Untersuchungen über die Beziehung zwischen der Bodenlockerung und der Wasserverdunstung des Bodens

VON ALFRED STEINBRÜCK, Königsberg (Pr.)

Einleitung

Es ist allgemein bekannt, daß die im Boden enthaltenen Wassermengen in hohem Maße das Wachstum und das Ertragsvermögen unserer Kulturpflanzen bedingen. Und doch hat es erst einer Reihe wissenschaftlicher Untersuchungen bedurft, um diesen Nachweis quantitativ zu liefern und in die zumeist kompliziert liegenden Verhältnisse Klarheit zu bringen.

Der Wasserhaushalt des Bodens hängt einerseits von der Größe und der Verteilung der atmosphärischen Niederschläge und andererseits von der Wasserverdunstung, von der Sickerwassermenge und dem Grundwasserspiegel ab. Während man auf die ersteren Faktoren fast keinen künstlichen Einfluß auszuüben vermag, ist man bei den letzteren sehr wohl in der Lage, sie durch verschiedene Kulturmaßnahmen in einem für die Vegetation vorteilhaften Sinne zu beeinflussen. Es ist daher auch für den praktischen Ackerbau von großer Bedeutung, zu wissen, welche Wirkung die verschiedenen Maßnahmen der Bodenbearbeitung auf die Wasserbewegung im Boden haben.

Bevor auf diese Fragen eingegangen wird, sollen zunächst die für die Wasserverdunstung des Bodens in Betracht kommenden Faktoren angeführt werden. Ihre Erforschung verdanken wir vor allem ESER¹⁾, der wohl als erster richtig erkannte, daß die Ursache der Verdunstung auf einer großen Zahl verschiedenartiger Faktoren beruht, die er, soweit das möglich war, getrennt in ihrer Wirkung untersuchte.

Man hat diese Faktoren in zwei Gruppen geteilt, in die klimatischen und in die bodenkundlichen Verdunstungsbedingungen. Zu den klimatischen Verdunstungsfaktoren rechnet man die Windgeschwindigkeit und die relative Luftfeuchtigkeit, diese ist das Ver-

¹⁾ ESER, Unters. üb. den Einfluß der physik. und chem. Eigensch. des Bodens auf dessen Verdunstungsvermögen. Forsch. a. d. Geb. d. Agrik. physik, Bd. 7. 1884. S. 1 u. f.

hältnis des Wassergehaltes, den die Luft momentan hat, zu dem Wassergehalt, den die Luft bei der entsprechenden Temperatur im Höchsthalle haben könnte. Die Verdunstung ist direkt proportional dieser Differenz. Je mehr Wasser die Luft bis zur Sättigung noch zu fassen vermag, um so mehr Wasser verdunstet. — Der Einfluß des Windes war bei den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit nahezu ausgeschaltet. Außerdem wurde dieser Faktor, wie alle atmosphärischen Verdunstungsfaktoren, durch einen später genauer anzuführenden Verdunstungsmesser konstant gehalten, so daß sie für unsere Beobachtungen keine Bedeutung haben. Es sei hier aber auf die interessanten Versuche von HENSELE¹⁾ hingewiesen, der den Einfluß des Windes auf den Boden und besonders den Einfluß auf die Verdunstung untersuchte und dabei fand, daß mit zunehmender Windstärke die Verdunstung gesteigert wurde.

Zu den bodenkundlichen Verdunstungsfaktoren gehören:

1. Der Wassergehalt der Bodenoberfläche, die mit der Atmosphäre in Berührung kommt,
2. Die Größe und Beschaffenheit der Boden- bzw. Erdoberfläche, an der das Wasser verdunsten kann,
3. Die Wasserleitungsfähigkeit des Bodens,
4. Die Faktoren, die auf die Erwärmung des Bodens einen Einfluß haben, wie die Farbe des Bodens, die Neigung der Erdoberfläche.

Außerdem wäre noch die Pflanzendecke zu erwähnen, die die Wasserverdunstung des Bodens nach verschiedenen Seiten nicht unwesentlich beeinflusst.

Bei den nachfolgenden Versuchen interessiert uns von diesen genannten Faktoren nur die Wirkung, die eine Bodenlockerung auf die Wasserverdunstung des Bodens hat. Und zwar soll untersucht werden, in welcher Weise die verschiedenen Lockerungstiefen die Wasserverdunstung des Bodens beeinflussen und welche Beziehung zwischen ihnen besteht. Grundlegend auf diesem Gebiete sind die bereits erwähnten Arbeiten von ESER²⁾ und WOLLNY³⁾. Sie stellten in der Hauptsache folgendes fest: Die Verdunstung des Wassers aus dem Boden wird durch Lockerung der obersten Bodenschicht erheb-

¹⁾ HENSELE, *Unters. üb. den Einfluß des Windes auf den Boden*, *Forsch. a. d. Geb. der Agrikulturphysik.* 16. Bd. 1893. S. 311.

²⁾ ESER, a. a. O. S. 121.

³⁾ WOLLNY, *Forsch. a. d. Geb. der Agrik. physik.* Bd. 3. 1880. S. 325 u. f.

lich herabgesetzt. Die Ursache dieser Erscheinung beruht darauf, daß die Lockerungsschicht infolge Vergrößerung der verdunstenden Oberfläche schneller abtrocknet und dadurch eine Isolationschicht entsteht. Die gelockerte Bodenschicht gibt zwar zunächst dadurch, daß den atmosphärischen Verdunstungsfaktoren eine größere Angriffsfläche geboten wird, mehr Wasser ab als die ungelockerte; aber sobald die Abtrocknung eingetreten ist, kann die Verdunstung, da die Kapillarität unterbrochen, aus der tiefer gelegenen Erdschicht nur noch gasförmig stattfinden, so daß die Verdunstung dann viel langsamer vor sich geht. Außer der Bodenbearbeitung kann das Hohlraumvolumen an der Oberfläche auch durch Aufbringung einer Bodendecke künstlich erweitert und so die Wasserverdunstung verringert werden.

Mit Rücksicht auf die Bedeutung der Wasserverdunstung des Bodens bei verschieden tiefer Lockerung sind auch in neuerer Zeit Untersuchungen zu dem Zweck angestellt worden, eine der Verdunstung eventuell zugrunde liegende Gesetzmäßigkeit herauszufinden. Dieses Ziel verfolgten auch die Versuche von SCHLIMM¹⁾. Er stellte zunächst Freilandversuche an, die jedoch infolge der ungünstigen Witterung des betreffenden Sommers keine befriedigenden Ergebnisse lieferten. Außerdem ist die Versuchsanstellung schon darum schwierig und ungenau, weil es fast unmöglich ist, sämtliche dabei einwirkenden Faktoren konstant zu halten. Er ging daher zu Laboratoriumsversuchen über und stellte bei der Untersuchung der qualitativen Wirkung der Bodenlockerung auf die Wasserverdunstung aller untersuchten Bodenarten eine Verminderung der Verdunstung fest. Er fand bei Eintragung der Versuchsergebnisse in das Koordinatenkreuz eine Kurve, die die verdunstete Gesamtwassermenge als Funktion der äußeren Verdunstungsbedingungen darstellt, nach der allgemeinen Gleichung:

$$\log (A - y) = \log A - c \cdot x.$$

In dieser Gleichung bedeuten y die Mittelwerte der Verdunstungsergebnisse, die sukzessive addiert wurden, x die addierten Verdunstungsmesser-Resultate und der Höchstwert A war aus dem Gesamtwassergehalt der Gefäße ersichtlich.

Bei der Berechnung des Krümmungsfaktors c stellte sich jedoch heraus, daß c mit dem geringer werdenden Wasservorrat kontinuierlich abnahm. SCHLIMM führt diese Abnahme von c bei dem ab-

¹⁾ SCHLIMM, Der Einfluß der Bodenlockerung auf die Wasserverdunstung versch. Bodenarten. MEZ, Archiv XVII. (1927).

nehmenden Wassergehalt auf die schlechter werdende Wasserleitung zurück.

Er führte dann noch quantitative Verdunstungsversuche mit verschieden tiefer Bodenlockerung aus, die zeigten, daß die Wasserabgabe um so mehr abnahm, je mächtiger die gelockerte Bodenschicht war. Die Verdunstung verlief aber nicht der Tiefe der Lockerung direkt proportional, sondern näherte sich einem Höchstwert. Um die Größe der Wirkung der verschiedenen Lockerungstiefen festzustellen, berechnete er Kurven, die die verdunstete Wassermenge Y als Funktion der äußeren Verdunstungsbedingungen X und der diesen entgegengesetzt wirkenden abnehmenden Wasserleitung des Bodens, die er Z nannte, darstellten, nach der Gleichung:

$$\log (A - Y) = \log A - c \cdot (X - Z).$$

Die Berechnung der logarithmischen Kurven war aber nur für Sandboden möglich, da die anderen Bodenarten, die eine höhere Wasserkapazität hatten, aus der obersten Bodenschicht noch Wasser verdunsteten, und außerdem der begrenzte Wassergehalt eine Berechnung nicht zuließ.

So war es auf Grund dieser Versuche nicht möglich, den Wirkungsgrad der verschiedenen Lockerungstiefen exakt zu ermitteln und zu berechnen. Der Wassergehalt des Bodens war schon fast verbraucht, ehe die Lockerungsschicht abgetrocknet war. Daraus folgert, daß die verdunstete Wassermenge jeweils wieder ersetzt werden muß, um den Wassergehalt des Bodens dauernd konstant zu halten. Dieses wurde, der Anregung SCHLIMMS folgend, dadurch ermöglicht, daß in den Boden Glasröhren eingesetzt wurden, durch die das verdunstete Wasser nach jeder Wägung wieder ersetzt wurde.

Unter diesen Gesichtspunkten wurde die vorliegende Arbeit im Laboratorium des Pflanzenbau-Institutes der Universität Königsberg i. Pr. ausgeführt. Nach dem oben Gesagten könnte man annehmen, daß die unter den angeführten Bedingungen angesetzten Versuche die offenstehende Frage leicht klären würden. Es stellte sich jedoch heraus, daß mehrere Versuchsanstellungen erforderlich waren. Und zwar lag die Schwierigkeit darin, den richtigen Wassergehalt für den Boden zu finden, bei dem die gelockerte Schicht abgetrocknet war, in der festen Schicht das Wasser aber noch kapillar bis zur Oberfläche anstieg. Aus den nachfolgenden Versuchen ist zu entnehmen, wie dieses erreicht wurde.

Erster Verdunstungsversuch

In Vegetationsgefäße von ca. 20 cm Durchmesser und 19 cm Höhe wurden 6 verschiedene Bodenarten: Sand, lehmiger Sand, sandiger Lehm, Gartenboden, Gartenboden im Gemenge mit Niederungsmoor- und Hochmoorboden in der Weise angefüllt, daß von den 16 Gefäßen, die für jede Bodenart angesetzt wurden, je 4 eine verschieden tiefe Lockerung erhielten. Zunächst kam in die Gefäße eine etwa 2 cm hohe Kiesschicht von 1 kg, die den Zweck haben sollte, das später durch Glasröhren eingegossene Wasser rasch aufzunehmen und auf dem Gefäßboden möglichst gleichmäßig zu verteilen, um dann im Boden kapillar emporzusteigen. Der Kies hatte eine Korngröße zwischen 3 und 5 mm. Sodann wurden etwa 20 bis 25 cm lange Glasröhren von ungefähr 1 cm lichter Weite in die Mitte der Gefäße eingesetzt, die in die Kiesschicht hineinführten. Bei der Füllung wurde der gut durchmischte Boden mit Hilfe eines Holzstößels schichtweise in die Gefäße so gleichmäßig wie möglich fest eingestampft, und sodann der Rest des Bodens, der für das bestimmte Gefäß vorher gewogen war, locker aufgeschüttet. Die nachstehende Tabelle zeigt übersichtlich die verschiedenen Mengen, die eingedrückt bzw. locker aufgefüllt wurden.

Eingefüllte Bodenmenge in kg. Je 4 Parallelversuche

Bodenart	fest		locker		fest		locker	
	fest	locker	fest	locker	fest	locker	fest	locker
Sand	3	3	4,5	1,5	5,4	0,6	6	—
Lehmiger Sand	3	3	4,5	1,5	5,4	0,6	6	—
Sandiger Lehm	3	3	4,5	1,5	5,4	0,6	6	—
Gartenboden	3	3	4,5	1,5	5,4	0,6	6	—
Gartenboden mit Nieder- moor	2,25	2,25	3,375	1,125	3,935	0,565	4,5	—
Hochmoor	2	2	3	1	3,4	0,6	4	—

Der Wassergehalt der Bodenarten war bei Beschickung der Gefäße in Gewichtsprozenten:

Sand	5,15 %	Gartenboden	18,47 %
Lehmiger Sand	11,23 %	Gartenboden mit Niedermoor	24,39 %
Sandiger Lehm	20,71 %	Hochmoor	62,92 %

Die Wasserkapazität der verschiedenen Böden wurde nach der von MITSCHERLICH¹⁾ ausgearbeiteten Methode bestimmt; es stellte sich jedoch später heraus, daß diese mit der wasserfassenden Kraft der Böden im Gefäß nicht übereinstimmte. Die Unterschiede sind auf

¹⁾ MITSCHERLICH, Bodenkunde für Land- und Forstwirte. 4. Aufl. Berlin 1923, S. 135.

die bei weitem festere Lagerung des Bodens in den Gefäßen als in den zur Bestimmung der Wasserkapazität verwendeten Metallzylindern zurückzuführen. Die wasserfassende Kraft des Bodens in den Gefäßen ist infolge der starken Zusammenpressung sehr gering, wie später noch gezeigt werden wird. Jedoch diene diese Wasserkapazitätsbestimmung, bezogen auf das Gewicht des Bodens, zunächst als Anhaltspunkt, und sämtliche Bodenarten wurden auf 50% dieser angenommenen Wasserkapazität gebracht. Die Berechnung war einfach, da alle in Frage kommenden Teile der Gefäße, wie das Gefäß selbst, die Glasröhre, der Kies, das zur Sättigung des Kieses erforderliche Wasser und der Boden gewogen waren. Aus der Trockensubstanzbestimmung war die Menge des im Gefäß befindlichen absolut trockenen Bodens bekannt, und daraus konnte die Wassermenge berechnet werden, die nötig war, um alle Bodenarten auf 50% der wasserfassenden Kraft zu bringen.

Der Wassergehalt des Bodens betrug sodann:

Sand	11,61 %	Gartenboden	22,84 %
Lehmiger Sand	18,61 %	Gartenboden mit Niedermoor	34,02 %
Sandiger Lehm	22,06 %	Hochmoor	77,91 %

Nun wurden die Gefäße alle 2 Tage gewogen, somit die jeweils verdunstete Wassermenge jedes Gefäßes festgestellt und sogleich das verlorengegangene Wasser durch die Glasröhre wieder ersetzt. So war also der Wassergehalt des Bodens dauernd der gleiche. Die äußeren Verdunstungsbedingungen wurden mit dem von Mitscherlich¹⁾ konstruierten Verdunstungsmesser gemessen und ebenfalls alle 2 Tage notiert.

Die Versuchsergebnisse zeigten, daß die Verdunstung sowohl bei dem ungelockerten Boden als auch bei den verschiedenen Lockerungstiefen innerhalb des vierfachen wahrscheinlichen Fehlers die gleiche war. Dies ist leicht dadurch zu erklären, daß der gelockerte Boden durch den hohen Wassergehalt dauernd feucht gehalten wurde, wie es auch äußerlich sichtbar war, und daher die äußeren Verdunstungsbedingungen auf alle Gefäße annähernd gleich wirkten. Hätten die Gefäße im Freien gestanden, oder wäre in dem betreffenden Raum die Luft sehr bewegt gewesen, dann würde sogar die Wasserabgabe bei dem gelockerten Boden infolge leichteren Zugang des Windes an die einzelnen Bodenteilchen höher gewesen sein. Die Verdunstung kann nur dann durch eine gelockerte Schicht ver-

¹⁾ MITSCHERLICH, Ein Verdunstungsmesser, Landw. Versuchsstationen, Bd. LX (1904), S. 63—72.

mindert werden, wenn diese abgetrocknet ist und so als Isolations-
schicht wirkt, wie eingangs näher ausgeführt wurde. Da sich also
der hohe Wassergehalt des Bodens als störend erwies, wurde diese
Versuchsreihe abgebrochen, da sie unter den gegebenen Be-
dingungen ein genügend klares Bild bot.

Zweiter Verdunstungsversuch

Die Gefäße blieben nun längere Zeit stehen, ohne das ver-
dunstete Wasser zu ersetzen, so daß durch weitere Verdunstung ein
niedrigerer Wassergehalt erreicht wurde und die Lockerungsschicht
abgetrocknet war. Mit Hilfe eines Lockerungshakens wurde die ge-
lockerte Schicht, die sich im Laufe der Zeit etwas gesetzt hatte, nach-
glockert. Sodann wurde für die verschiedenen Versuchsböden der
neue Wassergehalt berechnet und sämtliche Gefäße durch Zugabe
von Wasser auf das berechnete Gewicht gebracht. Es sei jedoch
bemerkt, daß der Wassergehalt auch hier wieder auf die ganze
Bodenmenge im Gefäß berechnet wurde, was sich später als fehler-
haft herausstellte, wenngleich bei diesen Versuchen durch den ver-
minderten Wassergehalt schon erhebliche Unterschiede in der Ver-
dunstung der einzelnen Lockerungstiefen beobachtet wurden.

Der Wassergehalt der einzelnen Bodenarten betrug in dieser
Versuchsreihe in Gewichtsprozenten bei:

Sand	3,95 %	Gartenboden	13,71 %
Lehmiger Sand	6,52 %	Gartenboden mit Niedermoor	30,21 %
Sandiger Lehm	15,40 %	Hochmoor	71,10 %

Die verdunstete Wassermenge wurde abermals alle 2 Tage ge-
wichtsmäßig festgestellt und sogleich ersetzt. In der gleichen Zeit
erfolgten die Ablesungen des Verdunstungsmessers. Die Versuchs-
zahlen wurden erst dann verwertet, als das Verhältnis zwischen der
Verdunstung des Bodens und den äußeren Verdunstungsbedingungen
konstant geworden war. Diese Versuche liefen annähernd
2 Monate, so daß eine mehr als zwanzigfache Wiederholung der
Verdunstungszahlen vorhanden war. Jedes einzelne Verdunstungs-
ergebnis wurde durch die vom Verdunstungsmesser angezeigte Zahl
dividiert, also auf die Einheit der Verdunstung der freien Wasser-
oberfläche (1 mm) bezogen. Hierbei wurde angenommen, daß die
Angabe des Verdunstungsmessers stets fehlerfrei ist. Sodann
wurden die Mittel aller gefundenen Zahlen und die wahrscheinlichen
Fehler des Mittels berechnet. Auf diese Art wurde die Rechnung
mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz vermieden, die hätte angewendet
werden müssen, wenn zuerst das Mittel der Parallelversuche mit

dem wahrscheinlichen Fehler gebildet worden, dann erst die Division durch die Verdunstungsmesserszahl und schließlich die Mittelbildung aller Mittel mit dem wahrscheinlichen Fehler erfolgt wäre. In den nachstehenden Tabellen wurde jedoch der Übersichtlichkeit wegen neben der Angabe der Verdunstung der freien Wasseroberfläche nur das Mittel mit dem wahrscheinlichen Fehler von je 4 Parallelversuchen angeführt.

Das Endresultat ist auf oben erklärte Weise errechnet worden¹⁾.

Es folgen die Resultate der verschiedenen Bodenarten:

I. Sand

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest		4,5 kg Bod. fest		5,4 kg Bod. fest		6 kg Bod. fest	
	3 kg Bod. locker	3 kg Bod. locker	1,5 kg Bod. locker	1,5 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker			
270	11,5 ± 1,34	13 ± 0,24	19,75 ± 0,43	22 ± 0,85				
340	12,75 ± 0,37	16,25 ± 0,67	24,75 ± 1,34	27,5 ± 0,42				
405	16,5 ± 0,98	18,25 ± 0,85	30,25 ± 0,85	32,5 ± 0,42				
428	16,75 ± 0,79	17,75 ± 0,43	30,25 ± 1,10	32 ± 0				
493	22,5 ± 0,73	25,25 ± 0,37	38,25 ± 1,59	42 ± 0				
290	11 ± 0,73	12 ± 0,24	17 ± 0,98	19,5 ± 0,42				
266	12 ± 0,24	13,25 ± 0,18	21 ± 0,24	22 ± 0				
300	14,75 ± 0,85	15,25 ± 0,37	23 ± 0,73	25,5 ± 1,27				
320	15,5 ± 0,73	16,5 ± 0,49	24,25 ± 0,37	25 ± 0				
408	16,5 ± 1,22	18 ± 0,73	30,5 ± 1,22	32,5 ± 2,12				
260	9 ± 0,24	11,75 ± 0,37	17,75 ± 0,85	19,5 ± 0,42				
280	17,25 ± 0,85	17,5 ± 0,24	26 ± 0,98	27 ± 0				
275	10,5 ± 0,49	13,25 ± 0,85	20,75 ± 0,85	24,5 ± 0,42				
565	29,5 ± 1,22	31,75 ± 0,85	46 ± 1,22	47 ± 1,69				
275	12,5 ± 0,49	15,5 ± 0,49	22,75 ± 0,61	23,5 ± 0,42				
390	18,25 ± 1,16	19,75 ± 0,79	30 ± 1,46	34 ± 0,85				
330	15,5 ± 0,37	15,75 ± 0,18	24,75 ± 0,85	25,5 ± 0,42				
310	14,75 ± 0,55	15,75 ± 0,61	22,25 ± 0,67	23 ± 0				
225	10,25 ± 0,37	12,25 ± 0,37	19 ± 0,73	20,5 ± 0,42				
235	10,25 ± 0,85	10,5 ± 0,49	16 ± 0,98	19,5 ± 0,42				
245	14 ± 0,49	15,75 ± 0,37	21,5 ± 0,49	22 ± 0,85				
265	12,75 ± 0,67	14,5 ± 0,73	23,5 ± 0,73	28 ± 0				
208	11,5 ± 0,37	12,25 ± 0,18	18 ± 0,73	18 ± 0				
235	13 ± 0,73	14,5 ± 0,24	20,5 ± 0,73	23,5 ± 0,42				
335	19,25 ± 0,61	19,75 ± 0,61	30,25 ± 0,85	32,5 ± 1,27				
100	4,67 ± 0,06	5,17 ± 0,05	7,83 ± 0,07	8,50 ± 0,06				

¹⁾ Die vollständigen Zahlenergebnisse der Versuche und deren Berechnungen befinden sich im Besitze des Pflanzenbau-Institutes der Universität Königsberg.

II. Lehmiger Sand

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest 3 kg Bod. locker	4,5 kg Bod. fest 1,5 kg Bod. locker	5,4 kg Bod. fest 0,6 kg Bod. locker	6 kg Bod. fest
2,70	12,5 ± 0,61	17 ± 0,73	24 ± 0,98	27,7 ± 1,84
3,40	17,5 ± 0,73	21 ± 0,98	30 ± 0,49	33,3 ± 1,34
4,05	21,75 ± 0,85	24,5 ± 0,24	35,5 ± 1,22	38,3 ± 0,96
4,28	20,25 ± 0,85	25 ± 0,98	36,25 ± 0,85	41 ± 1,6
4,93	29 ± 0,98	33 ± 0,24	46,75 ± 0,61	51 ± 2,4
2,60	14,25 ± 0,85	16 ± 0,49	24 ± 0,73	26,3 ± 1,44
2,66	14 ± 0,73	17,75 ± 0,61	25,75 ± 0,67	27,7 ± 1,44
3,00	17,75 ± 0,61	20 ± 0,73	28,5 ± 0,49	33,7 ± 1,44
3,20	17,5 ± 0,98	21,25 ± 0,61	31,25 ± 0,79	34,7 ± 1,08
4,08	23 ± 1,22	24 ± 0,49	36 ± 0,98	40,3 ± 2,12
2,60	14,75 ± 0,85	18 ± 0,49	25,75 ± 0,85	28 ± 2,0
2,80	21,5 ± 0,49	23,25 ± 0,37	31 ± 1,22	33,3 ± 1,32
2,75	14,5 ± 0,98	19,5 ± 1,46	27,75 ± 0,67	32 ± 1,6
5,65	35,75 ± 2,07	40 ± 0,98	58 ± 0,98	64,7 ± 2,24
2,75	18,5 ± 0,73	21 ± 0,49	29 ± 0,73	32,3 ± 1,08
3,90	22,75 ± 0,85	26 ± 0,98	38,5 ± 0,49	44 ± 1,6
3,30	19 ± 0,98	21,25 ± 0,61	31,25 ± 0,61	34 ± 1,2
3,10	18,25 ± 0,85	21,5 ± 0,49	30,75 ± 0,92	33 ± 1,2
2,25	16,25 ± 0,85	18 ± 0,49	25 ± 0,24	28 ± 1,2
2,35	14,5 ± 0,61	16 ± 0,73	25 ± 0	27,7 ± 1,08
2,45	16,5 ± 0,73	19,75 ± 0,37	26 ± 0,49	30,3 ± 1,32
2,65	20,25 ± 0,61	22,5 ± 0,73	33,5 ± 0,73	34,7 ± 1,08
2,08	15,5 ± 0,37	17,25 ± 0,18	24,5 ± 0,61	29 ± 1,2
2,35	16,75 ± 1,10	18,75 ± 0,43	27 ± 0,24	30 ± 1,2
3,35	25 ± 0,73	26,5 ± 0,85	37,25 ± 0,85	42,3 ± 1,76
1,00	6,10 ± 0,08	7,03 ± 0,07	10,08 ± 0,08	11,23 ± 0,12

III. Sandiger Lehm

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest 3 kg Bod. locker	4,5 kg Bod. fest 1,5 kg Bod. locker	5,4 kg Bod. fest 0,6 kg Bod. locker	6 kg Bod. fest
2,15	18,25 ± 0,61	19,3 ± 0,96	27 ± 0,49	27,25 ± 1,10
2,78	24 ± 0,73	27,7 ± 0,28	35,25 ± 1,16	39 ± 1,22
3,26	25,5 ± 0,61	27,7 ± 0,28	36,75 ± 0,61	37,5 ± 1,22
3,70	36 ± 0,49	37,7 ± 0,56	44,5 ± 1,46	46,75 ± 2,81

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest	4,5 kg Bod. fest	5,4 kg Bod. fest	6 kg Bod. fest
	3 kg Bod. locker	1,5 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker	
3,79	35,25 ± 0,37	39,7 ± 0,28	48,25 ± 1,34	50,25 ± 1,83
2,48	19,75 ± 0,92	23 ± 0,40	30,5 ± 0,98	30,25 ± 1,34
2,45	25,75 ± 0,18	28,7 ± 0,56	33,25 ± 0,85	33,5 ± 1,22
2,68	26,5 ± 0,49	27,7 ± 0,56	33,5 ± 0,73	34,5 ± 0,98
2,88	27 ± 0	30,7 ± 0,68	36,25 ± 1,28	37,5 ± 1,71
2,48	27,5 ± 0,73	32 ± 0,40	35,5 ± 0,73	37,75 ± 0,61
2,65	21,5 ± 0,37	24 ± 0,40	27,5 ± 0,61	28 ± 1,22
2,75	28,25 ± 0,67	31,3 ± 0,68	33,5 ± 0,61	36,75 ± 0,79
2,40	22,5 ± 0,73	24,3 ± 0,56	28,25 ± 0,43	29,75 ± 2,07
5,00	43,25 ± 1,10	52,3 ± 0,56	58,5 ± 1,22	60 ± 2,20
2,90	30,75 ± 1,10	31,7 ± 0,68	33,75 ± 0,61	34,5 ± 0,98
3,20	30 ± 0,49	36,7 ± 0,68	39 ± 1,22	41,5 ± 1,71
3,55	30,25 ± 0,61	33,3 ± 0,96	37,5 ± 0,98	38,25 ± 1,59
2,70	25,5 ± 0,24	29,3 ± 0,56	32,5 ± 0,73	32,5 ± 1,46
2,28	22,25 ± 0,67	25,7 ± 0,56	28,5 ± 0,98	30 ± 1,46
2,23	21,25 ± 0,37	24,3 ± 0,56	26,5 ± 0,73	26,75 ± 1,10
1,95	22,25 ± 0,37	25,3 ± 0,28	28 ± 0,73	28 ± 0,98
2,00	24,25 ± 0,85	27,3 ± 0,68	30,25 ± 0,85	31,5 ± 1,22
1,80	20,25 ± 0,67	22,3 ± 0,28	22,75 ± 0,43	26,25 ± 0,67
2,15	24 ± 0,24	26,7 ± 0,28	30,25 ± 0,61	31 ± 1,22
2,90	32 ± 0,73	36 ± 0,40	39,5 ± 0,73	43,25 ± 1,89
1,00	9,74 ± 0,09	10,91 ± 0,11	12,53 ± 0,09	13,05 ± 0,12

IV. Gartenboden

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest	4,5 kg Bod. fest	5,4 kg Bod. fest	6 kg Bod. fest
	3 kg Bod. locker	1,5 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker	
2,73	23,75 ± 0,85	29,5 ± 0,73	40 ± 1,22	49 ± 0,85
3,00	23,25 ± 0,18	31,75 ± 1,34	41,75 ± 0,43	66 ± 2,54
4,33	39 ± 1,22	44,5 ± 0,98	67,5 ± 1,34	99,5 ± 3,81
1,36	11 ± 0,49	14,5 ± 0,98	16 ± 0,98	23 ± 0
2,83	22,75 ± 0,67	25,75 ± 0,55	38,75 ± 0,92	54,5 ± 2,12
3,40	28 ± 0,49	33,5 ± 0,37	46,75 ± 1,34	63,5 ± 0,42
2,87	24,5 ± 0,73	29,75 ± 0,79	42,5 ± 0,73	58,5 ± 2,96
2,58	20 ± 0	23,25 ± 0,43	32 ± 0,49	42 ± 0,85
3,20	24,5 ± 0,37	30,25 ± 0,61	42 ± 0,49	58,5 ± 1,27
3,56	25,25 ± 0,61	35 ± 0,73	48,5 ± 1,10	64,5 ± 2,12
2,15	18,75 ± 0,61	22 ± 0,73	30,25 ± 0,43	38,5 ± 1,27
2,45	21,75 ± 0,43	24,5 ± 0,73	33 ± 0,49	44,5 ± 2,12

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest	4,5 kg Bod. fest	5,4 kg Bod. fest	6 kg Bod. fest
	3 kg Bod. locker	1,5 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker	
3,22	26,75 ± 0,92	32,75 ± 0,37	45,25 ± 1,10	62,5 ± 2,12
2,88	22,75 ± 0,37	28,25 ± 0,43	40,5 ± 1,10	53 ± 2,54
2,18	15,5 ± 0,73	21,5 ± 0,49	29,5 ± 0,49	38,5 ± 1,27
2,84	24,5 ± 0,49	30 ± 0,24	39,5 ± 0,73	54,5 ± 2,12
2,25	17,5 ± 0,49	21 ± 0,49	29,5 ± 0,37	40 ± 1,69
2,90	23 ± 0,73	29,5 ± 0,85	39,5 ± 0,98	52,5 ± 0,42
2,50	19,25 ± 0,67	25,75 ± 0,37	34,25 ± 0,43	45,5 ± 1,27
2,10	17,75 ± 0,18	20,75 ± 0,61	28,25 ± 0,61	34,5 ± 2,12
3,05	22,5 ± 0,24	28 ± 0,73	40,25 ± 0,67	54,5 ± 0,42
3,17	22,25 ± 0,18	26,5 ± 0,98	37,5 ± 0,85	52 ± 0,85
2,05	15,5 ± 0,24	19,25 ± 0,61	29 ± 0,98	38,5 ± 2,96
3,55	29,75 ± 0,43	33,75 ± 0,61	46 ± 0,98	56 ± 1,69
1,90	12,75 ± 0,18	16,75 ± 1,10	25 ± 0,73	32,5 ± 1,27
2,16	18,5 ± 0,61	20,75 ± 0,61	28,75 ± 0,85	36,5 ± 1,27
3,06	22,25 ± 0,43	27,25 ± 0,43	38,5 ± 0,49	50,5 ± 2,12
1,00	7,98 ± 0,06	9,78 ± 0,06	13,54 ± 0,07	18,20 ± 0,16

V. Gartenboden im Gemenge mit Niedermoor

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R.

Verd.- Messer mm	2,25 kg Bod. fest	3,375 kg Bod. fest	3,935 kg Bod. fest	4,5 kg Bod. fest
	2,25 kg Bod. locker	1,125 kg Bod. locker	0,565 kg Bod. locker	
2,70	13,5 ± 0,37	15 ± 0,24	18,75 ± 0,18	21,75 ± 0,37
3,40	21,25 ± 0,61	21,75 ± 0,37	24,75 ± 0,18	27,25 ± 0,67
4,05	23,25 ± 0,61	23,5 ± 0,73	27,25 ± 0,85	35,25 ± 1,10
4,28	21,5 ± 0,73	21,75 ± 0,85	28,25 ± 1,10	35,75 ± 1,59
4,93	31,5 ± 0,61	32,75 ± 0,37	38 ± 0,49	46,75 ± 1,16
2,60	11,5 ± 0,73	12 ± 0,24	14,5 ± 0,49	22,5 ± 1,22
2,66	14,75 ± 0,43	16 ± 0,49	20 ± 0,49	26 ± 1,22
3,00	20,25 ± 0,18	20,75 ± 0,18	23,75 ± 0,37	29,25 ± 0,43
3,20	19,5 ± 0,98	20 ± 0,73	24 ± 0,24	29,75 ± 1,10
4,08	21,5 ± 0,98	22,5 ± 0,37	27 ± 0,49	37,75 ± 1,59
2,60	12,5 ± 0,49	14,5 ± 0,24	20 ± 0,49	23 ± 0,73
2,80	22 ± 0,49	22 ± 0,98	24,5 ± 0,49	30,75 ± 0,92
2,75	16,5 ± 0,49	17,5 ± 0,37	23,25 ± 0,43	28,5 ± 0,24
5,65	38,75 ± 0,67	38,5 ± 0,73	44 ± 0,73	59,75 ± 2,07
2,75	19 ± 0,49	20,5 ± 0,37	26 ± 0,24	30,25 ± 1,34
3,90	23,75 ± 0,92	24 ± 0,49	30,5 ± 0,61	39,25 ± 1,34
3,30	23,5 ± 0,49	22,5 ± 0,24	26,5 ± 0,73	33,75 ± 1,34

Verd.- Messer mm	2,25 kg Bod. fest	3,375 kg Bod. fest	3,935 kg Bod. fest	4,5 kg Bod. fest
	2,25 kg Bod. locker	1,125 kg Bod. locker	0,565 kg Bod. locker	
3,10	19,5 ± 0,37	20,75 ± 0,85	24,25 ± 0,37	31 ± 0,98
2,25	16,75 ± 0,43	17 ± 0,24	20,75 ± 0,37	25,75 ± 0,85
2,35	15,5 ± 0,24	16 ± 0,24	19,25 ± 0,55	24,25 ± 0,85
2,45	18,5 ± 0,24	18 ± 0,24	21,5 ± 0,49	27,5 ± 0,73
2,65	20,75 ± 0,43	20,75 ± 0,85	27,75 ± 0,37	30,75 ± 0,85
2,08	14 ± 0,24	15 ± 0,49	17 ± 0,49	22,75 ± 0,85
2,35	19 ± 0,49	19,25 ± 0,18	23,25 ± 0,85	29,75 ± 1,10
3,35	29 ± 0,49	28 ± 0,73	33,75 ± 0,61	43,25 ± 1,83
1,00	6,45 ± 0,08	6,63 ± 0,07	8,04 ± 0,08	10,10 ± 0,10

VI. Hochmoor

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	2 kg Bod. fest	3 kg Bod. fest	3,4 kg Bod. fest	4 kg Bod. fest
	2 kg Bod. locker	1 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker	
2,84	21 ± 0,49	25,75 ± 0,61	32,25 ± 0,85	32 ± 1,69
3,05	25,75 ± 0,61	30,25 ± 1,04	38,5 ± 0,61	49 ± 5,92
3,42	26,25 ± 1,10	31,5 ± 0,73	36,75 ± 0,85	50 ± 3,38
2,05	17,5 ± 0,73	20,75 ± 0,61	25,25 ± 0,85	35,5 ± 2,12
3,55	33,5 ± 0,98	38,75 ± 1,10	44,75 ± 1,34	56 ± 5,08
1,95	15 ± 0,73	18 ± 0,73	22,75 ± 0,67	29,5 ± 2,12
2,16	20,5 ± 0,85	22,5 ± 0,49	26,5 ± 0,61	34,5 ± 2,96
2,15	16,75 ± 0,18	19,75 ± 0,43	21,75 ± 0,18	23 ± 0
2,78	22,5 ± 0,49	27 ± 0,49	31,5 ± 0,73	36,5 ± 0,42
3,26	25,5 ± 0,24	29,25 ± 0,85	33 ± 0,73	42,5 ± 0,42
3,70	29 ± 0,49	32,25 ± 0,61	36,5 ± 0,49	44 ± 0,85
3,79	32,25 ± 0,61	36,25 ± 0,67	44,25 ± 1,10	57 ± 4,23
2,48	20,25 ± 0,61	23 ± 0,49	26,25 ± 0,55	35 ± 2,54
2,45	22,25 ± 0,67	25,5 ± 0,49	28,5 ± 0,98	37 ± 1,69
2,68	22,75 ± 0,43	24,75 ± 0,37	28,75 ± 0,67	37,5 ± 2,96
2,88	24 ± 0,73	27,5 ± 0,61	32,25 ± 0,37	41,5 ± 2,96
2,48	25,75 ± 0,43	28,25 ± 0,55	30,5 ± 0,85	41 ± 3,38
2,65	20 ± 0,73	21,75 ± 0,67	27,75 ± 0,61	37 ± 3,38
2,75	25 ± 0,98	26,75 ± 0,18	31,5 ± 0,49	41 ± 1,69
2,40	20,25 ± 0,43	23,25 ± 0,85	27,5 ± 0,61	36,5 ± 2,96
5,00	41,25 ± 1,59	46,75 ± 0,43	54,25 ± 1,53	74 ± 5,08
2,90	26,5 ± 0,85	29 ± 0,73	31,25 ± 0,79	44 ± 3,38

Verd.- Messer mm	2 kg Bod. fest	3 kg Bod. fest	3,4 kg Bod. fest	4 kg Bod. fest
	2 kg Bod. locker	1 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker	
3,20	29 ± 0,73	34,25 ± 0,85	40,75 ± 0,92	56 ± 5,08
3,55	30 ± 0,98	33,5 ± 0,49	39,5 ± 1,10	55 ± 4,23
2,70	23,75 ± 0,85	27 ± 0,49	31 ± 0,73	42,5 ± 2,96
2,28	20 ± 0,73	21,75 ± 0,18	25,75 ± 0,61	34 ± 3,38
2,23	20,75 ± 0,37	22,5 ± 0,37	25 ± 0,73	33,5 ± 2,12
1,00	8,52 ± 0,06	9,69 ± 0,06	11,33 ± 0,07	14,70 ± 0,19

Aus diesen Zahlen ist klar ersichtlich, daß die Wasserverdunstung mit zunehmender Lockerungstiefe geringer wird. Jedoch liegen die Verdunstungsergebnisse zwischen den einzelnen Lockerungstiefen zum Teil innerhalb des vierfachen wahrscheinlichen Fehlers oder grenzen nahe daran. Vergleicht man aber die Wasserverdunstung einer Lockerungstiefe mit der der übernächsten, so zeigt sich sehr deutlich ein Unterschied in der Verdunstung, und die Zahlen liegen dann auch immer außerhalb der Fehlergrenze. Weshalb die Unterschiede in der Verdunstung zwischen den einzelnen Lockerungstiefen bei diesen Versuchen so minimal waren, ist aus mehrfachen Gründen zu erklären. Auf der einen Seite war der Wassergehalt für den ungelockerten Boden verhältnismäßig gering, so daß das Wasser nur gerade noch kapillar bis zur Oberfläche ansteigen konnte, die Verdunstung daher mäßig war, und auf der anderen Seite vermochte die feste Bodenschicht in den gelockerten Gefäßen das zugegebene Wasser nicht ganz zu fassen, so daß ein Teil desselben in die Lockerungsschicht überging, wodurch die wassersparende Wirkung dieser wieder vermindert wurde.

So bestätigen diese Versuche zwar die bereits bekannte Tatsache, daß, je mächtiger die Lockerungsschicht, desto geringer die Verdunstung ist, aber die in der gelockerten Bodenschicht noch zum Teil vorhandene Feuchtigkeit ließ ein genaues zahlenmäßiges Erfassen des Wirkungsgrades der verschiedenen Lockerungstiefen noch nicht zu.

Erst auf Grund der Ergebnisse der nächsten Versuchsreihe war es möglich, eine Gesetzmäßigkeit zwischen der Wasserverdunstung und der Bodenlockerung zu finden.

Am Schluß der Arbeit sind die gefundenen Zahlen von zwei Bodenarten des vorstehenden Versuches in das Koordinatensystem

eingetragen und zum Vergleich sind die berechneten Kurven des letzten Verdunstungsversuchs miteingezeichnet. Es ist daraus zu ersehen, daß die gefundenen Verdunstungswerte am Anfang der Kurve stets zu niedrig liegen, weil der Wassergehalt zu niedrig war, und am Ende der Kurve liegen die gefundenen Werte zu hoch, weil in den Gefäßen mit tieferer Lockerung, wie bereits erwähnt, die festgestampfte Bodenschicht das zugegebene Wasser nicht ganz zu fassen vermochte und ein Teil desselben in die Lockerungsschicht überging.

Dritter Verdunstungsversuch

Nachdem mit den bisherigen Versuchen die Beziehung zwischen der Bodenlockerung und der Wasserverdunstung des Bodens nur teilweise geklärt war, stand die Frage offen, welcher Wassergehalt notwendig war, um den festen Boden möglichst feucht und die verschiedenen Lockerungsschichten vollständig lufttrocken zu erhalten.

Der Wassergehalt wurde jetzt nur für die feste Bodenschicht berechnet, und diese zunächst einmal mit Wasser gesättigt, so daß die volle Wasserkapazität ungefähr erreicht war. Eine genaue Bestimmung der wasserfassenden Kraft war in diesem Falle ja nicht möglich, da die Gefäße vollständig geschlossen waren. Man mußte sich mit der ungefähren Feststellung begnügen, was für die Versuche auch keine Fehler zur Folge hatte. Wurde nun für die Gefäße mit gelockerter Schicht der Wassergehalt für den festgelagerten Boden bis beinahe zum vollen Fassungsvermögen berechnet und quantitativ zugegeben, so stellte sich heraus, daß die Lockerungsschicht ebenfalls bis zur Oberfläche mit Wasser benetzt wurde, wenigstens bei den geringen Lockerungstiefen, es zeigte sich also der alte Fehler. Daraus ging hervor, daß die zur Sättigung des festgestampften Bodens notwendige Wassermenge den Berechnungen nicht zugrunde gelegt werden durfte. Es wurde nun nach und nach ein immer geringerer Wassergehalt für den festen Boden gewählt, bis der Zustand erreicht war, in welchem alle Lockerungsschichten trocken blieben. Ein gewisser Übergang war naturgemäß vorhanden insofern, als die Bodenteilchen der gelockerten Schicht, die unmittelbar über dem festen Boden lagerten, noch eine geringe Feuchtigkeitsmenge enthielten. Diese Tastversuche nahmen längere Zeit in Anspruch, da die Lockerungsschichten ihr aufgenommenes Wasser immer erst wieder verdunsten mußten.

Die Beobachtungen fanden dann bei folgendem Feuchtigkeitsgehalt der festen Bodenschichten statt:

Sand	4,48 ⁰ / ₀	Gartenboden	16,70 ⁰ / ₀
Lehmiger Sand	9,14 ⁰ / ₀	Gartenboden mit Niedermoor	35,29 ⁰ / ₀
Sandiger Lehm	17,32 ⁰ / ₀	Hochmoor	84,70 ⁰ / ₀

Dieser Wassergehalt liegt etwas höher als 50% der wasserfassenden Kraft des festgedrückten Bodens. Sinkt die Bodenfeuchtigkeit unter diese Grenze herab, so steigt das Wasser in den Kapillaren nicht mehr bis zur Oberfläche, infolgedessen trocknet diese ab, und die Verdunstungsschicht kommt tiefer zu liegen¹⁾. Ist der Feuchtigkeitsgehalt des festgelagerten Bodens höher, so wird die darüber liegende Lockerungsschicht, wie wir sahen, dementsprechend mit Wasser benetzt. Sie vermindert wohl noch, wie die Verdunstungszahlen der zweiten Versuchsreihe zeigten, die Wasserabgabe des Bodens, aber die volle Wirkung als Isolationsschicht tritt noch nicht in die Erscheinung.

Daraus geht hervor, daß die Versuche nur mit dem oben angeführten Wassergehalt der festen Bodenschicht durchgeführt werden mußten, um die Wirkung der verschiedenen Lockerungstiefen ganz erfassen zu können.

Die Beobachtungen erfolgten in der gleichen Weise wie bei den vorhergehenden Versuchen. Die Menge des verdunsteten Wassers wurde alle 48 Stunden durch Wägung ermittelt und durch die Glasröhre dem Boden sofort wieder zugeführt. Die Angabe des Verdunstungsmessers wurde ebenfalls nach Verlauf von 48 Stunden aufgezeichnet. Auch hier wurden die Ergebnisse erst dann verwendet, als Konstanz zwischen der Bodenverdunstung und der Verdunstung der freien Wasseroberfläche eingetreten war. Die Beobachtungen wurden nun zwanzigmal wiederholt, so daß das Endresultat nur einen verhältnismäßig kleinen wahrscheinlichen Fehler hat. Die Verarbeitung der Zahlen geschah analog der der zweiten Versuchsreihe.

Die nachstehenden Tabellen enthalten die Ergebnisse der Beobachtungen:

¹⁾ ESER, a. a. O., Seite 121.

I. Sand

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest	4,5 kg Bod. fest	5,4 kg Bod. fest	6 kg Bod. fest
	3 kg Bod. locker	1,5 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker	
1,39	5 ± 0,49	9,75 ± 0,37	17,5 ± 0,37	34,5 ± 0,42
1,35	4,5 ± 0,24	9,75 ± 0,18	18,25 ± 0,43	37 ± 0,85
1,37	4,75 ± 0,18	9,5 ± 0,24	17 ± 0,24	35 ± 0,85
1,15	4,25 ± 0,18	8,5 ± 0,49	14 ± 0	26,5 ± 0,42
1,18	4,25 ± 0,18	8,25 ± 0,18	15,5 ± 0,24	30,5 ± 0,42
1,30	5 ± 0	9,75 ± 0,18	16,5 ± 0,24	33,5 ± 0,42
1,26	4,75 ± 0,18	8,75 ± 0,37	16,5 ± 0,24	32,5 ± 0,42
1,47	5,5 ± 0,37	11,25 ± 0,37	20,5 ± 0,37	39,5 ± 0,42
1,40	5,25 ± 0,18	10 ± 0	17,25 ± 0,61	33,5 ± 0,42
1,44	5,5 ± 0,24	10 ± 0	18,25 ± 0,43	35 ± 0
1,54	6,25 ± 0,18	12,25 ± 0,18	21 ± 0,49	40 ± 0
1,26	4,75 ± 0,18	9 ± 0,24	17,25 ± 0,61	32,5 ± 0,42
1,44	5,5 ± 0,24	10 ± 0	19,25 ± 0,37	36,5 ± 0,42
1,87	7,5 ± 0,24	14,25 ± 0,37	24 ± 0,49	47,5 ± 0,42
1,82	7 ± 0	13,75 ± 0,18	26 ± 0,73	51,5 ± 0,42
1,90	8,25 ± 0,18	14,75 ± 0,18	26,75 ± 0,37	55 ± 0
1,82	6,75 ± 0,18	15 ± 0	27 ± 0	54 ± 0,85
1,65	6,75 ± 0,18	11,5 ± 0,24	21,5 ± 0,49	45,5 ± 0,42
1,65	6,5 ± 0,24	11,5 ± 0,49	21 ± 0,49	44 ± 0,85
1,70	6,75 ± 0,18	12 ± 0,24	21,75 ± 0,37	44,5 ± 0,42
1,00	3,81 ± 0,03	7,30 ± 0,05	13,19 ± 0,08	26,16 ± 0,17

II. Lehmiger Sand

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest	1,5 kg Bod. fest	5,4 kg Bod. fest	6 kg Bod. fest
	3 kg Bod. locker	1,5 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker	
1,39	6 ± 0,49	11,5 ± 0,24	20 ± 0	39,3 ± 0,56
1,35	5,5 ± 0,37	11,25 ± 0,37	19,5 ± 0,37	37 ± 0,80
1,37	5,25 ± 0,18	10,75 ± 0,55	20 ± 0,49	37 ± 0,40
1,15	4,5 ± 0,24	9,75 ± 0,61	17 ± 0,73	27,7 ± 0,28
1,18	5 ± 0,24	10,25 ± 0,43	17,25 ± 0,18	32,7 ± 0,68
1,30	5,25 ± 0,18	10,5 ± 0,37	19,25 ± 0,37	33 ± 0,80
1,26	5,75 ± 0,37	11,5 ± 0,73	20,25 ± 0,37	36 ± 0,40
1,47	6,75 ± 0,18	13,5 ± 0,73	22 ± 0	39,7 ± 0,66
1,40	6,75 ± 0,37	13 ± 0,73	21 ± 0,49	35,7 ± 0,56
1,44	6,5 ± 0,37	13,25 ± 0,61	22,25 ± 0,61	39,3 ± 1,08
1,54	7,5 ± 0,37	14,75 ± 0,61	24,75 ± 0,37	43,7 ± 0,56
1,26	6 ± 0,49	12,5 ± 0,73	21,25 ± 0,37	34,3 ± 0,94
1,44	7,5 ± 0,24	14,75 ± 0,79	24,5 ± 0,61	40,7 ± 1,08
1,87	8,75 ± 0,18	19,75 ± 1,10	31,75 ± 0,67	53,3 ± 1,98
1,82	8,75 ± 0,18	18,75 ± 0,85	31,75 ± 0,85	55,7 ± 1,32
1,90	9,5 ± 0,24	19,75 ± 1,34	32,25 ± 0,67	56,7 ± 1,32
1,82	8,75 ± 0,18	19,5 ± 1,22	31,75 ± 0,43	54,3 ± 0,68
1,65	8,5 ± 0,24	17,5 ± 0,61	26,25 ± 0,61	47 ± 0,40
1,65	8 ± 0,24	16,75 ± 0,61	27 ± 0,73	46,7 ± 0,28
1,70	8,25 ± 0,18	17,5 ± 0,61	27 ± 0,73	48,3 ± 0,68
1,00	4,60 ± 0,05	9,46 ± 0,11	15,80 ± 0,10	27,80 ± 0,15

III. Sandiger Lehm

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest		4,5 kg Bod. fest		5,4 kg Bod. fest		6 kg Bod. fest	
	3 kg Bod. locker		1,5 kg Bod. locker		0,6 kg Bod. locker			
1,39	5	- 0	9,33	- 0,53	20,25	- 0,37	42,25	- 0,85
1,35	6	- 0	9,33	- 0,26	17,75	- 0,61	39,5	- 0,37
1,37	4,5	+ 0,24	8	- 0,40	18,5	- 0,24	36,25	- 0,37
1,15	4,5	+ 0,24	8,33	- 0,26	16,25	- 0,37	28,25	- 0,61
1,18	4,75	+ 0,18	8	- 0	15,25	- 0,61	31,75	- 0,61
1,30	5	- 0	8	- 0	18,25	- 0,43	33,75	- 0,61
1,26	4,75	+ 0,18	9,33	- 0,26	17,25	- 0,61	33,5	- 0,24
1,47	6,25	+ 0,18	12	- 0	21,25	- 0,43	39,5	- 0,37
1,40	5,75	+ 0,18	9	- 0,40	18	- 0,24	35,5	- 0,85
1,44	5,25	+ 0,18	9,33	- 0,66	20	- 0,24	37,75	- 0,37
1,54	6,75	+ 0,18	12,67	+ 0,53	22,5	- 0,24	41,75	- 0,61
1,26	4,5	+ 0,24	9,33	- 0,26	17,5	- 0,49	32,75	- 0,61
1,44	6,25	+ 0,18	12	- 0	20,25	- 0,61	37	- 0,49
1,87	8,5	+ 0,24	15,33	- 0,53	26,5	- 0,73	50	- 0
1,82	8,5	+ 0,24	15	- 0,40	27,75	- 0,61	52,25	- 0,61
1,90	8,25	+ 0,18	15,67	- 0,26	29	- 0,98	56,5	- 0,73
1,82	7,5	+ 0,24	14,67	+ 0,26	27,75	- 0,18	52,5	- 0,49
1,65	7,75	+ 0,37	13,33	- 0,26	23	- 0,24	46,5	- 0,24
1,65	7,25	+ 0,18	12,67	+ 0,26	23	- 0,24	47,5	- 0,24
1,70	7,5	+ 0,24	13,33	+ 0,26	25	- 0,24	47,5	- 0,49
1,00	4,12	+ 0,04	7,42	- 0,08	14,11	+ 0,08	27,32	- 0,14

IV. Gartenboden

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	3 kg Bod. fest		4,5 kg Bod. fest		5,4 kg Bod. fest		6 kg Bod. fest	
	3 kg Bod. locker		1,5 kg Bod. locker		0,6 kg Bod. locker			
1,39	6,25	- 0,37	11	- 0,49	21,25	- 0,43	37,5	- 0,42
1,35	4,75	- 0,18	10	- 0,49	19	- 0,49	39	- 0
1,37	4,5	+ 0,24	10,25	+ 0,18	20,5	- 0,73	39	- 0,85
1,15	3,75	+ 0,18	8,5	- 0,49	16,25	- 0,43	31,5	- 0,42
1,18	4,5	+ 0,24	8,75	- 0,61	19	- 0,24	32	- 0
1,30	4,75	+ 0,18	9,75	- 0,37	19,25	- 0,37	35	- 0
1,26	4,5	+ 0,24	9,75	- 0,18	18,5	- 0,24	35	- 0
1,47	6,5	- 0,24	12,75	- 0,37	23	- 0,73	43,5	- 1,27
1,40	5	- 0	11,25	- 0,37	21,25	- 0,61	38,5	- 0,42
1,44	5,25	- 0,18	11,75	- 0,61	21,25	- 0,85	41	- 0,85
1,54	5,5	- 0,24	12,5	- 0,73	25,5	- 0,49	47	- 0
1,26	4,5	+ 0,24	10,5	- 0,37	19,25	- 0,37	38	- 1,69
1,44	6	- 0,24	13,75	- 0,61	24,75	- 0,43	43,5	- 0,42
1,87	8,25	+ 0,18	17,25	- 0,37	31	- 0,73	56,5	- 0,42
1,82	7	- 0	15,75	- 0,55	31,25	- 0,61	51,5	- 0,42
1,90	8,25	+ 0,18	17	- 0,49	32	- 0,98	60	- 0,85
1,82	7,25	+ 0,18	16	- 0,49	29,75	- 0,85	53	- 0
1,65	7,5	+ 0,24	14,25	- 0,61	28,75	- 0,43	50	- 0,85
1,65	6,75	- 0,18	13,5	- 0,61	25,75	- 0,61	45	- 0
1,70	7,75	- 0,18	14,75	- 0,37	26,5	- 0,49	49	- 0,85
1,00	3,92	- 0,04	8,24	- 0,08	15,71	+ 0,11	28,78	- 0,17

V. Gartenboden im Gemenge mit Niederungsmoor
Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	2,25 kg Bod. fest	3,375 kg Bod. fest	3,935 kg Bod. fest	4,5 kg Bod. fest
	2,25 kg Bod. locker	1,125 kg Bod. locker	0,565 kg Bod. locker	
1,39	5,25 ± 0,18	10 ± 0,24	18,5 ± 0,73	41 ± 0,49
1,35	5 ± 0,24	8 ± 0	16,5 ± 0,49	38 ± 0,49
1,37	5 ± 0,24	9 ± 0,24	17,25 ± 0,18	39,75 ± 0,37
1,15	4 ± 0,24	7,25 ± 0,18	13,75 ± 0,55	30,5 ± 0,24
1,18	4,5 ± 0,24	8,5 ± 0,37	16,5 ± 0,24	33 ± 0,24
1,30	4,5 ± 0,24	8,5 ± 0,24	17,25 ± 0,18	35 ± 0
1,26	4,75 ± 0,18	7,75 ± 0,18	15,5 ± 0,37	34 ± 0,49
1,47	5,5 ± 0,37	10,5 ± 0,24	19,5 ± 0,37	41 ± 0,49
1,40	5,25 ± 0,18	8,75 ± 0,37	17,75 ± 0,85	37 ± 0,49
1,44	5,5 ± 0,24	10,25 ± 0,55	19,25 ± 0,55	39 ± 0,49
1,54	6,25 ± 0,37	10,25 ± 0,18	20,5 ± 0,73	43,25 ± 0,85
1,26	4,5 ± 0,24	8,75 ± 0,37	16,75 ± 0,18	33,75 ± 0,43
1,44	6,25 ± 0,18	11,5 ± 0,37	20,75 ± 0,37	42,75 ± 0,43
1,87	7 ± 0	13,25 ± 0,18	25,25 ± 0,85	51,25 ± 0,61
1,82	7,5 ± 0,24	13,25 ± 0,37	26,5 ± 0,73	56 ± 0,49
1,90	8,5 ± 0,24	13,5 ± 0,24	26,75 ± 0,61	55,5 ± 0,98
1,82	7,25 ± 0,18	13,5 ± 0,24	25,5 ± 0,73	51,25 ± 0,79
1,65	6,25 ± 0,18	11,25 ± 0,43	22,25 ± 0,43	46,5 ± 0,24
1,65	6 ± 0	10,25 ± 0,18	21,25 ± 0,37	47,25 ± 0,37
1,70	6,75 ± 0,18	11 ± 0,24	22,5 ± 0,37	46,5 ± 0,24
1,00	3,83 ± 0,04	6,82 ± 0,05	13,29 ± 0,08	28,04 ± 0,11

VI. Hochmoor

Verdunstete Wassermenge in g. Mittel von je vier Versuchen und wahrscheinlicher Fehler R

Verd.- Messer mm	2 kg Bod. fest	3 kg Bod. fest	3,4 kg Bod. fest	4 kg Bod. fest
	2 kg Bod. locker	1 kg Bod. locker	0,6 kg Bod. locker	
1,39	7,25 ± 0,18	13 ± 0,24	19,5 ± 0,61	37,3 ± 0,56
1,35	5 ± 0	10,25 ± 0,18	16,25 ± 0,37	37,7 ± 0,96
1,37	4,75 ± 0,37	9,75 ± 0,37	15 ± 0,49	37,7 ± 0,96
1,15	4,75 ± 0,18	9,25 ± 0,37	13,75 ± 0,18	32 ± 0,80
1,18	5,25 ± 0,18	10,5 ± 0,24	15,75 ± 0,18	36,3 ± 0,96
1,30	5,25 ± 0,18	10,75 ± 0,18	16,25 ± 0,37	34,3 ± 0,28
1,26	4,75 ± 0,18	10 ± 0,24	14,5 ± 0,49	33 ± 0,80
1,47	6,5 ± 0,24	11,5 ± 0,37	20 ± 0,49	44,3 ± 1,08
1,40	6,5 ± 0,24	11,5 ± 0,24	17 ± 0,49	36 ± 0
1,44	7 ± 0	12,75 ± 0,18	17 ± 0,24	37,3 ± 0,28
1,54	7 ± 0,24	14,25 ± 0,37	19,75 ± 0,43	42,3 ± 0,28
1,26	5 ± 0,24	10,25 ± 0,18	14,5 ± 0,49	33,7 ± 0,68
1,44	7,25 ± 0,18	14,25 ± 0,18	20 ± 0,49	42 ± 0
1,87	8,75 ± 0,18	17,5 ± 0,37	24 ± 0,73	50 ± 0,80
1,82	8,75 ± 0,18	17,75 ± 0,37	24,5 ± 0,73	56,3 ± 0,56
1,90	9,5 ± 0,24	16,75 ± 0,18	25,25 ± 0,85	57,3 ± 1,36
1,82	8 ± 0,24	15,5 ± 0,24	23,75 ± 0,61	51,7 ± 1,08
1,65	7,75 ± 0,18	15,25 ± 0,43	23 ± 0,49	52 ± 1,60
1,65	8,25 ± 0,18	15,75 ± 0,37	22,5 ± 0,49	54,7 ± 1,08
1,70	8 ± 0,24	15 ± 0,24	21,75 ± 0,43	48 ± 0,40
1,00	4,48 ± 0,05	8,67 ± 0,07	12,76 ± 0,09	28,39 ± 0,20

Mit voller Deutlichkeit geht aus diesen Zahlen hervor, daß je tiefer die Bodenlockerung, desto geringer die Wasserverdunstung, und zwar ist bei völliger Lufttrockenheit der gelockerten Schicht die Wasserabgabe ganz erheblich herabgesetzt. Die Verdunstungszahlen liegen daher auch in jedem Falle weit außerhalb der Fehlergrenze. Die geringen Verschiedenheiten in der Verdunstung bei den einzelnen Bodenarten sind auf die verschiedene physikalische Beschaffenheit derselben zurückzuführen, sind aber bei diesen Versuchsanstellungen von untergeordneter Bedeutung.

Um nun die Beziehung zwischen der Bodenlockerung und der Wasserverdunstung des Bodens zu ermitteln, wurden die für die Verdunstung gefundenen Werte und die Tiefe der Bodenlockerung graphisch aufgetragen. Dadurch entstanden Kurven, welche also die verdunstete Wassermenge nach jedesmal gleichen äußeren Verdunstungsbedingungen als Funktion der Lockerungstiefen darstellen. Dabei zeigte sich nun, daß die Wasserverdunstung in Form einer logarithmischen Funktion verläuft nach der Gleichung:

$$\log(v_0 + i) - \log(v_1 + i) = c(l_1 - l_0).$$

In dieser Gleichung bedeuten v_0 bzw. v_1 die Wassermengen, die bei den Lockerungstiefen l_0 bzw. l_1 verdunsten. i ist eine Verdunstungsmenge, die in dem Boden auch dann noch verdunstet, wenn die die Verdunstung herabsetzende Bodenlockerung am günstigsten durchgeführt ist. Sie wird durch den Gasaustausch des Bodens bedingt. Im Koordinatenkreuz ist i der Abstand zwischen der Abszisse und der zu dieser in ∞ parallel laufenden Kurve. c ist der Proportionalitätsfaktor, der die Krümmung der Kurve angibt, und der, wie später gezeigt werden wird, für alle hier untersuchten Bodenarten konstant gefunden wurde.

Entwicklung der Verdunstungsgleichung

In der Natur tritt die logarithmische Funktion meistens da auf, wo sich bei Steigerung der einen Variablen die andere asymptotisch einem Höchstwert bzw. Mindestwert nähert. In unserem Falle wird durch Steigerung der Lockerungstiefe l die Wasserverdunstung v aus dem Boden vermindert, ohne jedoch durch tiefste Lockerung ganz aufzuhören, sie nähert sich vielmehr asymptotisch einem Mindestwert, welches sich durch folgende Differentialgleichung ausdrücken läßt:

$$\frac{dv}{dl} = -c(v + i) \quad \text{oder} \quad \frac{dv}{v + i} = -c \cdot dl. \quad (1)$$

in welcher l und v die Variablen sind und i diesen Mindestwert bedeutet, welchen v allmählich bei Steigerung von l erreicht, wobei i eine für jeden Boden konstante Größe ist, die durch den Gasaustausch des Bodens bedingt wird. c ist Proportionalitätsfaktor. Mit steigender Lockerungstiefe l nimmt die Verdunstung v ab, also muß $c \cdot d l$ negativ sein.

Diese Gleichung besagt, daß die Abnahme von v bei der Steigerung von l der Summe $(v + i)$ proportional ist.

Integriert man diese Gleichung in bestimmten Grenzen, so erhält man

$$\log(v_0 + i) - \log(v_1 + i) = c(l_1 - l_0).$$

Auffindung der Konstanten der Verdunstungsgleichung¹⁾

Um diese Gesetzmäßigkeit für die Bodenverdunstung zu prüfen, müssen zunächst die Konstanten i und c in der Gleichung bestimmt werden. Nach Ausgleichung der graphischen Kurve wurden drei Verdunstungsgrößen v_0 , v_1 , v_2 herausgenommen, die untereinander die gleiche Lockerungsdifferenz hatten, also bei denen

$$l_2 - l_1 = l_1 - l_0 \quad \text{war.}$$

Wir haben dann die beiden Gleichungen:

$$\log(v_0 + i) - \log(v_1 + i) = c(l_1 - l_0) \quad (2)$$

$$\log(v_1 + i) - \log(v_2 + i) = c(l_2 - l_1). \quad (3)$$

Es ergibt sich dann durch Subtraktion (2) — (3), da die beiden rechten Seiten einander gleich sind:

$$\log(v_0 + i) - 2 \log(v_1 + i) + \log(v_2 + i) = 0$$

und durch Entlogarithmieren dieser Gleichung:

$$\frac{(v_0 + i)(v_2 + i)}{(v_1 + i)^2} = 1.$$

Löst man diese Gleichung nach i hin auf, so erhält man für:

$$i = \frac{v_1^2 - v_0 \cdot v_2}{v_0 + v_2 - 2v_1}.$$

Da die Größe i später negativ gefunden wird, setzt man sie als solche in die Hauptgleichung ein und erhält:

$$\log(v_0 - i) - \log(v_1 - i) = c(l_1 - l_0).$$

¹⁾ Vgl. a. H. RODEWALD, „Über Quellungs- und Benetzungsercheinungen“, Zeitschrift f. physik. Chemie, Bd. XXXIII, 1900, S. 594—595, und E. A. MITSCHERLICH, Untersuch. üb. die physik. Bodeneigenschaften, Landw. Jahrb. 30, Bd. 1901, S. 388-390.

Ist in dieser Gleichung i bekannt, so läßt sich der Proportionalitätsfaktor c direkt aus zwei Beobachtungen berechnen:

$$c = \frac{\log(v_0 - i) - \log(v_1 - i)}{l_1 - l_0}$$

Es wurden nun von jedem Boden 3 Verdunstungsmengen, die sich der Kurve gut anzupassen schienen, und die sich durch die gleiche Lockerungsdifferenz voneinander unterschieden, herausgenommen und damit in der oben angegebenen Weise die Konstanten i und c der einzelnen Bodenarten nacheinander bestimmt. Bei dieser Berechnung konnte der Mittelwert der Bestimmungen nicht gut genommen werden, da die Gleichung, die für jede Bodenart gefunden wurde, sich den Beobachtungen natürlich möglichst gut anschließen sollte. So besteht die Möglichkeit, daß sich noch andere Konstanten finden lassen, die sich den Beobachtungen genauer anschließen, als die hier berechneten. Dies ändert jedoch nichts an dem Resultat der Untersuchungen; für unsere Zwecke genügt der Nachweis, daß die Art der Gesetzmäßigkeit gültig ist.

Bei der Kurvenzeichnung mußte die Lockerungsschicht, die bei den Versuchen quantitativ hinzugegeben wurde, in ihrer Mächtigkeit ausgedrückt werden, da diese für die Verdunstung maßgebend ist. Die Bestimmung erfolgte mit Hilfe eines Lockerungshakens, an dem eine cm-Skala aufgezeichnet war. Durch die Größe der Unterschiede in der Verdunstung der einzelnen Lockerungstiefen war es erforderlich, die Mächtigkeit der gelockerten Schicht auf $\frac{1}{10}$ cm genau zu bestimmen. Die geringen Abweichungen, die sich bei der Messung der verschiedenen Lockerungstiefen zeigten, sind einmal auf die etwas ungenaue Methode und ferner auf das mehr oder weniger starke „Sichsetzen“ der gelockerten Schicht gemäß der verschiedenen physikalischen Beschaffenheit der einzelnen Böden zurückzuführen. In der nachstehenden Tabelle sind die Gleichungen, welche für die verschiedenen Bodenarten gefunden wurden, übersichtlich aufgeführt:

Verdunstungsgleichungen verschiedener Bodenarten

Bodenart nach der Form:	$\log(v - i) = \log(v_0 - i) - c \cdot l$
I. Sand	$\log(v - 2) = 1,3831 - 0,1642 \cdot l$
II. Lehmiger Sand	$\log(v - 2,1) = 1,4099 - 0,1642 \cdot l$
III. Sandiger Lehm	$\log(v - 2,2) = 1,4000 - 0,1642 \cdot l$
IV. Gartenboden.	$\log(v - 2,6) = 1,4179 - 0,1642 \cdot l$
V. Gartenboden mit Niederungsmoor	$\log(v - 2,5) = 1,4072 - 0,1642 \cdot l$
VI. Hochmoor	$\log(v - 3) = 1,4046 - 0,1642 \cdot l$

Aus den Gleichungen ist ersichtlich, daß der Proportionalitätsfaktor c für alle untersuchten Bodenarten der gleiche ist. Die Konstante i wird um so größer, je mehr organische Substanz der Boden enthält. Diese Tendenz läßt sich vielleicht so erklären, daß bei den humusreicheren Bodenarten ein schnellerer Gasaustausch stattfindet.

In nachfolgender Tabelle wurden nun die Mittelwerte der gefundenen Verdunstungsmengen der Gefäße, die eine verdunstende Oberfläche von 297 cm² hatten, in mm Verdunstungshöhe umgerechnet; und zwar entspricht der Verdunstung v_0 die Lockerungstiefe l_0 , der Verdunstung v_1 der Lockerungstiefe l_1 usw. Die in cm ausgedrückten Lockerungstiefen der einzelnen Bodenarten sind aus der übernächsten Tabelle, wo die gefundenen mit den berechneten Bestimmungen verglichen werden, zu ersehen.

Gleichungen der gefundenen Verdunstungsmengen in mm Verdunstungshöhe

I. Sand

- $v_0 = 0,88$ mm Verd.-Höhe
- $v_1 = 0,44$ mm Verd.-Höhe
- $v_2 = 0,25$ mm Verd.-Höhe
- $v_3 = 0,13$ mm Verd.-Höhe

II. Lehm. Sand

- $v_0 = 0,94$ mm Verd.-Höhe
- $v_1 = 0,53$ mm Verd.-Höhe
- $v_2 = 0,32$ mm Verd.-Höhe
- $v_3 = 0,16$ mm Verd.-Höhe

III. Sand. Lehm

- $v_0 = 0,92$ mm Verd.-Höhe
- $v_1 = 0,48$ mm Verd.-Höhe
- $v_2 = 0,25$ mm Verd.-Höhe
- $v_3 = 0,14$ mm Verd.-Höhe

IV. Gartenboden

- $v_0 = 0,97$ mm Verd.-Höhe
- $v_1 = 0,53$ mm Verd.-Höhe
- $v_2 = 0,28$ mm Verd.-Höhe
- $v_3 = 0,13$ mm Verd.-Höhe

V. Gartenboden mit Niedermoor

- $v_0 = 0,94$ mm Verd.-Höhe
- $v_1 = 0,45$ mm Verd.-Höhe
- $v_2 = 0,23$ mm Verd.-Höhe
- $v_3 = 0,13$ mm Verd.-Höhe

VI. Hochmoor

- $v_0 = 0,96$ mm Verd.-Höhe
- $v_1 = 0,43$ mm Verd.-Höhe
- $v_2 = 0,29$ mm Verd.-Höhe
- $v_3 = 0,15$ mm Verd.-Höhe

Diese Zahlen zeigen wiederum die Unterschiede in der Verdunstung der verschiedenen Lockerungstiefen.

Die Werte v_0 sowohl als auch die anderen Verdunstungswerte weisen innerhalb der einzelnen Böden durch ihre verschiedene physikalische Beschaffenheit keine großen Unterschiede auf, da die Verdunstung im geschlossenen Raum ohne Sonnenbestrahlung und ohne den Einfluß des Windes stattfand.

Der Verlauf der Gesetzmäßigkeit in der Wasserverdunstung der verschiedenen Bodenarten ist aus den im Landw. Institut Königsberg niedergelegten Kurven zu ersehen. Die gefundenen Werte sind als Kreise eingezeichnet.

Vergleich der gefundenen und berechneten Bestimmungen

Aus den oben angeführten Verdunstungsgleichungen wurden nun die Verdunstungsmengen bei entsprechender Lockerungstiefe berechnet. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

I. Sand

cm Lock. Tiefe	Gef.	Berechnet
0	26,16 ± 0,17	26,16
2	13,19 ± 0,08	13,34
4	7,30 ± 0,05	7,33
7	3,81 ± 0,03	3,71

II. Lehmiger Sand

cm Lock. Tiefe	Gef.	Berechnet
0	27,80 ± 0,15	27,80
1,65	15,80 ± 0,10	15,87
3,3	9,46 ± 0,11	9,48
6,2	4,60 ± 0,05	4,57

III. Sandiger Lehm

cm Lock. Tiefe	Gef.	Berechnet
0	27,32 ± 0,14	27,32
2	14,11 ± 0,08	14,00
4	7,42 ± 0,08	7,74
7	4,12 ± 0,04	3,98

IV. Gartenboden

cm Lock. Tiefe	Gef.	Berechnet
0	28,78 ± 0,17	28,78
1,8	15,71 ± 0,11	15,85
4	8,24 ± 0,08	8,37
8	3,92 ± 0,04	3,87

V. Gartenboden im Gemenge mit Niederungsmoor

cm Lock. Tiefe	Gef.	Berechnet
0	28,04 ± 0,11	28,04
2,3	13,29 ± 0,08	13,20
4,75	6,82 ± 0,05	6,74
8	3,83 ± 0,04	3,74

VI. Hochmoor

cm Lock. Tiefe	Gef.	Berechnet
0	28,39 ± 0,2	28,39
2,5	12,76 ± 0,09	12,87
4	8,67 ± 0,07	8,60
7,5	4,48 ± 0,05	4,49

Vergleicht man nun die berechneten Werte mit den gefundenen, so zeigt sich bei allen Bodenarten eine gute Übereinstimmung. Durchweg liegen die berechneten Werte innerhalb der Fehlergrenze, trotz des kleinen wahrscheinlichen Fehlers der gefundenen Verdunstungsqualitäten.

Nun könnte man einwenden, daß in den Versuchen ungelockerter Boden und nur drei verschiedene Lockerungstiefen zur Untersuchung herangezogen worden seien. Es ist natürlich klar, daß sich vier Beobachtungen im allgemeinen leichter in eine Kurve hinein-

legen lassen, als eine größere Anzahl. Hierzu ist jedoch zu bemerken, daß aus den resultierenden Zahlen der Versuche die Art der Gesetzmäßigkeit so deutlich zu erkennen ist, daß eine Untersuchung weiterer Differenzen in der Lockerungstiefe nicht erforderlich erscheint. Ferner wurde, wie bereits angegeben, der den Verlauf der Kurve angegebende Wirkungsfaktor c für alle sechs untersuchten Bodenarten konstant gefunden, was die festgestellte Beziehung zwischen der Bodenlockerung und der Wasserverdunstung des Bodens noch erhärtet.

Die Übertragung der Ergebnisse auf das freie Land und ihre Nutzbarmachung für die landwirtschaftliche Praxis

Es ist zunächst die Frage zu entscheiden, ob die in den vorliegenden Versuchen ermittelten Ergebnisse ohne weiteres auf die Vorgänge in der Natur zu übertragen sind. Da auch in der Natur die volle Wirkung einer Bodenlockerung auf die Verminderung der Wasserverdunstung aus dem Boden erst dann eintreten dürfte, wenn die gelockerte Schicht vollständig abgetrocknet ist, so wird angenommen werden können, daß die Übertragung der Resultate der Laboratoriumsversuche auf das freie Land angängig ist. Von dem Zeitpunkt der Bodenlockerung bis zur vollständigen Abtrocknung der gelockerten Schicht sind natürlicherweise die verschiedensten Übergänge vorhanden. Es wird immer von der herrschenden Witterung abhängen, ob eine vollkommene Abtrocknung überhaupt erfolgen kann. Aber wenn dies durch früher einsetzende Niederschläge verhindert wird, so setzt die Bodenlockerung die Wasserabgabe aus dem Boden in der Zwischenzeit dennoch herab, wenn auch in einem geringeren Grade, wie aus den Resultaten der zweiten Versuchsreihe hervorgeht. Vielfach werden die Verhältnisse auf dem freien Lande aber so liegen, daß die gelockerte Bodenschicht durch die Einwirkung der Sonnenstrahlen und durch leichteren Zugang des Windes an die einzelnen Bodenteilchen sehr rasch austrocknet und eine vollständige Isolationsschicht entsteht. Dann wird die Wasserverdunstung in gleicher Weise herabgesetzt werden wie in der letzten Versuchsreihe, oder die Wirkung der Bodenlockerung wird, sofern eine sonnige trockene Witterung längere Zeit anhält, noch viel größer sein.

An einem herausgegriffenen Beispiel soll jetzt dargetan werden, wie groß die Wasserersparnis bei vollkommen trockener gelockelter Bodenschicht ohne Einfluß von Wind und Sonnenbestrahlung

sein kann. Stellen wir die Verdunstung des ungelockerten Sandbodens der bei 7 cm tiefer Bodenlockerung gegenüber, so hat in ungefähr 1 Tage (= 1 mm Verdunstung der freien Wasseroberfläche) im geschlossenen Raum der ungelockerte Sand 26,16 g Wasser und der 7 cm tief gelockerte Sand 3,81 g Wasser verdunstet. Bei einer verdunstenden Oberfläche der Versuchsgefäße von 297 cm² entspricht dies beim ungelockerten Boden einer Verdunstungshöhe, oder im Äquivalent ausgedrückt, einer Regenhöhe von 0,88 mm und beim 7 cm tief gelockerten Sand einer Regenhöhe von 0,13 mm. Der ungelockerte Sand hat also annähernd 7 mal so viel Wasser an die Atmosphäre abgegeben als der 7 cm tief gelockerte Sandboden. Daraus geht hervor, daß die 7 cm tiefe Bodenlockerung in ganz erheblichem Maße wassersparend gewirkt hat. Während einer längeren Trockenperiode, nehmen wir einmal nur 20 Tage an, würde also der ungelockerte 17,6 mm und der 7 cm tief gelockerte Sandboden 2,6 mm Wasser verdunsten. Durch diese Lockerung wären demnach dem Boden 15 mm Niederschläge erhalten geblieben, und wenn die Witterung während dieser Zeit sehr heiß und windig gewesen wäre, so würde der Unterschied noch viel größer sein.

Bei den anderen Bodenarten ist die Wasserverdunstung durch Bodenlockerung in gleicher Weise herabgesetzt. Die verschiedenen physikalischen Eigenschaften der einzelnen Böden weisen bei der Verdunstung im geschlossenen Raum keine erheblichen Unterschiede auf.

Welch große Bedeutung diese Wasserersparnis für das Wachstum unserer Pflanzen hat, abgesehen von der noch in anderer Richtung günstigen Wirkung einer Bodenlockerung, ist ohne weiteres einleuchtend. Daraus folgt für die landwirtschaftliche Praxis mit unbedingter Notwendigkeit, welche besondere Beachtung der Landwirt der Bearbeitung des Ackerbodens zuzuwenden hat. Insonderheit sollte die Stoppel so bald wie möglich geschält werden. Der Ackerboden ist zwar zu dieser Zeit am meisten abgetrocknet, so daß die Kapillaren nicht bis zur Erdoberfläche reichen und die Verdunstung ist an sich gering. Wird der Boden nun geschält, so verdunstet sogar zunächst mehr Wasser. Aber es kommt nicht auf den momentanen Zustand des Bodens an, sondern sobald Niederschläge fallen, werden diese von der gelockerten Schicht besser absorbiert, die Lockerungsschicht trocknet dann schneller ab und bildet eine Isolationsschicht gegen die Atmosphäre, so daß der Regen nach Möglichkeit dem Boden erhalten bleibt. Beim ungeschälten Acker sind

die Kapillaren jedoch durch den Regenfall sofort wieder bis zur Erdoberfläche hergestellt und die Verdunstung ist sodann erheblich größer. Hieraus erhellt die Bedeutung der Schälffurche als wassersparende Maßnahme.

Aber auch während des Wachstums der Pflanzen ist eine Bodenlockerung zumeist von Vorteil. „Je mehr gesundes Wasser ein Boden während der ganzen Vegetationszeit den Pflanzen zur Verfügung stellt, um so fruchtbarer ist er¹⁾.“

Es steht nach alledem fest, daß durch eine zweckmäßige Bodenbearbeitung dem Boden sehr viel Wasser erhalten wird und in manchen Fällen sogar kostspielige künstliche Bewässerungsanlagen erspart werden können. Voraussetzung ist aber, daß der Landwirt die lokalen Verhältnisse und die Wirkungen jeder einzelnen Bodenbearbeitungsmaßnahme genau kennt, weil jeder Boden ganz verschieden behandelt werden muß.

Zusammenfassung

Der Boden verdunstet, je mächtiger die Lockerungsschicht ist, desto geringere Wassermengen. Die Verdunstung bei verschieden tiefer Lockerung verläuft, sobald die Lockerungsschicht abgetrocknet ist, wie die Resultate der Versuche bestätigt haben, in einer Kurve nach der logarithmischen Gleichung:

$$\log (v_0 - i) - \log (v_1 - i) = 0,1642 (l_1 - l_0).$$

i ist eine für jede Bodenart typische Konstante, eine Größe, die zeigt, welche Wassermenge der Boden auch dann noch an die Atmosphäre abgibt, wenn er ideal tief gelockert wäre. Diese Verdunstung wird durch den Gasaustausch des Bodens bedingt. Mit zunehmender organischer Substanz im Boden steigt die Konstante i , was wahrscheinlich auf stärker einsetzenden Gasaustausch infolge größerer Hohlräume zurückzuführen ist.

Um einerseits die Lockerungsschicht trocken und andererseits die Steighöhe des Wassers im festen Boden bis zur Oberfläche zu ermöglichen, war in der festgestampften Bodenschicht ein Wassergehalt von etwas mehr als 50% der wasserfassenden Kraft erforderlich, der während der ganzen Versuchsdauer konstant gehalten wurde.

¹⁾ MITSCHERLICH, Landw. Hefte Nr. 24, Berlin 1921. Steigerung der Pflanzenerträge unter dem Einflusse der Bodenbearbeitung.

Um diese Gesetzmäßigkeit herauszufinden, war das Fixieren aller übrigen Variablen bis auf die Bodenlockerung, deren Wirkungsgrad auf die Verdunstung des Bodens untersucht wurde, notwendig.

Die festgestellte Gesetzmäßigkeit gilt nicht nur für die verwendeten Böden, sondern dürfte allgemeinere Gültigkeit haben.

Die berechneten Kurven stellen die verdunstete Wassermenge nach jedesmal gleichen äußeren Verdunstungsbedingungen als Funktion der Lockerungstiefen dar. Dadurch ist der Wirkungsgrad der verschiedenen Lockerungstiefen gekennzeichnet.

Der Kurvenverlauf in der Verdunstung wird gestört, wenn die gelockerte Bodenschicht noch zum Teil feucht ist. Erst bei völliger Trockenheit der gelockerten Schicht setzt die volle Wirkung als Isolationsschicht ein, und die Wasserverdunstung des Bodens unterliegt dem gefundenen Gesetz.

Abstract

The result of the investigations in question may be summarised as follows:

The greater the depth of the loosened layer of soil, the smaller are the quantities of water evaporated by the soil. As the results of the investigations show, if the loosening is differently deep, the evaporation, as soon as the loosened layer dries off, takes its course in a curve according to logarithmical equation:

$$\log (v_0 - i) - \log (v_1 - i) = 0,1642 \cdot (l_1 - l_0).$$

i is a typical constant for every kind of soil, a value that shows what quantities of water are given up to the soil, even though it had been especially well loosened in depths. This evaporation has its cause in the exchange of gas of the soil. With the increase of the organic substance in the soil the constant i is rising which is caused probably by a stronger growing exchange of gas, in consequence of larger hollow spaces in the soil. To keep the loosened layer dry and on the other hand to make the rising of the water possible to the surface of the solid soil, it was necessary, to have a water capacity of some what more than 50% of the water carrying power, in the firmly rolled down layer, which was kept constant during the whole time of trial.

To find out this lawfulness it was necessary to fix all other variables except the loosening of the soil, the effect of which on the evaporation was being examined.

The attained lawfulness is not only valid for the examined soils but it is sure to have a general value.

The calculated curves represent the evaporated quantity of water always under similar external conditions of evaporation, as a function of the depth of loosening. This will elucidate the degree of effect of the different depths of loosening.

The course of the evaporation curves becomes disturbed, when the loosened layer of the soil is still partly humid. The full effect as an isolating layer does not begin before the loosened layer has become perfectly dry, and then the evaporation of the soil will be found in accordance with the discovered law.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Botanisches Archiv. Zeitschrift für die gesamte Botanik](#)

Jahr/Year: 1929

Band/Volume: [23](#)

Autor(en)/Author(s): Steinbrück Alfred

Artikel/Article: [Untersuchungen über die Beziehung zwischen der Bodenlockerung und der Wasserverdunstung des Bodens 238-265](#)