allen an derartige Versuche zu stellenden Anforderungen genügen. Immerhin mögen auch sie einen gewissen Anhalt für den Einfluß der Tiefe der Krume auf die Höhe der Erträge geben, und sollen sie deshalb hier wiedergegeben werden. Besagter Forscher hob zur Beantwortung dieser Frage auf einem Versuchs-

¹⁾ Otto Lemmermann, Unters. über den Einfluß eines verschieden großen Bodenvolumens auf den Ertrag und die Zusammensetzung der Pflanze; Journ. f. Landw. Bd. 51, S. 1 u. f.

²⁾ E. Wollny, Unters. über den Einfluß der physikalischen Eigenschaften des Bodens auf das Produktionsvermögen der Nutzpflanzen; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 306—314.

felde, welches Glazialschotter als Untergrund hatte, 40 cm tiefe Gruben aus, welche er teils 10, teils 20 und 30 cm hoch mit Schotter wieder auffüllte; auf diesen brachte er sodann humosen Diluvialsand, welcher somit in Krumentiefen von 40, 30, 20 und 10 cm Stärke auf den einzelnen je 4 qm großen Parzellen lagerte. Ich habe die Resultate Wollnys derart umgerechnet, daß ich die für 40 cm Ackerkrume erhaltenen Erträge gleich 100 setzte und danach die anderen berechnete; außerdem habe ich stets nur die lufttrockenen Gesamterträge berücksichtigt, d. h. z. B. die Summe des Ertrages an Körnern und Stroh beim Roggen oder die des Ertrages von Rüben und Kraut bei den Runkelrüben; denn solange wir noch im ungewissen sind, wodurch wir die Kornerträge resp. die Rübenenerträge einseitig steigern können, kann nur dies unser Maßstab sein. Die Zahlen Wollnys sind mit großen Fehlern behaftet, welche wohl in der ganzen Versuchsanordnung liegen, auf die ich hier nicht näher eingehen kann. Es ist deshalb um so bedauerlicher, daß fast nirgends Parallelversuche angestellt wurden. Immerhin zeigen die dreijährigen Resultate, welche Wollny für die Waldplatterbse erhielt, daß die wahrscheinlichen Schwankungen der einzelnen Versuche die Größe der ganzen Differenz erreichen können und infolgedessen einigen Resultaten nur ein sehr geringer Wert beizumessen ist.

Ich will mich deshalb damit begnügen, die aus den Wollnyschen Resultaten berechneten Zahlen noch gruppenweise zusammengefaßt hier wiederzugeben.

Anzahl der Versuche	Anzahl der verschiedenen Kulturpflanzen	Art der Versuchspflanzen:	Ertrag bei einer Krumentiefe von				Absoluter Ertrag bei 40 cm
			10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	
4	2	Getreide	40	63	82	100	—
6	4	Ölpflanzen	43	57	76	100	—
6	4	Hackfrüchte	47	61	85	100	—
8	6	Ackerfutterpflanzen (reif)	78	88	92	100	—
16	10	Leguminosen (Grünfutter)	67	81	92	100	—
2	—	Klee-Grasgemisch	76	85	93	100	—
3	—	Gräsergemisch	55	70	78	100	—
Versuchsjahr							g
1895	—	Waldplatterbse (je ein Schnitt)	33	60	86	100	(2230)
1896	—		45	93	105	100	(1890)
1897	—		112	116	114	100	(3530)
Im Mittel (1895—1897)			63	90	101	100	—
Wahrscheinliche Schwankung ±			33	20	11	—	—

Aus den vorstehenden Versuchsergebnissen läßt sich nur ersehen, daß die Erträge mit der Krumentiefe zunehmen. Es läßt sich aus ihnen nicht folgern, wie tief die Krume im Minimum sein muß, damit der Boden Maximalernten liefert. Die Leguminosen scheinen geringere Ansprüche an die Tiefe der Krume zu stellen als die anderen Kulturpflanzen.

Ist der Boden im Untergrund der gleiche wie in der Krume, so wird nur die Tiefe der Bodenbearbeitung einen Einfluß auf die Erträge ausüben. Da aber in der Regel die Krume von Zeit zu Zeit organischen Dünger erhält, so wird sie vielfach humusreicher sein als der Untergrund. In dem Falle wird die Herstellung einer tieferen Krume deshalb nicht so wünschenswert sein, weil dann der Krumenboden geringwertiger wird, und somit unsere Kulturpflanzen in ihrer Jugend in geringerem Boden wachsen müssen. Ist der Untergrund physikalisch anders geartet als die Krume, so wird meist dann ein tieferes Pflügen angebracht sein, wenn die Hygroskopizität des Untergrundes höher ist als die der Krume.

Da nicht in allen Jahren stets gleich tief gepflügt wird, so bilden sich zwischen der Krumenschicht und dem Untergrunde in der Bodenbeschaffenheit alle Übergänge aus. Hierdurch ist es oft fast unmöglich, die Tiefe der Krume mit Sicherheit festzustellen. Dazu kommt noch, daß dieselbe je nach der Bearbeitung und je nach der Witterung wechselt. Hierfür mögen wieder einige Zahlen folgen.

Die betreffenden Bodenarten waren in einer 50 cm starken Schicht in glasierte Tonröhren eingefüllt, an deren Rande man die Veränderung des Bodenniveaus feststellen konnte. Nachdem sich der Boden im Laufe eines Jahres gesetzt hatte, wurde sein Niveau festgestellt, sodann wurde er durch ein 1 cm weites Sieb abgesiebt, wieder in die Rohre eingefüllt und das Niveau von neuem beobachtet. Es zeigte sich, daß sich die 50 cm hohe Bodenschicht durch diese Bodenbearbeitung bei verschiedenen Bodenarten im Mittel von je acht Versuchen um die folgenden Beträge gehoben hatte:

Bei einem Waldsandboden	um 8 ⁰ / ₀ .
„ „ lehmigen Sandboden	„ 18 „
„ „ sandigen Lehm Boden	„ 24 „
„ „ humosen, milden Lehm Boden.	„ 19 „
„ „ strengen Lehm Boden	„ 28 „
„ „ Tiefland-Moorboden.	„ 26 „

Würde man also auch selbst die Grenze zwischen Krume und Untergrund exakt feststellen können, so würde doch die Bestimmung der Krumentiefe mit diesen erheblichen Fehlern behaftet sein. Es unterliegt keinem Zweifel, daß man diesen Fehler dadurch wesentlich verringern kann, daß

man den Boden da, wo man die Krumentiefe bestimmen will, vorher einstampft oder besser noch stark mit Wasser angiefst. Zu einem noch genaueren Resultat würde man gelangen, wenn man das Gewicht eines Quadratdezimeters Bodens von der Tiefe der Krume feststellt, da dies — wenn der Boden lufttrocken gemacht ist — unabhängig von der Bodenbearbeitung stets das gleiche ist.

§ 59. Die natürliche und die künstliche Bodendecke (Waldstreu, Pflanzendecke und Moorkultur).

Häufig kann die Tiefe der Krume, wie überhaupt die Krumenschicht, praktisch ganz vernachlässigt werden. In diesem Falle übernimmt die Bodendecke teilweise ihre Funktion, indem diese regulierend auf die Temperatur- und die Feuchtigkeits-Verhältnisse des Bodens einwirkt. Dies ist insonderheit bei unseren Forstböden der Fall, wo eine Bodenbearbeitung nur äußerst selten stattzufinden pflegt.

Jede Bodendecke im Walde, Laub- und Nadelstreu, Moos, Flechten, Beeresträucher, Farrenkräuter, Heidekraut, Ginster u. a. m. wirken hier in gleicher Weise günstig ein. Sie bilden eine schwache Humusschicht, welche so enge kapillare Hohlräume aufweisen kann, daß nach Ramann¹⁾ unter Umständen ein Wasserdruck von 10 cm nicht genügt, um das Wasser in diese eindringen zu lassen. Ist das Wasser aber durch die Humusschicht eingedrungen, so vermag diese — wie wir dies bei der Besprechung der Kapillaritätserscheinungen gesehen haben — gerade wegen der Feinheit dieser Kapillaren durch die kleinen sich in diesen bildenden Wasser- menisken eine außerordentlich große Wassermenge auch noch in dem darunter befindlichen groben Boden zurückzuhalten. So bleibt der Boden unter der Bodendecke feuchter. Hierzu kommt noch ein zweites Moment. Besteht die Bodendecke aus totem Material, nicht aus lebenden Pflanzen (Gras, Moos), welche zu ihrem Lebensprozefs Wasser aus dem Boden aufnehmen und verdunsten müssen, so bildet sie durch ihre großen, mit Luft erfüllten Hohlräume eine Isolationsschicht zwischen Atmosphäre und Boden. Es findet die Verdunstung nicht direkt aus dem Boden in die Atmosphäre statt, sondern das Wasser, welches aus dem Boden verdunstet, sättigt erst diese Luftisolationsschicht mit Wasserdampf und aus dieser diffundiert langsam der Wasserdampf in die Atmosphäre. So wird auch hierdurch die Feuchtigkeit dem Boden durch die Streu mehr erhalten. Hierfür einige Belege.²⁾

¹⁾ E. Ramann, *Bodenkunde*. 2. Aufl. Berlin 1905, S. 347.

²⁾ E. Wollny, *Forstlich-meteorologische Beobachtungen*. (Zweite Mit- teilung); *Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik* Bd. 13, S. 175.

Datum:	Verdunstungsmengen in mm eines Bodens:								
	nackt	bedeckt mit							
		Eichenlaub		Buchenlaub		Fichten- nadeln			
		1 cm	2,5 cm	1 cm	2,5 cm	1 cm	2,5 cm		
11.—19. Juli 1888	9,9	2,6	0,7	2,6	1,0	2,4	1,1		
20.—30. August 1888 . .	10,4	2,8	2,0	2,9	1,7	5,4	2,5		
12.—20. Juli 1889	7,9	2,6	2,0	2,4	1,6	4,3	2,8		
1.—13. August 1889 . .	22,3	4,1	2,4	3,5	2,1	6,5	3,5		

Datum:	Verdunstungsmengen in mm eines Bodens:							
	bedeckt mit							
	Kiefern- nadeln		Moos					
	1 cm	2,5 cm	15 cm	10 cm	7,5 cm	5 cm	2,5 cm	
11.—19. Juli 1888	3,5	1,4	0,1	0,2	0,7	0,8	2,1	
20.—30. August 1888 . .	5,8	3,4	0,3	0,6	0,9	1,2	2,6	
12.—20. Juli 1889	4,6	3,1	0,6	1,2	—	1,8	3,2	
1.—13. August 1889 . .	7,0	3,7	1,0	1,3	—	2,3	4,1	

Dafs in der Tat der Boden unter einer derartigen Bodendecke feuchter bleibt, zeigen die folgenden Resultate, welche Wollny¹⁾ für einen humosen Kalksand gefunden hat.

(Siehe die Tabelle auf Seite 289.)

Ebenso wie die Streudecke durch ihre grossen, mit Luft erfüllten Hohlräume eine Isolation für den Wasserdampf bildet, ist sie auch infolge der geringen Wärmekapazität und der geringen Wärmeleitungsfähigkeit der Luft eine Isolationsschicht für die Wärme.²⁾ Der Boden wird so unter einer Bodendecke viel geringeren Temperaturschwankungen ausgesetzt sein, als wenn diese nicht vorhanden ist. Der Boden muß sich unter der Bodendecke langsamer im Frühjahr erwärmen und wird im Herbst wiederum langsamer erkalten. Wollny³⁾ beobachtete hier in einer Bodentiefe von 12 cm die folgenden Temperaturen:

(Siehe die Tabelle auf Seite 290.)

¹⁾ E. Wollny, Forstlich-meteorologische Beobachtungen. (Zweite Mittheilung); Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 13, S. 171—173.

²⁾ Ich verweise hier auch auf die Ausführungen in § 37 u. f.

³⁾ l. c. S. 163.

Wassermenge der obersten 20 cm hohen Bodenschicht unter der Streudecke. (Gewichtsprocente.)

Anzahl der zum Mittel vereinigten Beobachtungen	Zeit der Beobachtungen	Boden nackt	Boden mit Gras bewachsen	Strohhäcksel		
				0,5 cm	2 cm	5 cm
12	Mai—Oktober 1883	20,2	—	26,5	27,1	27,6
17	Mai—Septbr. 1884	19,6	16,6	—	27,7	28,2
				2,5 cm	2,5 cm	2,5 cm
13	Mai—August 1888	16,7	—	20,3	20,1	19,6
23	April—Septbr. 1888	18,0	—	19,2	19,7	19,4

Anzahl der zum Mittel vereinigten Beobachtungen	Zeit der Beobachtungen	Moos 5 cm	Moos (Hypnum)			
			2,5 cm	5 cm	7,5 cm	10 cm
12	Mai—Oktober 1883	—	23,3	26,2	26,7	
17	Mai—Septbr. 1884	27,3	23,5	25,0	25,9	
		Kiefern-nadeln 2,5 cm	2,5 cm	5 cm	7,5 cm	10 cm
13	Mai—August 1888	20,4	20,5	20,9	21,4	21,4
23	April—Septbr. 1888	20,2	20,5	20,8	21,1	21,5

Leider liegen meines Wissens keine Beobachtungen vor, durch die man zahlenmäßig den Beleg für die Bedeutung der Bodendecke für die Pflanzenerträge erbringen könnte. Doch ist es eine jedem Forstwirt bekannte Tatsache, daß, wo auf leichtem Boden die Stren gerecht wird, unsere Kiefer z. B. sehr viel schlechtere, kleinere und schwächere Jahrestriebe macht und ebenso im Dickenwachstum zurückbleibt, und dies wird nicht nur dadurch hervorgerufen, daß wir den Pflanzen in der Stren einen Teil der Nährstoffe entziehen, sondern insonderheit durch die durch die Streuentnahme bewirkte stärkere Austrocknung des Bodens.

Jede lebende Pflanzendecke, wie z. B. Moos und Gras, entzieht dem Boden Wasser, und zwar um so mehr, je üppiger sie ist. Es ist deshalb wünschenswert, die Unkräuter auch im Walde, wenn der Boden an sich trocken ist, soviel wie möglich zu unterdrücken, damit das im Boden vorhandene Wasser nach Möglichkeit den Kulturpflanzen zugute kommt.

Sind die Pflanzen abgeschnitten oder mit ihren Wurzeln ausgerauft, so wirken sie ebenso wie die Streu. Die Wasserentnahme der Bodensträucher und Moos- und Grasarten aus dem Waldboden ist ziemlich indifferent, wenn der Waldmantel gut geschlossen ist, da dann dieser wiederum eine isolierende Luftschicht gegen die Atmosphäre einschließt, in welcher diese Pflanzen gedeihen, und infolgedessen die Wasserverdunstung durch diese Pflanzen geringer ist, weil die abgeschlossene Waldluft sich feuchter erhält.

1888 Monat	Luft- tempe- ratur	Boden nackt	Eichen- laub	Buchen- laub	Fichten- nadeln	Kiefern- nadeln	Moos			
			2,5 cm	2,5 cm	2,5 cm	2,5 cm	2,5 cm	5 cm	7,5 cm	10 cm
Mai	13,23	15,11	13,15	13,17	13,16	13,38	13,25	12,69	12,50	12,42
Juni	16,41	18,35	17,05	17,03	17,20	17,34	17,28	16,86	16,66	16,55
Juli	15,04	16,57	15,78	15,68	16,38	16,27	16,17	16,00	15,90	15,83
August . . .	15,60	17,84	16,54	16,55	17,04	17,06	16,89	16,66	16,56	16,49
September .	12,82	14,59	14,25	14,24	14,50	14,45	14,28	14,34	14,43	14,47
Oktober . .	5,33	7,21	7,24	7,20	7,39	7,30	7,28	7,67	8,11	8,24

Die maximalen täglichen Temperaturschwankungen in dieser Zeit betragen Grade C.:

Mai	--	9,70	3,27	3,43	3,07	3,48	3,37	2,23	1,78	1,45
Juni	--	11,07	5,35	5,73	4,83	5,51	5,28	3,87	2,92	2,62
Juli	--	7,93	3,63	3,40	3,48	3,65	3,38	2,27	1,82	1,78
August . . .	--	9,00	4,13	4,07	4,13	4,57	4,10	2,95	2,37	2,12
September .	--	7,50	3,85	3,65	3,13	3,80	3,18	2,22	1,68	1,55
Oktober . .	--	5,05	3,20	2,92	2,68	2,97	2,47	1,95	1,52	1,40

Nächst der natürlichen Bodendecke haben die landwirtschaftlichen Praktiker auch nach dem Vorbilde Rimpaus in Cunrau künstliche Boden-
decken eingeführt, indem sie Moorboden mit einer Sandschicht überdeckten. Diese Kulturmethode, wie überhaupt die Kultur unseres fruchtbarsten Bodens hat erst verhältnismäßig spät begonnen. — Die Moore brachten früher keine Erträge, weil in ihnen meist das Wasser stagnierte und so unsere Kulturpflanzen nicht gedeihen konnten. Sollte ein Moorboden kultur-
fähig gemacht werden, so war zunächst eine Entwässerung desselben dringend geboten. Zeigte es sich dann, daß der Boden nicht sauer war, was an fließenden größeren Gewässern in der Regel der Fall sein dürfte, so bietet der Boden, so wie er ist, sogleich für unsere Kulturpflanzen einen sehr geeigneten Standort. Es kommt dann in trockenen Gegenden nur darauf an, daß man ihn möglichst seicht bearbeitet, damit im Sommer, wenn die oberste Erdschicht austrocknet, die Pflanzen noch von untenher

genug Feuchtigkeit vorfinden. Ich habe solche Ländereien in Pommern besucht, welche so *unbesandet* sehr hohe Erträge an Wickfutter, Winterroggen und Futterrunkeln, sowie an Gras ergaben. Vielleicht dafs auch das seichte Pflügen kaum erforderlich ist, wenn man nur den Boden auf andere Weise *möglichst fein* bearbeitet. — Auf meinem Versuchsfelde habe ich seit drei Jahren eine 50 cm starke Schicht eines Tieflandmoorbodens, welche ich durch ein 1 cm weites Maschensieb abgesiebt habe, direkt auf trockenen scharfen Sand gebettet, wo aus dem Untergrund keine Feuchtigkeit aufgenommen werden kann, und habe trotzdem im trockenen Binnenlandklima (Mark Brandenburg) die höchsten Erträge auf diesem Boden im Vergleich zu anderen sehr guten Kulturböden erzielt (vergl. § 57, S. 282).

Einen Übelstand hat aber der Moorboden insonderheit, wenn er nicht sehr fein bearbeitet wird; er bietet ein schlechtes Keimbett. Es braucht nur während des Keimprozesses Trockenheit einzutreten, so trocknet die oberste Bodenschicht aus, und da die Wasserleitung in diesem Boden dann ganz auferordentlich langsam vor sich geht, müssen die Keimlinge verdorren. — Dieser Umstand dürfte zunächst der wahre Grund für die Übersandung unserer Moore sein. Kommt es uns hier nur darauf an, *einmal* einen guten Pflanzenbestand zu erzielen, welcher dann jahraus jahrein bleibt, so genügt hierfür ein Aufbringen einer Sanddecke von 3—5 cm, wie wir dies bei unserer Moorzienkultur ausführen. Sollen hingegen *alle* Jahre die Aussaaten wiederholt werden, so bringt man eine Sanddecke von der Stärke auf das Moor, dafs man gerade noch auf ihr die Bodenbearbeitung ausführen kann; denn dann mufs man sicher sein, dafs auch in den folgenden Jahren ein gutes Keimbett in der Sandschicht vorhanden ist. — Wir pflügen dann nur in der auf das Moor aufgelegten ca. 30 cm starken Sandschicht (Moordammkultur).

Dem Moorboden wird ferner nachgesagt, dafs die Pflanzen leicht auswintern, dafs er sich langsamer erwärmt u. a. m. — Alle diese Untugenden verliert er aber, sobald er tief genug entwässert und fein genug bearbeitet ist. Eine gründliche Bearbeitung namentlich bei Neukultivierung ist schon deshalb in jedem Falle angebracht, weil man sonst des Unkrautes nicht Herr zu werden vermag. Sie ist bei saurem Moorboden durchaus erforderlich, um die Zersetzung zu fördern. Pflanzengifte wie Schwefel-eisen oder Schwefelkies, der sich leicht in eisenhaltigen Mooren bildet, müssen sich an der Luft zu Schwefelsäure und Eisenvitriol umsetzen; die Schwefelsäure mufs dabei durch eine Kalk- resp. Mergeldüngung gebunden werden, wenn überhaupt der Boden ertragreich werden soll.

Die Ertragssteigerung, welche durch die Übersandung der Moore erzielt wurde, ist ganz auferordentlich grofs und so bekannt, dafs es hier nicht erforderlich ist, Zahlen dafür anzugeben. Die Frage, ob man die

gleiche Ertragssteigerung nicht vielleicht durch tiefe Entwässerung und zweckentsprechende Bodenbearbeitung allein erzielen kann, ist noch nicht endgültig gelöst.

Gemäß allen unseren bisherigen Erörterungen muß der unbesandete Moorboden ertragreicher sein als der besandete, da seine Oberfläche größer ist. Das scheint in offenbarem Widerspruch mit den praktischen Erfahrungen zu stehen, findet aber auch durch Wollnysche Vegetationsversuche¹⁾ volle Bestätigung. Ich lasse die Resultate derselben deshalb hier folgen.

Die Moorschicht betrug bei den Versuchen 0,3 resp. 0,4 m, die auf die eine Reihe der Parzellen aufgelagerte Sandschicht 0,1 m. Bei einer anderen Reihe von Parzellen wurde diese Sandschicht mit der Moorschicht vermengt. Da die absolute Höhe der Erträge hier nicht interessiert, wurden die beim unbesandeten Moore gefundenen gleich 100 gesetzt und die anderen auf diese bezogen.

Kulturpflanze:	Versuchsjahr	Hochmoorboden			Niederungsmoorboden		
		unverändert	mit Sand gemischt	mit Sand bedeckt	unverändert	mit Sand gemischt	mit Sand bedeckt
Winterroggen . . .	1893/94	100	90	77	100	87	75
Sommerroggen . . .	1892	100	98	87	100	86	85
" . . .	1895	100	98	80	100	91	78
Sommerweizen . . .	1894	100	69	58	—	—	—
Sommerraps . . .	1893	100	79	70	—	—	—
" . . .	1895	100	72	73	100	72	61
Leindotter . . .	1894	100	54	37	100	78	62
" . . .	1895	100	85	51	—	—	—
Erbse . . .	1893/95	100	101	108	100	87	73
Buschbohne . . .	1895	100	85	67	—	—	—
Kohlrübe . . .	1896	100	62	53	100	71	60
Kartoffel . . .	1896	100	83	73	100	88	83
Gräsergemisch (Heu)	1896	100	72	39	—	—	—
Rotklee (Heu) . . .	1896	100	88	78	—	—	—
Im Mittel		100	82	68	100	83	72
Minderertrag		—	18	32	—	17	28
Wahrscheinliche Fehler einer Beobachtung ±		—	9,8	12,6	—	5,6	7,5

¹⁾ E. Wollny, Unters. über die Beeinflussung der physikal. Eigensch. des Moorbodens durch Mischung und Bedeckung mit Sand; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 201—205.

Würden die Erträge der Oberfläche proportional gehen, was, wie wir zuvor § 57 sahen, nicht ganz der Fall ist, so müßten wir in den Parzellen, wo der vierte Teil des Moorbodens durch Sand ersetzt ist, nur den vierten Teil der Erträge haben, da die Oberfläche des Sandes im Verhältnis zu der des Bodens vernachlässigt werden kann. Die Erträge gehen aber statt um 25 $\frac{0}{0}$ nur um 18 resp. 17 $\frac{0}{0}$ zurück, was mit unseren früheren Ergebnissen übereinstimmt.

Dafs die Bedeckung des Moorbodens mit Sand noch ungünstiger auf die Erträge einwirkt als die Mischung desselben mit Sand, ergibt sich daraus, dafs die Pflanzenwurzeln vornehmlich die obere Erdschicht auszunutzen suchen, diese aber im ersteren Falle geringwertiger ist.

Nach gründlicher Entwässerung wird ein Moor in der Regel für Menschen und Gespanne zugänglich und so bearbeitbar sein. Sollte es dies nicht sein, so würde die Übersandung die letzte Hilfe dazu sein, es kulturfähig zu machen. Betreffend die Moorkulturen selbst möchte ich hier auf die eingehende Behandlung derselben durch Moritz Fleischer¹⁾ verweisen.

§ 60. Die Neigung der Erdoberfläche.

Durch die Neigung der Erdoberfläche werden die Feuchtigkeits- und die Wärmeverhältnisse des Bodens beeinflusst. Hierbei ist einmal die Gröfse des Neigungswinkels zu berücksichtigen und ferner die Himmelsrichtung, nach welcher das Terrain abfällt.

Fällt das Terrain steil ab, so wird das Wasser häufig nicht in den Boden einziehen können, sondern aufsen herabfließen. Es sind dann derartige Abhänge verhältnismäfsig trocken. Aber auch wenn das Gelände nur einen geringen Neigungswinkel hat, und das Wasser ganz einzieht, wird der geneigte Boden trockener sein müssen als der ebene; denn einmal ist die Erdfäche, auf welcher sich die Niederschläge verteilen, beim geneigten Terrain eine gröfsere, es kommt somit weniger Wasser auf eine Stelle. Ferner aber ist infolge der gröfseren Erdoberfläche auch die Wasserverdunstung gröfser, da diese der Gröfse dieser Fläche unter sonst gleichen Umständen proportional ist. Diese Wasserverdunstung wird noch dadurch vermehrt werden, dafs sich das nach Süden geneigte Gelände mehr erwärmt, da hier die Sonnenstrahlen mehr senkrecht auf die Erde auf fallen. So fand Wollny,²⁾ dafs bei nach Süden geneigten brachen Böden in der Zeit vom 20. August bis 4. September 1883 in München die Wasserverdunstung je nach dem Neigungswinkel folgende Gröfse annahm:

¹⁾ Ch. A. Vogler, Grundlehren der Kulturtechnik. 3. Aufl. Berlin 1903, Bd. 1, Teil 1, S. 91—106 und 162—165; ferner Bd. 1, Teil 2, S. 344—377.

²⁾ E. Wollny, Unters. über die Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnisse des Bodens bei verschiedener Neigung des Terrains gegen den Horizont; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 9, S. 5—7.

<i>Neigungswinkel (Grad)</i>	0	10	20	30
Verdunstung (mm)	38,2	42,4	46,9	50,9

Dementsprechend nimmt der Wassergehalt des Bodens mit der Größe des Neigungswinkels ab. Setzt man den Wassergehalt des ebenen Bodens gleich 100, so ergeben sich aus den Wollnyschen¹⁾ Resultaten für die verschieden stark nach Süden geneigten Erdböden folgende Werte:

Anzahl der Versuche	Humoser Kalkboden, bestellt mit	Neigungswinkel			
		0°	10°	20°	30°
8	Ackerbohnen	100	94	90	83
4	Kartoffeln	100	98	91	90
4	Ackerbohnen	100	93	84	77
4	"	100	92	84	83

Der Boden eines Südabhanges muß sich, da die Sonnenstrahlen senkrechter zu ihm einfallen, stärker erwärmen als z. B. der eines Nordabhanges von gleichem Neigungswinkel, mithin wird der Nordabhang auch unter sonst gleichen Umständen feuchter sein als der Südabhang. Die folgenden Zahlen Wollnys²⁾ bieten auch Belege hierfür.

	Exposition nach							
	Norden		Süden		Osten		Westen	
	Inklinationswinkel:							
	15°	30°	15°	30°	15°	30°	15°	30°
Bodentemperatur in 15 cm Tiefe (Grade C.):								
Boden gebracht	21,7	21,1	22,9	23,5	22,3	22,4	22,6	23,0
Boden mit Gras bewachsen	18,7	18,3	19,1	20,2	19,1	19,4	19,7	19,7
Wassergehalt des Bodens (Gewichtsprozente):								
Boden gebracht	24,4	23,3	21,9	20,4	22,6	20,8	23,4	22,1
Boden mit Gras bewachsen	22,9	21,5	20,4	18,5	20,4	18,5	21,7	20,4

¹⁾ E. Wollny. Unters. über die Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnisse des Bodens bei verschiedener Neigung des Terrains gegen den Horizont; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 9, S. 5—7.

²⁾ Derselbe, ebenda Bd. 10, S. 6 u. 49.

Wollny hat, um den Einfluß zu untersuchen, welchen die Exposition bei einem Neigungswinkel von 15° und von 30° auf die Pflanzenerträge ausübt, Vegetationsversuche mit verschiedenen Pflanzen in verschiedenen Jahren angestellt. Auf Grund derselben kommt er zu dem Resultat,¹⁾ daß bei verschiedener Lage der Erdf Flächen gegen die Himmelsrichtung die Südseiten den höchsten, die Nordseiten den geringsten und die Ost- und Westseiten einen mittleren Ertrag liefern, wenn der Boden infolge günstiger Witterungsverhältnisse mit genügenden Feuchtigkeitsmengen versehen wird, daß hingegen bei trockener Witterung die südlich exponierten Flächen in dem Ertragsvermögen den nach den übrigen Himmelsrichtungen geneigten nachstehen, und daß bei extrem trockener Witterung die höchsten Erträge auf der Nordseite gewonnen werden. Bei größerem Neigungswinkel wurden bei feuchter Witterung die Erträge am Südabhang größer, während sie an den anderen Abhängen abnahmen.

Diese Schlußfolgerung hätte man auch ohne Vegetationsversuche ziehen müssen. Sie besagen nichts anderes als daß, wenn der Boden feucht genug ist, der Ertrag mit zunehmender Wärmezufuhr steigt. — Hätte Wollny diese Versuche viele Jahre hintereinander in gleicher Weise ausgeführt, so daß sich die Schwankungen der Ernteerträge, welche durch die verschiedene Witterung der einzelnen Jahre bedingt sind, ausgleichen, dann wären für diesen speziellen Boden und das lokale Klima allgemein gültige Resultate erhalten worden.

Die Versuche zeigen uns aber immerhin, daß der Einfluß der Art der Neigung des Geländes auf die Erträge unserer Kulturpflanzen im allgemeinen nicht sehr bedeutend ist.

§ 61. Der Untergrund.

Über den Wert des Untergrundes für die Pflanzenkultur, sofern die Erdschicht nicht mehr von der Pflanzenwurzel erreicht wird, entscheidet das Verhalten des Bodens zum Wasser. Ist der Untergrund für Wasser undurchlässig, so daß stagnierende Nässe eintritt, so kann der beste Boden (z. B. der Moorboden) keine Erträge ergeben. Derartige Bodenarten werden erst kulturfähig, wenn man den Grundwasserstand senkt, was entweder durch Gräben oder Drainageanlagen möglich ist. Aus praktischen Gründen empfiehlt es sich aber, diese Anlagen derart auszuführen, daß man jederzeit auch das Wasser wieder zurückstauen kann.

Derartige für Wasser undurchlässige Erdschichten sind in der Regel Tonschichten, in denen, wie wir sahen, die kapillare Wasserleitung nicht mehr

¹⁾ E. Wollny, Unters. über den Einfluß der physikalischen Eigenschaften des Bodens auf das Produktionsvermögen der Nutzpflanzen: Forsch. u. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 298—305.

stattfinden kann. Bestehen die undurchlässigen Erdschichten aus anstehendem Gestein, so wird eine Melioration durch Entwässerung in der Regel nicht durchführbar sein. Eine Ausnahme bildet hier der Ortstein. Dieser, eine Bildung unserer Zeit, entsteht durch die Verkittung des Sandes mittelst humoser Stoffe. Die Mächtigkeit der Schicht, sowie die Tiefe, in der er auftritt, wechselt sehr. Liegt er in nicht zu mächtiger Schicht und in nicht zu großer Tiefe, so läßt er sich aufpflügen oder aufgraben, und es wird dann an diesen Stellen, da der Ortstein, sobald er an die Luft gebracht wird, zerfällt, für das Wasser Abzug geschaffen. Leider wird aber hierdurch wiederum eine starke Auswaschung des Bodens und die Bildung von „Bleisand“ bewirkt, welcher von neuen Ortsteinablagerungen umkleidet wird, die dann oft metertief in den Boden hinabreichen. Hierdurch können der Kultur dieser Bodenarten erst recht große Schwierigkeiten entgegenstehen. Da die Ortsteinbildung in der Regel auf reinen Sandböden auftritt, so werden derartige Ländereien meist forstlich kultiviert. Man pflügt hierzu, um ein Schließen des Bodens infolge derartiger Neubildung des Ortsteins nach Möglichkeit zu vermeiden, das Gelände streifenweise, und zwar wenigstens in Streifen von einem Meter Breite auf und bepflanzt die dazwischen liegen gebliebenen Streifen. Ist der Boden sehr nafs, so werden Rabatten angelegt. Auf diese Weise ist es dann möglich geworden, dem Wasser Abzug zu verschaffen und die tieferen Bodenschichten der Pflanzenwurzel zu erschließen.¹⁾

Liegt die wasserundurchlässige Schicht nicht zu hoch und ist sie sanft geneigt, so dafs das Bodenwasser in den darüber befindlichen Erdschichten fliefsen und sich somit stetig erneuern kann, so haben wir für unsere Pflanzenkultur günstige Grundwasserverhältnisse. Das Grundwasser wird ergänzt durch diejenigen Wassermengen von den atmosphärischen Niederschlägen, welche nicht von den Pflanzen und den oberen Erdschichten zurückgehalten werden. Diese Sickerwassermengen²⁾ sind demnach um so

¹⁾ E. Ramann, Der Ortstein und ähnliche Sekundärbildungen in den Diluvial- und Alluvial-Sanden; Jahrb. d. Kgl. preufs. geologischen Landesanstalt für 1885. Berlin 1886. — Derselbe, Über die Bildung und Kultur des Ortsteins; Zeitschr. f. Forst- und Jagdwesen. Berlin 1886, 1. Heft.

²⁾ E. Wollny, Der Einfluss der Pflanzendecke und der Beschattung auf die Sickerwassermengen im Boden; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 10, S. 321. — Derselbe, Untersuchungen über die Sickerwassermengen in verschiedenen Bodenarten; ebenda Bd. 11, S. 1. — Derselbe, Der Einfluss der atmosphärischen Niederschläge auf die Grundwasserstände im Boden; ebenda Bd. 14, S. 335. — E. Ebermayer, Einfluss des Waldes und der Bestandsdichte auf die Bodenfeuchtigkeit und auf die Sickerwassermengen; ebenda Bd. 12, S. 147. — Derselbe, Untersuchungen über die Sickerwassermengen in verschiedenen Bodenarten; ebenda Bd. 13, S. 1 u. a. m.

größer, der Untergrundwasserstand mithin um so höher, je größer die Niederschlagsmengen in einer kurzen Zeitperiode sind, je weniger Wasser ferner ein Boden zurückzuhalten vermag, und je geringer die Pflanzendecke ist, welche Wasser zurückhält und wieder verdunstet. So unterliegt der Grundwasserstand mehr oder weniger großen Schwankungen, welche nicht nur in den einzelnen Monaten, sondern auch in den einzelnen Jahren an verschiedenen Orten sehr verschieden groß sein müssen (vergl. § 33, S. 193). — Die Höhe des Grundwasserstandes läßt sich daher nur mit einer sehr geringen Genauigkeit feststellen.

Der Einfluss, welchen die Höhe des Grundwasserstandes auf die Erträge unserer Kulturpflanzen ausübt, ist sehr verschieden, je nach der Bodenart und je nach der Art der Kulturpflanze.

Ein Sandboden kann in niederschlagsarmen Gegenden noch sehr gute Ernten liefern, wenn der Grundwasserstand hoch ist, so daß durch ihn die Pflanzen mit dem erforderlichen Wasser versorgt werden. In der Regel leiden wir in unserem Klima nicht unter übermäßiger Feuchtigkeit, und ist es deshalb gut, da, wo der Grundwasserstand durch Gräben oder Drainagen gesenkt werden muß, dafür Sorge zu tragen, daß man ihn in einer Trockenheitsperiode wieder zu heben vermag. Bei guten Kulturbodenarten, welche an sich für die Pflanze genügend Wasser zurückzuhalten vermögen, kann ein zu hoher Grundwasserstand auf die Kulturpflanzen schädigend einwirken. Nach einer Reihe statistischer Erhebungen, welche der Verfasser¹⁾ in verschiedenen Gegenden Deutschlands für die ertragreichsten Bodenarten angestellt hat, lieferten diese, sobald der Grundwasserstand höher als 4 m unter dem Erdniveau war, bei trockener, sobald er tiefer als 4 m war, bei nasser Witterung Maximalerträge. Bei einem leichteren Boden, in dem das Wasser weniger hoch kapillar ansteigt, wird die Tiefe, bis zu welcher der Grundwasserstand einen Einfluss auf die Vegetation auszuüben vermag, entsprechend geringer sein. Im allgemeinen kann man so vielleicht annehmen, daß in den Fällen, wo der Grundwasserstand tiefer als 4 m ist, derselbe für unsere landwirtschaftlichen Kulturpflanzen nicht mehr in Betracht gezogen werden braucht. Bei forstlicher Bodenbenutzung werden entsprechend dem tiefergehenden Wurzelsysteme unserer Holzgewächse noch weitere Tiefen Berücksichtigung finden müssen.

Über die Bestimmung des Grundwasserstandes selbst herrschen in der Praxis viel Unklarheiten. Es kommt für die Pflanze hier lediglich auf die oberste wasserführende Erdschicht an. Haben wir z. B. einen sandigen Boden, welcher in 2 m Tiefe auf eine undurchlässige Tonschicht aufgelagert ist, so müßten wir, um den Grundwasserstand zu bestimmen, einen 2 m tiefen Einschlag machen. Die Tiefe des Grundwasserstandes

¹⁾ Alfred Mitscherlich, l. c. Landw. Jahrbücher 1901, S. 436—439.

wird sodann vom Erdniveau bis zum Wasserspiegel in diesem Einschlage gemessen. Die gleichen Schwankungen, welchen die Bestimmung der Krumentiefe unterliegt, haften auch den Messungen des Grundwasserstandes an. Dazu kommen noch die Schwankungen, welche durch den wechselnden Wasserreichtum der wasserführenden Bodenschicht herbeigeführt werden. Die Gröfse derselben in einzelnen Monaten und in verschiedenen Jahren mag aus den folgenden Zahlen¹⁾ zu ersehen sein:

Beobachtungszeit und Ort:							
Monat	München 1850—1886		Berlin 1870—1885		Jahr	München (niedrigster Grund- wasserstand = 0)	Berlin (niedrigster Grund- wasserstand = 0)
	Regenhöhe + 29,1 mm	Grundwasser- stand + 515,324 mm über dem Meere	Regenhöhe + 32,1 mm	Grundwasser- stand + 32380 mm über dem Meere			
Januar	5,9	18	8,2	340	1870	138	37
Februar	0,0	83	2,7	410	1871	259	44
März	19,3	158	14,5	500	1872	162	18
April	26,4	177	0,0	580	1873	215	14
Mai	48,7	197	7,7	500	1874	42	0
Juni	83,0	258	30,1	310	1875	149	1
Juli	82,7	268	34,1	180	1876	745	28
August	72,6	243	28,1	70	1877	656	22
September	42,6	129	8,7	20	1878	798	13
Oktober	25,3	43	25,4	0	1879	470	20
November	21,4	0	12,4	90	1880	638	11
Dezember	16,7	28	14,1	120	1881	676	36
					1882	236	35
					1883	295	35
					1884	0	10
					1885	6	14

Bei den vorstehenden Zahlen ist der Grundwasserstand in seiner Höhe über dem Meeresspiegel angegeben, uns darf vom pflanzenphysiologischen Standpunkte aus jedoch nur die Tiefe unter der Erdoberfläche interessieren. Die Gröfse der Schwankungen des Wasserspiegels ist natürlich in jedem Falle die gleiche; es bedeuten dieselben in unserem Falle Millimeter Erhebung über dem tiefsten Grundwasserstande.

Da für die Vegetation der Wasserstand in der obersten wasserführenden Erdschicht in Betracht zu ziehen ist, so ist es falsch, etwa die

¹⁾ Vergl. E. Ramann. Bodenkunde. Berlin 1905. S. 275 u. 276.

Tiefe des Grundwasserstandes vom Brunnenniveau aus bis zum Erdniveau messen zu wollen. Beim Brunnengraben werden in der Regel erst eine Reihe wasserführender Sandadern durchschlagen, weil sie für den Brunnen nicht ausreichend Wasser führen. Man geht hier so tief, bis in der Zeiteinheit eine bestimmte Wassermenge zufließt, wobei sich natürlich auch die oberen zuvor durchschlagenen Sandadern in den Brunnen ergießen. Der Wasserspiegel des Brunnens liegt so in der Regel um vieles tiefer als der für die Pflanzenkultur in Betracht zu ziehende Grundwasserstand.

Übt der Grundwasserstand einen Einfluss auf die Erträge eines Bodens aus, so lässt sich dieser Einfluss nur dann beurteilen, wenn man gleichzeitig die physikalische Beschaffenheit des Bodens und die Größe und die Verteilung der an dem betreffenden Orte beobachteten mittleren Niederschläge mit berücksichtigt.

§ 62. Der Einfluss des Klimas auf die Erträge des Bodens.

Eine Beurteilung des Bodens lässt sich nie einigermaßen genau ausführen, sofern man nicht dabei gleichzeitig die lokalen klimatischen Faktoren mit berücksichtigt. Als solche kommen Licht, Luft, Wärme und Wasser in Betracht, von denen ein jeder Faktor für die Pflanze unentbehrlich ist. Das Licht ermöglicht unter anderem der Pflanze die Assimilation, die Aufnahme der Kohlensäure und Abgabe des Sauerstoffes; die Luft hat u. a. die Kohlensäure zum Assimilations- und den Sauerstoff zum Atmungsprozess zu liefern. Die Wärme ist die Energie, ohne welche der Lebensprozess der Pflanze unmöglich ist, und welche Rolle endlich das Wasser spielt, haben wir bereits zur Genüge kennen gelernt.

Im allgemeinen sind unsere Kulturpflanzen unserem Klima angepasst, und wir dürfen deshalb annehmen, dass für sie die klimatischen Faktoren zweckentsprechend sind. Dennoch haben wir in der Praxis vielfach, um nicht zu sagen überall, die Erfahrung machen müssen, dass die Ernteerträge in den verschiedenen Jahren, selbst wenn unser Boden jedesmal sehr gut bestellt ist, selbst wenn er jedesmal genau gleich gut bearbeitet, genau gleich gut gedüngt ist, wenn die Saat genau gleich gut in den Boden eingekommen und aufgelaufen ist, sehr verschieden ausfallen können. Der Grund hierfür kann dann nur darin zu suchen sein, dass in dem einen Jahre einer der klimatischen Faktoren im Minimum vorhanden war. Wir kennen leider den Einfluss der einzelnen klimatischen Vegetationsfaktoren noch sehr wenig. Im allgemeinen muss es auch schwer sein, denselben kennen zu lernen, da die Faktoren nicht nur unter sich in Wechselwirkung treten, sondern auch je nach dem Boden einen anderen Einfluss auf die Erträge ausüben können. Im allgemeinen nimmt man an, dass den Pflanzen Luft stets in genügender Menge zur Verfügung steht. Schon die bloße Erwärmung des Erdbodens bewirkt eine Luftströmung durch das Auf-

steigen der an der Erde erwärmten Luft, welche dazu genügen dürfte, den Pflanzen die erforderlichen Kohlensäuremengen zuzuführen.

Auch das Licht dürfte dort, wo keine Beschattung durch andere Pflanzen stattfindet, überall für unsere Kulturpflanzen in ausreichender Menge vorhanden sein.

Anders steht es schon mit der Wärme. Der Umstand, daß unsere Vegetationszeit nur 6—7 Monate währt, ist vornehmlich dem Mangel an Wärme zuzuschreiben. Es ist uns dadurch nur möglich, in einem Jahre eine Vollernte und höchstens eine Nachernte dem Boden zu entnehmen, wenn wir von verschiedenen kurzlebigen Gartenkulturpflanzen absehen. Ob sonst im Einzelfalle die Pflanzen zuweilen wegen mangelnder Wärme schlechte Erträge liefern, wissen wir nicht; denn kalte Jahre pflegen in der Regel nafs zu sein, und es kann so ebensogut der Überschufs an Nässe der Ertragsfähigkeit des Bodens geschadet haben. Dennoch läfst sich von einer Reihe von Kulturpflanzen, welche in kälterem Klima nicht mehr gedeihen, vermuten, daß sie auch bei uns in kalten Jahren leiden, so vielleicht Braugerste, Esparsette, Körnermais, Tabak, Gurke.

Der wesentlichste Vegetationsfaktor, durch den sich das Klima in den verschiedenen Gegenden Deutschlands hauptsächlich unterscheidet, und welcher uns deshalb hier vornehmlich interessiert, ist das Wasser.

Es ist meines Erachtens ein wesentlicher Fehler, welcher bei den land- und forstwirtschaftlichen Wetterbeobachtungen gemacht wird, daß meist nur die Regenmenge und nicht gleichzeitig auch die Verdunstungsmenge gemessen wird. Der Grund hierfür ist wohl darin zu suchen, daß die Verdunstung je nach der Art des Bodens, je nach dem Pflanzenbestand und je nach dem Entwicklungsstadium der Pflanzen wechselt, indem durch diese Momente die verdunstende Oberfläche eine andere wird. Wir müssen deshalb bei diesen Messungen (ebenso wie bei dem Regen) von der verdunstenden Oberfläche absehen und als solche die freie Wasseroberfläche in jedem Falle annehmen, wie dies von dem Verfasser bei der Beschreibung eines Verdunstungsmessers¹⁾ vorgeschlagen wurde.

Messen wir doch auch im Regen durchaus nicht die Regenmenge, welche der Pflanze in jedem Falle zugute kommt. Regnet es lange stark, so geht namentlich auf leichtem Boden ein großer Teil des Wassers ungenutzt verloren, und doch bestimmen wir diese in der Regenhöhe. Es liegt ja überhaupt eine Schwierigkeit darin, daß wir nicht wissen, in wie große Perioden wir praktisch die Niederschlagsmengen einteilen sollen und wie groß die Niederschläge in einer solchen Periode für das bestmögliche Gedeihen unserer Pflanzen sein müssen. Wir können das nicht *allgemein*

¹⁾ Alfred Mitscherlich, Ein Verdunstungsmesser: Landw. Versuchs-Stationen 1904, S. 63 u. f.

feststellen, weil unser Boden allenthalben verschieden ist, und dieser so die Niederschlagsmengen verschieden gut für die Pflanzen auszunutzen vermag.

Bei der Wasserverdunstung aus dem Boden liegen ähnliche Verhältnisse vor. Im allgemeinen dürfte die Verdunstung der freien Wasseroberfläche gegen diejenige des Bodens und insonderheit gegen die des bewachsenen Bodens zu gering bemessen sein. So stellte Haberlandt¹⁾ bei verschiedenen Bodenarten, die er verschieden stark mit Wasser sättigte, die folgenden Verdunstungsmengen im Verhältnis zur Verdunstung der freien Wasseroberfläche fest:

Verdunstung in mm pro Tag.

	Versuche im Freien bei Beschattung:				Vormittags am offenen Fenster im Sonnenschein (30. Juni 1876). nachmittags und nachts im geschlos- senen Zimmer
	1.	2.	3.	4.	
<i>Destilliertes Wasser</i>	2,33	4,38	11,71	21,69	32,00
Ackererde + 15 % Wasser . .	2,47	5,03	11,79	17,01	27,15
" + 25 " "	2,62	5,57	16,89	25,76	48,15
" + 35 " "	2,73	5,72	17,24	27,72	53,18
Sand + 10 " "	2,41	4,81	12,41	17,05	27,53
" + 15 " "	2,61	5,01	14,44	23,28	42,36
" + 25 " "	2,78	5,70	15,09	24,48	49,35
Moorerde + 50 " "	1,53	4,18	11,98	13,26	28,65
" + 75 " "	1,94	4,57	13,29	16,76	34,16
" + 100 " "	2,55	4,86	16,16	21,46	40,47

Wird der Boden von der Sonne beschienen, so trocknet, falls er nicht entsprechend viel Wasser enthält, die oberste Bodenschicht schneller aus, ehe das Wasser kapillar nachgesaugt wird; die Wasserverdunstung wird dann geringer als die der freien Wasseroberfläche. Durch den Pflanzenwuchs wird die Wasserverdunstung des Bodens erhöht, da die Pflanzen eine viel größere, für die Wasserverdunstung in Betracht kommende Oberfläche bieten als der nackte Boden. Hierzu kommt noch, dass die Pflanzen dem Boden auch aus den tieferen Schichten leichter das Wasser entziehen können, da die Wasserleitung im lebenden pflanzlichen Organismus nicht unterbrochen ist. Eine Folgeerscheinung der durch den Pflanzenbestand herbeigeführten stärkeren Verdunstung ist dann die, dass der mit Pflanzen bestandene Boden trockener sein wird als der brach-

¹⁾ Friedr. Haberlandt, Unters. auf d. Geb. des Pflanzenbaues. Bd. II. Wien 1877, S. 29—31.

liegende. Für die durch den Pflanzenwuchs bedingte stärkere Wasserverdunstung des Bodens einige Belegzahlen:¹⁾

Millimeter Verdunstungsmengen vom 15. April bis 18. November 1874.

Bodenart:	Bestanden mit		Brache
	Bokharaklee	Gras	
Humoser Kalksand	546,88	538,39	343,15

Millimeter Verdunstungsmengen vom 15. April bis 31. Oktober 1875.

Bodenart:	Bestanden mit		Brache
	mit Gras		
Sand	473,55		183,12
Lehm	517,21		338,99
Torf	556,30		302,90

Die Wassermengen, welche die Pflanze während einer Vegetationsperiode verdunstet, sind außerordentlich große. So fand Wollny²⁾ für verschiedene landwirtschaftliche Kulturpflanzen die folgenden Zahlen für die mit den betreffenden Pflanzen bestandene Flächeneinheit:

(Siehe die obere Tabelle auf Seite 303.)

Die verdunsteten Wassermengen schwanken nicht nur nach der Länge der Vegetationszeit, nach dem Stande der Pflanzen und der Pflanzenart, sondern auch nach den Verdunstungsbedingungen.

Sind die atmosphärischen Verdunstungsbedingungen günstig für die Verdunstung, so werden die Pflanzen zuweilen die ihnen durch den Boden zur Verfügung gestellten Wassermengen ganz ausnutzen, ja sie werden so teilweise nicht genug an diesen haben und dann welken, kümmern. Sind die Bedingungen ungünstig für die Verdunstung, so werden die Pflanzen auch dann noch genug Wasser haben, wenn die Regenmengen verhältnismäßig gering sind; denn nach Versuchen von W. Wollny³⁾ sind die Ernteerträge um so höher, je feuchter die Luft ist, je mehr also dementsprechend die Verdunstung der Pflanze herabgedrückt wird. So lassen sich die Wasserverhältnisse eines Klimas mit Rücksicht auf die Vegetation nur beurteilen, wenn man Niederschlagsmengen und Verdunstungsmengen gleichzeitig in Betracht zieht.

Da nur Niederschlagswasser in der Regel verdunstet, so werden die Verdunstungsmengen meist kleiner sein als die Niederschlagsmengen. In

¹⁾ E. Wollny, Unters. über den Einfluss der Pflanzendecke und der Beschattung auf die physikalischen Eigenschaften des Bodens; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 10, S. 284.

²⁾ Derselbe (dritte Mitteilung); ebenda Bd. 12, S. 27.

³⁾ W. Wollny, Unters. über den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf das Wachstum der Pflanzen; Forsch. a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 20, S. 397 u. f.

Vegetationszeit	Kulturpflanze	Verdunstung mm
20./4.— 3./8. 1879	Winterroggen	370,45
20./4.—14./8. 1880	Sommerroggen	469,08
20./4.—14./8. 1880	"	433,05
1./5.—16./8. 1879	Gerste	371,28
20./4.—22./8. 1879	"	389,05
20./4.—10./9. 1880	Hafer	562,20
20./4.—14./9. 1880	"	489,50
1./5.—16./8. 1879	Frühhafer	382,78
1./5.—12./9. 1879	Späthafer	424,83
1./5.— 9./8. 1879	Erbsen	369,28
20./4.—27./8. 1879	"	449,68
20./4.—14./8. 1880	"	467,63
20./4.—10./9. 1880	Bohnen	448,98
1./5.—12./9. 1879	Pferdebohnen	394,88
20./4.— 1./10. 1880	Sojabohnen	563,05
1./5.— 9./8. 1879	Wicken	362,55
20./4.—23./8. 1880	"	548,03
1./5.— 1./10. 1879	Rotklee	540,95
20./4.— 1./10. 1879	"	439,08
20./4.— 1./10. 1880	"	587,70
1./5.— 1./10. 1879	Esparsette	532,63
20./4.—20./8. 1880	Sommerrübsen	546,08
1./5.— 1./10. 1879	Gras	455,58

welchem Verhältnis diese beim nackten Boden zueinander stehen können, lassen die folgenden Zahlen¹⁾ erkennen:

	Bodenart:					
	Quarzsand		Humoser Kalksand		Lehm	
	Struktur:					
	0,0—2,0 mm		Pulver-	Krümel-	Pulver-	Krümel-
	1.	2.				
Regenmenge (mm)	705,9	614,5	614,5	614,5	614,5	614,5
Verdunstungsmenge (mm)	265,4	275,1	484,5	447,3	454,6	462,3
Beobachtungszeit	20./4. bis 25./9. 1880		20./4.—30./9. 1881.			

¹⁾ E. Wollny, Einfluss der Struktur des Bodens auf dessen Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnisse: Forschungen a. d. Geb. d. Agrikulturphysik Bd. 5, S. 156 u. 157.

Demgegenüber gestaltete sich nach Versuchen des Verfassers die von der freien Wasseroberfläche verdunstete Wassermenge zur Regenmenge im Binnenlandklima wie folgt:

Datum:	1903		1904	
	Regenmenge (mm)	Ver- dunstungs- menge (mm)	Regenmenge (mm)	Ver- dunstungs- menge (mm)
5.—10. April	10,40	5,35	28,40	5,4
11.—20. „	19,20	11,43	8,35	21,0
21.—30. „	6,70	15,01	19,40	15,8
1.—10. Mai	56,75	21,34	8,80	14,5
11.—20. „	37,55	9,84	12,95	21,6
21.—31. „	7,80	24,14	0,00	28,7
1.—10. Juni	5,40	23,41	0,00	27,4
11.—20. „	21,50	15,86	30,15	23,5
21.—30. „	12,50	19,11	17,80	16,2
1.—10. Juli	4,45	21,85	0,10	24,4
10.—20. „	23,25	22,80	—	—
10.—15. „	—	—	0,00	16,9
Während der ganzen Vegetationsperiode	205,50	190,14	125,95	215,0

Im vorliegenden Falle, namentlich im Jahre 1904 sind die von der freien Wasseroberfläche verdunsteten Wassermengen offenbar größer als die von den Pflanzen verdunsteten; denn die Pflanzen vermögen, falls der Boden nicht durch die Winterfeuchtigkeit viel Wasser enthält, nicht mehr Wasser zu verdunsten, als ihnen durch den Regen zugeführt wird. Aus den Zahlen von 1904 muß man annehmen, daß die Pflanzen in der Trockenperiode Anfang Juni und Mitte Juli unter Wassermangel gelitten haben.

Jedenfalls läßt sich nicht leugnen, daß wir in der Verdunstungsgröße einen Vegetationsfaktor haben, welcher einen sehr erheblichen Einfluß auf die Entwicklung der Pflanzen auszuüben vermag — ein Faktor von gleicher Bedeutung wie die Niederschlagsmenge. Im Gegensatz zum Binnenlandklima (Mark Brandenburg) gestalten sich diese Größen im See- und im Gebirgsklima ganz anders. Z. B. beträgt in Kiel die Niederschlagsmenge um ca. 13 % mehr, die Verdunstung aber gleichzeitig vielleicht um ca. 60 % weniger als die eben für das Binnenlandklima angeführten Zahlen. Daß dies auf die Wasserversorgung unserer Pflanzen einen ganz erheblichen Einfluß haben muß, bedarf keiner weiteren Ausführung.

Es ist unstrittig ein großes Verdienst Thieles,¹⁾ die meteorologischen Beobachtungen Deutschlands in Hinsicht auf ihren landwirtschaftlichen

¹⁾ Paul Thiele. Deutschlands landwirtschaftl. Klimatographie. Bonn 1895.

Wert zusammengestellt zu haben. Es unterliegt aber meines Erachtens keinem Zweifel, daß, wenn sich der Verfasser lediglich von dem für uns wesentlichsten Vegetationsfaktor, den Wasserverhältnissen, hätte leiten lassen, d. h. von den Niederschlagsmengen und von den Bestimmungen der relativen Feuchtigkeit (in Ermangelung der Verdunstungsmessungen), daß er dann zu einer ganz anderen, viel einfacheren Einteilung unseres Landes gekommen wäre. Er hätte für die Vegetationszeit (Mai bis September) zunächst das extrem feuchte See- und Gebirgsklima aus den Beobachtungen von Borkum, Keitum, Kiel und Donaueschingen, Villingen, Ittendorf, Bretten, Wertheim herausgelesen und von diesen dann die allmählichen Übergänge zu dem extrem trockenen Binnenlandklima, wie sich dies nach den von ihm angegebenen klimatologischen Beobachtungen in Neu-Strelitz, Eberswalde, (Potsdam), Berlin, Magdeburg, (Halle), Braunschweig und (Sondershausen) vorfindet, gefunden.

Aus der Praxis wissen wir, daß solche lokalen Unterschiede im Klima, wie wir sie z. B. zwischen See- und Gebirgsklima einerseits und dem Binnenlandklima andererseits konstatieren müssen, einen bedeutenden Einfluß auf die Ertragsfähigkeit eines Bodens auszuüben vermögen. Es wird so ein Sandboden in einem feuchten Klima unter Umständen höhere Erträge liefern als ein besserer Boden unter trockenen klimatischen Verhältnissen. Aus diesem Grunde ist bei einer Bodenklassifikation das Klima stets mit zu berücksichtigen, und es ist deshalb durchaus wünschenswert, daß die meteorologischen Beobachtungen, insonderheit die Regen- und die Verdunstungsmessungen an möglichst vielen Orten angestellt werden.

Schlußbemerkung.

Von allen Größen, welche im vorliegenden Kapitel einzeln besprochen wurden, hat keine einen derartig hohen Einfluß auf den Bodenwert, wie die physikalische Beschaffenheit der Ackerkrume. Hat ein Boden eine tiefe Krume, durchlässigen Untergrund, ist die Erdoberfläche eben, der Grundwasserstand tief, liegen mithin Verhältnisse vor, wie wir sie vielfach im Forst- und häufig im Wiesen- und Ackerboden vorfinden, so entscheidet über den Wert des Bodens nach dem Vorhergehenden fast lediglich die physikalische Bodenbeschaffenheit der Krume, da von dieser die Höhe der Erträge abhängen muß. Welcher Einfluß dem Klima dabei einzuräumen ist, und ob der eventuell schädliche Einfluß des Klimas nicht vielleicht durch zweckmäßige Bodenbearbeitung und Düngung bis zu einem gewissen Grade beseitigt werden kann, das sind Fragen, über die wir bislang noch so gut wie gar nicht unterrichtet sind.

Kapitel VIII.

Die Bodenklassifikation.

§ 63. Über die Bestimmung des Wertes eines Grundstückes auf Grund der Untersuchung einzelner Standorte.

Im vorigen Kapitel haben wir alle Momente aufgesucht, welche für die Wertbestimmung einer Stelle, auf welcher Pflanzen uns Erträge liefern sollen, in Betracht gezogen werden müssen. In welcher Weise dieselben jedesmal zu berücksichtigen sind, mußte leider offen gelassen werden, da quantitative Untersuchungen hierüber noch vollkommen fehlen. Wir sahen aber ferner, daß abgesehen davon, daß auch die verschiedenen Bodenarten ineinander übergehen, auch in der Güte eines und desselben Bodens z. B. durch seinen jeweiligen Dungzustand Schwankungen eintreten, und daß infolge derartiger Schwankungen auch die Entnahme der Bodenprobe vom Felde großen Fehlern ausgesetzt sein muß. So ist es, sobald wir von der einzelnen Erdstelle auf die Beschaffenheit eines Grundstückes Schlüsse ziehen wollen, zunächst notwendig, zu ermitteln, wie die Probeentnahme anzustellen ist, und wieviel Proben einem Grundstück entnommen werden müssen, damit man den durchschnittlichen Wert desselben aus der Untersuchung erkennen kann. Im allgemeinen kann man nicht von einer Bodenuntersuchung, welche man auf einem Quadratmeter Landfläche vornimmt, auf einen Hektar oder auf 100 ha eines ähnlich aussehenden Landes Schlüsse ziehen. Es gilt natürlich auch hier die Regel, daß wir die Abschätzung eines Grundstückes um so genauer machen, den Wert desselben um so sicherer beurteilen können, je mehr Proben wir demselben entnehmen. Wie viele Bodenproben einem Grundstück zu entnehmen sind, wollen wir später untersuchen. Jetzt wollen wir annehmen, daß wir die Proben zweckmäßig entnommen haben. Es tritt dann an uns die Frage heran, wie können wir aus den vielen einzelnen Probeentnahmen den Wert unseres Grundstückes bestimmen. Hierfür gibt es offenbar zwei Wege: entweder wir bestimmen den Wert jeder Probestelle für sich oder wir vermischen die sämtlichen Bodenproben zu einer Hauptprobe. Es ist keine Frage, daß der erstere dieser Wege der exaktere ist, er ist aber infolge der vielen Arbeit, welche damit verbunden ist, praktisch nicht gangbar. Wir wählen also den zweiten Weg.

Wollen wir die Beschaffenheit der Krume physikalisch oder chemisch untersuchen, so werden wir an jeder Stelle, wo wir eine Probe entnehmen, die Bodenprobe stets bis zur gleichen Tiefe, beim Ackerland zweckmäßig soweit die Pflugfurche geht, entnehmen. Hierbei ist es wichtig, daß der Boden möglichst aus jeder Tiefe in gleicher Menge entnommen wird. Es kommt nicht darauf an, daß die entnommenen Proben möglichst groß sind. Sollen die Proben von verschiedenen Stellen sodann zu einer einzigen Mittelprobe vereinigt werden, so ist hier vornehmlich darauf zu achten, daß von jeder Einzelprobe die gleiche Menge genommen wird. Geschieht dies nicht, so wird die Probe, von der man mehr zur Mittelprobe zuführt, stärker ins Gewicht fallen müssen. Z. B. einem Felde seien zwei Proben entnommen, von denen die eine den Wert = 1, die andere den Wert = 2 habe. Nimmt man von der ersten Probe doppelt soviel als von der zweiten, so ist der Wert des Grundstückes $\frac{1+1+2}{3} = 1,33$; nimmt man von der zweiten Probe doppelt soviel als von der ersten, so ist der Wert $\frac{1+2+2}{3} = 1,67$, während der wahre Wert 1,50 ist.

Eine Schwierigkeit liegt in der Berücksichtigung der Steine. Entnehmen wir nur kleine Bodenproben dem Grundstück, so sind Steine nach Möglichkeit auszuschließen, insonderheit wenn nur wenig Steine im Boden sind. Wir stützen uns dann auf den Wollnyschen Befund, daß geringe Mengen von Steinen (bis 10 %) keinen Einfluß auf die Erträge des Bodens ausüben. Wir hatten früher gesehen, daß dieser Befund streng genommen nicht zu Recht bestehen kann, da Steine das Hohlraumvolumen des Bodens verringern; jedoch ist es möglich, daß ein geringer Gehalt von Steinen die Erträge nur innerhalb der Grenzen, welche durch die verschieden tiefe Bearbeitung des Bodens gezogen sind, herabdrückt, so daß er praktisch keine Bedeutung hat. Ist der Boden reicher an Steinen, so muß wenigstens an einer Stelle des Grundstückes, welche dem Augenschein nach einen mittleren Steingehalt besitzt, die Bodenuntersuchung in der in § 4, S. 13 wiedergegebenen Weise erfolgen.

Die Tiefe der Krume muß an jeder Stelle, wo eine Bodenprobe entnommen wird, gemessen werden.

Die physikalische Beschaffenheit des Untergrundes wird zweckmäßig in der obersten Untergrundsicht untersucht. Hierzu ist an jeder Probestelle eine Bodenprobe in einer Tiefe von 60—90 cm unter dem Erdniveau zu entnehmen, worauf die Einzelproben ebenso wie zuvor zu einer Mittelprobe vereinigt werden. Eine derartige Tiefe ist zweckmäßig, weil man annehmen kann, in derselben schon reinen, von Humussubstanzen freien Untergrundboden zu erhalten, und weil diese oberste Untergrundsicht für die Pflanze noch als Wasserreservoir in Betracht zu ziehen ist.

Der Untergrundwasserstand wird, sofern das Gelände bei der Probenentnahme als geologisch gleichartig erscheint, höchstens an einer Stelle festgestellt werden brauchen, und man wird dies in der Regel auch nur dann tun, wenn man den Grundwasserstand in geringerer als in 4 m Tiefe unter dem Erdniveau erwartet.

Die Neigung der Erdoberfläche vergrößert die Grundstücksfläche. Rodewald¹⁾ hat hierüber Berechnungen angestellt. Denkt man sich eine kreisförmige horizontale Fläche, deren Halbmesser r sein soll, und über dieser die Fläche einer Kugelkalotte von der Höhe h ausgebreitet, so ist die Steigung dieser Fläche gegen die Horizontale $\frac{h}{r}$. — Von der Größe dieser Steigung ist die Flächenzunahme abhängig, und es läßt sich leicht mathematisch berechnen, daß, wenn die ebene Fläche = F , die kugelförmige Fläche = F^1 ist, die Beziehung besteht:

$$\frac{F^1}{F} = 1 + \frac{h^2}{r^2}.$$

Man erhält also die Flächenzunahme des kugelförmigen Berges gegen die Grundfläche, wenn man die Grundfläche mit dem Quadrat der Steigung multipliziert. Rodewald berechnet so für die verschiedenen derartigen Steigungen die folgenden Flächenzunahmen:

Steigung	Flächenzunahme	Steigung	Flächenzunahme
1 : 20	0,25 %	1 : 3	11,11 %
1 : 15	0,44 "	1 : 2	25,00 "
1 : 10	1,00 "	3 : 4	56,25 "
1 : 5	4,00 "	1 : 1	100,00 "
1 : 4	6,25 "		

Die durch die Neigung der Erdoberfläche herbeigeführte Flächenvergrößerung wird also erst bedeutend, wenn die Steigung 10% überschreitet; sie nimmt dann allerdings schnell zu.

Ist die Fläche nur nach einer Richtung hin geneigt, so folgt die Berechnung aus dem rechtwinkligen Dreieck, dessen Grundlinie, die Ebene (a) die eine Kathete, dessen Höhe, die Steigung (b) die andere Kathete ist, und bei dem gesucht wird, um wieviel seine Hypothenuse = $\sqrt{a^2 + b^2}$ größer als a ist. Nehmen wir hier die gleichen Steigungen $\left(\frac{a}{b}\right)$ an, so erhalten wir folgende Vergrößerungen der Erdoberfläche:

Steigung	Flächenzunahme	Steigung	Flächenzunahme
1 : 20	0,10 %	1 : 10	0,50 %
1 : 15	0,20 "	1 : 5	1,98 "

¹⁾ Rodewald-Kiel, Bringen die wagerechten oder unebenen Weiden mehr Ertrag; Landw. Wochenblatt für Schleswig-Holstein Jahrg. 54, No. 14, S. 270.

Steigung	Flächenzunahme	Steigung	Flächenzunahme
1 : 4	3,08 ‰	3 : 4	25,00 ‰
1 : 3	5,40 „	1 : 1	41,50 „
1 : 2	12,85 „		

In diesem Falle erfolgt also die Flächenzunahme entsprechend der ebeneren Gestalt der Oberfläche langsamer. Eine Bedeutung dürfte einer derartigen Flächenvergrößerung wohl erst dann zukommen, wenn infolge der Neigung der Erdoberfläche die Bodenbearbeitung erschwert oder auch ganz in Frage gestellt wird; wir werden sie so meist bei Ackerländereien vernachlässigen können, wohingegen sie bei Forst- und Weideländereien unter Umständen bei der Beurteilung eines Geländes mit in Betracht gezogen werden muß. Sie wird dann aber gleichfalls nicht an einer Stelle bestimmt werden, sondern man wird eine mittlere Steigung für das ganze zu bonitierende Gelände abzuschätzen haben.

Nach dem Vorhergehenden werden wir so nur für die Beurteilung der Beschaffenheit der Krume und des Untergrundes einzelne Bodenproben entnehmen müssen, und es ist nun unsere Aufgabe, zu untersuchen, wie diese Bodenproben zweckmäßig entnommen werden, und wieviel Bodenproben man auf einem Grundstück zweckmäßig zu entnehmen hat.

§ 64. Die Anwendung der Fehlerwahrscheinlichkeitsrechnung zur Beurteilung der zweckmäßigen Anzahl der auf einem Grundstück zu wählenden Probestellen und zur Beurteilung der Art der Probeentnahme.

Zur Beantwortung dieser für jede Bodenklassifikation grundlegenden Fragen müssen wir uns eines in seiner Anwendung einfachen rechnerischen Hilfsmittels bedienen, der „Fehlerwahrscheinlichkeitsrechnung“. Wir wollen dieselbe hier an einigen Beispielen erläutern.

Um die Tiefe der Ackerkrume eines einen Hektar großen Grundstückes zu bestimmen, untersuchte ich dieses an hundert Stellen, und zwar derart, daß die einzelnen Stellen um je 10 m im Quadratverbande voneinander entfernt waren, wie dies die Fig. 36 veranschaulicht. Die Untersuchung geschah derart, daß ein Bohrstock ca. 60 cm tief in den Boden eingetrieben und mit dem darin haftenden Boden wieder herausgezogen wurde. Die Messung geschah an einem am Bohrstock angebrachten, in je 5 cm eingeteilten Maßstabe von oben aus bis dahin, wo deutlich eine festere Lagerung respektive auch eine andere Bodenschicht zu erkennen war. Da der Boden soeben zur Kartoffelbestellung vorbereitet, mithin sehr locker war, so waren die Krumentiefen im Mittel verhältnismäßig groß.

Es wurden an den verschiedenen Stellen die folgenden Tiefen gemessen:

Reihe:	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	32	40	45	39	45	45	55	42	43	40
2	35	37	43	43	42	45	40	48	48	42
3	45	44	40	38	43	45	47	42	45	40
4	40	39	50	38	50	51	40	48	42	45
5	43	40	40	45	45	32	38	45	43	43
6	42	38	35	35	50	35	40	45	35	40
7	55	37	48	45	45	50	34	35	42	40
8	52	38	45	40	43	50	44	48	41	42
9	48	41	53	44	42	50	45	45	45	38
10	35	37	52	42	43	42	42	42	42	47

Im Mittel aller dieser Beobachtungen betrug die Krumentiefe 42,79 cm.

Wir berechnen nun aus diesen Beobachtungen die wahrscheinliche Schwankung. Hierzu gehen wir derart vor, daß wir die einzelnen

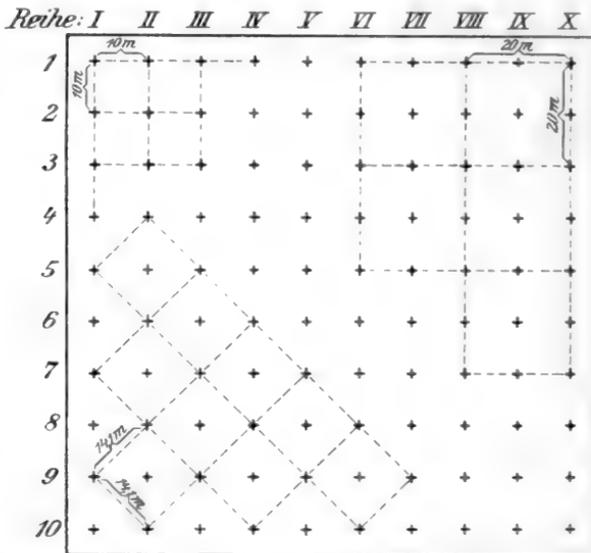


Fig. 86. Zur Art der Probeentnahme.

Beobachtungen nach ihrer Größe ordnen und die Differenz einer jeden Einzelbeobachtung zu dem gefundenen Mittelwerte bilden. Diese Differenzen werden sodann addiert. War die Mittelbildung und die Differenzbildung sowie das Aufsummieren der einzelnen Differenzen richtig, so muß die Summe der positiven Differenzen gleich der Summe der negativen Differenzen sein. Darin besteht die Rechenprobe. Wir führen das Gesagte aus:

Krumen- tiefe (cm)	An- zahl der Fälle	Diffe- renz vom Mittel	Summe der Diffe- renzen	Krumen- tiefe (cm)	An- zahl der Fälle	Diffe- renz vom Mittel	Summe der Diffe- renzen		
32	2	×	+ 10,79 = +	21,58	43	9	×	- 0,21 = -	1,89
34	1	×	+ 8,79 = +	8,79	44	3	×	- 1,21 = -	3,63
35	7	×	+ 7,79 = +	54,53	45	18	×	- 2,21 = -	39,78
37	3	×	+ 5,79 = +	17,37	47	2	×	- 4,21 = -	8,42
38	6	×	+ 4,79 = +	28,74	48	6	×	- 5,21 = -	31,26
39	2	×	+ 3,79 = +	7,58	50	6	×	- 7,21 = -	43,26
40	13	×	+ 2,79 = +	36,27	51	1	×	- 8,21 = -	8,21
41	2	×	+ 1,79 = +	3,58	52	2	×	- 9,21 = -	18,42
42	14	×	+ 0,79 = +	11,06	53	1	×	- 10,21 = -	10,21
					55	2	×	- 12,21 = -	24,42
<hr/> Anzahl der } 50 Summe der } = + 189,50 + Diffe- } renzen }				<hr/> Anzahl der } 50 Summe der } = - 189,50 - Diffe- } renzen }					

Die positiven und negativen Differenzen werden jetzt ohne Berücksichtigung des Vorzeichens addiert (= 379) und die so gefundene Summe $[v]$ durch die Wurzel aus dem Produkt, aus der Anzahl der gebildeten Differenzen ($n = 100$) und der Anzahl derselben vermindert um 1 ($n - 1 = 99$) dividiert; dieser Quotient wird sodann mit 0,845 multipliziert. Es ergibt also diese Rechnung in unserem Falle:

$$\frac{379}{\sqrt{100 \cdot 99}} \cdot 0,845 = 3,22$$

oder allgemein:
$$\frac{[v]}{\sqrt{n(n-1)}} \cdot 0,845 = r.^1)$$

¹⁾ Diese zuerst von den Astronomen*) angewandte Methode dürfte meines Erachtens für alle landwirtschaftlichen Probleme ausreichend genau sein. Es ist ein Verdienst Simonyms,**) uns noch einen viel genaueren und auch für den Fall, daß nur wenig Beobachtungen vorliegen, stets gangbaren Weg zur Bestimmung des wahrscheinlichen Fehlers gewiesen zu haben; jedoch ist es vielleicht unnötig, diesen einzuschlagen, da unser Mittel, welches wir ja dann auch nur aus einer sehr geringen Anzahl von Beobachtungen bilden, ebenfalls nur innerhalb weiter Grenzen dem wahren Werte nahe kommen kann. Ich unterlasse es, hier auf die Simonymsche Berechnung näher einzugehen, weil diese umständlicher ist, und ich hier den Leser nicht unnötig durch Rechnereien belästigen möchte.

*) C. A. F. Peters, Über die Bestimmung des wahrscheinlichen Fehlers einer Beobachtung aus den Abweichungen der Beobachtungen von ihrem arithmetischen Mittel *Astronomische Nachrichten*. Altona 1856, Bd. 44, No. 1034, S. 29-32.

**) Oskar Simony, Über die Anwendbarkeit der Fehlerwahrscheinlichkeits- und Ausgleichsrechnung auf Ertragsbestimmungen; *Zeitschr. für das landwirtschaftliche Versuchswesen in Österreich* 1905, S. 87-138.

Die so gefundene Zahl (r resp. 3,22) ist der „wahrscheinliche Fehler“ oder richtiger für uns die „wahrscheinliche Schwankung“ der Beobachtungen.

Von dieser GröÙe besagt uns das Gaußsche Fehlerwahrscheinlichkeitsgesetz, daß die Wahrscheinlichkeit besteht, daß die Differenz zwischen dem Mittel und der einzelnen Beobachtung eine bestimmte GröÙe hat.

Fehlerwahrscheinlichkeitstabelle.¹⁾

Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Differenz liegt zwischen $0,0 \cdot r$ und

$0,5 \cdot r$ ist 0,2635		$3,0 \cdot r$ ist 0,9570
$1,0 \cdot r$ „ 0,5000		$3,5 \cdot r$ „ 0,9815
$1,5 \cdot r$ „ 0,6873		$4,0 \cdot r$ „ 0,9930
$2,0 \cdot r$ „ 0,8227		$4,5 \cdot r$ „ 0,9976
$2,5 \cdot r$ „ 0,9075		$5,0 \cdot r$ „ 0,9993

(Für die Zwischenwerte genügt für unsere praktischen Fälle die geradlinige Interpolation.)

Die Tabelle besagt, daß, wenn man z. B. von 100 Beobachtungen die 100 Differenzen zum Mittel bildet, daß dann von diesen $100 \times 0,2635 = 26$ kleiner sein werden als $0,5 \cdot r$ (oder in unserem Beispiel als: $0,5 \cdot 3,22 = 1,61$); 50 kleiner sein müssen als r usf.

Wir wollen nun untersuchen, inwieweit dies in unserem Falle zutrifft.

Verteilung der bei 100 Krumentiefen gefundenen Differenzen vom Mittelwerte.

Unter	liegen der Berechnung nach	dem Befunde nach
$0,5 \cdot r$	26	26
$1,0 \cdot r$	50	59
$1,5 \cdot r$	69	69
$2,0 \cdot r$	82	78
$2,5 \cdot r$	91	91
$3,0 \cdot r$	96	95
$3,5 \cdot r$	98	98
$4,0 \cdot r$	99	100
$4,5 \cdot r$	100	100
$5,0 \cdot r$	100	100

Wir sehen aus diesen Zahlen, daß diese Gesetzmäßigkeit recht gut zutrifft.

Können wir nun so mit Hilfe der wahrscheinlichen Schwankung feststellen, wie die Tiefe unserer Krume bei den Einzelbeobachtungen wechseln muß, so ist es nicht mehr erforderlich, jedesmal 100 Stellen

¹⁾ Vergl. u. a. W. Jordan, Vermessungskunde 1888, Bd. I, Anhang S. [10] oder G. Hagen, Grundzüge der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin 1882, S. 218.

auf einem Hektar zu untersuchen; wir werden vielleicht mit 50 oder mit 25 oder auch mit noch weniger auskommen können, sofern nur die wahrscheinliche Schwankung die gleiche bleibt. Die Untersuchung läßt sich mit dem vorliegenden Materiale leicht ausführen.

Um 50 Bestimmungen herauszugreifen, die den gleichen Abstand haben, lassen wir jede zweite Bestimmung wegfallen. Wir erhalten so 50 Probestellen, welche in einem Quadratverbande von $\sqrt{10^2 + 10^2} = 14,15$ m voneinander entfernt sind (vergl. Fig. 36 links unten), und zwar erhalten wir 2 Reihen, indem wir einmal die eine Hälfte, das andere Mal die andere Hälfte der Bestimmungen wegfallen lassen. Verfolgen wir die Bestimmungen in wagerechten Reihen (S. 310), so beginnt

die erste mit 32, 45, 45, 55, 43, 37, 43

die zweite mit 40, 39, 45, 42, 40, 35, 43

Die Mittel und die wahrscheinlichen Schwankungen dieser Reihen, welche in der gleichen Weise wie das erstemal ermittelt wurden, betragen:

$$1. m_{50} \pm r = 43,26 \pm 3,35 \text{ cm,}$$

$$2. m_{50} \pm r = 42,32 \pm 3,07 \text{ " .}$$

Je 25 Beobachtungen, welche an gleichweit voneinander entfernten Stellen im Quadratverbande gemacht wurden, erhält man, wenn man alle Bestimmungen in der je zweiten senkrechten und in der je zweiten wagerechten Reihe ausfallen läßt (vgl. Fig. 36 rechts oben). Die Entnahmestellen haben so einen Abstand von je 20 m voneinander. Je nachdem, welche Reihe man als zweite Reihe jedesmal nimmt, wird man die 100 Bestimmungen in vier verschiedene Gruppen zu je 25 Bestimmungen zerlegen. Verfolgen wir in den Beobachtungen die Reihen wagerecht, so beginnt Gruppe:

1. mit den Bestimmungen 32, 45, 45, 55, 43, 45, 40, 43 . . .

2. " " " 40, 39, 45, 42, 40, 44, 38, 45 . . .

3. " " " 35, 43, 42, 40, 48, 40, 50, 50 . . .

4. " " " 37, 43, 45, 48, 42, 39, 38, 51

In gleicher Weise wie zuvor berechnen sich hier aus den je 25 Bestimmungen die folgenden Mittel und wahrscheinlichen Schwankungen:

$$1. m_{25} \pm r = 44,24 \pm 3,27 \text{ cm,}$$

$$2. m_{25} \pm r = 41,80 \pm 2,87 \text{ "}$$

$$3. m_{25} \pm r = 42,84 \pm 3,36 \text{ "}$$

$$4. m_{25} \pm r = 42,28 \pm 3,25 \text{ " .}$$

Emmerling¹⁾ schlägt schliefslich vor, die Proben nicht in dieser Weise, sondern in den beiden Hauptdiagonalen des Ackerstückes zu entnehmen. Führt man dies im vorliegenden Falle aus, so würde man auf den beiden Diagonalen alle 14,15 m eine Probe entnommen haben. Aus

¹⁾ A. Emmerling, l. c. Eine Festschrift. Kiel 1895, S. 168—170.

den so entnommenen 20 Bestimmungen berechnet sich das folgende Mittel und die folgende wahrscheinliche Schwankung:

$$m_{20} \pm r = 40,95 \pm 4,03.$$

Stellen wir zur Übersicht alle erhaltenen Resultate zusammen, so ergibt sich, wenn wir mit dem Index bei dem Mittel m immer die Anzahl der Bestimmungen angeben, aus welcher das Mittel (m) gebildet und die wahrscheinliche Schwankung (r) berechnet wurde:

	Abweichung von r in % von seinem wahrscheinlichsten Werte
$m_{100} \pm r = 42,79 \pm 3,22$ cm	0,0 %
$m_{50} \pm r = 43,26 \pm 3,35$ „	- 4,0 „
$m_{50} \pm r = 42,32 \pm 3,07$ „	+ 4,7 „
$m_{25} \pm r = 44,24 \pm 3,27$ „	- 1,6 „
$m_{25} \pm r = 41,80 \pm 2,87$ „	+ 10,9 „
$m_{25} \pm r = 42,84 \pm 3,36$ „	- 4,4 „
$m_{25} \pm r = 42,28 \pm 3,25$ „	- 0,9 „
$m_{20} \pm r = 40,95 \pm 4,03$ „	- 25,2 „

Die Mittel stimmen alle innerhalb des einfachen wahrscheinlichen Fehlers mit dem Hauptmittel überein, dürften somit in diesem Falle für praktische Zwecke genau genug sein. Bei 25 Bestimmungen wird die wahrscheinliche Schwankung aber in einem Falle bereits um beinahe 11% anders, so daß hier ein Rückschluß auf die übrigen 75 Bestimmungen oder auf die ganze Fläche schon sehr gewagt erscheint. Es möchte das deshalb für praktische Zwecke die geringste Anzahl der Versuchsstellen sein, wenn alle 20 m im Quadratverbände die Tiefe der Krume festgestellt wird.

Viel größeres Interesse als diese Bestimmung der Krumentiefen hat aber die Art der Probeentnahme für die Bodenuntersuchung. Zu diesem Zwecke entnahm ich an 10 Stellen des gleichen Bodens Proben mittelst des Gersonschen Bohrstockes (Fig. 37).¹⁾ Es ist das ein einfacher, mit einer Rille versehener, unten spitzer Eisenstab, der an seinem oberen Ende einen mit grobem Leder überzogenen Kreuzgriff hat. Der Stab wurde an der Stelle, wo der Boden entnommen werden sollte, dreimal je 40 cm tief in die Erde eingestossen, dann umgedreht und herausgezogen; sodann wurden die obersten je 30 cm herausgestossen und in ein hierzu mitgenommenes Gefäß eingefüllt. Um zu untersuchen, wie sich diese Probe zur Spatenprobe verhielt, wurde dann an denselben Stellen je in einem Umkreis von 25 cm Radius der Boden 30 cm tief umgegraben und möglichst gut gemischt, und es wurde so auch von diesen selben Stellen mit dem Spaten

¹⁾ Illustrierte Landw. Zeitung XIV. Jahrg. No. 85.

je eine Durchschnittsprobe entnommen. Alle Proben wurden darauf einzeln auf ihre Hygroskopizität hin untersucht. Es ergaben sich die folgenden Resultate:

Bohrprobe . . .	0,90	0,96	1,31	1,78	1,03
Spatenprobe . . .	1,07	0,93	1,31	1,78	1,07
Bohrprobe . . .	0,97	1,00	0,95	0,94	0,87
Spatenprobe . . .	1,01	0,94	1,02	0,94	0,98
Bohrprobe im Mittel	$+r = 1,071 \pm 0,17$				
Spatenprobe „ „	$+r = 1,105 \pm 0,16$				

Man ersieht hieraus, daß die Bohrprobe vollkommen ebenso genaue Werte gibt als die Spatenprobe, da die Differenz der Mittel nur das 0,2fache der wahrscheinlichen Schwankung der einzelnen Bestimmung beträgt. Es genügt also die Probenentnahme mit dem Bohrstock vollkommen.

Nach dieser Voruntersuchung kam es nunmehr darauf an, festzustellen, wieviel Proben man auf einem Hektar möglichst gleichmäßigen Bodens entnehmen muß, um ein einigermaßen gutes Bild von der physikalischen Beschaffenheit desselben zu gewinnen.

Es wurden deshalb hundert Proben auf einen Hektar (auf demselben, von dem die Krumentiefen bestimmt waren) mit dem Bohrstock wieder je in einer Entfernung von 10 m im Quadratverbande (Fig. 36) in gleicher Weise entnommen, und sodann von jeder einzelnen die Hygroskopizität bestimmt. Es ergaben sich hier die folgenden Resultate:

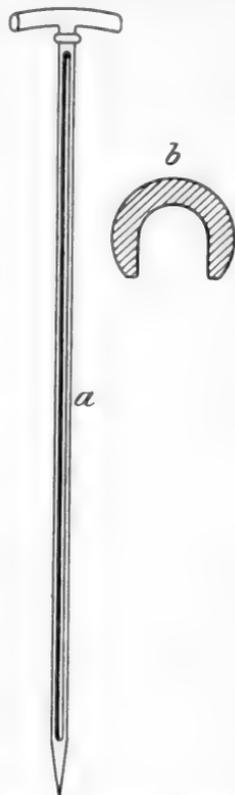


Fig. 37. Erdbohrstock No. 2 nach Georg H. Gerson. a $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse; b Querschnitt, natürl. Gröfse.

Reihe:	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	1,27	1,23	1,36	1,44	1,54	1,53	1,46	1,44	1,47	1,37
2	1,11	1,16	1,35	1,59	1,46	1,32	1,36	1,40	1,35	1,38
3	1,45	1,45	1,45	1,65	1,70	1,66	1,21	1,35	1,22	1,49
4	1,48	1,45	1,54	1,68	1,54	1,51	1,35	1,38	1,50	1,39
5	1,43	1,39	1,50	1,80	1,55	1,17	1,43	1,37	1,37	1,32
6	1,29	1,36	1,42	1,42	1,33	1,25	1,27	1,31	1,33	1,31
7	1,40	1,42	1,45	1,34	1,43	1,58	1,47	1,42	1,46	1,35
8	1,53	1,38	1,30	1,64	1,57	1,53	1,44	1,56	1,57	1,43
9	1,54	1,52	1,22	1,44	1,46	1,45	1,36	1,51	1,52	1,58
10	1,42	1,62	1,18	1,48	1,60	1,45	1,43	1,40	1,50	1,45

Berechnen wir hier wiederum die Mittel und wahrscheinlichen Schwankungen von 100, je 50, je 25 sowie von den 20 Diagonalbestimmungen in gleicher Weise wie zuvor, so erhält man:

$m_{100} + r = 1,43 + 0,08$	$m_{25} + r = 1,41 + 0,09$
$m_{50} + r = 1,43 \pm 0,08$	$m_{25} \pm r = 1,45 \pm 0,09$
$m_{50} + r = 1,43 + 0,09$	$m_{25} + r = 1,43 + 0,08$
$m_{25} + r = 1,43 + 0,07$	$m_{20} \pm r = 1,39 \pm 0,09$

Aus den vorstehenden Resultaten läßt sich ersehen, daß auch für die Untersuchung eines möglichst gleichartigen Bodens auf seine Hygroskopizität hin 25 Probeentnahmen auf 1 ha ausreichend sind.

Es muß auf den ersten Blick bei diesen Zahlen auffallen, daß die wahrscheinliche Schwankung so enorm groß ist; sie beträgt 5,6% der gemessenen Größe, und scheint danach die Methode der Hygroskopizitätsbestimmung für praktische Zwecke übermäßig genau zu sein. — Und doch ist uns diese große wahrscheinliche Schwankung (nach § 57) sehr erklärlich, wenn wir berücksichtigen, daß der Boden kurz vorher für die anzubauenden Kartoffeln mit Stalldünger befahren worden war, dessen Hygroskopizität 40 betrug. Denn je nachdem, ob die Einzelprobe mehr oder weniger Dung enthält, müssen erhebliche Schwankungen eintreten. Hierzu kommt noch die Ungleichmäßigkeit des Bodens an sich.

Nach den vorstehend mitgeteilten Versuchen genügt es, an je 25 gleichmäßig über 1 ha Land hin verteilten Probestellen die Tiefe der Krume zu untersuchen, und hierbei gleichzeitig eine Bodenprobe für die physikalische Bodenuntersuchung jedesmal zu entnehmen. Da es praktisch in den meisten Fällen nicht erforderlich ist, das Resultat der Einzeluntersuchung zu kennen, so werden wir diese je 25 gleichgroßen Bodenproben zu einer Hauptprobe vereinigen und diese weiter auf ihre Hygroskopizität, auf ihre chemische Beschaffenheit hin usw. untersuchen. Bei Untergrundproben würden wir genau ebenso vorzugehen haben, nur daß die Einzelproben dabei in entsprechender Tiefe (60—90 cm) zu entnehmen sind.

§ 65. Der Wert der Untersuchung jeder einzelnen der einem Grundstück entnommenen Bodenproben.

Im allgemeinen begnügen wir uns damit, die von einem Grundstück auf die angegebene Weise entnommenen Proben zu einer Mittelprobe zu vereinigen und diese letztere zu untersuchen. Man wird dies vornehmlich deshalb tun, um Arbeit und Kosten zu sparen. Es läßt sich nun aber andererseits nicht leugnen, daß die Einzeluntersuchungen in mancher Hinsicht einen nicht zu unterschätzenden Wert besitzen. So geben sie uns zunächst Aufschluß über die Gleichmäßigkeit unseres Bodens. Sie geben uns an,

wie groß die Schwankungen sind, welche durch den momentanen Düngezustand des Bodens physikalisch sowie chemisch bedingt werden.

Für die Verschiedenheit eines Bodens in chemischer Hinsicht liegen meines Wissens nur Untersuchungen Emmerlings (l. c.) vor, und auch diese sind nicht Einzeluntersuchungen, sondern Untersuchungen, welche für Mittelproben angestellt wurden, welche von einem in rechteckige Streifen von 40 Schritt Breite eingeteilten Felde von jedem einzelnen Streifen gebildet waren. Die Resultate dieser Mittel der einzelnen Parallelstreifen waren die folgenden:

Parallelstreifen No.	Anzahl der Einzelproben	Gehalt des Bodens in 100 000 Teilen Feinerde (< 2 mm) an			
		Stickstoff	Phosphorsäure	Kalk	Kali
1	8	166,7	84,4	101,2	39,8
2	9	169,9	75,9	91,5	41,6
3	6	161,7	63,5	87,9	37,2
4	7	178,6	56,6	88,3	38,4
5	7	180,2	49,3	88,7	37,2
6	10	178,7	42,3	96,5	34,3
Im Mittel		172,7	62,0	92,4	38,1
Wahrscheinliche Schwankung \pm		6,0	11,7	4,0	1,7
Dengl. in $\frac{0}{100}$ der gemessenen Größe \pm		3,5	18,8	4,3	4,5

Es ergibt sich aus den vorstehenden Zahlen, daß die Schwankungen in den Mischproben im Gehalt derselben an Pflanzennährsalzen außerordentlich groß sind. — Würden wir einem derartigen Boden pro Hektar etwa 100 kg Stickstoff, 130 kg Kali und 50 kg Phosphorsäure zuführen, wie dies den Gesetzen der Statik für eine Fruchtfolge 1. Kartoffeln, 2. Roggen, 3. Hafer entsprechen würde,¹⁾ so würden das bei einer Bodenmasse von 4500000 kg pro Hektar (vergl. S. 279) auf 100000 Teile zirka 2 Teile Stickstoff, 3 Teile Kali und 1 Teil Phosphorsäure sein; das sind Größen, welche vielleicht, abgesehen vom Kali, mithin ganz innerhalb der Fehler der Probeentnahme liegen. Eine solche Düngung läßt sich also nach der bislang üblichen Methode für die chemische Bodenuntersuchung nicht mehr in einem derartigen Boden nachweisen.

Nicht geringer sind die Schwankungen in der physikalischen Beschaffenheit eines Grundstückes. Ich fasse hierzu, um einen Vergleich mit diesen Emmerlingschen Zahlen zu ermöglichen, meine Beobachtungen

¹⁾ Alfred Mitscherlich, Die Schwankungen der landwirtschaftlichen Reinerträge; Zeitschr. f. d. ges. Staatswissenschaften, Ergheft. VIII, S. 69.

gleichfalls zu je 10 streifenweise zusammen. Es ergeben sich dann für 2 ha, von deren jedem die Krumentiefen und die Hygroskopizität bestimmt wurden, die folgenden Resultate:

Parallelstreifen No.	1. Hektar:				2. Hektar:			
	Krumentiefen cm		Hygroskopizität %		Krumentiefen cm		Hygroskopizität %	
	a	b	a	b	a	b	a	b
1	42,6	42,7	1,41	1,39	28,3	35,1	1,15	1,07
2	42,3	39,1	1,35	1,40	26,8	27,7	1,47	1,31
3	42,9	45,1	1,46	1,38	27,2	27,3	1,42	1,32
4	44,3	40,9	1,48	1,55	25,5	25,2	1,41	1,19
5	41,4	44,8	1,43	1,52	25,3	25,4	1,02	1,14
6	39,5	44,5	1,33	1,45	25,9	27,5	0,98	1,20
7	43,1	42,5	1,43	1,38	25,4	24,4	0,97	1,20
8	44,3	44,0	1,50	1,41	27,5	22,9	1,01	1,14
9	45,1	42,6	1,46	1,43	27,3	24,0	1,07	1,03
10	42,4	41,7	1,45	1,41	25,0	24,7	1,16	1,03
Mittel	42,8	42,8	1,43	1,43	26,4	26,4	1,17	1,16
$\pm r$	1,0	1,3	0,04	0,04	0,9	2,1	0,14	0,07
r in %	2,4	3,0	2,5	2,7	3,4	8,0	12,4	6,2

Die Zahlen zeigen zur Genüge, daß auch die physikalische Bodenbeschaffenheit eines Grundstückes den gleichen Schwankungen ausgesetzt ist. Das sind Schwankungen, welche durch die Art des Bodens, durch die Düngung sowie durch die Art der Bodenbearbeitung hervorgerufen werden und in der Praxis unvermeidlich sind. — Wie dies die wahrscheinlichen Schwankungen bei der Bestimmung der Hygroskopizität der Parallelstreifen bei dem 2. Hektar zeigen, wird sich auch physikalisch eine Stalldüngung oder eine Gründüngung in einem Boden schwer nachweisen lassen; denn nach unseren früheren Berechnungen wird die Hygroskopizität eines solchen Bodens durch eine mittlere Stalldüngung um ca. 7 % durch eine mittlere Gründüngung um ca. 4 % vergrößert. —

Ziehen sich Adern einer anderen Bodenart in unser sonst gleichartiges Grundstück hinein, so läßt sich dies auch durch die Einzeluntersuchung jeder der Erde entnommenen Bodenprobe exakt feststellen, und zwar um so genauer naturgemäß, je mehr Probeentnahmen und Untersuchungen pro Flächeneinheit ausgeführt werden. Um dies zu demonstrieren, habe ich auf einem ungleichen Ackerstücke eines ähnlichen Bodens 100 Proben in gleicher Weise wie zuvor (Fig. 36) entnommen und jede von diesen auf ihre Hygroskopizität hin untersucht. Ich gebe die Resultate

widerum so wieder, wie sie für die einzelnen benachbarten Probestellen gefunden wurden (vergl. Fig. 36).

Reihe:	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	0,90	1,09	1,23	1,08	1,05	1,04	1,22	1,51	1,33	1,07
2	0,96	2,62	2,27	1,66	1,33	1,32	1,25	1,12	1,14	1,03
3	1,31	2,06	2,03	1,73	1,27	1,21	1,17	1,13	1,20	1,15
4	1,78	2,07	1,89	1,64	0,84	1,11	1,22	1,23	1,08	1,26
5	1,03	0,89	1,21	1,00	0,75	1,00	1,07	1,05	1,13	1,08
6	0,97	0,78	0,95	0,90	0,99	0,89	1,07	1,07	1,13	1,06
7	1,00	0,84	0,94	0,88	0,94	1,10	1,15	0,98	0,86	1,05
8	0,95	0,88	0,87	1,09	0,95	1,23	1,23	0,97	0,91	1,01
9	0,94	1,01	0,90	0,96	1,70	1,47	1,26	0,93	0,73	0,80
10	0,87	0,86	0,89	0,97	1,54	1,64	1,42	1,50	0,78	0,76

Bilden wir aus diesen Beobachtungen wieder das Mittel und die wahrscheinliche Schwankung in der zuvor angegebenen Weise, so erhalten wir: $1,164 \pm 0,209$.

Jetzt zeigt uns die Fehlerwahrscheinlichkeitstabelle S. 312, daß die fünffache oder eine größere wahrscheinliche Schwankung nur in 1000 Fällen 0,7 mal vorkommen kann. Hieraus entnehmen wir, daß eine größere Schwankung uns eine *grobe* Abweichung von unserer Bodenart oder einen anderen Boden anzeigt. Die Hygroskopizität $1,164 + (5 \times 0,209)$, d. h. 2,21 wird nur zweimal überschritten, während unter $1,164 - (5 \times 0,209)$, d. i. unter 0,12, keine Bestimmung liegt. Wir schalten somit die beiden Beobachtungen 2,62 und 2,27 aus, bilden wieder das Mittel und wieder die wahrscheinliche Schwankung aus den nunmehr 98 Bestimmungen. Es ergibt sich hier: $1,138 + 0,184$. Jetzt liegen wieder außerhalb des Mittels plus der fünffachen wahrscheinlichen Schwankung $(1,138 + 0,920) = 2,058$ die Bestimmungen 2,06 und 2,07. Wir schalten diese nochmal aus und wiederholen nun das Verfahren so lange, bis keine Bestimmung mehr über dem Mittel plus der fünffachen wahrscheinlichen Schwankung liegt. Es fallen sodann 6 benachbarte Probestellen, welche 2,62 — 2,27 — 2,06 — 2,03 — 2,07 und 1,89 % Hygroskopizität ergeben haben, aus, welche anderen Boden und zwar besseren Boden haben müssen, und es zeigte sich in der Tat, daß an dieser Stelle in dem Sandboden ein Lehmlager war, wie man dies schon an der deutlich helleren Färbung leicht sehen konnte. Haben wir aber in der Tat nur an diesen Stellen wesentlich anderen Boden, während dieser sonst in den durch die Düngung und durch die Bearbeitung herbeigeführten Grenzen variiert, so müssen die anderen 94 Proben dem Gauß'schen Fehlergesetze folgen, d. h. es müssen sich alle ihre Differenzen vom

Mittel nach der Fehlerwahrscheinlichkeitstabelle verteilen lassen. Die Beweisführung hierfür mag die folgende Tabelle ergeben (vergl. die Tabelle auf S. 312).

Das Mittel \pm dem wahrscheinlichen Fehler der 94 übrigbleibenden Beobachtungen der Hygroskopizität betrug:

$$m \pm r = 1,101 \pm 0,152.$$

Verteilung der für die 94 gleichartigen Bodenproben gefundenen Differenzen ihrer Hygroskopizität vom Mittelwerte.

Unter	liegen der Berechnung nach	dem Befunde nach
0,5 · r	25	26
1,0 · r	47	50
1,5 · r	65	68
2,0 · r	77	78
2,5 · r	85	85
3,0 · r	90	88
3,5 · r	92	88
4,0 · r	93	92
4,5 · r	94	94
5,0 · r	94	94

Man ersieht hieraus, daß die anderen 94 Beobachtungen rein zufällige Schwankungen aufweisen, daß somit also die sechs groben Differenzen mit Recht auszuschalten waren, weil bei ihnen keine zufällige Verschiedenheit eines und desselben Bodens, sondern ein anderer Boden vorlag.

Inwieweit man durch die Farbe oder durch das Gefühl die Gleichheit eines Bodens beurteilen kann, und ob diese Kriterien für praktische Zwecke ausreichend genau sind, muß weiteren Untersuchungen zur Beantwortung vorbehalten bleiben. Im Vorliegenden ist sonst eine Methode gegeben, mit der man die Gleichartigkeit eines Bodens in jeder Hinsicht objektiv festzustellen vermag.

Noch eine weitere praktisch interessante Frage läßt sich mit Hilfe dieser Untersuchung der Einzelproben und der Fehlerwahrscheinlichkeitsrechnung untersuchen, nämlich die, inwieweit ein Grundstück durch die Bearbeitung gleichartig gemacht wird. Auch hierfür ein Beispiel.

Ich entnahm einem Grundstück im Rechtecksverband-Abstände von je zehnmal zwanzig Metern 26 Proben, und zwar sowohl aus der Krumschicht in 0—30 cm Tiefe als auch aus dem Untergrunde in 60—90 cm Tiefe, und untersuchte jede entnommene Probe für sich auf ihre Hygroskopizität. Ich will die einzelnen Resultate hier in Form eines Bruches wiedergeben. Der Zähler bedeutet die Hygroskopizität der Krume, der Nenner die des zugehörigen Untergrundes. Das Ackerstück, auf dem die Proben entnommen wurden, war mir von dem Praktiker, der dasselbe über

11 Jahre hindurch bestellt hatte, als „sehr gleichmäÙig“ bezeichnet worden (vergl. S. 315):

<i>Hygroskopizitätsbestimmungen</i>					
<i>der Ackerkrume</i>					
<i>des Untergrundes</i>					
<i>eines Ackergrundstückes.</i>					
1,27	1,29	1,36	1,42	1,54	1,33
1,34	1,74	1,74	3,14	2,15	1,33
1,11	1,40	1,35	1,45	1,46	
0,79	3,54	3,10	3,63	1,91	
1,45	1,53	1,45	1,30	1,70	
1,82	2,56	4,69	1,76	2,16	
1,48	1,54	1,54	1,22	1,54	
2,53	3,56	2,17	0,89	1,77	
1,43	1,42	1,50	1,18	1,55	
0,84	3,04	2,84	2,31	3,66	

Es fällt bei der ersten Übersicht über die vorstehenden Zahlen auf, wie gleichartig die Ackerkrume im Verhältnis zum Untergrund ist. Dies läÙt sich übersichtlicher zum Ausdruck bringen durch das Mittel (m) und die wahrscheinliche Schwankung (r); es berechnen sich aus den vorstehenden Zahlen die folgenden GröÙen:

1. für die Ackerkrume $m \pm r = 1,416 \pm 0,088$,
2. für den Untergrund $m \pm r = 2,343 \pm 0,705$,

während so bei der Ackerkrume die wahrscheinliche Schwankung nur 6,2 % der mittleren Beobachtung betrug, machte diese bei dem Untergrund 30,1 % des Mittelwertes aus.

Nur in drei Fällen, wo Sandadern sich im Untergrunde befanden, hat dieser eine geringere Hygroskopizität als die Krume; in fast allen Fällen ist die Hygroskopizität der Krume geringer. Ob dies auf eine zufällige Übersandung oder lediglich auf den Einfluss der Kulturarbeit des Menschen und die hierdurch günstigeren Bedingungen für die Verwitterung des Bodens zurückzuführen ist, muß dahingestellt bleiben. Nach der Lage des Grundstückes ist eher das letztere anzunehmen.

Durch tiefere Bodenkultur würde man gemäß unseren früheren Ausführungen einen solchen Boden verbessern können. Dabei ist es jedoch, wie wohl in allen Fällen, anzuraten, nicht zu plötzlich, nicht zu schnell vorzugehen, um den Boden nicht zu ungleichartig zu gestalten und ihn nach Möglichkeit auch in sich gut zu mischen. Es empfiehlt sich, nicht sogleich tiefer zu pflügen, sondern tief zu grubbern, ohne den Boden umzuwerfen, und dann allmählich von Jahr zu Jahr eine etwas tiefere Pflugfurche zu nehmen.

Es dürften sich noch eine Reihe anderer Fragen an diese Einzeluntersuchungen anschließen, denen jedoch im allgemeinen mehr theoretischer als praktischer Wert zukommen dürfte. Es würde hier zu weit führen, auch auf diese näher einzugehen.

§ 66. Die zum Aufbau einer wissenschaftlichen Bodenklassifikation gangbaren Wege.

Mancher Leser, welcher vordem die Schwierigkeiten der Bodenuntersuchungen, die Mannigfaltigkeit der auf den Pflanzenwuchs einwirkenden Faktoren nicht gekannt hat, wird vielleicht in diesem letzten Kapitel schon Vorschläge für eine exakte Bodenklassifikation erwartet haben. Nach den bislang vorliegenden Versuchsergebnissen sind wir aber durchaus nicht in der Lage, schon jetzt eine Richtschnur hierfür zu geben. Wohl aber läßt sich über die möglichen Wege sprechen, welche zu einer derartigen exakten Feststellung des pflanzenphysiologischen Bodenwertes führen können. Meines Erachtens gibt es deren zwei: einmal den der Anstellung von exakten Vegetationsversuchen und ferner den der Statistik. Der erstere von diesen führt besser zum Ziele, gibt sicherere Resultate und kann uns noch weitere Aufschlüsse über die einzelnen Wachstumsbedingungen geben. Der letztere hingegen läßt uns schneller, aber um so ungenauere Resultate erhalten.

Bei der Anstellung von Vegetationsversuchen ist es möglich, viele sehr verschiedene Bodenarten genau gleich zu kultivieren und so von den Vegetationsfaktoren nur einen, z. B. die physikalischen Bodeneigenschaften, zu variieren. Da diese Versuche alle nebeneinander auf einem Felde angestellt werden können, so sind zunächst alle klimatischen Faktoren, welche auf die Pflanzenerträge einen Einfluß ausüben, in einem Jahre für alle Bodenarten dieselben. Die Bodenarten selbst müssen natürlich von dem umliegenden Boden physikalisch isoliert werden, d. h. es darf das Hohlraumvolumen des Versuchsbodens nicht derartig in Verbindung stehen mit dem Hohlraumvolumen des benachbarten Bodens, daß hierdurch die Feuchtigkeitsverhältnisse des Versuchsbodens beeinträchtigt werden. Ich halte es deshalb für zweckmäßig, den Versuchsboden in glasierte Tonrohre, welche senkrecht im Felde bis zu ihrem Rande eingegraben sind, einzufüllen. Der Untergrundwasserstand darf zunächst keinen Einfluß auf die Pflanzenerträge ausüben. Er muß sehr tief liegen, und empfiehlt es sich, um ein kapillares Ansteigen des Wassers in den Versuchsboden zu verhindern, zunächst die glasierten Tonrohre mit scharfem Sande ca. 50 cm hoch aufzufüllen, da die höchste Steighöhe des Wassers in diesen Sandarten nur 20—30 cm beträgt. Auf diesen Sand, welcher gleichzeitig einen für das überschüssige Tagewasser gut durchlässigen Untergrund abgibt, ist dann der Versuchsboden in einer Schicht von einer solchen Mächtigkeit aufzufüllen, daß die Pflanzenwurzeln in diesem in keiner Weise beengt

sind. Ich nahm für Versuche, die ich mit Roggen ausführte, eine Schichthöhe von 50—60 cm; doch dürfte es vielleicht, obwohl ich nicht beobachten konnte, daß die Wurzeln der Roggenpflanzen in den Untergrundsand eindringen, zweckmäßiger sein, noch eine tiefere Krumenschicht zu wählen. Der Versuchsboden selbst muß auf das sorgfältigste bearbeitet werden. Da die Versuchspartellen entsprechend dem Lumen der glasierten Röhre stets verhältnismäßig klein sein werden, so kann man eine gleichmäßige und gute Bodenbearbeitung dadurch erzielen, daß man den ganzen Versuchsboden durch ein Sieb von 1 cm weiten Maschen absiebt. Man darf so annehmen, daß das Optimum der Bodenbearbeitung erreicht wird, und vermag auf diese Weise alle Bodenarten sicher gleichmäßig zu behandeln.

Die chemische Düngung ist bei allen Bodenarten in wasserlöslicher Form und in solchen Mengen zu geben, daß sie zur Erzielung einer Maximalernte ausreicht; damit sind die chemischen Bodeneigenschaften bei den Versuchen im Maximum vorhanden. Um schädliche Wirkung der bei unseren künstlichen Düngemitteln vorhandenen Beimengungen auszuschließen, sind reine Düngesalze (etwa primäres phosphorsaures Kali und salpetersaures Ammoniak) zu geben. Die Düngung geschieht kurz vor der Aussaat. Man entfernt hierzu zweckmäßig die oberste 5 cm hohe Bodenschicht und streut den Dünger möglichst gleichmäßig, eventuell durch ein Sieb über die ganze Fläche aus. Damit das möglich ist, muß das Düngesalz zuvor möglichst fein zerrieben werden. Der Dünger wird auf einmal gegeben. Es ist die Aufgabe der physikalischen Bodeneigenschaften, denselben den Pflanzen während ihrer Vegetationszeit stets in zweckentsprechender Form und Menge zur Verfügung zu stellen. Nach der Düngung wird die abgehobene Bodenschicht wieder leicht darübergedeckt.

Es folgt dann die Aussaat resp. Pflanzung. Hierzu sind nur beste, ausgesuchte Saatkörner resp. Pflanzen zu nehmen. Die Pflanzen müssen, da die Versuchsflächen klein sind, einen möglichst gut gewählten und gleichmäßigen Abstand voneinander haben. Es empfiehlt sich der Quadratverband, weil sich an diesem später am besten kontrollieren läßt, ob eine Pflanze aufgegangen ist oder fehlt. Bei Roggen wählte ich je 5 cm Abstand. Die Körner wurden bei diesem ca. 1,5—2 cm tief ausgelegt. — Körner, die nicht aufgegangen sind, oder Pflanzen, die bald (ca. 14 Tage) nach der Pflanzung ausgehen, sind durch andere zu ersetzen, da die Individualität der Pflanze bei den geringen Pflanzenmengen möglichst gleichgestellt und der Pflanzenbestand möglichst vollständig sein muß. Im übrigen entscheidet jetzt die Güte der Ackerkrume über die Erträge. — Doch nicht allein, auch das Klima während der Vegetationszeit hat einen erheblichen Einfluß; doch, da dieser Einfluß auf alle Bodenarten der gleiche ist, so kann man doch die Erträge verschiedener Bodenarten, die man in ein und demselben Jahre erzielt, miteinander vergleichen.

Beobachtet man ferner die unter gleichen Bedingungen auf ein und demselben Boden in verschiedenen Jahren erzielten Erträge, so kann man auf diese Weise vielleicht auch auf den Einfluß der einzelnen klimatischen Vegetationsfaktoren schließen.

Jedenfalls müssen bei derartigen Versuchen die meteorologischen Momente stets genau mitbestimmt werden, so vornehmlich die Niederschlags- und Verdunstungsmengen und die Wärmemengen.

Die Licht- und Luftmengen sind bei derartigen Versuchen den gewöhnlichen Verhältnissen anzupassen. Das geschieht, indem das ganze Land um die Versuche herum mit derselben Kulturpflanze angebaut wird, so daß die Versuchspartellen mitten im Felde stehen und sich sonst in nichts außer in dem stets sichtbar bleibenden Rande der glasierten Tonröhren von der Umgebung abheben.¹⁾

Haben wir diese Momente nach jahrelangen Versuchen, die auf verschiedene Weise in möglichst verschiedenem Klima gleichzeitig angestellt sind, für eine Pflanzenart feststellen können, so variieren wir zunächst mit der Pflanzenart. Nach dem Vorhergesagten werden wir auch hier eine analoge Abhängigkeit, wenigstens sofern wir mit landwirtschaftlichen Kulturpflanzen arbeiten, finden. Alsdann müssen wir weiter variieren. Wir setzen den Boden konstant und variieren mit der Art des Untergrundes, dann mit der Tiefe der Krume, dann mit dem Untergrundwasserstand usw. So endlich kann es uns nach jahrzehntelanger, mühsamer Arbeit möglich werden, den Einfluß der einzelnen Vegetationsfaktoren auf die Erträge kennen zu lernen und dann auch auf dieser Erkenntnis eine exakte wissenschaftliche Bodenklassifikation aufzubauen. — Wir sehen, wir sind noch weit von dem Ziele entfernt, welches so gern jeder Theoretiker und Praktiker im Augenblick erreichen möchte, und damit rechtfertige ich mich, wenn ich dem Land- und Forstwirt hier keine Vorschläge zu einer Bodenklassifikation zu machen vermag.

Bei allen Vegetationsversuchen sind, trotzdem wir nach menschlichem Ermessen alle Faktoren gleich gestalten, doch so viele Fehler möglich, daß es, wenn man überhaupt zu brauchbaren Resultaten bei denselben gelangen will, unumgänglich nötig ist, möglichst zahlreiche gleichartige Parallelversuche anzustellen, und zwar nach Möglichkeit meines Erachtens nicht unter acht. Der Wert der Resultate derselben ist sodann aus der Größe der aus den Einzelbestimmungen ermittelten wahrscheinlichen Schwankung zu ermessen,²⁾ welche man in der in § 64, S. 310 angegebenen Weise und noch genauer nach der Simonyschen Methode findet.

¹⁾ Alfred Mitscherlich, Landwirtschaftliche Vegetationsversuche; Landwirtschaftl. Jahrbücher 1903, S. 773 u. f.

²⁾ Alfred Mitscherlich, Die landwirtschaftlichen Vegetationsversuche und die Verarbeitung der Resultate derselben; Landw. Vers.-Stat. 1904, S. 285 u. f.

Das zweite Verfahren, uns über den Wert eines Bodens Rechenschaft abzulegen, ist das, daß man die Erträge feststellt, welche ein Boden, dessen physikalische Beschaffenheit, dessen Untergrundverhältnisse etc. man genau kennt, bei bester Bodenbearbeitung und bei voller künstlicher Düngung unter bekannten klimatischen Verhältnissen zu geben vermag.

Wir haben hier den Vorteil, große Grundstücke zu den Versuchsergebnissen heranziehen zu können; somit fällt der Versuchsfehler, welcher durch die Individualität der einzelnen Pflanze bedingt wird, weg. Dagegen sind die Bodenverhältnisse nicht so gleichartig, die Bodenbearbeitung und die Düngung sowie die Aussaat lassen sich nicht so exakt durchführen. Man wird hier einwenden, daß das aber nirgends in der Praxis der Fall sein wird, und daß die hierdurch bedingten Fehler uns überall in der Praxis entgegnetreten; warum sollen wir also genauere Resultate erzielen? Der Einwand ist berechtigt. Wir nehmen also auch hier an, daß wir die chemischen Nährstoffe im Maximum geben, um diesen Faktor zunächst auszuschalten. Wir nehmen an, daß wir von allen Feldern die Resultate zusammengestellt hätten und somit jetzt vor der Frage stehen, wie das gesammelte Material zusammenzufassen und zu verarbeiten ist. Wir ordnen es zunächst nach der Bodenart, dann in der einzelnen Bodenart nach der Tiefe der Krume, dann bei derselben Bodenart und derselben Krumentiefe nach den Grundwasserverhältnissen und jetzt bei gleicher Bodenart, Krumentiefe und Grundwasserstand nach der Art des Untergrundes und schließlich so weiter nach den einzelnen klimatischen Faktoren, die auf jedem der Felder, von dem wir die Ertragsergebnisse bearbeiten, festgestellt werden mußten usw. — Und bei alledem gibt es alle Übergänge! Man sieht, wie groß diese Arbeit ist, wenn sie zu Resultaten von irgend welchem Werte führen soll! Sie kann nur dann gelingen, wenn ein außerordentlich großes Beobachtungsmaterial vorliegt, und wird auch selbst dann, da uns der Einfluß der einzelnen Vegetationsfaktoren von vornherein nicht bekannt ist, und wir nicht wissen, wie wir z. B. die Witterungsfaktoren zusammenfassen können, nur zu angenäherten Resultaten führen. Dazu kommt der Umstand, daß bei einem derartig großen Beobachtungsmaterial die Individualität des einzelnen Beobachters, welcher z. B. die Art der Bestellung, die Düngung usw. zu besorgen hat, nicht auszuschalten ist. — So werden diesen Resultaten viel größere Fehler anhaften, so daß es überhaupt fraglich erscheinen muß, ob man aus denselben irgend welche sicheren Schlüsse auf den Einfluß eines Vegetationsfaktors auf die Erträge zu ziehen vermag.

Dennoch ist diese statistische Methode die einzig anwendbare da, wo unsere Kulturpflanzen viele Jahre hindurch ein Grundstück beanspruchen, ohne daß der Boden inzwischen bearbeitet oder gedüngt wird, wie dies insonderheit bei unseren Forstkulturen der Fall ist. Hier richten

sich die Erträge nach der Witterung vieler Jahre und man kann so mit einem mittleren lokalen Klima rechnen, ohne großes Gewicht auf die jährlichen Schwankungen in der Witterung zu legen. Das ist wesentlich, denn derartige Vegetationsversuche, wie die zuvor beschriebenen, lassen sich mit unseren Forstgewächsen nicht ausführen, da wir einmal nicht ein so großes Bodenquantum, wie es diese gebrauchen, physikalisch isolieren können, wie wir es zuvor beschrieben haben, und da ferner derartige Versuche viel zu langwierig wären, um von einem Beobachter ausgeführt zu werden. — Im Forst werden wir also die statistische Methode zur Ausarbeitung einer Bodenklassifikation anzuwenden haben. Diese gestaltet sich hier auch dadurch noch einfacher, als nur die physikalische und die chemische Beschaffenheit des *Gesamt*bodens nächst dem Untergrundwasserstande und den Witterungsverhältnissen berücksichtigt zu werden braucht, wohingegen von der Untersuchung einer Krumenschicht und von der Feststellung der Tiefe dieser Krumenschicht vielfach ganz abgesehen werden kann. — Zu derartigen Bestimmungen dürfen natürlich aber nur Bestände herangezogen werden, welche während ihrer Vegetation durch keine Zufälligkeiten, wie Schnee, Wind usw. oder Insekten u. a. m., gelitten haben und bei denen auch die Zwischennutzung (die Erträge der Durchforstungen usw.) bekannt sind.

Sind diese beiden Wege, der eine für die Bonitierung des Ackerlandes, der andere für die des Forstgeländes, meines Erachtens gangbar, so erfordern sie doch jeder für sich noch sehr viel mühsame Vorarbeiten. Jede Mitarbeit auf dem bislang leider so stiefmütterlich behandelten Gebiete muß daher mit Freude begrüßt werden.

Bei der Besprechung der Bodenklassifikation und der hierfür maßgebenden Faktoren habe ich von der schwereren oder leichteren Bearbeitbarkeit des Bodens absichtlich ganz abgesehen, da dies, wie ich das eingangs erwähnte, ein Moment ist, welches die Bodentaxation, nicht die Bodenklassifikation zu berücksichtigen hat. Läßt sich ein Boden schwerer bearbeiten, so muß man mehr Arbeitskraft auf ihn verwenden, hat das Grundstück u. a. viel spitze Winkel, so ist auch mehr Arbeitskraft erforderlich, ist seine Entfernung vom Wirtschaftshofe eine größere als die eines anderen Grundstückes, so ist dasselbe der Fall; es sind dies alles Momente, welche auf die Produktionskosten einen Einfluß ausüben, nicht aber auf den Rohertrag. Will man hier eines dieser Momente berücksichtigen, so muß man es mit allen tun, dies läßt sich aber nur in jedem einzelnen Falle (bei der Bodentaxation) ausführen. Allgemein ist es nicht durchführbar, und somit kann es für die Bodenklassifikation, welche allgemein sein soll, nicht in Betracht kommen. Abgesehen davon, läßt es sich aber mit dem für die Pflanzenproduktion ermittelten Bodenwert in keiner Weise vereinigen, da selbst bei gleich bleibender Arbeits-

zeit die Arbeitslöhne in den verschiedenen Gegenden variieren, mithin auch dann diese vom Rohertrag abzuziehenden Arbeitskosten schwanken müssen und keinen allgemeinen Wert haben, und da ferner, um diesen Abzug überhaupt zu ermöglichen, erst die mittleren Erträge eines Bodens mit dem mittleren Marktpreis, einer wiederum in verschiedenen Gegenden sehr schwankenden Größe, multipliziert werden müssen.

Da wir in jedem Fall, ob ein Boden leichter oder schwerer zu bearbeiten ist, annehmen müssen, daß der Boden stets gleich gut bearbeitet wird, so bestehen auch keine direkten Beziehungen zwischen der Art der Bodenbearbeitbarkeit und dem Bodenertrag.

Fassen wir zum Schluß noch einmal das, was wir von einer Bodenklassifikation verlangen, zusammen, so dürfen wir hier den folgenden Satz aufstellen:

„Eine Bodenklassifikation soll uns Aufschluß geben über die von einem Grundstück zu erwartenden Erträge.“

Damit ist nicht gesagt, daß diese Erträge jetzt bei der momentanen Bewirtschaftung überall erreicht werden, sondern es ist damit gesagt, daß sie unter mittleren lokalen Witterungsverhältnissen bei günstigster Bodenbearbeitung und günstigster Düngung, sowie bei bestem Saatmaterial erreicht werden können.

Ist so eine derartige *allgemeine* Bodenklassifikation ausgearbeitet, so vermag sie mithin ihrerseits dem Praktiker passende Winke zu geben für die Bearbeitung und Düngung des Bodens, für die Art der Kulturpflanze, welche er mit Erfolg anbauen kann, und für vieles andere mehr; das ist das Ziel, der Erfolg, den diese jahrelange Arbeit haben soll. Daß es auch wünschenswert ist, eine Vorstellung von dem wirtschaftlichen Werte eines Grundstückes zu haben, und daß man diese auch auf diesem Wege erhalten muß, ist hiergegen gering zu veranschlagen, mag es auch für die Bodentaxation von noch so hoher Bedeutung sein.

§ 67. Frühere Versuche zur Erzielung einer Bodenklassifikation.

Das Bestreben, eine brauchbare Bodenklassifikation für die Abschätzung des Bodenwertes zu schaffen, geht wohl weit über 100 Jahre zurück und hat auch in neuerer Zeit wieder verschiedene Forscher beschäftigt. Es ist deshalb eine derartige Bodenkunde nicht abzuschließen, ohne auf die hierbei vorherrschenden Gesichtspunkte einzugehen und zu zeigen, in welchem Zusammenhange diese zu den zuvor vom Verfasser aufgestellten Normen stehen.

I. Die mechanisch-chemische Bodenklassifikation des Praktikers.

Schon wiederholt habe ich mich im vorliegenden Buche üblicher Bodenbezeichnungen bedient, mit welchen der Praktiker seine Bodenarten

zu charakterisieren pflegt. Ich habe auch bei Besprechung der einzelnen physikalischen Bodeneigenschaften auf die Hauptunterschiede der hauptsächlichsten Bodenbestandteile hingewiesen. Nach den im vorliegenden Buche entwickelten Anschauungen *wird der Boden nun nicht in diese seine Bestandteile zerlegt, sondern als Ganzes physikalisch untersucht*; dennoch halte ich es für erforderlich, hier zunächst noch auf die von dem Praktiker unterschiedenen Bodenarten und auf ihre besonderen Eigenschaften näher einzugehen, weil das die allgemein übliche Bezeichnung der verschiedenen Bodenarten geworden ist.

Die Hauptbodengemengteile, welche den verschiedenen Bodenarten den Namen geben, sind: Ton, Lehm, Sand, Kalk und Humus. Nach dem größeren Gehalte eines Bodens an einem von diesen Bestandteilen unterscheidet nun der Praktiker nach dem Vorgange Thaers¹⁾ folgende Bodenklassen:

(Siehe die Tabelle auf Seite 330—332.)

Diese ursprünglich von Thaer aufgestellte Bodenklassifikation hat in den verschiedenen Gegenden Deutschlands mannigfaltige Abweichungen erfahren; so unterscheidet man insonderheit in vielen Gegenden Lehm- und Tonboden nicht mehr nach ihrem Tongehalt, sondern nach ihrer Farbe. Jeder viel Tonsubstanzen enthaltende Boden von grauer Farbe wird dort als „Tonboden“, jeder von gelber bis rötlicher Farbe, d. h. jeder eisen-schüssige als „Lehmboden“ bezeichnet. Da mir diese Ausdrucksweise von der Praxis her gebräuchlich war, so habe ich dieselbe auch in meine Arbeiten mit hinübergenommen. — Ich will nun an der Hand der nachstehenden Bodenklassen zur Charakterisierung der einzelnen Bodenarten übergehen.

1. Klasse: Tonboden.

Je nach dem Gehalt des Bodens an Ton treten mehr oder weniger die ungünstigen Eigenschaften dieses Bodenbestandteiles hervor. Wir sahen, dafs die Tonsubstanzen die größte äußere Oberfläche (§ 11 e) und mithin die feinsten Teilchen bilden. Wir finden so beim Ton in der Volumeneinheit die größte Anzahl gegenseitiger Berührungspunkte, deshalb haften die einzelnen Tonteilchen sehr fest aneinander; je mehr Ton so ein Boden enthält, um so bindiger ist derselbe. Da die Tonteilchen sehr fein sind, so wird das Hohlraumvolumen auch dementsprechend fein sein. Es dringt das Wasser kaum noch in die Hohlräume ein, denn die Reibung und die engen sich in den Hohlräumen bildenden Menisken sind stärker als die Adhäsion von Ton zu Wasser. So kommt in strengem Ton keine Steighöhe des Wassers zustande, ja, selbst wenn Wasser auf eine Ton-

¹⁾ Albrecht Thaer, Versuch einer Ausmittlung des Reinertrages der produktiven Grundstücke. Berlin. Realschulbuchhandlung, 1813.

schicht aufgelagert wird, vermag auch ein überstehender hoher Druck das Wasser nicht in das Hohlraumvolumen des Bodens, in den Ton hineinzupressen. Ton verschleißt sich gegen Wasser, er ist undurchlässig für Wasser. — Jede Beimischung von Sand, von Kalk oder Humus verringert diese schlechten Eigenschaften des Tones, doch treten dieselben fast immer noch recht lästig auf. — Ist ein Tonboden benetzt und trocknet er alsdann unter dem Einfluß der Sonne etc. aus, so ziehen sich die festen Teilchen, zwischen die das Wasser eingedrungen war, wieder zusammen. Sie ziehen sich von den Stellen, wo sie einander nicht direkt berührten, weg, und es bilden sich Risse und Spalten. Durch diese Erscheinung können oft Pflanzen beschädigt werden und zugrunde gehen, sofern ihre Wurzeln hierbei gezerzt oder zerrissen werden. So erscheint uns der Tonboden in jeder Weise als eine der unfruchtbarsten Bodenarten, und zwar um so unfruchtbarer, je strenger derselbe ist, und doch sollte er nach der Größe seiner Bodenoberfläche zu den fruchtbarsten Bodenarten gehören! Der scheinbare Widerspruch liegt in der Bodenbearbeitung. Können wir einen Tonboden, wenn er auch noch so streng ist, unter Zuhilfenahme seiner Eigenschaft des „Aufreißens“ in feinste Krümelstruktur überführen, so gehört er zu den fruchtbarsten Bodenarten, die wir überhaupt besitzen. Dann kann das Wasser frei in die Tiefe abziehen, dann ist ein weiteres Aufreißen und ein Zerreißen der Pflanzenwurzel nicht mehr zu befürchten. Aber kein Boden erfordert so viel Arbeit und insonderheit so viel zur richtigen Zeit ausgeführte Arbeit, als der strenge Tonboden. Dafür liefert er aber dann auch mit die höchsten Erträge.

Die Tonsubstanzen, unter denen wir in der Regel alle feinsten abschlämmbaren Teilchen, die nicht Sand, Kalk oder Humus sind, verstehen, sind sehr verschieden, und selbst wenn sie chemisch identisch sein sollten — was uns vom pflanzenphysiologischen Standpunkte aus gar nicht interessiert — so können sie trotzdem physikalisch in der Feinheit ihrer Bestandteile, also auch in der Größe der Oberfläche sehr verschieden sein. Einige Beispiele mögen das zeigen.¹⁾ 1 g trockene Tonsubstanz ergab beim Benetzen mit Wasser folgende Benetzungswärme (eine Größe, die, wie wir früher sahen, der Bodenoberfläche proportional ist):

Reiner Kaolinton	1,79 cal.
Aus Tonboden ausgeschlammter grauer Ton	3,11 „
Aus Lehmboden ausgeschlammter gelber Ton	4,80 „
Aus vulkanischem Tonboden aus Java ausgeschlammter grauer Ton	15,51 „

(Fortsetzung des Textes siehe Seite 333.)

¹⁾ Alfred Mitscherlich, Beurteilung der physikalischen Eigenschaften des Ackerbodens mit Hilfe seiner Benetzungswärme; Journ. f. Landwirtschaft 1898, S. 265.

Benennung der Bodenarten:			Bestandteile in 100 Teilen			
Klassen	Ordnungen	Arten	Ton	Kalk	Humus	Sand
I. Tonboden:	kalkloser	armer	über 50	0	0—0,5	das übrige
		vermögender reicher	" 50	0	0,5—1,5 1,5—5,0	" "
	kalkhaltiger	armer	" 50	0,5—5,0	0—0,5	" "
		vermögender reicher	" 50	0,5—5,0 0,5—5,0	0,5—1,5 1,5—5,0	" "
II. Lehmboden:	kalkloser	armer	30—50	0	0—0,5	das übrige
		vermögender reicher	30—50	0	0,5—1,5 1,5—5,0	" "
	kalkhaltiger	armer	30—50	0,5—5,0	0—0,5	" "
		vermögender reicher	30—50	0,5—5,0 0,5—5,0	0,5—1,5 1,5—5,0	" "
III. Sandiger Lehm- boden:	kalkloser	armer	20—30	0	0—0,5	das übrige
		vermögender reicher	20—30	0	0,5—1,5 1,5—5,0	" "
	kalkhaltiger	armer	20—30	0,5—5,0	0—0,5	" "
		vermögender reicher	20—30	0,5—5,0 0,5—5,0	0,5—1,5 1,5—5,0	" "
IV. Lehmiger Sand- boden:	kalkloser	armer	10—20	0	0—0,5	das übrige
		vermögender reicher	10—20	0	0,5—1,5 1,5—5,0	" "
			10—20	0	0,5—1,5 1,5—5,0	" "

IV. Lehmniger Sand- boden:	kalkhaltiger	armer vermögender reicher	10-20 10-20 10-20	0,5-5,0 0,5-5,0 0,5-5,0	0-0,5 0,5-1,5 1,5-5,0	das übrige " " " "
V. Sandboden:	kalkloser	armer vermögender reicher	0-10 0-10 0-10	0 0 0	0-0,5 0,5-1,5 1,5-5,0	das übrige " " " "
	kalkhaltiger	armer vermögender reicher	0-10 0-10 0-10	0,5-5,0 0,5-5,0 0,5-5,0	0-0,5 0,5-1,5 1,5-5,0	" " " " " "
	toniger	armer vermögender reicher	über 50 " 50 " 50	5-20 5-20 5-20	0-0,5 0,5-1,5 1,5-5,0	das übrige " " " "
VI. Mergelboden:	lehmiger	armer vermögender reicher	30-50 30-50 30-50	5-20 5-20 5-20	0-0,5 0,5-1,5 1,5-5,0	" " " " " "
	sandiger Lehm- mergelboden	armer vermögender reicher	20-30 20-30 20-30	5-20 5-20 5-20	0-0,5 0,5-1,5 1,5-5,0	" " " " " "
		lehmiger Sand- mergelboden	armer vermögender reicher	10-20 10-20 10-20	5-20 5-20 5-20	0-0,5 0,5-1,5 1,5-5,0
	humoser	toniger lehmiger sandiger	über 50 30-50 20-30	5-20 5-20 5-20	über 5,0 " 5,0 " 5,0	" " " " " "

Benennung der Bodenarten:		Bestandteile in 100 Teilen					
Klassen	Ordnungen	Arten	Ton	Kalk	Humus	Sand	
VII. Kalkboden:	toniger	armer	über 50	über 20	0—0,5	das übrige	
		vermögender reicher	50 50	20 20	0,5—1,5 1,5—5,0	" "	
	lehmiger	armer	30—50	20	0—0,5	"	
		vermögender reicher	30—50 30—50	20 20	0,5—1,5 1,5—5,0	" "	
	sandiger Lehm- kalkboden	armer	20—30	20	0—0,5	"	
		vermögender reicher	20—30 20—30	20 20	0,5—1,5 1,5—5,0	" "	
	lehmiger Sand- kalkboden	armer	10—20	10—20	0—0,5	"	
		vermögender reicher	10—20 10—20	20 20	0,5—1,5 1,5—5,0	" "	
	humoser	toniger	über 50	über 50	20	über 5,0	"
		lehmiger sandiger	über 50 30—50	30—50 20—30	20 20	5,0 5,0	" "
VIII. Humusboden enthält größ- tentheils	auflösliehen milden Humus	toniger	über 50	} mit oder } ohne Kalk	5,0	das übrige	
		lehmiger sandiger	30—50 20—30		5,0 5,0		
	unauflösliehen verkohlten od. sauren Humus	toniger	über 50	} mit oder } ohne Kalk	5,0	"	
		lehmiger sandiger	30—50 20—30		5,0 5,0	" "	
	unauflösliehen faserige Pflanzenstoffe	Torfboden	mit oder ohne Kalk	} mit oder ohne Kalk {	5,0	"	
		Moorboden			5,0	"	

Wir dürften wohl nirgends in Deutschland derartig strengen Tonboden besitzen, wie es der Javaner ist, der nicht weniger als 92% dieser strengen Tonsubstanz enthält.

Einzig und allein dem Umstande, daß der Boden zu bewässern ist, ist es zu danken, daß er überhaupt bearbeitungsfähig ist. So läßt er sich aber bearbeiten und liefert nach den persönlichen Mitteilungen, welche der Verfasser dem Vorstande der Versuchsstation in Pasoeroeau, Herrn J. C. Kobus, verdankt, außerordentlich hohe Erträge. Da die Kulturart dieses extremen Bodens allgemeines Interesse beanspruchen darf, sei sie hier mitgeteilt.

Die Fruchtfolge, welche auf diesem strengen Tonboden in Ost-Java innegehalten wird, ist:

1. Zuckerrohr,
2. Mais,
3. Reis,
4. Erdnufs,
5. Reis,
6. Zuckerrohr.

Zuweilen wird auch zwischen Erdnufs und Reis noch ein Jahr Maisanbau eingeschoben, so daß dann die Fruchtfolge siebenfeldrig ist.

Zur Reiskultur wird der Boden $4\frac{1}{2}$ Monate lang unter Wasser ge-

setzt; der Boden wird sodann oberflächlich gepflügt und geeget. Beim Mais werden die Pflanzlöcher mit einem spitzen Stock gemacht und mit sehr wenig Wasser begossen. Bisweilen wird hier der Boden auch oberflächlich (10—15 cm), ebenso wie zu der Erdnufs gepflügt. Bei der Zuckerrohrkultur wird der Boden durch ein System von Gräben trocken gelegt, dann werden Pflanzfurchen (Fig. 38 a) gegraben, 1 Fuß tief und 1—2 Fuß breit. Der Boden dieser Furchen wird auf den dazwischen liegenden Boden (2—3 Fuß breit) aufgestapelt und sodann der Einwirkung der Atmosphäre, hauptsächlich der tropischen Sonne überlassen. Hier trocknet er aus, bekommt viele feine Risse und Sprünge und geht so, da er locker liegt, in Krümelstruktur über! Es ist hierzu notwendig, daß der Boden sehr stark

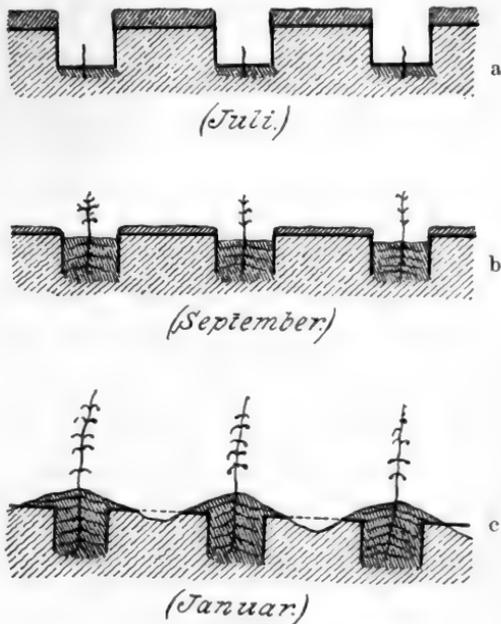


Fig. 38. Zuckerrohrkultur auf strengstem Tonboden.

ausgetrocknet. Der Boden der Furchen wird noch 10 cm tief gelockert und hierin werden im Juli die Zuckerstecklinge gepflanzt (Fig. 38 a). Die Zuckerpflanzen werden dann allmählich mit dem Boden zwischen den Furchen angedeutet, so daß die Furchen nach und nach gefüllt werden (Fig. 38 b) und schließlich (Fig. 38 c) als Hügel hervorragen. Durch diese Kultur finden fortwährend neue Stengelknoten Gelegenheit, ihre Wurzeln zu entwickeln. — Die von einem Stengelknoten ausgehenden Wurzeln vermögen nicht in den festen, unbearbeiteten Boden einzudringen. Um nun aber doch den notwendigen Boden der Pflanze zur Ausbildung ihres Wurzelsystems zur Verfügung stellen zu können und das Wurzelsystem selbst nach Möglichkeit zu verzweigen, geschieht die langsame Anhäufelung mit dem in Krümelstruktur übergeführten Boden. Dieser letztere muß stets trocken sein; wird er naß aufgefüllt, so verkleistert der Boden, die Krümelstruktur geht verloren und das Pflanzenwachstum ist vorbei.

Mitten im Regenmonsum ist das Wachstum des 3—5 cm starken Rohrstengels oft so groß, daß Herr Kobus 35 cm Zuwachs in einer Woche beobachten konnte! Die Erträge betragen von den beiden ertragreichsten Zuckerrohrvarietäten im Mittel über 1400 dz Zuckerrohrstengel pro Hektar. Dazu kommen noch für Blätter und Stengelspitzen, die nicht mitgewogen wurden, im Mittel 30%, so daß der Gesamtertrag 1800 dz pro Hektar beträgt. Als Düngung wurden hierfür 3,5 dz schwefelsaures Ammoniak verabfolgt. — Der Tonboden hält das Wasser sehr zurück; er gestattet so eine sehr gute Ausnutzung der wasserlöslichen Pflanzennährsalze durch die Pflanze. Auch in der chemischen Bodenabsorption dürfte der Tonboden alle anderen Bodenarten übertreffen.

Der strenge Tonboden findet sich als Krumenboden bei uns am häufigsten in den Flusstälern, auch wohl im Hügel- und Berglande, selten im Flachlande; wo er im letzteren nesterweise vorkommt, wird er in der Regel zu technischen Zwecken, so zur Ziegel-, zur Röhren-, auch zur Porzellan-Fabrikation benutzt. Er kann als Untergrund oft schädigend auf den Pflanzenwuchs einwirken, insofern er das Tagewasser nicht abfließen läßt. Der Boden wird so „kalt“ und „naß“ und ist für die Ackerkultur erst gut brauchbar, wenn wir dem Wasser künstlich, z. B. durch Drainage, Abzug verschaffen. Je mehr Humus ein Tonboden enthält, um so fruchtbarer ist derselbe. Der Humusgehalt kann bis zu 10% des Bodens betragen. Solche Tonbodenarten, wie wir sie z. B. in Niederungen und Talgründen, am Meeresstrande, an Flusufnern, in ausgetrockneten Meer- und Seebecken, so in der Schwarzerde und in dem Marschboden vor uns haben, dürften zu den fruchtbarsten aller unserer Bodenarten gehören.

2. Klasse: Lehmboden.

Auch diese Bodenarten haben noch einen überwiegend großen Gehalt an feinsten Teilchen. Sie sind so auch bindig und formbar. Der schwere

Lehmboden ist dem Tonboden sehr ähnlich. Im allgemeinen ist der Lehmboden eben wegen seines geringeren Tongehaltes bedeutend leichter zu bearbeiten.

Der kalklose Lehmboden findet sich häufiger an Abhängen und höher gelegenen Geländen. Er hat ziemlich starke Konsistenz, zerfällt jedoch beim Austrocknen viel leichter als der eigentliche Tonboden. Der kalkhaltige Lehmboden gehört bei hinreichendem Humusgehalt mit zu den fruchtbarsten Bodenarten.

3. Klasse: Sandiger Lehmboden. 4. Klasse: Lehmiger Sandboden.

5. Klasse: Sandboden.

Die Fruchtbarkeit dieser Bodenarten nimmt mit Zunahme des Sand- und mit entsprechender Abnahme des Tongehaltes des Bodens ab. Einige Kulturpflanzen gehen in ihren Erträgen mit dem gröfseren Sandgehalte des Bodens oder, was damit gleichbedeutend ist, mit der geringeren Oberflächenentwicklung des Bodens schnell zurück. Diese Bodenarten vermögen weniger Wasser zurückzuhalten, so dafs Pflanzen, die zu ihrer Hauptentwicklung infolge ihrer durch die grofse Blatentwicklung starken Transpiration in kurzer Zeit viel Wasser gebrauchen, wie z. B. Weizen, nicht mehr den Anbau verlohnen.

Wenngleich der geringere Gehalt dieser Bodenarten an Ton ihre Bearbeitbarkeit wesentlich erleichtert, so kann doch wieder mit dem Steingehalt dieser Bodenarten ein gröfserer Arbeitsaufwand verbunden sein. Je höher der Gehalt an Humus ist, um so ertragreicher ist ein Boden. Der Kalkgehalt übt, da er diese Bodenarten weder viel lockerer noch viel bindiger macht (die Oberflächengröfse des Kalkes ist ungefähr die gleiche wie die dieser Bodenarten), keinen wesentlichen Einfluss auf die Fruchtbarkeit aus. Der Kalkgehalt des Bodens verhindert jedoch die Bildung freier Humussäuren, die, wie wir sahen, einen giftigen Einfluss auf die Vegetation ausüben können.

Mit zunehmendem Sandgehalt nimmt die Bindigkeit des Bodens und damit seine Fähigkeit, Krümel zu bilden, ab. Je sandiger somit ein Boden ist, um so trockner wird er sein. Durch feuchtes Klima kann sich dieser letzte Nachteil des Bodens weniger fühlbar machen. Immerhin wird aber auch hier ein Sandboden leichter „verarmen“, insofern das Wasser im Boden nicht sehr zurückgehalten, mithin die wasserlöslichen Nährstoffe leicht ausgewaschen werden. Da auch die chemische Absorptionsfähigkeit des Sandes in der Regel äufserst gering ist, so gelten die reinen Sandböden wohl mit Recht als die unfruchtbarsten Bodenarten. Sie sind um so unfruchtbarer, je gröber der Sand ist, je mehr er in Grand und Kies übergeht. Dementsprechend wird auch die Gröfse seiner Oberfläche geringer.

6. Klasse: Mergelboden. 7. Klasse: Kalkboden.

Mergel- und Kalkböden weisen einen verhältnismäßig hohen Gehalt an Kalk (5—20 % resp. über 20 %) auf. Wir finden diese Bodenarten in der Regel in der Nähe von Kalkgebirgen oder in Gegenden, die Mergel als Untergrund haben. In Bodenarten, welche auf Keuperformation oder den dolomitischen Schichten der Muschelkalkformation aufliegen, findet man auch häufig einige Prozente Bittererde. Je tonreicher und humusreicher ein Kalkboden oder Mergelboden ist, um so fruchtbarer ist er. Der humose, tonige Mergelboden ist so eine unserer ertragreichsten Bodenarten. Umgekehrt nimmt auch hier durch größeren Kalk- und Sandgehalt die Fruchtbarkeit des Bodens sehr ab. Da der Kalk ebenso wie der Sand eine verhältnismäßig geringe Bodenoberfläche hat, so werden die sandreichen Kalkböden nur sehr schlecht Wasser zurückhalten; mithin werden die Pflanzen, wenn das Klima nicht sehr feucht ist, leicht unter Wassermangel leiden; man nennt solche Kalkböden dann „hitzig“. Derartige hitzige Bodenarten lassen sich nur durch Beimengungen von Ton und Tonmergel fruchtbarer machen. Da der Kalk Humus leichter zersetzt, so wird man stark kalkhaltige Bodenarten häufiger und stärker düngen müssen, um sie bindiger und frischer zu erhalten. — Im allgemeinen kann man sagen, daß der Kalk physikalisch ebenso wie der Sand sehr indifferent für den Wert des Bodens ist. Es kommt bei Kalkbodenarten ebenso wie bei den Sandbodenarten fast ausschließlich auf die Mengen der in diesen Bodenarten befindlichen Ton- und Humussubstanzen an.

8. Klasse: Humusboden.

Als Humusboden wird schon ein Boden bezeichnet, welcher mehr als 5 % Humus enthält. Nach Thaer ist der Humus der fruchtbringende Bestandteil des Bodens, und in der Tat läßt sich der Humus durch keinen anderen Bodenbestandteil ersetzen. Humus verbessert so jeden Boden. Er hat mit dem Ton die große Bodenoberfläche gemein, ja übertrifft hierin den ersteren noch bei weitem. Dementsprechend vermag der Humus viel Wasser zurückzuhalten und den Pflanzen so jederzeit Wasser zur Verfügung zu stellen. Der Humus hat dabei aber eine geringe äußere Bodenoberfläche. Er lockert so z. B. jeden Tonboden, macht ihn brückeriger, krümliger; da seine äußere Bodenoberfläche aber andererseits größer ist als die von Sand und Kalk, so macht er sandige und kalkhaltige Bodenarten wieder bindiger und so für die Krümelbildung günstiger. — Was man im allgemeinen als Humus bezeichnet, ist eine sehr wesentlich verschiedenartige Substanz. Dies zeigt unter anderem die verschiedene Größe der Oberfläche humusbildender Substanzen an. So betrug die dieser Größe proportionale Benetzungswärme¹⁾

¹⁾ Alfred Mitscherlich, l. c. Journ. f. Landw. 1898, S. 265.

bei der Holzfaser	17,0 cal. pro Gramm,
„ „ Braunkohle	28,5 „ „ „
„ Humus aus frisch gedüngtem Boden	34,0 „ „ „
„ „ „ Moorboden	47,0 „ „ „

Die Humusböden finden sich vorzüglich in Niederungen und Tälern oder in muldenartigen Vertiefungen. Sie zeichnen sich gewöhnlich durch ihre schwarzbraune bis schwarze Farbe aus. Die extremen Humusbodenarten, die Moorböden, dürften meines Erachtens unsere ertragreichsten Kulturböden sein, sofern sie genügend entwässert, durch genügende Kalkdüngung entsäuert und richtig bearbeitet werden (vergl. § 57). [Über die Entstehung dieser Bodenarten vergl. August Vogler, Grundlehren der Kulturtechnik, 1. Bd., 1. Teil. Die Bodenkunde auf physikalisch-chemischer Grundlage von Moritz Fleischer, Kapitel II. D, S. 82—106. Berlin 1903, und E. Ramann, Bodenkunde. Berlin 1905, S. 127—194.]

Wir sehen aus diesen Betrachtungen der Bodenklassen, daß, wenn auch die einzelnen Bodenbestandteile: Sand, Kalk, Ton und Humus in sich außerordentlich verschieden sind, sie doch jeder für sich den Boden je nach dem Mengenverhältnis, in dem sie auftreten, ein typisches Gepräge geben, so daß die praktischen Bezeichnungen wie Tonboden, Lehmboden, Sandboden und Kalkboden doch eine allgemeine Anschauung von der Eigenart des betreffenden Bodens geben. — Diese praktische Bodenklassifikation sollte seinerzeit exakter ausgestaltet werden durch die mechanisch-chemische Bodenanalyse (vergl. § 10 a). Sie gibt uns in der Klasseneinteilung keinen Anhalt für die Fruchtbarkeit eines Bodens. — Um diese zu erhalten, werden einzelne Gruppierungen dieser verschiedenen Bodenklassen getroffen, Gruppierungen, welche in den verschiedenen Gegenden unseres Vaterlandes sehr verschieden sind. So kann ein erstklassiger Boden in wenig fruchtbarer Gegend unter Umständen nur einen halb so hohen Ertrag abwerfen als einer in fruchtbarer Gegend. Ein Beispiel für eine Klasseneinteilung auf leichtem Boden mag trotzdem hier folgen:¹⁾

(Siehe die obere Tabelle auf Seite 338.)

Zwischen den einzelnen Bodenklassen gibt es nun natürlich alle Übergänge. So wird z. B. ein reicher humoser Tonboden (Klasse I) sich in der Ertragsfähigkeit von einem geringen tonigen milden Humusboden (Klasse VII) nicht unterscheiden. Ebenso wenig ein reicher kalkhaltiger lehmiger Sandboden (Klasse IV) von einem reichen lehmigen Sandmergelboden (Klasse VI) usf., doch das ist ein Übelstand, welcher überhaupt jeder Klasseneinteilung anhaften muß, solange man nicht statt der Klassen einfache Zahlenwerte einzusetzen vermag.

¹⁾ Vergl. Alfred Mitscherlich, Inaug.-Diss. Kiel 1898, S. 43 (Taxklassen der schlesischen Landschaft).

Klasse:	Krume:	Untergrund:
<i>Ackerklassen.</i>		
I.	reicher humoser milder Lehm	milder Lehm
II.	humoser sandiger Lehm	frischer, teils lehmiger Sand
III.	humoser lehmiger Sand	frischer Sand
IV.	frischer Sand	Sand
V.	Sand	Sand
<i>Wiesenklassen.</i>		
I.	reicher humoser sandiger Lehm	lehmiger Sand
II.	humoser lehmiger Sand	frischer Sand
<i>Forstklassen.</i>		
II.	frischer humoser Sand	frischer Sand
III.	Sand	Sand

Das Hauptbedenken gegen diese Bodenklassifikation ist die Ungleichartigkeit der Tonsubstanzen untereinander und die der Humussubstanzen untereinander; ferner dafs hierdurch, sowie durch den Umstand, dafs sich Kalk und Sand bis zu einem gewissen Grade in ihrem Einflufs auf die Fruchtbarkeit eines Bodens vertreten können, Bodenarten aus verschiedenen Klassen auch unter sonst gleichen Umständen ganz gleichhohe Erträge zu liefern vermögen. Das sind Momente, die eine einheitliche Bodenklassifikation dieser Art in den verschiedenen Gegenden stets unmöglich machen werden. Aber auch in ein und derselben Gegend zeigt sich, dafs zwischen den Erträgen und diesen praktischen Bodenklassen keine direkte Abhängigkeit besteht. Hierfür liegt speziell für den Hafer ein umfangreiches Material von Emmerling¹⁾ vor. Ich will dasselbe derart wiedergeben, dafs ich das arithmetische Mittel und den wahrscheinlichen Fehler des Haferertrages für die einzelnen Bodenklassen berechne.

Anzahl der Beobachtungen	Bodenklasse:		Haferertrag	
			dz pro ha	$\pm r$
14	Lehmboden	2. Klasse (inkl. 2.—3.)	23,2	3,6
29	"	3. " (" 3.—4.)	22,3	2,9
12	"	4. " (" 4.—5.)	19,3	2,9
3	"	5. "	14,7	3,2
7	Sandboden	4. " (" 3.—4. und 4.—5.)	15,8	3,5
10	"	5. " (" 5.—6.)	14,8	2,0
8	"	6. " (" 6.—7.)	14,2	4,2
10	Marschboden	2. "	25,7	5,3
18	"	3. "	29,9	3,2

¹⁾ A. Emmerling, Eine Festschrift. Kiel, Dezember 1895. S. 176—183.

Aus den vorstehenden Zahlen ergibt sich, daß man nicht von dem durchschnittlichen Haferertrag auf die Bodenklasse Rückschlüsse machen darf, da die Hafererträge innerhalb ein und derselben Klasse hierzu in zu weiten Grenzen schwanken.

II. Die Bodenklassifikation nach den Bodenerträgen.

Daß die Unzulänglichkeit der Bodenklassifikation nach den hauptsächlichsten Bodenbestandteilen längst erkannt ist, obwohl sich dieselbe mangels einer besseren bis zum heutigen Tage erhalten hat, beweisen die vielen Versuche, welche gemacht worden sind, um den Boden nach anderen Gesichtspunkten zu klassifizieren. Von allen diesen anderen Bodenklassifikationen muß jedenfalls die nach den Bodenerträgen für uns das größte Interesse haben. Es ist bei dieser von vornherein jedoch der Übelstand zu berücksichtigen, daß jeder Boden je nach der Art der Bearbeitung, je nach der Düngung sehr verschieden hohe Erträge liefert, und daß so ein durch die Persönlichkeit des einzelnen Landwirtes bedingter ökonomischer Einfluß bei dieser Beurteilung des Bodens mitspricht, durch welchen diese Bodenklassifikation ihren objektiven Charakter und damit ihren allgemeinen Wert verliert. Ich glaube, daß das auch der Hauptgrund dafür ist, daß sich diese Bodenklassifikation nie recht einbürgern konnte. Dazu kommt noch eine zweite Ursache. Wertvolle Pflanzen, d. h. solche, deren Erträge wir zurzeit hoch verwerten können, gedeihen nicht mehr auf Bodenarten, auf denen weniger wertvolle Pflanzen noch recht gute Erträge ergeben. Es wird hiermit in diese Bodenklassifikation noch ein weiteres zufälliges ökonomisches Moment hereingezogen: der Preis unserer verschiedenen Ernteprodukte, welcher in gleicher Weise wie die Erträge der einzelnen Kulturpflanze pro Flächeneinheit den Bruttoertrag bedingt.

Wir haben bislang in der vorliegenden Bodenkunde stets angenommen, daß alle Momente, welche bei einer beliebigen Pflanze günstig auf das Erntergebnis einwirken, auch in gleicher Weise auf alle Pflanzen einen günstigen Einfluß haben. Ich muß hier auf diese bislang stillschweigend eingeführte Hypothese noch etwas näher eingehen. Daß zunächst die Pflanzenarten sehr verschieden sind und deshalb verschiedene Ansprüche an den Boden stellen müssen, unterliegt keinem Zweifel. Dabei wird aber jede Pflanze um so besser wachsen, je besser der Boden bearbeitet ist, denn um so weniger Energie braucht sie bei ihrem Wurzelwachstum aufzuwenden; jede Pflanze wird ferner um so besser gedeihen, je nährstoffreicher der Boden ist usf., und doch finden sich tatsächlich Unterschiede. Meines Erachtens beruhen diese lediglich in dem Wasserverbrauch der verschiedenen Pflanzen.

Je mehr oberirdische Organe eine Pflanze entwickelt, je mehr sie ihre Blätter ausbreitet, um so mehr Wasser wird sie verdunsten, um so

mehr Wasser muß sie somit im Boden vorfinden, um so mehr Wasser muß der Boden zurückhalten können. Blattreichere Pflanzen werden deshalb auf einem wasserreicheren Boden höhere Erträge liefern und mit der Abnahme der wasserhaltenden Kraft des Bodens auch schneller in ihren Erträgen zurückgehen müssen als blattärmere Pflanzen. Je mehr Ton, je mehr Humus ein Boden hat, um so mehr blattreichere Pflanzen werden sich mit gutem Erfolge anbauen lassen. Deshalb verlangt der Weizen einen tonigeren und humusreicheren Boden als der Roggen, deshalb verlangen die Kleepflanzen mehr einen solchen als das Getreide und die Kartoffeln, lediglich deshalb legen wir unsere Wiesen, die eine große Blattoberfläche abgeben, auf humusreichen, tonigen, d. h. auf viel wasserhaltenden Bodenarten an. — Es ist so natürlich, daß die zuvor angeführten Bodenklassen auch nach den Hauptfrüchten charakterisiert wurden, welche auf ihnen gute Erträge ergaben. So bezeichnete unser Altmeister Thaer seine Bodenklassen folgendermaßen:

- I. *Tonboden als „Weizen- und Dinkelboden“*. Die kalkhaltigen, nicht zu tonreichen, an Sand und Humus nicht zu armen geben reichen Ertrag; auf ihnen gedeiht vorzüglich Weizen, Dinkel, große Gerste, Raps, Bohnen, Lein und Klee. Humusarme dienen noch zu Hafer.
- II. *Lehmboden als „Gerstenboden“*. Die humusreichen, kalkhaltigen eignen sich auch noch gut zu Weizen und Dinkel und nähern sich oft sehr den vorhergehenden. Übrigens eignen sie sich zu Emmer, Roggen, Hafer, Raps, Lein, Klee.
- III. *Sandiger Lehmboden als „Gersten- und Haferboden“*. Er eignet sich noch weniger zu Weizen und Dinkel als die vorhergehenden, noch eher zu Emmer und Roggen; Wurzelgewächsen, besonders Kartoffeln und Wasserrüben ist er zuträglich.
- IV. *Lehmiger Sandboden als „Hafer- und Roggenboden“*. Auf den humusreichen gedeiht auch noch Gerste. Sie eignen sich gut zu Buchweizen. Weizen, Dinkel, Klee gedeihen nicht auf ihnen.
- V. *Sandboden als Roggenboden* von geringem Werte. Die humushaltigen eignen sich übrigens auch zu Buchweizen, Hafer, Hanf, Tabak, Kartoffeln und Spörgel.
- VI. *Mergelboden*. Die *tonigen* als vorzügliche *Weizen- und Dinkelböden*, auf welchen auch Luzerne und Esparsette wächst. — Die *lehmigen* als weniger zu Weizen und Dinkel, mehr zu *Gerste und Emmer* geeignet; sie gehören übrigens zu den besseren Böden. — Die *sandigen Lehmmergelböden* sind *Gersten- und Haferböden*. — Die *lehmigen Sandmergelböden* *Hafer- und Roggenböden*. — Der *humose tonige Mergelboden* gehört zu den vorzüglichsten Bodenarten.

VII. *Kalkboden* entspricht dem Mergelboden. Die *humusarmen* erfordern viel Dünger. — Die *tonreichen* eignen sich gut zu Dinkel und Weizen; von Sommerfrüchten gedeiht auf ihnen vorzüglich Hafer, auch Emmer und Gerste; von Futterkräutern Luzerne und Esparsette. Bei *großem Kalk- und Sandgehalt* vermindert sich der Wert bedeutend.

VIII. *Humusboden*. Der *kalkhaltige tonige Humusboden* eignet sich zu *Weizen, Dinkel*, Gerste, Ölgewächsen; die *lehmigen und sandigen* eignen sich vorzüglich zu *Hafer*, bei feuchter Lage zu Wiesen.

Nächst dieser Charakteristik der Bodenarten nach den einzelnen Feldfrüchten, in welchen wir gewissermaßen einen Übergang zwischen der mechanisch-chemischen Bodenklassifikation und der Bodenklassifikation nach den Erträgen finden, gibt uns u. a. Pabst¹⁾ eine Bodenklassifikation, bei welcher ausschließlich die Höhe der Erträge berücksichtigt wird. Dieselbe mag hier folgen.

(Siehe die Tabelle auf Seite 342.)

Man ersieht aus der Klassifikation, daß mit abnehmender Güte des Bodens die Erträge fast aller Feldfrüchte gleichmäßig abnehmen. Die Klassen 6 und 7 dürften richtiger umzustellen sein, wie dies auch von der Goltz in seiner Taxationslehre²⁾ bei dem Exzerpt aus der nachstehenden Tabelle getan hat.

Da die Erträge dauernd bei der größeren Intensität unserer Landwirtschaft im Steigen sind, so dürften bereits heute diese Ertragsklassen nicht mehr ganz zu Recht bestehen. Sie werden außerdem durch das Schwanken der Getreidepreise stets Schwankungen unterworfen sein, insofern, falls z. B. der Roggen mit dem Weizen gleichwertig würde, die Roggenböden entsprechend höher eingeordnet werden müßten usf. Im allgemeinen wird sich ja dabei allerdings die Tatsache nicht verändern, daß der Weizenboden höher einzuschätzen ist als der Gerstenboden, dieser höher als der Haferboden und dieser wieder höher als der Roggenboden; das hängt, wie wir sahen, mit dem Wasserbedürfnis der einzelnen Kulturpflanzen und mit der wasserzurückhaltenden Kraft des Bodens eng zusammen.

Zweckmäßiger noch vielleicht als die vorige dürfte eine von Hazard³⁾ nach den anbaufähigen land- und forstwirtschaftlichen Ge-

¹⁾ Heinrich Wilhelm Pabst, Die landwirtschaftliche Taxationslehre. Wien 1853, S. 42 u. 43.

²⁾ Theodor Frhr. von der Goltz, Landwirtschaftliche Taxationslehre, 2. Aufl. Berlin 1892, S. 385.

³⁾ J. Hazard, Die geologisch-agronomische Kartierung als Grundlage einer allgemeinen Bonitierung des Bodens; Landw. Jahrb. 1900, S. 825.

No.	Bodenklasse:	Durchschnittserträge in dz pro ha an									
		Weizen	Roggen	Gerste	Hafer	Erbsen oder Bohnen	Kartoffeln	Runkelrüben	Klee, Luzerne oder Klee gras, Heu	künstliche Weide (Heu)	
1.	Sehr guter Niederungs-Weizenboden (Mensch-Klärboden)	26-31	24-31	24-28	21-25	20-24	180-210	530-636	84-106	64-80	
2.	Sehr guter Niederungs-Gerstenboden (Marschmittelboden, Anboden)	—	19-26	21-25	17-22	—	165-188	424-530	64-96	54-64	
3.	Weizenboden 1. Klasse	20-24	19-24	20-24	18-22	14-19	165-180	476-580	74-84	54-68	
4.	" 2.	16-19	16-19	15-19	14-17	10-14	120-150	424-466	54-68	42-54	
5.	(Gerstenboden 1.	15-19	19-24	18-21	15-18	10-14	165-188	446-530	54-74	42-54	
6.	Weizenboden 3.	13-15	13-16	10-14	11-13	9-10	—	320-380	32-54	26-42	
7.	Gerstenboden 2.	13-14	14-19	14-17	12-14	9-10	143-158	360-424	42-60	32-48	
8.	" 3.	—	11-14	10-13	8-11	8-9	105-135	—	—	22-38	
9.	Weizenboden 4.	10-12	10-13	—	8-10	—	—	—	22-32	22-36	
10.	Gewöhnlicher Haferboden 1. Klasse	—	10-11	7-9	8-10	—	90-105	—	—	22-32	
11.	" 2.	—	6-8	—	6-8	—	75-83	—	—	16-26	
12.	Roggenboden 1. Klasse	—	8-10	6-7	6-7	—	68-75	—	—	10-18	
13.	Mooriger, steiniger Haferboden besserer Art	—	5-7	—	7-8	—	75-83	—	—	22-32	
14.	Geringer, mooriger und zäher, nasser Haferboden	—	—	—	6-7	—	—	—	—	14-22	
15.	Roggenboden 2. Klasse	—	6-7	—	—	—	54-65	—	—	8-10	
16.	" 3.	—	5-6	—	—	—	—	—	—	4-6	

wachsen versuchte Bodeneinteilung sein, welche hier auch noch einen Platz finden mag.

I. *Landwirtschaftlich benutzte Bodenarten:*

- a) Kartoffelboden (Kartoffel, Lupine, dürrtiger Roggen);
- b) Roggenboden (Kartoffel, Roggen in normaler Ausbildung);
- c) Haferboden (die vorigen, ferner Hafer);
- d) Kleeboden (die vorigen, ferner Rotklee und Gerste);
- e) leichter Weizenboden = Zuckerrübenboden (die vorigen, außerdem Zuckerrüben und mittelmäßiger Weizen);
- f) Weizen- und Roggenboden (zum Anbau sämtlicher landwirtschaftlicher Gewächse geeignet);
- g) schwerer Weizenboden (sämtliche Gewächse mit Ausnahme des Roggens);
- h) Ackerbohnenboden (Roggen und Hackfrüchte ausgeschlossen);
- i) Weizen- und Wiesenboden (zum Wiesenbau geeigneter, schwerer Weizenboden);
- k) Wiesenboden.

II. *Forstlich benutzte Bodenarten:*

- a) Kiefernboden (nur zum Anbau der Kiefer geeignet);
- b) Birkenboden (Kiefer mit Fichtenunterholz, normal ausgebildete Birken);
- c) Kiefern- und Fichtenboden (Kiefer, Birke, Fichte in mittelmäßigen Exemplaren);
- d) leichter Fichtenboden (Kiefer, Birke, Fichte, Lärche);
- e) Tannenboden (die vorigen, ferner die Weifstanne);
- f) Rotbuchenboden (die vorigen, ferner die Rotbuche);
- g) schwerer bzw. nasser Fichtenboden (Kiefer, Birke, Fichte, Lärche);
- h) Eichen- und Erlenboden (Birke, Fichte, Eiche und Erle);
- i) Eichen- und Weidenboden (Fichte und sämtliche Laubbölzer mit Ausnahme der Rotbuche).

Die vorstehende Bodenklassifikation, insonderheit die der landwirtschaftlichen Bodenarten, welche direkt auf der Ertragsfähigkeit des Bodens aufgebaut ist, läßt leider keine schärferen Grenzen erkennen. Sie beruht nur auf der momentanen Art der Bewirtschaftung des Bodens und den dabei erzielten Erträgen; daß man eventuell mit der Bestellung einer anderen Kulturpflanze oder durch andere Maßnahmen höhere Erträge erzielen könnte, wodurch der Boden in eine andere Klasse aufrücken würde, das sieht sie nicht vor. Es liegt dies wieder an der Betonung des ökonomischen Momentes, welches wir bei einer exakten objektiven Bodenklassifikation ausschalten müssen, und wodurch auch diese Art der Bodenklassifikation als nicht zweckentsprechend angesehen werden muß.

In der Forstwirtschaft hat man auch eine Bodenwertbestimmung durch die Wald- und Bodenrente versucht.¹⁾ Es ist dies hier um so leichter möglich, als sich die Produktionskosten besser als in der Landwirtschaft feststellen lassen, da wir nicht mit nicht marktgängigen Futter- und Düngemitteln zu rechnen haben. Vom Verwertungspreis wird der Produktionspreis (inkl. der aufgelaufenen Zinsen und Zinseszinsen) in Abzug gebracht; der Rest sind die Zinsen und Zinseszinsen des Bodenkapitals, welches sich daraus ermitteln läßt. Eine derartige Wertermittelung wird nur dann exakt durchführbar sein, wenn auch die Zwischennutzungen aus den Durchforstungen usw. in gleicher Weise in Rechnung gezogen werden.

III. Die Bodenklassifikation nach den wildwachsenden Pflanzen.

Es ist ferner der Versuch gemacht worden,²⁾ die Güte des Bodens aus der Art der wildwachsenden Pflanzen zu bestimmen, und in der Tat finden sich auf einzelnen Bodenarten, zumal wenn dieselben nicht jahraus jahrein bearbeitet und kultiviert werden, eine Reihe spezifischer Unkräuter. Im allgemeinen leidet ein Boden um so mehr unter Unkräutern, je fruchtbarer er ist, d. h. je lockerer er ist, und je mehr Wasser er zurückzuhalten vermag. Auf derartigen Bodenarten vermag selbst die ständige Kultur oft des Unkrautes kaum Herr zu werden, so daß es zuweilen geboten erscheint, ein ganzes Jahr lang keine Kulturpflanze anzubauen, sondern den Boden möglichst offen zu halten, um die aufgegangenen Unkrautsamen jedesmal nach Möglichkeit vernichten zu können (Schwarzbrache).

Wird der Boden nicht oder sehr selten bearbeitet, wie im Forst, so richtet sich die Art des Unkrautes nicht nur nach dem Wassergehalte,

¹⁾ Vergl. die zahlreichen Abhandlungen im „Forstwissenschaftlichen Zentralblatt“, so unter den letzten: Weber, Waldrente und Bodenrente, 26. Jahrg., 1904, Seite 621.

²⁾ F. Unger, Über den Einfluß des Bodens auf die Verteilung der Gewächse . . . , nachgewiesen in der Vegetation des nordöstlichen Tirols. Wien 1836. vergl. u. a. S. 144, 193, 194. — Thurmman, Essai de Phytostatique appliqué à la chaîne du Jura et aux Contrées voisines; étude de la dispersion des plantes vasculaires envisagée principalement quant à l'influence des roches soujacentes; deux volumes. Berne 1849. — Derselbe, De la marche à suivre dans l'étude de la dispersion des espèces végétales, relativement aux roches soujacentes; Actes de la Société helvétique des sciences naturelles 38, session Pourrentrouy 1853. p. 169. — C. Trömmer, Die Bonitierung des Bodens vermittelt der wildwachsenden Pflanzen. Greifswald 1853. — Ferdinand Senft, Die Vegetationsverhältnisse der Umgegend Eisenachs. Eisenach 1865. — R. Braungart, Die Wissenschaft in der Bodenkunde; ein Leitfaden für geobotanisch-ökonomische Studien. Berlin und Leipzig 1876. — Derselbe, Gibt es bodenbestimmende Pflanzen; Journal für Landwirtschaft Bd. 27, 1879, S. 423 u. 481; ferner ebenda Bd. 28, 1880, S. 59 u. 155.

sondern auch nach der Bindigkeit des Bodens. Viele Pflanzen vermögen so nicht mit ihren Wurzeln in Ton einzudringen und dort der Güte des Bodens entsprechend üppiger zu gedeihen, weil ihre Wurzeln nicht die Kraft besitzen, sich zwischen die enggelagerten Tonteilchen einzudrängen. Solche Pflanzen finden wir je nach ihrer Blattentfaltung entweder auf Sand- und Kalkbodenarten oder auf den nasserem Humusböden. Andere Pflanzen hingegen verlangen den Kalk, wieder andere die spezifischen Eigenschaften des Tones. — Es sei deshalb hier zunächst, soweit wie möglich, im Anschluß an die zuvor besprochenen Thaerschen Bodenklassen die hauptsächliche Unkrautflora wiedergegeben.¹⁾ Es sind typisch und am weitesten verbreitet auf:

I. Tonboden:

a) Kalkarmem:

Bromus giganteus, Riesentrespe.
Galium aparine, kletterndes Labkraut.
Sonchus arvensis, Ackersaudistel.

b) Kalkreichem:

Tussilago Farfara, gemeiner Huflattich.
Anagallis coerulea, blauer Gauchheil.
Pimpinella saxifraga, gemeine Bibernelle.
Prunella vulgaris, gemeine Brunelle.
Anthyllis vulneraria, Wundklee.
Medicago falcata, schwedische Luzerne.

II. Lehm Boden:

Bromus secalinus, Roggentrespe.
Bromus arvensis, Ackertrespe.
Veronica arvensis, Ackerehrenpreis.
Polygonum convolvulus, windender Buchweizen.
Rumex crispus, krauser Sauerampfer.
Brunella vulgaris, gemeine Brunelle.
Cichorium intibis, Zichorie.
Leontodon Taraxacum officinale, Löwenzahn.
Colchicum autumnale, Herbstzeitlose.
Fumaria officinalis, gemeiner Erdrrauch.
Senecio vulgaris, gemeines Kreuzkraut.
Ranunculus acer, scharfer Hahnenfuß.
Tanacetum vulgare, Rainfarn.

¹⁾ Vergl. u. a. G. Schübler, Grundsätze d. Agrikulturchemie. Leipzig 1830. 2. Teil, S. 145 u. f.; ferner Nowacki, Praktische Bodenkunde. 4. Aufl. Berlin 1904, S. 141 u. f.

Daucus Carota, wilde Möhre.

Carum Carvi, Wiesenkümmel.

Auf kalkarmem:

Equisetum arvense, Ackerschachtelhalm.

Rumex acetosella, kleiner Sauerampfer.

III. Sandigem Lehm Boden:

Unkräuter wie bei der vorhergehenden und bei der folgenden Bodenklasse.

IV. Lehmigem Sandboden:

Centaurea cyanus, Kornblume.

Agrostemma Githago, Kornrade.

Raphanus Raphanistrum, Hederich.

Plantago lanceolata, spitzblättriger Wegerich.

Viola tricolor, wildes Stiefmütterchen.

Myosotis arvensis, Ackervergiftsmeinnicht.

Scleranthus annuus, Knöterich.

Anthemis arvensis, Ackerhundskamille.

Veronica verna, Frühlingssehnenpreis.

Pteridium aquilinum, Adlerfarn.

V. Sandboden:

Aira canescens, Sandschmiele.

Arundo arenaria, Sandrohr.

Elymus arenarius, Sandhafer.

Spartium Scoparium,
Sarothamnus scoparius, } Besenpfriemen.

Calluna vulgaris, Heidekraut.

Verbascum thapsiforme, Königskerze.

Trifolium arvense, Katzenklee.

Armeria vulgaris, Grasnelke.

Erophila verna, Hungerblümchen.

Plantago arenaria, Sandwegerich.

Phleum arenaria, Sandlieschgras.

Avena caryophylla Nelkenhafer.

Carex arenaria, Sandriedgras.

VI. Mergelboden:

Sherardia arvensis, Ackerseradie.

Rubus caesius, Kratzbeere.

Alyssum calycinum, Kelchschildkraut.

Medicago lupulina, Hopfenklee.

Tussilago Farfara, gemeiner Huflattich
 u. a. der folgenden Klasse.

VII. *Kalkboden:*

Poterium Sanguisorba, gemeine Becherblume.
 Cyripedium Calceolus, Frauenschuh.
 Gentiana ciliata und G. cruciata, Enzian.
 Rosa cinnamomea, Pfingströschen.
 Medicago falcata, schwedische Luzerne.
 Bractypodium pinnatum, Federzwenke.
 Reseda lutea, gelber Wau.
 Anemone silvestris, Waldwindröschen.
 Cynosurus coeruleus, blaues Kammgras.
 Taxus bacchata, Eibe
 u. a. m.

VIII. *Humusboden:*

Ziemlich alle Grasarten, auf nicht entwässertem: Binsen, Simsen
 Rietgräser und Rohr.

Die Flora der Moorböden ist je nach der Entstehung derselben verschieden.¹⁾

Wenngleich die vorstehenden Unkräuter für die verschiedenen Bodenarten wohl als typisch gelten können, so ist doch zur Genüge festgestellt, daß z. B. eine anscheinend kalkliebende Pflanze auch auf kalkarmem Boden sehr gut wächst, sobald der Boden kultiviert wird, und daß ebenso die für irgend eine andere Bodenart „typischen“ Pflanzen auf jedem anderen „kultivierten“ Boden gedeihen können.²⁾ Im Forst, in Hecken, im Knick, auf Rainen und an Wegerändern werden uns die Unkräuter jedoch meist einen Anhalt für die Bodenarten geben können; auf dem Acker wird dies nicht mehr möglich sein, sofern sie sich nicht durch Rhizombildung oder durch Ausreifung des Samens in einer kürzeren Zeit, als dies bei unseren Kulturpflanzen der Fall ist, weiter vermehren und so lokal halten können.

Braungart³⁾ hat auch die Unkrautflora in ihrer Abhängigkeit von der chemischen Bodenbeschaffenheit untersucht. Es seien hier auch diese verschiedenen Typen wiedergegeben.

1. *Typisch für kalk- und magnesiaarmen Ton-, Kieselton- oder Kieselboden:*

Digitalis purpurea, roter Fingerhut (Boden reich an Kali; Kieselton- und Kieselboden).

¹⁾ Vergl. C. A. Weber, Aufbau, Entstehung und Pflanzendecke der Moore; Mitteilungen des Vereins zur Förderung der Moorkultur im Deutschen Reiche XXII. Jahrg., 1904.

²⁾ U. a. H. Hoffmann, Untersuchungen zur Klima- und Bodenkunde mit Rücksicht auf die Vegetation; Beil. z. B. Z. 1865, S. 75, 76 u. f.

³⁾ R. Braungart, Bodenbestimmende Pflanzen; Journal für Landwirtschaft Jahrg. XXVIII, 1880, S. 399 u. f. und S. 469 u. f.

Grnaphalium arenarium, gelbes Katzenpfütchen (trockener Sand).
 Spartium Scoparium, gem. Besenstrauch (trockener Sand, lehmiger Sand, sandiger Lehmboden).

Saxifraga granulata, gem. Steinbrech (ziemlich trockener, lehmiger Sand, sandiger Lehm).

Hyoseris minima, Zwerg-Lämmersalat (kalkfliehend! feuchter Sand).

2. *Typisch für Kalk-, Kalksand- und Mergelböden:*

Helleborus foetidus, stinkende Nießwurz (trockener Boden).

Saxifraga tridactylites, dreifingriger Steinbrech (Lehm-Mergel, Kalksand, wasserfreier Boden).

Teucrium Chamaedrys, echter Gamander (trockener, lockerer, kalkreicher Boden).

Holosteum umbellatum, doldenblütige Spirre (sandiger oder toniger, sonniger, trockener Boden).

Sium falcaria, Sichelholde (spezifische Mergelpflanze; Boden immer über 10% Kalk enthaltend).

Calendula arvensis, gem. Ringelblume (Boden lehmig).

3. *Kalireiche Böden:*

Centaurea nigra, schwarze Flockenblume (kalkfliehend).

Trifolium spadiceum, kastanienbrauner Klee.

Artemisia Absinthium, gem. Wermut (kalireicher Boden, etwas kalkhaltig).

Silene rupestris, Felsen-Leinkraut (kalireicher Boden, kalkfliehend).

4. *Salzhaltige Böden:*

Aster tripolium, Salzsternaster (toniger, feuchter Boden; je üppiger die Pflanze gedeiht, desto reicher ist der Boden an Kochsalz).

Bupleurum tenuissimum, feinstengliges Hasenohr (mit Salzwasser durchtränkter Tonboden; je häufiger die Pflanze, desto stärker der Salzgehalt des Bodens).

5. *Ammoniakhaltige Böden:*

Aethusa Cynapinae, Hundspetersilie, Gartenschierling (Boden stickstoffreich, kalkhaltig, mälsig feucht).

Wenngleich diese Unkräuter für die chemische Bodenbeschaffenheit charakteristischer sein dürften als die zuvor angeführten für die physikalische Beschaffenheit des Bodens, so sind sie doch deshalb für die Beurteilung eines Bodens im allgemeinen nicht von großer Bedeutung, weil den meisten von diesen die weitere Verbreitung fehlt.

Da die Unkräuter dem erfahrenen Beobachter im Sommer sofort ein Merkmal für die Bodenart abgeben, schon ohne daß er den Boden selbst untersucht, so beruht hierin ohne Zweifel ein großer Vorteil dieser Bodenerkennung. Leider ist aber, wie wir sahen, dieses Merkmal kein sicheres, und vermag es uns auch in keiner Weise einen sicheren Anhalt für die

von einem Boden zu erwartenden Erträge zu geben, so daß es wohl als äußeres Merkmal in Verbindung mit anderen Merkmalen wertvoll ist, nie aber die Grundlage einer Bodenklassifikation zu bilden vermag.

IV. Versuche einer chemischen Bodenklassifikation.

Die chemische Bodenanalyse könnte nur dann die Grundlage einer Bodenklassifikation bilden, wenn lediglich von dem Gehalt des Bodens an Pflanzennährstoffen die Fruchtbarkeit desselben abhängig wäre. Wollte man auf diesem eine Bodenklassifikation aufbauen, so wäre es wohl das erste, zu untersuchen, inwieweit Beziehungen zwischen dem Gehalte des Bodens an Pflanzennährsalzen einerseits und der praktischen Bodentaxtklasse und den Erträgen andererseits bestehen. Dies läßt sich aus dem umfangreichen Zahlenmaterial von Emmerling¹⁾ ersehen. Die Mittelzahlen, welche für die verschiedenen Bodenklassen gefunden wurden, mögen hier folgen; ich schliesse denselben auch noch gleich einige für die Moorbodenarten von der Moor-Versuchsstation ermittelte Zahlen²⁾ an:

Anzahl der Analysen	Bodenklasse resp. Bodenart:	In 100000 Teilen Feinerde sind Teile an			
		Stickstoff	Phosphorsäure	Kali	Kalk
	<i>Lehmboden:</i>				
19	2. Klasse (inkl. 2.—3.)	137	61	42	193
35	3. " (" 3.—4.)	131	51	40	131
18	4. " (" 4.—5.)	137	49	35	200
5	5. "	120	45	23	110
	<i>Sandboden:</i>				
9	4. Klasse (inkl. 3.—4. und 4.—5.) . .	143	70	19	94
11	5. " (" 5.—6.)	136	49	17	67
9	6. " (" 6.—7.)	193	80	26	73
	<i>Marschboden:</i>				
11	2. Klasse	145	84	69	614
19	3. "	142	85	59	630
?	<i>Hochmoorboden</i>	1300	80	50	230
?	<i>Niederungsmoorboden</i>	3350	290	60	4060
?	<i>Übergangsmoorboden</i>	2000	200	60	1170

¹⁾ A. Emmerling, Eine Festschrift. Kiel 1895, S. 185.

²⁾ M. Fleischer und August Vogler, Kulturtechnik. Berlin 1903, 1. Bd., 1. Teil, S. 144. Vergl. auch Br. Tacke, Die chemische und botanische Zusammensetzung der wichtigsten Torfarten; Mitteilungen des Vereins zur Förderung der Moorkultur im Deutschen Reiche XXII. Jahrg., 1904.

Ich habe hier davon absehen können, durch die Berechnung der wahrscheinlichen Schwankung auf die einzelnen Bestimmungen einzugehen. Zeigen doch schon die Mittelzahlen zur Genüge, daß hier zwischen dem Nährstoffgehalt des Bodens und den einzelnen Bodenklassen keine Abhängigkeit festzustellen ist.¹⁾ Vergleichen wir mit den vorstehenden Zahlen die Hafererträge der verschiedenen Bodenklassen (S. 338), so vermag man auch hier keine Beziehungen zu finden. Nach unseren früheren Erörterungen wird das aber auch nicht der Fall sein können.

Wohltmann²⁾ hat den Versuch gemacht, bei gleichartigen Bodenarten nächst den genannten Pflanzennährstoffen auch Magnesia, Humus-Glühverlust und Eisen + Tonerde chemisch zu bestimmen und dann in der Summe aller dieser Stoffe einen Maßstab für die Bodenqualität zu erhalten. Es ist zunächst grundfalsch, alle die genannten Stoffe als gleichwertig für die Pflanze zu betrachten. Tut man dies aber, so darf man nicht übersehen, daß hier der Gehalt des Bodens an feinsten Teilchen: Humus, Ton und eventuell noch der Kalk allein ausschlaggebend ist, daß der Gehalt des Bodens an den hauptsächlichen Pflanzennährstoffen hiergegen kaum noch irgendwie ins Gewicht fällt. — Die feinsten Teilchen sind aber, wie wir das früher sahen, ebenfalls keineswegs als gleichwertig zu betrachten. Wäre dies der Fall, so genügte uns ja die einfachste Schlämmanalyse, welche den Boden in abschlämbbare und in nicht abschlämbbare Teile sondert. — Diese Gesichtspunkte richten zur Genüge einen Versuch, welchen übrigens Wohltmann nicht lange darauf selbst als verfehlt aufgeben mußte.³⁾

¹⁾ Auch die mühsamen Untersuchungen von George Thoms („Zur Wertschätzung der Ackererde auf naturwissenschaftlich-statistischer Grundlage; Journal für Landwirtschaft Bd. 42, 1894, S. 1 u. f.) konnten so natürlich nicht zu irgend welchem Resultate von allgemeinerem Werte führen.

²⁾ F. Wohltmann, Die chemische Untersuchung des Bodens und ihre Bedeutung für die Bonitierung des Ackers; Mitteilungen aus d. Versuchsfelde d. landw. Akad. Bonn-Poppelsdorf No. 4, 1896.

³⁾ F. Wohltmann und Mehring, Die Bedeutung der chemischen Bodenuntersuchung für die Ackerbonitierung; Mitteilungen aus dem Versuchsfelde der landw. Akademie Bonn-Poppelsdorf No. 18, 1899. Hierin sagen die Verfasser, daß, so wertvoll auch die chemische Bodenanalyse zur Erkennung des Düngerbedürfnisses des Bodens und zur Feststellung eventuell vorhandener Pflanzengifte ist, so wenig können sie die prinzipielle Benutzung der chemischen Bodenanalyse bei Bonitierungen befürworten. Ein maßgebender Faktor bei der Bonitierung könne dieselbe *nicht* werden; und in F. Wohltmann, Nährstoffkapital westdeutscher Böden; Fühlings landw. Zeitung 50. Jahrg., Heft 11 heißt es: „Es liegt der Kernpunkt in der Bonitierung anderswo als im Nährstoffkapital, nämlich in der natürlichen Tiefgründigkeit des Bodens und in den Feuchtigkeitsverhältnissen.“

Für uns hat immer noch ein alter Ausspruch Déherains¹⁾ seine Bedeutung und wird, wie wir jetzt mit Bestimmtheit sagen können, diese stets behalten:

„Die chemische Analyse zeigt in einem Kilogramm Erde von der ungleichsten Fruchtbarkeit keine beträchtlichen Unterschiede. Die Dicke der baubaren Bodenschicht, der Raum, innerhalb dessen die Wurzeln sich ausbreiten können, scheint einen weit größeren Einfluss auf die Fruchtbarkeit zu haben, als der Reichtum dieser Erde selbst.“

Eine ganz andere Art Einteilung der verschiedenen Bodenarten, welche in die Mineralogie hinübergreift, hat Knop²⁾ versucht. Es war die folgende:

I. Chloride:		Kochsalz.	
II. Kalksulfate:	{	Anhydrit.	
	{	Gips.	
III. Karbonate von:	{	Talkerde.	
	{	Kalkerde.	
IV. Kieselsäure und Silikate:	{	Kieselsäure	{ frei als Quarzsand gebunden in den Silikaten.
	{	Monoxyde.	
	{	Eisenoxyd,	} Sesquioxyde.
	{	Tonerde,	

Diese Bodenklassifikation, in welcher so Sand und Ton in einer Klasse vereinigt werden, hat praktisch nie eine Bedeutung beanspruchen können, wie überhaupt sich die Mineralogie ebensowenig wie die Chemie als Grundlage für eine Klassifikation des Bodens nach seinem pflanzenphysiologischen Werte zu eignen vermag.

Anders gestaltet sich eine Bodeneinteilung, welche auf mineralogisch und geologischer Grundlage aufgebaut wird, wie dies von Sprengel, Trommer, Fallon, Girard, Senft u. a.³⁾ zuerst versucht worden ist.

V. Versuche einer geologischen Bodenklassifikation.

Mineralogie und Geologie gemeinsam haben von jeher als die Grundlage einer wissenschaftlich praktischen Bodenkunde gegolten. Wir finden

¹⁾ Vergl. H. Hoffmann, l. c. S. 76.

²⁾ Wilhelm Knop, Die Bonitierung der Ackererde. 2. Aufl. Leipzig 1872, S. 127.

³⁾ Sprengel, Die Bodenkunde. Leipzig 1837. — C. Trommer, Die Bodenkunde. Berlin 1856. — Friedrich Albert Fallon, Pedologie oder allgemeine und besondere Bodenkunde. Dresden 1862. 2. Teil. — Girard, Grundlagen der Bodenkunde für Land- und Forstwirte. Halle 1868. — Ferdinand Senft, Steinschutt und Erdboden. Berlin 1867.

so diese Wissenschaften in ihren Grundzügen in fast allen Bodenkunden bis auf die neueste Zeit¹⁾ wiedergegeben. Und sie haben auch ein Anrecht darauf, denn es ist nicht zu verkennen, daß je nach dem Gehalt des Urgesteins an Pflanzennährstoffen auch der Boden reicher und ärmer daran sein wird,²⁾ vorausgesetzt, daß diese Nährstoffe sich nicht in Mineralien befinden, aus denen sie auswittern. Ferner ist auch nicht zu verkennen, daß, je nachdem, wie das Urgestein verwittert, ja infolge seines mineralogischen Aufbaues verwittern muß, daß je nachdem der aus ihm entstehende Boden feinkörniger oder grobkörniger, also physikalisch verschieden werden wird. So werden die pflanzenphysiologischen Werte eines Bodens von dem Urgestein abhängig sein müssen. — Daß es dennoch vom pflanzenphysiologischen Standpunkte aus, der den Landmann und Forstwirt allein interessiert, falsch ist, das Urgestein statt des Bodens, in welchem doch unsere Pflanzen wachsen sollen, zu untersuchen und zu charakterisieren, habe ich eingangs bereits betont. — Die Geologie ist aber eine ältere Wissenschaft als die Pflanzenphysiologie, und da man Beziehungen zwischen der Abstammung der Bodenarten und den auf ihnen wachsenden Pflanzen resp. der Höhe der Erträge dieser Pflanzen fand, so war es naheliegend, die geologische Abstammung des Bodens als Grundlage für eine praktische Bodenklassifikation zu wählen.

Geologisch sind alle Bodenarten zweckmäßig in zwei Gruppen einzuteilen: in Verwitterungsböden, das sind solche, die auf ihrer primären Lagerstätte liegen geblieben sind, also auf dem Urgestein auflagern, und in Schwemmböden, d. s. solche, die von ihrem Urgestein fortgeschwemmt sind. — Lehnen wir uns wieder an die praktische Bodenklassifikation an, welche Ton-, Lehm-, Kalk- und Sandbodenarten unterscheidet, so werden wir die Urgesteine demnach in folgender Weise (vergl. Fesca)³⁾ gruppieren:

I. Verwitterungsböden.

- a) *Tonböden*: Liaston, Keupermergelton, Muschelkalkton und Kreideton.
- b) *Lehmböden*: Gneis, rheinischer Tonschiefer, Glimmerschiefer und Kulm (unter Steinkohlenbildung).
- c) *Kalkböden*: Lias, Muschelkalk, Plänerkalk und Eifelkalk.
- d) *Mergelböden*: Kreidemergel, Löfsmergel, Liasmergel, Keupermergel, Röt.
- e) *Sande*: Lias, Grauwacke, Rotliegendes, Buntsandstein, Keuper, Karpathensandstein, Quadersand.

¹⁾ U. a. F. W. Dafert, Kleines Lehrbuch der Bodenkunde. Neudamm 1885. — L. Milch, Die Grundlagen der Bodenkunde. Leipzig u. Wien 1899.

²⁾ Vergl. Georg Appelt, Pflanze und Boden. Breslau 1889, Anhang S. 195 u. f.: Die Zusammenstellung der Gesteins- und Bodenanalysen.

³⁾ M. Fesca, Die agronomische Bodenuntersuchung und Kartierung auf naturwissenschaftlicher Grundlage. Berlin 1879, S. 1—2.

II. Schwemmböden.

- a) *Tonböden*: Diluvialer und alluvialer Marschklei und Seeschlick, Tonmergel und Deckton, tertiärer Glimmerton (Septarienton) und die abgeleiteten tertiären Tonböden.
- b) *Lehmböden*: Löss, alluvialer Auelehm, diluvialer Blocklehm und Tonlehm.
- c) *Kalkböden*: In den tertiären Becken.
- d) *Sande*: Diluvialer Glimmersand, gemeiner Diluvialsand, Grand des Diluviums, der eigentliche Alluvialsand, der junge alluviale Sand, der Tal- und Flugsand.

Von älteren geognostischen Bodeneinteilungen, wie z. B. von der von Hausmann¹⁾ und der von Hundeshagen²⁾ (vergl. G. Schübler, Grundsätze der Agrikulturchemie Bd. 2, S. 140—144) muß hier abgesehen werden.

Da bei der vorstehenden Bodeneinteilung die Humusböden nicht einzureihen sind, hat Liburnau³⁾ eine Einteilung in Primitiv- und in Derivatböden vorgeschlagen. — Da diese Einteilung im übrigen der vorhergehenden sehr ähnlich ist, verlohnt es nicht, näher auf dieselbe einzugehen.

Was bietet uns nun diese geologische Bodeneinteilung? Wir teilen zuerst alle Bodenarten in zwei große Gruppen ein, ohne Rücksichtnahme auf die momentane Bodenbeschaffenheit. Hierdurch kommt es, daß in jeder der beiden Klassen pflanzenphysiologisch ganz gleichwertige Bodenarten auftreten können. Wir machen hier also einen Unterschied, den wir aus praktischen Gründen nicht machen dürfen. Innerhalb der einzelnen Hauptgruppen aber machen wir unsere Unterabteilungen in Wirklichkeit nicht nach geologischen Gesichtspunkten, sondern gemäß der praktischen Bodenklassifikation. Das ersieht man am besten daran, daß u. a. Lias in vier von fünf Unterklassen wiederkehrt. Damit aber hat eine derartige Bodenklassifikation als „geologische“ keine Bedeutung mehr.

Auch der Schluß von dem geologischen Ursprung des Gesteines auf den Nährstoffgehalt eines Bodens hat sich als sehr unzuverlässig herausgestellt. So sagt Wohltmann⁴⁾ auf Grund zahlreicher Untersuchungen, daß die Bestimmung eines Bodens aus einer bestimmten Formation keine praktisch wertvollen Schlüsse über das Nährstoffkapital zu ziehen gestattet. Es zeigen sich vielmehr mit ihr weit größere Unterschiede zwischen den Bodenarten aus einer Formation, als zwischen denen verschiedener Formationen.

¹⁾ Hausmann, Specimen de rei agrariae et salutariae fundamento geologico, übersetzt von Prof. Körte; Möglinische Annalen Bd. 14, 2. Stück.

²⁾ Hundeshagen, Beiträge zur gesamten Forstwirtschaft. Tübingen 1825, Bd. 1, S. 106—110.

³⁾ Jos. Ritter Lorenz von Liburnau, Die geologischen Verhältnisse von Grund und Boden. Berlin 1883, S. 178.

⁴⁾ F. Wohltmann, l. c. Fühlings landw. Zeitung 50. Jahrg., Heft 11. Mitscherlich, Bodenkunde.

Wenn somit der Versuch, auf geologischer Grundlage eine Bodenklassifikation aufzubauen, auch als gescheitert angesehen werden muß, so soll doch deshalb über die Geologie, als Hilfswissenschaft für unsere Bodenkunde, keineswegs der Stab gebrochen werden. Gerade ihre Aufgabe ist es, die Umwandlungen des Bodens in längeren Zeitperioden, wie sie durch die Verwitterung, durch den Einfluß von Organismen u. a. m. stattfinden, klar zu legen. Wenn wir in der vorliegenden Bodenkunde ganz davon absehen konnten, so geschah dies nur, weil diese Veränderungen sehr gering sind, d. h. sich mehr oder weniger erst in sehr langen Zeitperioden bemerkbar machen.¹⁾

VI. Weitere Versuche einer naturwissenschaftlichen Bodenklassifikation.

Von weiteren Versuchen einer naturwissenschaftlichen Bodenklassifikation seien hier der Vollständigkeit halber noch einige erwähnt, welche jedoch bislang keine allgemeinere Verbreitung gefunden haben.

So gibt Schübler²⁾ u. a. eine Einteilung des Bodens nach seiner schweren oder leichten Bearbeitbarkeit an. Hierfür ist, wie wir früher sahen, insonderheit der Tongehalt des Bodens maßgebend, wie dies auch aus der eingehenden Beschreibung der sieben Klassen Schüblers deutlich hervorgeht.

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. Klasse: Ausgezeichnet schwere Böden | mit 95—100 % Ton. |
| 2. „ : Sehr schwere Böden | „ 80— 95 „ „ |
| 3. „ : Schwere Böden | „ 60— 70 „ „ |
| 4. „ : Böden von mittlerer Konsistenz | mehr mergelige Bodenarten. |
| 5. „ : Leichte Bodenarten | unter 50 % Ton. |
| 6. „ : Sehr leichte Bodenarten | wenig feiner Ton, überwiegend Sand. |
| 7. „ : Ausgezeichnet leichte Bodenarten | vorherrschend viel Sand. |

Dafs die Tonsubstanzen nicht den allein ausschlaggebenden Faktor für die Fruchtbarkeit eines Bodens bilden, und dafs ferner die Bearbeitbarkeit des Bodens praktisch erst in zweiter Linie in Betracht zu ziehen ist,

¹⁾ Es war mir um so leichter möglich, hier von allen diesen Momenten absehen zu können, als ich wufste, dafs Professor F. Ramann-München, welcher auf diesem Gebiete eine Autorität ist, an der zweiten Auflage seiner geologischen „Bodenkunde“ (Berlin 1905) arbeitete, welche unterdessen bereits erschienen ist.

²⁾ G. Schübler, Grundsätze der Agrikulturchemie. Leipzig 1830, Bd. 2, S. 135—137.

darauf habe ich früher wiederholt hingewiesen. — Auch dürfte die Bearbeitbarkeit des Bodens nicht nur von der Quantität, sondern auch von der Qualität des in ihm befindlichen Tones wesentlich mit abhängen und infolgedessen eine derartige Klassifikation schwer durchführbar sein (vergl. S. 329).

Eine Arbeit Ehrenbergs¹⁾ läßt durch ihren Titel die Vermutung auftauchen, als ob der Verfasser versuchen wolle, auf Grund der bakteriologischen Eigenschaften eines Bodens den pflanzenphysiologischen Wert desselben zu bestimmen. In der Abhandlung selbst geschieht es nicht; sie bringt im wesentlichen diesbezüglich nur Befunde, die auch Remy²⁾ a. a. O. wiedergegeben hat, nämlich: daß die Bakterienzählungen keine Anhaltspunkte für die bakterielle Beschaffenheit eines Bodens gibt. Daß hierfür eher die Untersuchung der einzelnen Bakterienarten brauchbar sei, diese aber wiederum für praktische Zwecke viel zu umständlich ist. — Daß die verschiedenen Bakterienarten auch physikalisch einen verschiedenartigen Einfluß auf den Boden ausüben, haben wir in § 26 besprochen. Im allgemeinen aber darf man annehmen, daß ein Boden, welcher für unsere Kulturpflanzen günstig ist, auch für die diesen günstigen Bakterien günstige Lebensbedingungen bietet. Beides wird durch die chemische und physikalische Beschaffenheit des Bodens bedingt, u. a. auch wohl durch den Kalkgehalt des Bodens.³⁾

Knop³⁾ versuchte eine Bonitierung des Bodens auf der Absorptionsfähigkeit desselben gegen Pflanzennährstoffe aufzubauen. Je geringer die Absorptionsfähigkeit eines Bodens für eine Salmiaklösung von bestimmter Konzentration war, um so geringer wählte er die Bodenklasse.

Wir haben in § 52 an der Hand der Emmerlingschen Versuche gesehen, daß die Absorptionsfähigkeit eines Bodens für Kali und Phosphorsäure durchaus in keiner Beziehung zu den praktischen Bodentaxklassen steht, von denen wir doch immerhin annehmen müssen, daß sie uns den sichersten Anhalt für den Bodenwert geben. Es sei hier darauf verwiesen.

Schließlich hat der Verfasser⁴⁾ selbst einmal den Versuch gemacht, auf Grund der Bestimmungen der Benetzungswärmen des Bodens eine Bodenklassifikation aufzubauen. Es wurde die Höhe der Krumenschicht mit der Benetzungswärme der Krume und dann die Höhe der darauf folgenden Untergrundsicht bis zu 1 m Tiefe mit der Benetzungswärme

¹⁾ Paul Ehrenberg, Die bakterielle Bodenuntersuchung in ihrer Bedeutung für die Feststellung der Bodenfruchtbarkeit; Landw. Jahrbücher 1904, Bd. 33, S. 1 u. f.

²⁾ Th. Remy, Die bakteriologische Untersuchung der Ackererde (Vortrag). V. internationaler Kongress für angewandte Chemie 1903. Bericht III, S. 785.

³⁾ Knop, Die Bonitierung der Ackererde. Leipzig 1872.

⁴⁾ Alfred Mitscherlich, l. c. Inaug.-Diss. Kiel 1898, S. 41 u. f.

des Untergrundes multipliziert und sodann beide Produkte addiert. Es ergab sich in dieser Anzahl der „Bodenkalorien“ eine sehr gute Übereinstimmung mit den Taxklassen der schlesischen Landschaft. — Trotzdem diese Bodenklassifikation sehr viel für sich hat, läßt sich doch noch nicht mit Bestimmtheit sagen, ob das der richtige Weg zur Erzielung einer exakten Bodenklassifikation ist, da die theoretischen Grundlagen für dies empirische Verfahren bislang noch fehlen. Ich glaube deshalb hier die betreffenden äusserst günstigen Resultate nicht wiedergeben zu dürfen.

VII. Versuche einer ökonomischen Bodenklassifikation.¹⁾

Den Anstofs zu den folgenden Bodenklassifikationen, welche nach unseren obigen Ausführungen bereits in die Bodentaxation hineingreifen, haben wohl Settegast²⁾ und Birnbaum³⁾ gegeben.

Birnbaum sucht zehn Eigenschaften des Bodens heraus, welche für den Bodenwert in Betracht kommen. Er gibt jeder dieser Eigenschaften, je nachdem sie gut oder schlecht vertreten sind, 1—10 Punkte, so daß der beste Boden $10 \times 10 = 100$ Punkte erhält. Der Gedanke, von dem Birnbaum bei seiner Klassifikation ausging, war der, daß man bei der Schwierigkeit der Bodenklassifikation den Boden so oft, als man Bonitierungsmomente annehmen will, bonitieren müsse und aus allen Bonitierungen sodann den Durchschnitt als den wahrscheinlichsten Ausdruck für die relative Wertabstufung des betreffenden Bodens nehmen kann. Jedes dieser Bonitierungsmomente solle deshalb gleichhoch zu veranschlagen sein. Birnbaum stellte hierzu die folgenden zehn Momente als die wesentlichsten hin:

1. Bestandmischung (Bodenart)	mit 10 Punkten.
2. Mächtigkeit der Krume und Untergrund	„ 10 „
3. Untergrund	„ 10 „
4. Zusammenhalt der Krume	„ 10 „
5. Absorptionsfähigkeit	„ 10 „
6. Feuchtigkeitsverhältnisse	„ 10 „
7. Bearbeitungsfähigkeit	„ 10 „
8. Bearbeitung	„ 10 „
9. Der Kraftzustand (Reichtum)	„ 10 „
10. Die Anbaubeschränkung (Einschätzung nach den Hauptfrüchten)	„ 10 „

Im Höchsthalle = 100 Punkte.

¹⁾ Vergl. auch Thilo Eichholtz, Die Bodeneinschätzung. Zusammenstellung der praktischen Gesichtspunkte und der gesetzlichen Bestimmungen. Berlin 1900.

²⁾ H. Settegast, Die Landwirtschaft und ihr Betrieb. Breslau 1875, Bd. 1, S. 229 u. f.

³⁾ K. Birnbaum, Landwirtsch. Taxationslehre. Berlin 1877, S. 69, 73—83.

Krafft¹⁾ hält diese Art der Bonitierung mit Recht nicht für zweckentsprechend, da die einzelnen Momente vom pflanzenphysiologischen wie vom wirtschaftlichen Standpunkte aus sehr verschieden hoch zu bewerten sind. Er führt so in diesem sogenannten „kombinierten Bonitierungs-systeme“ das eigentliche Punktersystem ein. So entwarf er für ein warmes trockenes Klima mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 10,1 °C. (Januar - 1,7 °C., Juli + 28,1 °C.) und einer jährlichen Niederschlagsmenge von 440 mm das folgende Bodenklassifikationsschema:

	Höchstzahl der Punkte
1. <i>Bodenart</i> : Lehmmergelboden = 25, milder Lehm Boden = 20, milder Tonboden = 18, sandiger Lehm Boden = 17, lehmiger Sandboden = 16, Sandmergelboden = 15, Humusboden = 14, Tonmergelboden = 13, strenger Lehm Boden = 12, gewöhnlicher Tonboden = 11, strenger Tonboden = 10, loser Sandboden = 8, Kalkmergelboden = 6, Kalkboden = 4, Flugsand = 1	25
2. <i>Mächtigkeit der Ackerkrume</i> : tiefgründig: über 60 cm = 10, 60—50 cm = 8, 50—30 cm = 6, 30—15 cm = 4; flachgründig: 15—10 cm = 2, unter 10 cm = 1	10
3. <i>Untergrund</i> : Lehmmergelboden, wie die Krume = 15, von anderer Beschaffenheit: undurchlassend = 10, durchlassend = 6, Trieb sand = 4, Schotter = 2, Fels = 1	15
4. <i>Humusgehalt</i> : humusreich = 5, humos = 4, humushaltig = 3, humusarm = 2, moorig = 1	5
5. <i>Neigung</i> : 1°—3° = 5, 4°—6° = 4, 7°—9° = 3, 10°—14° = 2, über 14° = 1	5
6. <i>Bearbeitungsfähigkeit</i> : 60—70 a pro Tag und Pferdege span = 5, 50—60 a = 4, 40—50 a = 3, 30—40 a = 2, 20—30 a = 1, 10—20 a = 0	5
7. <i>Wasserfassende Kraft</i> : frisch = 10, feucht = 8, trocken = 6, nafs = 4, dürr = 1	10
8. <i>Lage</i> : Westlage = 5, Ostlage = 4, Nordlage = 3, Südlage = 1	5
9. <i>Hauptfrüchte</i> : Weizen, rotkleefähig = 10, Gerste, luzerne fähig = 8, Hafer, nicht kleefähig = 3, Roggen, nicht klee fähig = 1	10
10. <i>Kultur- und Düngungszustand</i> : ausgezeichnet = 10, sehr gut = 8, gut = 4, schlecht = 2	10

Gesamtwert des ertragreichsten Bodens = 100

Es ist naheliegend, die einzelnen praktischen Gesichtspunkte, nach denen Krafft das Punktersystem aufgestellt hat, näher zu besprechen.

¹⁾ Guido Krafft, Die Betriebslehre. Berlin 1877, S. 18—19.

Wir finden unter den 100 Punkten:

für die physikalische Beschaffenheit der Krume (ad 1, 4, 6, 7 und 9 und 10 ca. zur Hälfte) im Maximum $25 + 5$ $+ 5 + 10 + 5 + 5 =$	55 Punkte
für die chemische Beschaffenheit (ad 9 und 10 ca. zur Hälfte) $5 + 5 =$	10 "
für die Neigung der Erdoberfläche (ad 5 und 8) $5 + 5 =$.	10 "
für die Tiefe der Krume (ad 2) =	10 "
und für die Beschaffenheit des Untergrundes =	15 "

Im ganzen: 100 Punkte.

Da dieses Punktiersystem auf praktischen Erfahrungen aufgebaut ist, so läßt sich aus ihm ersehen, daß der Praktiker die physikalische Beschaffenheit der Bodenkrume vier- bis fünfmal so hoch veranschlagt als jeden der anderen lokalen Vegetationsfaktoren.

Dem Punktiersystem haftet, von allem anderen abgesehen, der Übelstand an, daß es nur für das betreffende Klima brauchbar ist. Kraft hat natürlich absichtlich das Klima als Vegetationsfaktor bei dem Punktierungssystem ausgeschaltet. Er wäre sonst zu ganz unhaltbaren Widersprüchen gekommen. Hätte er so einem nassen Klima einen hohen Punkt gegeben, so hätte vielleicht der sandige Lehm Boden, der durchlassende Untergrund, die Südlage u. a. m. die *höchsten* Ertragspunkte erhalten müssen. — Hätte er aber dem trockenen Klima die höchsten Ertragspunkte gegeben, so müßten sich die anderen Ertragspunkte wiederum anders gestalten; denn Boden und Klima treten bekanntlich als Vegetationsfaktoren in Wechselwirkung zueinander. — Dem Punktiersystem muß somit der Mangel anhaften, daß es in der vorstehenden Weise keine allgemeine Brauchbarkeit beanspruchen kann.

Auch alle diese Bonitierungssysteme können nur einen rohen Anhalt für den Bodenwert geben, welcher mehr oder weniger von der Art der Schätzung des einzelnen Praktikers abhängt, mithin immer ein stark subjektives Moment einschließen muß.

Ganz unzweckmäßig muß mir aus dem gleichen Grunde eine Bodenklassifikation erscheinen, welche sich auf der alten Grundsteuerbonitierung aufbauen soll. Nach dieser will Woelfer¹⁾ für eine Gegend den Wert einer „mittleren Bodenklasse“ feststellen und sodann von dieser Mittelklasse ausgehend bessere oder geringere Bodenklassen abschätzen. — Bei der Verschiedenheit der Grundsteuerbonitierung in den verschiedenen Gegenden Deutschlands ersieht man leicht, daß diese Bodenklassifikation

¹⁾ Theodor Woelfer, Ein Beitrag zur Beurteilung der Frage der Bodenschätzung und Bodenbewertung; Landwirtschaftl. Jahrbücher 1899, Bd. 28, S. 311 u. f.

ganz abgesehen von der Subjektivität des Taxators, nie allgemeinen Wert beanspruchen kann.

Zu einer objektiven, rein wissenschaftlichen Bodenklassifikation können wir nur dann gelangen, wenn wir den Einfluss jedes einzelnen Vegetationsfaktors bei jeder möglichen Kombination studieren, so wie wir dies im vorhergehenden Paragraphen gezeigt haben. Hierzu aber haben wir viele Arbeitskräfte, viele Forscher und jahrzehntelange Arbeit nötig.

„Freilich ist unsere Zeit wenig geneigt“ — sagt J. König¹⁾ — „sich derartigen mühsamen und langwierigen Versuchsrichtungen zuzuwenden; die berufenen wissenschaftlichen Anstalten dieser Art sollen der Landwirtschaft direkt und schnell nutzen; sie werden infolgedessen mit Versuchen beauftragt, die auch von jedem Verwalter oder Gärtner ausgeführt werden können. Es ist aber eine alte Erfahrung, dass wissenschaftliche Arbeiten, je eingehender und reiner sie um ihrer selbst willen und ohne Nebenrücksichten auf die Praxis durchgeführt werden, desto eher überraschende und für das praktische Leben nutzbringende Ergebnisse zutage fördern. Diese Erfahrung hat auch ihre Gültigkeit für die Landwirtschaft“, und — ich möchte hinzufügen — in dieser nicht am wenigsten für die Bodenkunde.

¹⁾ J. König, l. c. Landwirtschaftliche Versuchs-Stationen Bd. LXI, 1905, S. 396.

Druckfehler-Berichtigungen.

Seite 108 unter der Figur lies: nach **Völker** statt nach Völkers.

Seite 111 7. Zeile von unten lies: der alte **Völkersche** Apparat statt Völknersche.

Seite 117 oberste Zeile lies: **11,5 qcm** statt 11,59 qcm.

Alphabetisches Sach- und Namenregister.

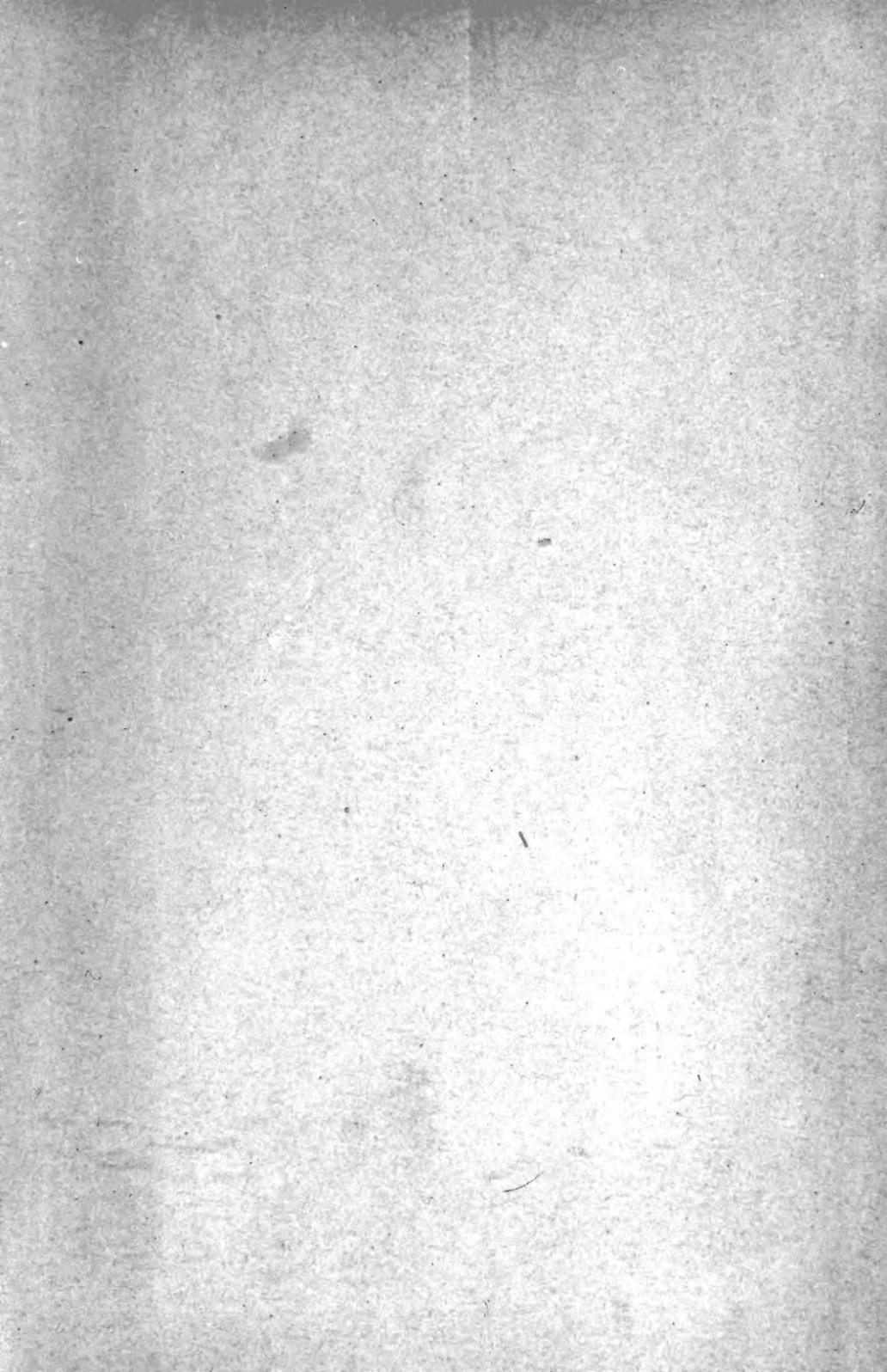
- Abschlämmen s. Schlamm-
 methode.
 Absieben des Bodens zur
 Untersuchung des Fein-
 bodens 8.
 Absorption des Bodens für
 Gase 225—227.
 — — — Pflanzennähr-
 salze 261—269.
 — — — Wärme 28,
 245—248.
 Adsorptionskoeffizienten
 267.
 Ackergare 135, 136, 146.
 Ackerkrume 277—283.
 Adhäsion des Bodens an
 Holz und Eisen 112 bis
 116.
 Adhäsionskonstante 77, 78.
 Äußere Bodenoberfläche 73.
 Ahr, J. 248.
 Ammon, G. 158, 159, 225,
 230.
 Ammoniak-Absorption 227.
 Analyse siehe Bodenanalyse.
 Ångström, J. A. 27.
 Appelt, G. 352.
 Arntz, E. 15, 16, 18, 19, 158.
 Arrhenius, S. 188.
 Atmosphärische Einflüsse
 131, 299—305.
 Atterberg, A. 254.
 Ausflockung der Tonsub-
 stanzen 148—151, 264.
 Ausnutzungskoeffizienten
 der Phosphorsäure 252,
 253.
B
 Babo, v. 160, 161.
 Bagger, W. 47.
 Bakterien siehe Bodenbak-
 terien.
 Baur, F. 140.
 Behn, H. 255.
 Bemelé, C. 140.
 Bemmelen, J. M. van
 263, 264.
 Benetzungerscheinungen
 153—161.
 Benetzungsgläschen 55.
 Benetzungsgleichung (4)
 59.
 Benetzungskurven 61.
 Benetzungswärme d. Bodens
 51—66.
 Bennigsen, v. 41.
 Berührungspunkte d. festen
 Bodenteilchen 89, 90.
 Billitzer, J. 150.
 Bindigkeit des Bodens 98,
 99, 105.
 Birnbaum, K. 356.
 Blanck, E. 194.
 Boden, Definition d. Wortes
 1—3.
 Bodenanalyse 33—41, 253,
 257—261.
 Bodenarten 327—339.
 Bodenbakterien 135—137,
 270—271.
 Bodenbearbeitung 120 bis
 124, 140, 209—211, 333,
 334, 354.
 Bodendecke 287—293.
 Bodenerträge s. Pflanzen-
 erträge.
 Bodenklassifikation 6, 322
 bis 359.
 Bodenoberfläche 2, 51—76.
 Bodenprobe 9—14, 309 bis
 321.
 Bodentemperaturen 243,
 246, 248.
 Bodenuntersuchung 5—8.
 Börnstein, 27, 189, 194,
 225.
 Boussingault 222.
 Brache 146, 147, 210, 287
 bis 289.
 Brandes, H. 78.
 Braungart, R. 347.
 Bunsen, R. 51, 160, 235.
C
 Cadet de Vaux 36.
 Cal. siehe Kalorie 23.
 Charles 232.
 Chemische Bodeneigen-
 schaften 248—275, 316,
 317.
 — Massenwirkung 264.
 Cieslar, A. 146.
 Clausius, R. 66.
D
 Dafert, F. W. 352.
 Dampfdruckkurve 68, 69.
 Davy 161.
 Déherain 351.
 Diffusion s. Durchlässigkeit.
 Djemil, M. 139.
 Dobeneck, A. Frh. v. 158,
 161, 225, 226.
 Düngung 147, 251, 252, 256,
 269, 270.
 Durchlässigkeit des Bodens
 für Gase 230—234.
 — — — Wasser 194
 bis 204.
 Durchlüftungsfähigkeit des
 Bodens 230—234.
E
 Ebermayer, E. 210, 218,
 223, 235, 247, 296.
 Ebert, H. 78.
 Edler, W. 36, 186.
 Ehrenberg, P. 355.
 Eichholtz, Th. 356.
 Eichhorn 265.
 Eindringen des Wassers in
 den Boden 201—204.
 Einzelkornstruktur 87, 96,
 109, 115, 118, 124—128,
 131—134, 157, 179, 199,
 209, 231.
 Eiskalorimeter 51—54.
 Elementaranalyse 35.

- Elster, J. 78.
 Emission des Bodens für Wärme 28, 245—248.
 Emmerling, A. 42, 49, 252, 253, 266, 313, 317, 338, 349.
 Engerling 140.
 Erde, Definition d. Wortes 2.
 Erdoberfläche 2, 308, 309.
 Erwärmung des Bodens 29, 30.
 Eser, C. 206—210, 212.
 Ewers, P. 78.
 Exposition der Erdoberfläche 207, 208, 294, 295.
 Exsikkator 16—18.
 Fadejeff, A. 37.
 Fallage der Schlammprodukte 45, 46.
 Färbung der Koloidsubstanzen 49.
 Fallon, F. A. 351.
 Farbe des Bodens 28—32, 207.
 Fehler der Probeentnahme 315.
 Fehlerwahrscheinlichkeitsrechnung 309—322.
 Fehlerwahrscheinlichkeitstabelle 312.
 Fesca, M. 352.
 Feste Bodenbestandteile 1 bis 152.
 Festigkeit d. Bodenkrümel 99—103.
 Filtrierrohren 18.
 Fleischer, M. 133, 293, 337, 349.
 Flint, E. R. 15.
 Flockenbildung der Tonsubstanzen 148—151.
 Flügge, C. 200.
 Forbes 242.
 Fresenius 35.
 Fribourg 139.
 Frostwirkung auf d. Boden 132—134.
 Frühbeete 136.
 Gare 135, 136, 146.
 Gang d. Eiskalorimeters 54.
 Gasabsorption durch den Boden 225—227.
 Gauß 312, 319.
 Gay-Lussac 232.
 Gehl 263.
 Geitel H. 78.
 Geologische Bodenklassifikation 352—354.
 Georges, N. 131.
 Gerson, G. H. 314, 315.
 Gestalt des Hohlraumvolumens 84—87.
 Gewicht, spezifisches — der festen Bodenteilchen 20 bis 23.
 Gewichtseinheit 7.
 Girard, 234, 351.
 Gisevius, P. 20.
 Gleichartigkeit eines Grundstückes 314—322.
 Godlewski, E. 255.
 Goltz, Th. Frh. v. der 341.
 Grandeau, L. 33.
 Größe des Hohlraumvolumens 80—84.
 Grofs, E. 193.
 Gründüngung 272—273, 278—280.
 Grundwasserstand 208, 295, 299.
 Haberlandt, F. 99—101, 105, 106, 161, 178, 180, 204, 239, 301.
 Hagel 132.
 Hagen, G. 312.
 Hanamann, F. 256.
 Hannén, F. 235.
 Haselhoff, E. 251.
 Hausmann 353.
 Hazard, J. 103, 341.
 Heinrich, R. 99, 100, 107, 116, 126, 162, 182, 219, 233, 234, 250, 254.
 Hellriegel, H. 157, 214, 219, 220, 254, 270.
 Helmersen, G. v. 26.
 Helmkampf, A. 254.
 Hensen, V. 138.
 Hilgard, E. W. 42, 46, 87, 89, 156.
 Hiltner, L. 273.
 Hoffmann, H. 347, 351.
 Hohlraumvolumen des Bodens 79—98.
 Humus 22, 25, 35, 98, 101, 102, 105, 110, 114, 129, 154, 181, 201, 229, 237, 238, 332, 336—337.
 Humusbestimmung 34, 35.
 Hundeshagen 353.
 Hydraulischer Wert 47.
 Hygroskopizität 56—58, 66 bis 70, 153—165.
 Indirekte Düngung 269 bis 270.
 Inklination 207—208, 294.
 Jäger 149.
 Jordan, W. 312.
 Kältemischung 53.
 Kali 249, 265, 269, 270.
 Kalibestimmung 259—260.
 Kaligehalt verschiedener Bodenarten 349.
 Kalk 22, 25, 35, 71, 75, 90, 95, 98, 101, 102, 105, 110, 114, 115, 129, 154, 181, 192, 199, 208, 209, 237, 249, 265, 269, 270.
 Kalkbestimmung 33, 34, 260.
 Kalkböden 332, 336.
 Kalkgehalt verschiedener Bodenarten 349.
 Kalorie (cal.) 23, 26.
 Kalorimeter 24, 25, 51—54.
 Kaolin siehe Ton.
 Kapillaritätserscheinungen 166—176.
 Kapillaritätsgleichung 168 bis 170.
 Kapillaritätskonstanten 194.
 Kattein, A. 59, 70, 79.
 Kellner, O. 268, 269.
 Kies 37, 200.
 Kirchhoff, G. 246.
 Kjeldahl 260.
 Klassifikation siehe Bodenklassifikation.
 Klenze, v. 178, 180, 186, 188, 200.
 Klima 299—305.
 Knop, W. 41, 155, 222, 266, 274, 351, 355.
 Kobus, J. C. 333, 334.
 König, A. 265.
 König, J. 9, 251, 253, 257, 359.
 Kohärenz des Bodens 98.
 Kohäsionskonstante 77.
 Kohlensäure 222—227, 234 bis 236.
 Kolloide 79.
 Korngröße der festen Bodenteilchen 32—49, 72, 181, 196.
 Krafft, G. 357.
 Krakow, S. 188.

- Krause, M. 140.
 Kraut 2.
 Krüger 151.
 Kühn, J. 41, 48.
 Künstliche Düngung 147
 bis 152.
 Krümelstruktur 87, 96, 109,
 115, 118, 131—134, 157,
 179, 199, 209, 231, 333,
 334.
 Krume, Krumenschicht 277
 bis 287, 309.
 Krumentiefen 309—314.
 Kultur des Bodens 320—321.
Landolt 27, 189, 194, 225.
 Lang, C. 22, 25, 26, 30, 248.
 Lehm 35, 75, 103, 110, 115,
 118, 192, 199—201, 209,
 229, 231.
 Lehmboden 8, 22, 35, 71,
 76, 95, 97, 157, 181, 263,
 267, 268, 279, 280, 282,
 330, 334—336.
 Leitungsvermögen des Bodens
 für Luft 230—236.
 — — — — — Wärme 239 bis
 245.
 — — — — — Wasser 185 bis
 204.
 Lemmermann, O. 11, 12,
 127, 128, 284.
 Lenard, P. 166.
 Léwy 222.
 Liburnau, J. Ritter Lorenz
 v. 353.
 Liebenberg, Ritter A. v.
 22, 25, 26, 180, 186, 200,
 248.
 Liebig, J. v. 33, 161, 249,
 267, 270.
 Liebscher 254, 255.
 Littrow, A. v. 239.
 Loew, O. 249.
 Loges 35.
 Luft, Bodenluft 222—236.
 Luftkapazität d. Bodens 227.
Mächtigkeit des Bodens s.
Krumentiefen.
 Magnesia 249, 274.
 Manometerkapillare 17.
 Marschboden 267, 268, 279,
 280, 282, 334, 338, 349.
 Maxwell, W. 275.
 Mayer, A. 149, 162, 177,
 178, 254, 261, 264, 265,
 267.
 Mechanisch-chemische Boden-
 analyse 33—36.
 Mechanische Bodenanalyse
 36—49.
 Mehring, H. 350.
 Meister 206, 207.
 Mergel, Mergelboden 98,
 105, 157, 331, 336.
 Meyer 107.
 Milch, L. 352.
 Mineralien 27.
 Mineralische Bodenbestand-
 teile 73.
 Minimum, das Gesetz des
 249.
 Mitscherlich, A. 7, 14
 bis 16, 22, 23, 34, 35,
 43, 51, 54, 60, 69, 72,
 76, 77, 94, 97, 111, 112,
 133, 134, 137, 147, 159,
 160, 163, 168, 181, 192,
 204, 206, 212, 261, 264,
 281, 297, 300, 317, 324,
 329, 336, 337, 355.
 Möllendorff, G. v. 218.
 Möller, J. 223.
 Moor, Moorboden 8, 22, 35,
 71, 76, 91, 95, 97, 98,
 157, 181, 263, 337.
 Moorkultur 290—293.
 Moosdecke 287—290.
 Müttrich 245.
 Mykorrhizien 273.
Nachtweh, A. 121.
 Nadelstreu 287—290.
 Nägeli, v. 90.
 Nährstoffe der Pflanze 249
 bis 273.
 Neigung der Erdoberfläche
 293—295, 308—309.
 Nernst, W. 71, 212.
 Niederschläge 132.
 Niveaudifferenz infolge der
 Bodenbearbeitung 286.
 Nobbe, Fr. 126, 273.
 Nobel 42.
 Nördlinger, Th. 248.
 Nowacki, A. 3, 345.
Oberfläche des Bodens 2.
 — der Erde 2.
 — äußere 73.
 — mizellare 73.
 Oberflächenspannung 149,
 150.
 Ökonomische Bodenklassi-
 fikation 338, 356—358.
Organische Substanzen im
Boden 73.
 Orth, A. 138.
 Ortstein 296.
Pabst, H. W. 341.
 Peters, C. A. F. 311.
 Pfaundler, L. 25.
 Pfeiffer, Th. 146, 272.
 Pflanze, Einfluß der Pflanze
 auf den Boden 137, 138.
 Pflanzanalyse 254—256.
 Pflanzenerträge auf ver-
 schiedenen Bodenarten
 282, 292, 338, 342,
 — bei verschiedener Korn-
 größe des Bodens 38, 40.
 — — — — — Krumentiefe des
 Bodens 284, 285.
 — — — — — Löslichkeit der
 Düngesalze 251, 252.
 — — — — — Neigung der Erd-
 oberfläche 294.
 — — — — — verschiedenem Sand-
 gehalt des Bodens 12.
 — — — — — Steingehalt des
 Bodens 10, 11.
 — — — — — verschiedener Struk-
 tur des Bodens 142.
 — — — — — Tiefe der Boden-
 bearbeitung 143, 146.
 — — — — — verschiedenem Was-
 sergehalte des Bodens 220.
 — — — — — verschiedener Zeit der
 Bodenbearbeitung 144.
 Pflanzengifte 273—275.
 Phosphorsäure 249, 265 bis
 268.
 Phosphorsäurebestimmung
 258—259.
 Phosphorsäuregehalt ver-
 schiedener Bodenarten
 349.
 Physikalische Absorption
 261—264.
 Plasmolyse 273.
 Poiseuille 195.
 Porenvolumen siehe Hohl-
 raumvolumen.
 Pott, E. 239.
 Prianschnikow 250.
 Probenentnahme 309—316.
 Puchner, H. 15, 42, 101
 bis 103, 109—114, 119,
 129.
 Punktsystem b. d. Boden-
 klassifikation 356—358.
 Pycnometer 20.

- Quarzsand siehe „Sand“.
 Quincke, G. 88, 91.
- Radioaktivität des Bodens**
 78.
- Ramann, E. 2, 28, 42, 44,
 47, 93, 94, 97, 98, 140,
 183, 193, 204, 265, 287,
 296, 298, 337, 354,
 Regen 131, 132.
 Regenwurm 138—140, 273,
 Reibung des Bodens an Holz
 und Eisen 116—120.
 Reibungskoeffizient 117.
 Remy, Th. 355.
 Renk, F. 230.
 Riecke, 27, 239.
 Rimpau, 290.
 Rodewald, H. 15, 43, 49,
 54—56, 58—60, 66, 67,
 69, 70, 77, 79, 153, 156,
 159, 160, 184, 185, 308.
 Rümker, K. v. 147.
- Sachs, J.** 133, 162.
 Sack 121.
 Salger, C. 235.
 Salzlösungen 189, 193, 211,
 212.
 Sand 12, 22, 37—41, 71, 75,
 90, 98, 101—103, 105,
 110, 114, 115, 118, 129,
 154, 181, 196, 199—201,
 208, 229, 231, 237, 238,
 278.
 Sandbestimmung 34.
 Sandboden 8, 22, 25, 35,
 71, 76, 95, 97, 157, 181,
 263, 267, 268, 278—280,
 282, 330—331, 335—336,
 Sandgehalt verschiedener
 Bodenarten 35.
 Sauerstoffgehalt der Boden-
 luft 223.
 Schachbasian, J. 113 bis
 120, 128—130.
 Schellhorn 140.
 Schermbeek, A. J. van
 111—113, 124.
 Schlamm 46.
 Schlammapparate 41, 42.
 Schlammmethode 41—49.
 Schlösing 33, 36, 48, 158,
 226.
 Schnee 132.
 Schöne 42.
 Schubert, J. 242, 243,
 245.
- Schübler, G. 20, 22, 29,
 33, 93, 96—98, 104, 106,
 107, 112, 113, 120, 128 bis
 130, 154, 158, 160—163,
 178, 225, 345, 354.
 Schuhmacher, W. 22, 25,
 26, 98.
 Schuller, A. 56.
 Schwalbe, G. 160.
 Schwarz, A. R. v. 156.
 Seelhorst, C. v. 131, 255.
 Segnitz, E. 123, 124.
 Senft, F. 344, 351.
 Settegast, H. 356.
 Sickerwassermengen 215 bis
 218.
 Siebmethode 37—41.
 Siebrückstand 9.
 Sieden, F. 49.
 Sikorski, J. S. 156—158.
 Simony, O. 311.
 Sjollem, B. 49.
 Soyka 81, 176, 177.
 Spaltpilze siehe Bodenbakterien.
 Spezifische Eigenschaften
 der festen Bodenteilchen
 14—78.
 Spezifische Wärme des
 Bodens 237, 238.
 Sprengel, C. 121, 351.
 Sproßspitze 135, 136.
 Stahl-Schroeder, M. 255.
 Stalldüngung 279.
 Staub 37, 46.
 Steighöhe des Wassers im
 Boden 171—173, 185 bis
 194.
 Steighöhenmesser 191.
 Steine 11, 13—14, 37, 229.
 Stellwaag, A. 160, 225.
 Stickstoff in der Bodenluft
 223.
 — im Boden 249, 265 bis
 268.
 Stickstoffassimilation 272,
 273.
 Stickstoffbestimmung 260
 bis 261.
 Stickstoffgehalt verschiede-
 ner Bodenarten 349.
 Stiehr, G. 222, 274, 275.
 Streudecke 210, 288—290.
 Struktur des Bodens siehe
 Einzelkorn- und Krümel-
 struktur.
 Swaring, A. J. 151.
 Symbiose 272—273.
- Tacke, B. 349.
 Tau 213.
 Taxklassen 338.
 Temperatur siehe Boden-
 temperaturen.
 Thaer, A. 4, 32, 279, 328,
 340, 345.
 Thiel, H. 130, 137, 250,
 273, 279.
 Thiele, P. 304.
 Thoms, G. 350.
 Thomsen, H. S. 267.
 Thurmann 344.
 Tiefgründigkeit des Bodens
 siehe Krumentiefen.
 Tollens, B. 15, 255.
 Toluolbenetzungskurve 75.
 Ton 8, 22, 25, 35, 75, 98,
 101, 102, 105, 110, 114,
 118, 129, 154, 181, 192,
 199, 201, 229, 231, 237,
 238, 329.
 Tonbestimmung 34, 49.
 Tonboden 8, 22, 35, 71, 76,
 91, 95, 97, 98, 157, 181,
 263, 279, 328—334.
 Tongehalt verschiedener Boden-
 arten 35.
 Torf 22, 25, 114, 118, 157,
 199, 231, 237.
 Trennungswiderstand des
 Bodens 99, 103—105,
 107—112.
 Trennungswiderstands-
 messer 104, 108, 112.
 Trockensubstanzbestim-
 mung 14—19.
 Trockenverfahren 16—19.
 Trommer, C. 22, 155, 165,
 178, 186, 253, 344, 351.
 Tryller, H. 15.
 Tubeuf, Frh. v. 273.
 Tucher, M. 131.
- Übersanden 211, 290—293.
 Ulbricht, R. 258.
 Ulrich, R. 25, 151.
 Ulsch 260.
 Unger, F. 344.
 Ungleichartigkeit des Bodens
 309—321.
 Unkräuter, bodenbestim-
 mende 344—349.
 Untergrund 295—299.
- Vakuummexikator 16.
 Verdunstung des Wassers
 204—213, 300—303.

- Verkrustung des Bodens 147—152.
- Verwesung der Humussubstanzen 135.
- Virchow, K. 15.
- Völker 107—109, 113, 120.
- Vogel 206, 207.
- Vogler, A. 337, 349.
- Voigt, W. 91.
- Volumen, spez. der festen Bodenbestandteile 20 bis 23.
- Volumenmafs Bodens 7.
- Volumenverminderung 97 bis 98, 286.
- Volumengewicht 8.
- Vorschläge zur Ausarbeitung einer Bodenklassifikation 322—327.
- Wärmeabgabe (-emission) und -aufnahme (-absorption) 245—248.
- Wärmekapazität (spez. Wärme) 23—26, 237—239.
- Wärmeleitung 26—28, 239 bis 245.
- Wärmeleitungs-konstanten verschiedener Bodenarten 244.
- Wagner, F. 239—241.
- Wahnschaffe, F. 2, 13.
- Waldstreu 210, 287—290.
- Wartha, V. 56.
- Wasser, Bodenwasser 153 bis 221.
- Wasserausnutzung durch die Pflanze 161—165, 216.
- Wasserdurchlässigkeitskonstanten verschiedener Bodenarten 197, 198.
- Wasserextrakt aus dem Boden 257—258.
- Wassergehalt des Bodens 183—184.
- Wasserkapazität 176—185.
- Wasserleitung 166—176, 185—204.
- Wasserverbrauch d. Pflanze 303.
- Wasserverdunstung 204 bis 213.
- Weber 344.
- Weber, C. A. 347.
- Wein, E. 258.
- Welitschkowsky, D. v. 195, 197, 230.
- Wilfarth, H. 270.
- Williams, W. R. 9, 36, 46, 48.
- Wilms, J. 255.
- Woelfer, Th. 358.
- Wohltmann, F. 4. 350, 353.
- Wolf, E. 35.
- Wollny, E. 8, 10—12, 22, 30, 31, 37—39, 48, 87, 93, 96, 128, 133—136, 138—144, 148, 178 bis 180, 186—188, 195, 197, 199—201, 210—212, 215, 217, 219, 222—224, 226, 228, 230, 232, 247, 284, 285, 287, 288, 292—296, 302, 303.
- Wollny, W. 214.
- Zähigkeit, spezifische von Wasser und von Salzlösungen 188, 189.
- Zugkraftmesser 121—123.





S
593
M58

Mitscherlich, Eilhard Alfred
Bodenkunde für Land- und
Forstwirte

Fore

MITSCHERLICH, E.A.

AUTHOR

Bodenkunde.

TITLE

S

593

M58

[84862]

DATE

ISSUED TO

[84862]

LIBRARY
FACULTY OF FORESTRY
UNIVERSITY OF TORONTO

