

39.

11.

U430865

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000305612

Mitteilungen

Landwirtschaftlichen Institute

der Königlich Preussischen Universität Göttingen

Verlag von

W. Neumann, Neudamm bei Berlin, in Commission bei

Dr. K. von Meyer

X
2,128

Zeitschr. 19/10. 06

Überreicht vom Verfasser.

Sonderabdruck aus:

Mitteilungen

der

Landwirtschaftlichen Institute

der Königlichen Universität Breslau.

Unter Mitwirkung von

Dr. F. Aereboe,	Dr. F. Ahrens,	Dr. Casper,	Dr. F. Holdeweiss,	Dr. C. Luedecke,	Dr. Th. Pfeiffer,
Professor, Direktor des Institu- tes für Wirtschafts- lehre des Landbaues	Professor, Direktor des landw. technolog. Institutes	Professor, Direktor des Veterinär- Institutes	Professor, Direktor d. Institutes für landw. Tierproduktionslehre	Professor, Leiter des kultur- technischen Apparates	Professor, Direktor des agrik- chem. u. bakterio- logischen Institutes

herausgegeben von

Dr. K. von Rümker,

Professor, Direktor des Institutes für landwirtschaftliche Pflanzenproduktionslehre.



F. Nr. 27890

Dritter Band. Heft V.



BERLIN.

VERLAGSBUCHHANDLUNG PAUL PAREY.

Verlag für Landwirtschaft, Gartenbau und Forstwesen.
SW., Hedemannstrasse 10.

1906.

5.39
71



III 33412

Akc. Nr. 2952 / 30

Das Verhältnis zwischen der Menge des Niederschlages und des Sickerwassers nach englischen Versuchen.

Von

Prof. Dr. C. Luedecke-Breslau.

(Hierzu Taf. VI—X.)

Die Unentbehrlichkeit des Grund- und Quellwassers für die Ernährung von Menschen und Tieren, für häusliche Zwecke und zur Benutzung in der Industrie und Landwirtschaft hat schon früh Versuche veranlasst, die Menge desselben, die unter bestimmten Verhältnissen vorhanden ist, zu bestimmen und das Verhältnis zwischen der Menge des Niederschlags und der aus Quellen etc. abfließenden Grundwassermenge festzustellen. Diese Versuche haben weit auseinanderliegende Resultate ergeben; ja man hat sogar behauptet — als der erste wohl der Geologe Volger —, dass der grösste Teil des Grundwassers nicht von dem Regen stamme, sondern durch Kondensation der Luftfeuchtigkeit an der Bodenoberfläche, in den Poren des Bodens und des tieferliegenden Gesteins entstehe.

Es ist selbstverständlich, dass in der Zeit, wo der Boden kälter ist als die Luft, durch Kondensation flüssiges Wasser entsteht, welches vom Boden aufgesogen wird; wenn ferner bei steigendem Barometer die in den Poren des Untergrundgesteins enthaltene Luft zusammengepresst wird, so tritt aus der Atmosphäre Luft und mit ihr Feuchtigkeit in die kühleren Schichten ein, wo die letztere teilweise niedergeschlagen werden kann. Dafür tritt aber auch bei sinkendem Barometer ein Teil der mit Feuchtigkeit mehr oder weniger gesättigten Bodenluft in die Atmosphäre und entführt dem Boden Wasser. Da in vielen Gegenden das Grundwasser gar nicht tief unter der Oberfläche steht, so ist überhaupt die Schicht, in welcher erheblicher Luftwechsel durch Bewegung stattfindet, nicht sehr stark und deshalb auch die durch Kondensation dem Boden aus der Luft einverleibte Wassermenge im Vergleich zu der durch den Regen dem Boden zugeführten unerheblich, auch wenn die in den Poren des Bodens stattfindende Taubildung verhältnismässig häufig eintreten sollte.

Unter mittleren Verhältnissen fliesst ein Teil des Niederschlagswassers auf der Oberfläche des Bodens ab und gelangt so in die Bäche und Flüsse; ein anderer Teil dringt in die Poren des Bodens ein und bildet das Sickerwasser, Drain- und Grundwasser, während ein dritter Anteil durch Verdunstung der Atmosphäre direkt zurückerstattet wird. Die Verdunstung

findet direkt aus dem Boden statt oder durch Vermittelung der Pflanzen, die durch ihre Wurzeln das Wasser aufnehmen und durch die Spaltöffnungen der Blätter etc. an die Atmosphäre wieder abgeben. Je kräftiger die Vegetation, um so stärker ist der aufsteigende Saftstrom und die Verdunstung der Blätter.

Will man das Verhältnis zwischen der Menge des Niederschlags- und des Sickerwassers bestimmen, so wird man am besten die Einrichtung so treffen, dass oberirdisch kein Wasser abfliessen kann; man misst ferner mit dem Regenmesser die Menge des Niederschlags und die durch eine Bodenschicht von bestimmter Mächtigkeit hindurchsickernde Wassermenge. Der Unterschied beider Messungsergebnisse stellt die scheinbar verdunstete Wassermenge dar. Um das wirklich verdunstete Wasser zu finden, müsste noch der Wassergehalt des Bodens am Anfang und am Ende des Versuchs ermittelt und entsprechend in Rechnung gestellt werden. Bei bebautem Boden ist, wie bekannt, die Verdunstung sehr viel grösser als bei Brachland. Je länger eine solche Versuchsreihe fortgesetzt wird, um so mehr nähert sich der Mittelwert der Beobachtungen dem durch die bestehenden Verhältnisse bedingten wirklichen Wert, ohne diesen jedoch zu erreichen.

Wir wollen zunächst die Rothamsted (bei Harpenden, 40 km von London) von Lawes und Gilbert 1870 begonnene und bis zur Gegenwart fortgesetzte Versuchsreihe benutzen, um den Gang der Sickerwasserbildung zu studieren. Die Versuchsanordnung ist in verschiedenen Veröffentlichungen beschrieben (z. B. On the amount and composition of the rain and drainage waters, London 1882). Von allen anderen ähnlichen unterscheidet sie sich wesentlich dadurch, dass der Boden in seiner natürlichen Lagerung verwendet ist; die Ackerkrume ist ziemlich schwerer Lehm (8 Zoll tief), darunter folgt bröcklicher Ton (10" stark) und schliesslich fester Ton (1 Zoll = 2,54 cm). Regenmesser werden zwei verwendet; der eine ist $\frac{1}{1000}$ Acre (4,05 qm) gross, aus Glasplatten erbaut, so dass sein Rand mit den Rändern der Versuchsbeete gleichhoch liegt; der andere hat die gewöhnliche Form von 5" Durchmesser.

Der letztere Messer gibt den Regenfall geringer an als der grosse, und zwar:

im Monat	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli
um	12,6	12,7	17,4	10,2	7,7	7,3	6,3 %
im Monat	Aug.	Septbr.	Oktrbr.	Novbr.	Dezbr.		
um	7,7	8,9	9,9	9,9	10,7 %		
im Jahre 9,8 % (Mittel 1853—80 70 mm zu wenig).							

Der Einfluss, welchen der Wind auf die im Regenmesser gefundene Niederschlagsmenge ausübt, ist bekannt; vor allem wird starker Schneefall im grossen Apparat sicherer gemessen als im kleinen. Ich habe deshalb nur die im grossen Regenmesser erhaltenen Resultate als die sichereren berücksichtigt.

Das Jahr ist stets vom 1. September bis 31. August gezählt. In den Jahren 1870—74 sind einzelne Wände der Lysimeter undicht gewesen und

die Resultate deshalb unsicher; ich habe daher nur die Reihe 1875/76 bis 1899/1900 bearbeitet. Wollny hat in seiner Arbeit über die Sickerwassermengen in verschiedenen Bodenarten (Forschungen Bd. 11, 1888) die unrichtigen Werte mitbenutzt. Der geringste Regenfall in dieser Zeit ist 495 mm, der höchste 1040 mm, das Mittel 749 mm.

Eine alte Regel sagt, dass das nasseste Jahr doppelt so viel Niederschlag hat als das trockenste, ein sehr trocknes aber zwei Drittel des Mittels, was mit den Beobachtungen etwa übereinstimmt.

Die Verteilung des Regens ist dort eine andere als bei uns; es hat im Mittel der Winter (Septbr.—Febr.) 404 mm, der Sommer (März—Aug.) 345 mm. Der trockenste Monat ist der März mit 46 mm; dann wächst die Regenmenge bis zum August auf 72 mm, im September ist sie wieder etwas geringer und erreicht im Oktober und November mit 84 und 82 mm ihren höchsten Wert, um dann bis zum März wieder abzufallen. Schnee fällt nur wenig und schmilzt gewöhnlich auch bald wieder.

Obgleich die meteorologischen Beobachtungen nicht solche sind, die dem Fehlerwahrscheinlichkeitsgesetz auch nur annähernd entsprechen, so ist es doch üblich geworden, zur Bezeichnung der Genauigkeit der erlangten Mittelwerte ihren wahrscheinlichen Fehler zu berechnen. Es sei deshalb angeführt, dass der wahrscheinliche Fehler des Niederschlags des Jahresmittels für den Zeitraum 1875—1900 $r = \pm 19$ mm oder 2,5 % der Regenhöhe, von einzelnen Monaten für Oktober ± 6 mm = 7 %, Januar ± 4 mm = ± 6 %, Mai ± 4 mm = ± 8 %, August ± 5 mm = ± 7 % und für den Winter = ± 15 mm = $\pm 3,7$ %, Sommer = ± 11 mm = $\pm 3,2$ % beträgt. Es sei hier noch erläuternd bemerkt, dass die ganzen ausserordentlich ausgedehnten Rechnungen alle mit englischem Zoll-Maß ausgeführt und nur die Resultate in Zentimeter und Millimeter umgerechnet sind.

Die Menge des Sickerwassers hängt ab von der Grösse und der Verteilung der Niederschläge, von den physikalischen Eigenschaften des Bodens und der Grösse der Verdunstung. Dr. Eser hat unter Wollnys Leitung durch eingehende Versuche mit kleinen Lysimetern den Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Grösse der Verdunstung ermittelt (Wollny, Forschungen Bd. VII, 1884).

In Rothamsted hat man drei Parzellen von je 0,001 Acre Grösse (4,05 qm) im gewachsenen Lehm ringsum freigegeben, mit wasserdichten Mauern umgeben und in einer Tiefe von 20" (= 51 cm), 40" (= 101 cm) und 60" (= 152 cm) unterfahren, so dass die Erdmasse festlag, und das durch sie hindurchsickernde Wasser aufgefangen und gemessen werden konnte. Die Oberfläche blieb stets unbebaut, nur die Unkräuter wurden zerstört. Die Monatssummen des Sickerwassers und Regenfalls 1870 bis 1899 sind abgedruckt: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society Vol. XXVI No. 114 April 1900, by Rob. H. Scott.

Zunächst ist es nötig, den Vorgang der Sickerwasserbildung etwas näher zu betrachten. Jeder feste Boden oder Untergrund ist von einer mehr oder weniger grossen Zahl von Löchern (Trockenrissen, Regenwurm-gängen, Wurzelröhrchen) durchzogen. (In dem Trichter des Lysimeters

von 20" hat man öfter Regenwürmer gefunden, in denen von 40" und 60" nur selten.) Das Sickerwasser gelangt deshalb auf zwei verschiedenen Wegen von der Oberfläche in den Untergrund: 1. indem es durch die grösseren Spalten etc. hindurchfliesst, was verhältnismässig schnell von-statten geht, und 2. indem es sich durch die kleinen Hohlräume bewegt, was wesentlich länger dauert. Die erste Welle des Sickerwassers, welche den Boden schnell passiert, nimmt deshalb aus diesem auch weniger Salze auf als die zweite, die langsamer fliesst und mit den Bodenteilchen in längere und innigere Berührung kommt. Lawes und Gilbert haben dies durch chemische Untersuchung bestätigt. Auf Taf. VI, Fig. 1 ist für die einzelnen Tage des Monats April 1879 die Grösse des Regensfalls und Sickerwassers und der Gehalt des letzteren an Stickstoff in Milligrammen im Liter dargestellt. Es geht daraus hervor: Wenn bald nach Beginn des Regens das Sickerwasser untersucht wird, so enthält es meist wenig Nitrate (erste Welle durch die Spalten sich bewegend); das Maximum des Stickstoffgehaltes wird meist erst erreicht, wenn der Regen aufgehört hat und der Boden mit Wasser gesättigt ist (zweite Welle, welche sich durch die engeren Hohlräume bewegt, dazwischen Mischwasser aus beiden). Bei Böden von verschiedener physikalischer Beschaffenheit sind diese Anteile verschieden gross; in leichten Böden werden die Wurmröhren nur wenig Bedeutung haben, in schweren Böden dagegen, welche das Wasser langsam aufnehmen und noch langsamer in die Tiefe leiten, haben die Wurmröhren, Trockenrisse etc. grosse Bedeutung; durch diese Kanäle fliesst das Wasser schon ab, ehe noch der Boden mit Wasser gesättigt ist, vor allem, wenn der Regen sehr schnell und massig fällt (grosse Regendichte), und das Wasser sich an der Oberfläche anhäuft. Wenn der Regen aufhört, beginnt sofort die Verdunstung an der Oberfläche, welche dann später auch das Wasser aus den tieferen Schichten wieder nach oben saugen kann und dadurch die Menge des Sickerwassers verringert.

Man könnte erwarten, dass Böden von verschiedener Tiefe (Lysimeter von 20", 40", 60" Tiefe) sich merklich verschieden verhielten. Das ist aber nach den Versuchen nicht der Fall, wie die Tabellen deutlich zeigen werden; es betrug die Sickerwassermengen im Mittel von 25 Jahren bei 20", 40" und 60" Tiefe:

	Sickerwasser in Millimetern			Sickerwasser in Prozenten des Regens		
	bei 20" Tiefe	bei 40" Tiefe	bei 60" Tiefe	bei 20" Tiefe	bei 40" Tiefe	bei 60" Tiefe
Mittel 25 Jahre	376	399	376	50	54	50
" 25 Winter	275	292	275	68	72	68
" 25 Sommer	101	107	101	29	31	28

Der Boden in dem 40"-Lysimeter ist etwas durchlässiger als der der beiden anderen, was auch durch vielfältige andere Beobachtungen bestätigt wird; der Lysimeter von 20" liefert genau dieselbe Sickerwassermenge wie der von 60" Tiefe.

Grösse der Versickerung.

Der Boden wurde, wie schon erwähnt, nur leicht behackt, um das Unkraut zu zerstören.

Taf. VII, Fig. 2 stellt die Grösse des Niederschlags der Versickerung und scheinbaren Verdunstung für die ganzen Jahre (vom 1. Septbr. bis 31. Aug. gerechnet) der Beobachtungszeit dar, während in Fig. 3 die Beobachtungen für die Wintermonate (Septbr.—Febr.) und die Sommermonate (März—Aug.) getrennt dargestellt sind.

Da die Winter in Rothamsted milde sind, und eine Aufspeicherung des Niederschlags in Form von Eis und Schnee, wie bei uns, wo der Schnee mitunter bis tief in den März liegen bleibt, nicht stattfindet, so kann auch eine Übertragung von Niederschlag und Sickerwasser aus dem Winter in den Sommer hinein nicht eintreten.

Auf Taf. VI, Fig. 4 sind die Mittelwerte des Regenfalls, der Versickerung und Verdunstung für die einzelnen Monate dargestellt.

Die folgende Tabelle gibt die hauptsächlichsten Werte für den Lysimeter von 60".

(Siehe die Tabelle I auf S. 620.)

Danach versickert im Jahresdurchschnitt von dem 749 mm betragenden Niederschlag fast genau die Hälfte, während die andere Hälfte verdunstet. Von dem grösseren Niederschlag des Winters (404 mm) versickern im Mittel 68 % und verdunsten 32 %, während im Sommer (345 mm) nur 29 % versickern und 71 % verdunsten. Im Vergleich zum Winter ist hier die Bezeichnung der Werte vertauscht.

Die in der Tabelle folgende Zusammenstellung enthält die Mittel aus je fünf Jahren. Trotzdem hier die Regenhöhen ziemlich stark schwanken, differiert die prozentische Versickerung und Verdunstung doch nur höchstens um 2 % mehr oder weniger. Auch für Sommer und Winter finden sich die Werte für die Versickerung und Verdunstung vertauscht wieder, nur sind hier die Schwankungen grösser. Die Schwankungen für die einzelnen Jahre sind natürlich viel grösser.

Es beträgt in den Jahren:

J a h r:	Regen- höhe	Versickerung		Verdunstung	
	mm	mm	%	mm	%
Minimum 1897/98	495	165	33	330	67
1879/80	539	165	31	374	69
Maximum 1896/97	945	579	61	366	39
Verhältnis: Minimum: Maximum = 1:3,50				= 1:1,04.	
I m W i n t e r:					
Minimum 1879/80	230	118	51	112	49
1877/78	250	120	48	130	52
Maximum 1896/97	582	479	82	103	18
Verhältnis: Minimum: Maximum = 1:4,0				= 1:0,9.	
I m S o m m e r:					
Minimum 1892/93	210	14	7	196	93
Maximum 1877/78	605	287	47	318	53
Verhältnis: Minimum: Maximum = 1:20,5				= 1:1,6.	

Hieraus geht hervor, dass die Grösse der Verdunstung unter den verschiedensten Verhältnissen nur sehr wenig schwankt, wie auch Taf. VII, Fig. 2 und 3 deutlich zeigt; sie ist unter den drei voneinander abhängigen Grössen Regenfall, Sickerwasser und Verdunstung die Konstante, und es wäre deshalb sehr wünschenswert, dass, wenn etwa wieder ähnliche Versuche eingerichtet werden, man die Einrichtung so trifft, dass die verdunstete Wassermenge direkt bestimmt wird, wie dies auch schon bei amerikanischen Versuchen geschehen ist. Bei der Rothamsteder Versuchseinrichtung ermittelt man nur die Grösse der scheinbaren Verdunstung, indem, wie schon erwähnt, die Schwankungen der Bodenfeuchtigkeit unberücksichtigt bleiben. Im langjährigen Mittel muss dieser Einfluss verschwinden, aber das Resultat der einzelnen Monate kann sehr dadurch getrübt werden.

Gar nicht berücksichtigen kann man die verschiedene Verteilung des Regens; grosse Regenmengen in wenigen Tagen geben grössere Sickerwassermengen und weniger verdunstetes Wasser, als wenn dieselbe Niederschlagsmenge auf den ganzen Monat gleichmässig verteilt gewesen wäre. Die Unregelmässigkeiten, die hierdurch hervorgerufen werden, sind aber in dem Rothamsteder schweren Boden in natürlicher Lagerung viel kleiner als in lose eingefülltem oder durchlässigem Boden.

Die Fig. 2 und 3 stellen auch dar, wie weit die Verdunstung in einzelnen Jahren von dem Mittelwerte abweicht; nicht zum geringsten wird die Konstanz der Verdunstung bedingt durch die Erscheinung, dass starker Regen, grosse Hitze und geringe Luftfeuchtigkeit wohl nie zusammentreffen, sondern sich zum Teil gegenseitig ausschliessen. In nasser Zeit ist es gewöhnlich kälter, während in warmer und regenärmerer Zeit die obere, ausgetrocknete Bodenschicht die tieferliegende, verdunstende Wasserfläche schützt.

Aus dem Vorstehenden folgt der Schluss: Das Sickerwasser ist der Überschuss des Regenfalls über die Verdunstung. Hierdurch wird zugleich das starke Schwanken der Sickerwassermenge erklärt.

Wie schon oben erwähnt, übt die Bodentiefe auf die Grösse der Verdunstung und die des Sickerwassers keinen Einfluss aus.

Auf Taf. VI, Fig. 4 und Tabelle I sind die Monatsmittel des Regenfalls, des Sickerwassers und der verdunsteten Wassermenge absolut und relativ angegeben.

Während der Sommermonate, von März an bis Ende September, bildet sich selbst bei Brachland im Mittel nur wenig Sickerwasser; die Verdunstung ist eben in dieser Zeit zu gross. Je weniger hoch die Sonne am Himmel steigt, um so mehr entsteht Sickerwasser, absolut am meisten im November (58 mm) und relativ am meisten im Januar (90 %); die Verdunstung wird hier ein Minimum von 10 %, während ihr Maximum in den Monaten Juni bis August liegt, wo 76—80 % der Regenmenge verdunsten (43—55 mm).

Die Unsicherheit der Resultate ist bei den Monatswerten grösser als bei denen für die Jahre und Halbjahre; für die Sommermonate ist die Un-

sicherheit besonders gross, weil hier mitunter der Regenfall gar nicht ausreicht, die verdunstende Wassermenge zu decken, und der fehlende Rest aus dem Bodenvorrat entnommen wird, was aber in den Messungsergebnissen des Sickerwassers nicht zum Ausdruck kommt. Es ist daher in diesen Fällen die Verdunstung zu klein gefunden. Im Winter, wenn sich der Boden mehr und mehr mit Wasser sättigt, ist sie vielleicht etwas zu gross, weil dann ein Teil des Regenwassers im Boden aufgespeichert ist.

Die Verdunstung wird auch nicht richtig gefunden, wenn ein starker Regen gegen Ende des Monats fällt, dessen Sickerwasser erst teilweise im folgenden Monat erscheint, oder wenn starker Frost gegen Ende des Monats herrscht. Diese beiden Fälle sind in den Jahren 1870—97 im ganzen 12 mal eingetreten.

So wie oben die wahrscheinlichen Fehler der Mittel der Regenbeobachtungen aufgeführt sind, seien hier auch noch die der Sickerwassermessungen angegeben.

Der wahrscheinliche Fehler des Sickerwassers beträgt für das Jahresmittel $r = \pm 15$ mm oder 4% der ganzen Menge, für den Monat Mai ± 2 mm = 16% , August ± 3 mm = 19% , Oktober ± 6 mm = 12% , Januar ± 4 mm = 8% , für den Winter ± 14 mm = 5% , Sommer ± 7 mm = 7% .

Soweit hätten wir versucht, aus den Mittelzahlen das Gesetz der Sickerwasserbildung zu ermitteln. Es kann das uns aber nicht genügen, denn das Mittel ist eine durch Rechnung gewonnene Grösse, die in der Natur nur ganz ausnahmsweise beobachtet werden wird. Der mittlere jährliche Regenfall von 749 mm ist in den 25 Jahren nur einmal beobachtet, ein zweiter Wert liegt noch dicht dabei, die nächstfolgenden liegen aber schon um 12—15 mm davon entfernt; ferner beträgt die in diesen Jahren beobachtete Sickerwassermenge auch nicht 50% , wie im Mittel, sondern weicht um mehrere Prozente davon nach oben und unten ab. Je weiter die Regenhöhe vom Mittel abweicht, um so grösser wird auch im allgemeinen die Abweichung vom Betrage der Sickerwassermenge. Es handelt sich also jetzt noch darum, festzustellen, in welchem Verhältnis sich die Sickerwassermenge ändert, wenn der Regenfall um einen gewissen Betrag vom Mittel abweicht, oder allgemein: wie lässt sich das Verhältnis des Niederschlags zum Sickerwasser mathematisch formulieren?

Auf Taf. VI, Fig. 5 sind als Abszissen auf der wagerechten Achse die Regenhöhen der einzelnen Jahre und auf der senkrechten Achse die dazugehörigen Sickerwassermengen des 60"-Lysimeters aufgetragen. Dadurch sind die 25 Punkte für die einzelnen Jahre und einer für das Mittel erhalten. Wie ersichtlich, ordnen sich diese Punkte rechts und links von einer Geraden, die durch den durch das Mittel bestimmten Punkt geht und in einem gewissen Punkte die Abszisse schneidet. Um alle Willkür auszuschliessen, ist die Lage dieser Linie mittelst der Methode der kleinsten Quadrate so bestimmt, dass die Quadratsumme der Abstände, um welche die einzelnen Punkte höher oder tiefer liegen als diese Linie, ein Minimum

wird. Man findet dann die Lage des Schnittpunktes der Linie auf der Abszisse und den Winkel, den sie mit dieser Achse machen muss, bestimmt durch die Tangente des Schnittwinkels bei $P_1 = b$.

Es besteht dann die Gleichung:

$$y = (x - x_0) b.$$

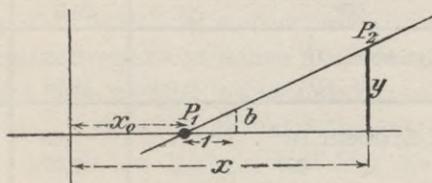


Fig. 12.

Da hierin x_0 und b aus den beobachteten Werten für Regenfall und Sickerwasser durch die Rechnung bestimmt werden, also bekannt sind, so kann man für jedes beliebige x (= Regenhöhe) das zugehörige y (= Sickerwasserhöhe) finden.

Die voll ausgezogene Linie mit der Bezeichnung „Jahre 60“ stellt die Versickerung im Lysimeter von 60“ Tiefe dar; ausserdem sind noch schwach punktiert eingetragen die Linien für den 20“-Lysimeter, die sich der vorigen bis auf eine Kleinigkeit anschliessen, und die des 40“-Lysimeters, die, der grösseren Durchlässigkeit dieses Bodens entsprechend, etwas nach oben verschoben ist. Die eingetragenen Punkte beziehen sich nur auf den 60“-Lysimeter.

Fig. 5 enthält gleichzeitig die Linien, die den Verlauf der Sickerwasserbildung während des Sommers und Winters für den Lysimeter von 60“ darstellen.

Selbstverständlich gelten diese Linien nur für den Bereich zwischen den Beobachtungspunkten; über ihren Verlauf ausserhalb dieser Punkte können wir überhaupt nichts wissen. Der Punkt P_1 ist bloss ein Hilfspunkt für die Konstruktion.

Die Linie, welche vom Nullpunkt der Teilung ausgeht und mit der Abszisse einen Winkel von 45° macht, gibt die Lage aller Punkte an, für welche die Sickerwassermenge gleich der Regenhöhe sein würde. Der senkrecht gemessene Abstand zwischen dieser Linie und einer der anderen gibt die Grösse der Verdunstung für den entsprechenden Punkt an. Alle drei Linien für die Sickerwasserbildung im Jahr, im Winter und Sommer laufen der das Achsensystem um 45° schneidenden Linie nicht parallel, bei allen wird der Abstand nach rechts zu grösser, d. h. die Verdunstung wächst mit steigender Regenhöhe, und zwar am stärksten im Sommer, darauf folgt die des ganzen Jahres, und am geringsten ist der Unterschied für den Winter.

In der folgenden Tabelle sind die Werte für x_0 und b zusammengestellt, welche die Ausgleichsrechnung für Jahr, Winter, Sommer und die einzelnen Monate geliefert hat.

Bezeichnung der Mittel:	x_0 cm	b
Jahr: Lysimeter 20"	28,45	0,798
" 40"	25,3	0,807
" 60"	25,5	0,770
Winter: Lysimeter 60"	9,99	0,905
Sommer: " 60"	19,92	0,681
September: Lysimeter 60"	3,65	0,76
Oktober: " 60"	2,99	0,88
November: " 60"	1,61	0,93
Dezember: " 60"	0,45	0,88
Januar: " 60"	0,63	1,01
Februar: " 60"	1,10	1,00
März: " 60"	1,49	0,81
April: " 60"	2,57	0,62
Mai: " 60"	2,68	0,50
Juni: " 60"	2,71	0,41
Juli: " 60"	3,38	0,50
August: " 60"	4,05	0,57

Auf Taf. VI, Fig. 6 sind die Linien, die die Sickerwasserbildung in den einzelnen Monaten darstellen, eingetragen, nebst den mittleren und grössten beobachteten Monatsregensummen. Am stärksten ist die Sickerwasserbildung in den Monaten Januar und Februar; wenn die geringe Verdunstung gedeckt ist, gibt hier 1 cm Regen auch 1 cm Sickerwasser ($b = 1,00$ und $1,009$), was in der Figur durch den parallelen Verlauf der Monatslinien mit der Linie Regenhöhe = Sickerwasser ausgedrückt ist. Auch der Dezember weicht nicht viel von den vorher genannten Monaten ab, nur ist hier bei grösseren Regenfällen die scheinbare Verdunstung grösser als bei kleineren Regenfällen.

Diese drei Monate dürfen als eine Gruppe für sich betrachtet werden (Fig. 6a), deren Sickerwassergleichung lauten würden: $y \text{ cm} = (x \text{ cm} - 0,56 \text{ cm}) \times 0,935$. Die Sickerwasserbildung ist hier am stärksten im ganzen Jahr. Den Gegensatz dazu bildet die Gruppe der Monate Mai, Juni, Juli und August, wo die Verdunstung am stärksten ist; die Unterschiede zwischen scheinbarer und wirklicher Verdunstung sind hier besonders gross, so dass dadurch auch die Lage der Linien ungünstig beeinflusst wird, und dieses vor allem in dem Anfang der Abszissen, wo sie die wirklichen Verhältnisse nur mit geringer Genauigkeit darstellen können. Die Gleichung dieser Gruppe würde lauten:

$$y \text{ cm} = (x \text{ cm} - 3,26 \text{ cm}) \cdot 0,499.$$

Was die übrigen, zwischen diesen Gruppen stehenden Monate betrifft, so neigt sich der März der Wintergruppe zu, der April aber nach dem Mai hin. Die beiden regenreichsten Monate September und Oktober nehmen zwischen Sommer und Winter eine Mittelstellung ein. Die hohen Regen-

fälle ergänzen das im Sommer entstandene Defizit an Bodenfeuchtigkeit; der November schliesst sich dem Dezember an.

Die Fig. 6a, in welcher die Linien der Gruppen eingetragen sind, bringt das Gesetz der Sickerwasserbildung vielleicht noch besser zur Anschauung als Fig. 6.

Für Demonstrationszwecke lässt sich nach Taf. VI, Fig. 6 ein sehr anschauliches körperliches Modell herstellen, wenn man die den einzelnen Monaten entsprechenden Dreiecke zwischen Abszisse und Sickerwasserlinie in Pappe ausschneidet und parallel nebeneinander aufstellt. Die Sickerwasserfläche bildet dann eine schön gleichmässig gekrümmte Fläche.

An Stelle des körperlichen Modells wird hier die Fig. 13 auf Taf. X gegeben, aus welcher zu ersehen ist, wie gross in jedem Monat für einen bestimmten Regenfall die mittlere Sickerwasserhöhe sein könnte. Während in Fig. 6 Profile dargestellt sind durch die Regenhöhen als Abszissen und die Sickerwasserhöhen als Ordinaten, stellt die Fig. 13 gewissermassen einen Plan dar, in welchem die Punkte gleicher Sickerwasserhöhe durch Linien verbunden sind. Die durch diese Schichtenlinien dargestellte Fläche könnte man die „Sickerwasserfläche“ nennen. Um die in einem bestimmten Monat zu einer gewissen Regenhöhe gehörige Sickerwasserhöhe zu ermitteln, verfährt man ähnlich, wie man in einem Horizontalschichtenplane die Höhe eines durch seine Koordinaten bestimmten Punkte bestimmt. Man schreitet auf der Monatslinie nach oben zu so weit fort, bis dass man den Punkt erreicht, an welchem die auf dem linksseitigen Mafsstabe abzulesende Regenhöhe die gewünschte Grösse hat. Durch Interpolieren dieses Punktes zwischen den zunächst oberhalb und unterhalb gelegenen Linien gleicher Sickerwassermenge erhält man die Höhe des Sickerwassers.

Versuche von Dickinson und Evans.

Diese Versuche sind eingerichtet im Jahre 1839 von Dickinson, einem Wassermüller in Nashville bei Hemel Hampstead in Herefordshire, und wurden fortgesetzt von seinem Nachfolger Evans bis 1875 und vielleicht noch länger. Die Resultate sind veröffentlicht in den Minutes of Proceedings of the Institute of Civil Engineers Vol. II 1843, XX 1861, XLV 1876.

Die Versuchsansteller rechnen das Jahr vom 1. Oktober an; um die Resultate mit denen von Rothamsted vergleichen zu können, ist alles umgerechnet worden, so dass auch hier das Jahr vom Anfang September an zählt.

Als Regenmesser wurde hier nur ein Apparat benutzt, wie er bei den meteorologischen Stationen in Gebrauch ist, so dass hier die im vorigen Abschnitt erwähnte Unsicherheit der Messung der Regenhöhe extra in Ansatz zu bringen wäre.

Die Lysimeter bestanden aus Zylindern von verzinktem Eisenblech von 50 cm Durchmesser und 90 cm Höhe; der erste der Apparate BI war mit dem in dortiger Gegend am meisten verbreiteten Kalkverwitterungsboden, einem kiesig-sandigen Lehm, gefüllt, bis zur Oberkante in den Boden eingegraben und mit Gras besät. Im Jahre 1850 wurde noch ein

zweiter Lysimeter BII hinzugefügt von gleichen Abmessungen, der mit Kalkkies, dem Untergrund des dortigen Bodens, angefüllt und gleichfalls mit Gras besät wurde. Trotzdem dieses Material recht grobkörnig ist, hält es doch grosse Mengen Wasser fest. Auf den Kalkhügeln dortiger Gegend bleibt die Vegetation auch in trockenen Sommern lange frisch. Das Regenwasser dringt schnell in den Boden ein, so dass durch oberirdischen Abfluss der Vegetation verhältnismässig wenig verloren geht. Ein Lysimeter in Brache fehlt hier leider.

Nach dem Einfüllen ist der Boden offenbar, trotzdem er gestampft wurde, doch recht locker gewesen und hat sich nur sehr langsam fester gelagert, so dass die anfangs grosse Sickerwassermenge sich fortlaufend verkleinert, wie folgende Zusammenstellung zeigt:

Lysimeter I	Regenhöhe	Sickerwasserhöhe =	Prozent vom Regen
1835—45	670 mm	272 mm	41
1845—55	660 „	162 „	25
1855—65	658 „	157 „	24
1865—75	683 „	137 „	20
1835—55	665 mm	217 mm	32
1855—75	670 „	148 „	22.

Die mittlere Regenhöhe hat in den einzelnen Jahrfünften nur wenig geschwankt, die Sickerwassermenge ist aber von 41% auf 20% heruntergegangen. Die Resultate dieser Versuche sind wohl unter sich vergleichbar, zur Berechnung der wirklichen Menge des Sickerwassers in natürlich gelagertem Boden lassen sie sich aber nur mit Vorbehalt gebrauchen, wie auch viele andere, die in ähnlicher Weise ausgeführt wurden.

Um festzustellen, inwieweit die Endresultate durch das allmähliche Setzen des Bodens beeinflusst werden, wurden die Reihen der Beobachtung von 1835—75 und von 1855—75 jede für sich in der Art, wie im vorigen Abschnitt für die Rothamsteder Versuche beschrieben wurde, durchgerechnet. Die Differenzen zwischen beiden sind so gross, dass ich mich entschlossen habe, nur die Beobachtungen der 20jährigen Reihe 1855—75 zu verwerten, die früheren aber gänzlich unberücksichtigt zulassen, und es beziehen sich alle folgenden Auseinandersetzungen nur auf diesen Zeitraum.

Der wahrscheinliche Fehler des Niederschlages im Mittel von 20 Jahren beträgt hier

	$\pm 16 \text{ mm} = 2,4\%$
der des Winters	$\pm 15 \text{ mm} = 4,2\%$
„ „ Sommers	$\pm 10 \text{ „} = 3,2 \text{ „}$
„ „ Monats Februar	$\pm 3 \text{ „} = 7,0 \text{ „}$
„ „ „ Juli	$\pm 10 \text{ „} = 17,0 \text{ „}$

Um das Vorstehende zu erläutern, sind in Tabelle II für die ganze Zeit der Beobachtung die Werte der Regenhöhe, der Versickerung und Verdunstung (absolut und relativ zur Regenhöhe) für je fünf aufeinander folgende Jahre berechnet, sowie das Mittel der ganzen vierzigjährigen Be-

Tabelle II.
Boden und Kalkkies, beide mit Gras.

Jahrfünft:	Regen- höhe im Jahre mm	Sickerwasser:				Verdunstung:			
		I.	II.	I.	II.	I.	II.	I.	II.
		Boden mm	Kalk- kies mm	Boden ‰	Kalk- kies ‰	Boden mm	Kalk- kies mm	Boden ‰	Kalk- kies ‰
1835/36—1839/40. . . .	668	302	—	45	—	366	—	55	—
1840/41—1844/45. . . .	670	241	—	36	—	429	—	64	—
1845/46—1849/50. . . .	642	165	—	26	—	477	—	74	—
1850/51—1854/55. . . .	676	160	—	24	—	516	—	76	—
1855/56—1859/60. . . .	729	169	291	23	40	560	438	77	60
1860/61—1864/65. . . .	586	146	177	25	30	440	409	75	70
1865/66—1869/70. . . .	687	150	245	22	36	537	442	78	64
1870/71—1874/75. . . .	678	127	251	19	37	551	427	81	63
Mittel 1835—1875:	668	183	—	27	—	485	—	73	—
„ 1855—1875:	670	148	241	22	36	522	429	78	64

Tabelle III.

Winter.

1835/36—1839/40. . . .	383	254	—	66	—	129	—	34	—
1840/41—1844/45. . . .	373	226	—	61	—	147	—	39	—
1845/46—1849/50. . . .	354	145	—	41	—	209	—	59	—
1850/51—1854/55. . . .	327	129	—	39	—	198	—	61	—
1855/56—1859/60. . . .	352	120	188	34	54	232	164	66	46
1860/61—1864/65. . . .	289	99	128	34	44	190	161	66	56
1865/66—1869/70. . . .	405	132	193	33	48	273	212	67	52
1870/71—1874/75. . . .	377	109	186	29	49	268	191	71	51
Mittel 1835—1875:	358	152	—	42	—	206	—	58	—
„ 1855—1875:	356	115	174	33	49	241	182	68	51

Sommer.

1835/36—1839/40. . . .	285	50	—	17	—	235	—	83	—
1840/41—1844/45. . . .	297	16	—	5	—	281	—	95	—
1845/46—1849/50. . . .	288	20	—	7	—	268	—	93	—
1850/51—1854/55. . . .	349	31	—	9	—	318	—	91	—
1855/56—1859/60. . . .	377	49	97	13	26	328	280	87	74
1860/61—1864/65. . . .	297	47	49	16	16	250	248	84	84
1865/66—1869/70. . . .	282	18	53	6	19	264	229	94	81
1870/71—1874/75. . . .	301	18	65	6	22	283	236	94	78
Mittel 1835—1875:	310	31	—	10	—	278	—	90	—
„ 1855—1875:	314	33	66	10	21	281	248	90	79

Tabelle IV.
1855—1875 = 20 Jahre.

M o n a t:	Regen- höhe mm	Sickerwasser:				Verdunstung:			
		I.	II.	I.	II.	I.	II.	I.	II.
		Boden mm	Kalk- kies mm	Boden ‰	Kalk- kies ‰	Boden mm	Kalk- kies mm	Boden ‰	Kalk- kies ‰
September	69	1	2	1	3	68	67	99	97
Oktober	75	4	19	7	25	70	56	93	75
November	52	17	27	33	52	35	25	67	48
Dezember	56	24	37	43	66	32	19	57	34
Januar	68	41	55	60	81	27	13	40	19
Februar	40	27	34	68	85	13	6	32	15
März	44	17	25	39	57	27	19	61	43
April	44	7	14	16	32	37	30	84	68
Mai	54	5	10	9	18	49	44	91	82
Juni	56	3	8	5	14	53	48	95	86
Juli	55	1	7	2	13	54	48	98	87
August	57	0	3	0	5	57	54	100	95
Jahr:	670	148	241	22	36	522	429	78	64

obachtungsreihe und das der letzten 20 Jahre 1855—1875, welches letztere allein der weiteren Betrachtung als das wahrscheinlichere zugrunde gelegt ist.

Tabelle III gibt dieselben Werte für Winter und Sommer (Sept. bis Febr. und März bis Aug.).

Tabelle IV und Taf. VIII, Fig. 7 enthalten für die einzelnen Monate die Grösse des Regenfalls, der Verdunstung und Versickerung für die mit Ackerboden und mit Kalkkies gefüllten Lysimeter gesondert.

In dem mit Ackererde gefüllten Lysimeter I bildet sich wesentlich weniger Sickerwasser, als in dem mit dem grobkörnigen Untergrund gefüllten; je höher die Verdunstung von Gras und Boden ansteigt, um so geringer werden die Unterschiede. Jedenfalls ist auch die in II erzeugte Grasernte geringer gewesen als die in I, was aber nirgends erwähnt wird. Die Ergebnisse der beiden Beobachtungsreihen lassen sich allerdings nur bedingungsweise vergleichen, weil die Erde in Lysimeter I 20 Jahre, die in Lysimeter II aber nur 2 Jahre Zeit gehabt hatte, sich zu setzen. Im Mittel von 20 Jahren ist die Versickerung im Untergrundkies des Lysimeters II um 60 ‰ grösser als in I, im Winter dagegen 50 ‰, im Sommer 110 ‰ grösser. Die in den einzelnen Jahrfünften erhaltenen Werte lassen Veränderungen, aus denen man auf allmähliches Setzen des Bodens schliessen könnte, hier nicht erkennen; nach der Erfahrung setzen sich grobkörnige Massen auch viel weniger als feinkörnige.

In den Sommermonaten hört die Versickerung fast überall ganz auf, nur starke Regenfälle lassen noch einiges Sickerwasser entstehen.

In der ganzen Beobachtungszeit 1843—1875 zeigen die Mittel der Monate:

	Mai	Juni	Juli	August	September
in Lysimeter I . . .	5 mal	2 mal	2 mal	1 mal	1 mal
in Lysimeter II . . .	9 „	8 „	5 „	4 „	1 „

Sickerwassermengen, die gemessen werden konnten.

In vielen Monaten wird die Regenmenge wohl nicht ausgereicht haben, um die Verdunstung zu decken, obgleich das Mittel immer noch einen kleinen Überschuss des Regens über die Verdunstung zeigt. Nur im August sind beide Werte gleich und die Sickerwassermenge gleich Null.

Auf Taf. IX, Fig. 8 ist das Verhältnis zwischen Regenfall und Sickerwassermenge für den Jahresdurchschnitt sowie für den von Winter und Sommer dargestellt. Die Linien für Lysimeter I sind voll ausgezogen, die für II gestrichelt. Im Winter laufen beide Linien fast parallel, im Sommer ist der Winkel, den beide miteinander bilden, am grössten.

Überall liegen die Linien des Lysimeters II, der grösseren Durchlässigkeit des Bodenmaterials entsprechend, weiter von der Abszisse entfernt als die des Lysimeters I. Ganz ähnliches Verhalten zeigt sich auch in den einzelnen Monaten (Taf. IX, Fig. 9 u. 9a). In den Monaten Juli, August, September bildet sich, wie schon erwähnt, so gut wie kein Sickerwasser. Die Linien liegen dicht an der Abszisse und sind deshalb in der Nebenzeichnung in eine Linie zusammengefasst. In den Monaten Dezember, Januar, Februar und März verhalten sich beide Lysimeter ganz ähnlich, nur liegen die Linien des Lysimeters II näher an der Linie „Regenfall-Sickerwasser“ als die von I. In der Hilfsfigur 9a sind diese vier Monate durch eine Mittellinie dargestellt und der Gang der Sickerwasserbildung im Laufe des Jahres lässt sich hieran wie folgt darstellen. Die vereinigte Wirkung der Pflanzen- und Bodenverdunstung hat in den Monaten Juli, August und September den Boden so ausgetrocknet, dass Sickerwasser überhaupt nicht mehr entsteht; die starken Regenfälle des Monats Oktober werden zum grössten Teil verbraucht, um den Vorrat an Bodenfeuchtigkeit zu ergänzen, und es entsteht nur zeitweise Sickerwasser und dies auch nur in geringer Menge. Im Monat November ist der Boden wieder so weit gesättigt, dass ebenso wie in den folgenden Monaten Dezember, Januar, Februar und März regelmässig Sickerwasser entsteht.

In den Monaten April Mai und Juli wird durch die ständig wachsende Verdunstung der Regen so weit verbraucht, dass für dieselbe Menge derselben die Sickerwassermenge immer geringer wird, bis dass sie schliesslich auf Null heruntersinkt.

Die Gleichungen der Sickerwasserlinien sind in Tabelle V (auf S. 630) zusammengestellt.

Versuche von Greaves.

Eine dritte Versuchsreihe, welche die Bestimmung des Verhältnisses zwischen Niederschlag und Sickerwasser zum Zweck hat, ist im Jahre 1851 von Charles Greaves in Leebridge, 6 englische Meilen nördlich und $1\frac{1}{2}$ Meilen westlich von Greenwich, in Gang gesetzt worden. Der erste Lysimeter hatte drei Fuss im Quadrat Grundfläche bei ebensoviel Höhe; er war aus Schieferplatten, die sorgfältig mit Zement gedichtet waren,

hergestellt und mit einem tieferstehenden Sammelgefäß versehen, nach welchem das sich bildende Sickerwasser sofort abfloss und worin es auch gemessen wurde. Dieses Lysimeter I wurde mit „Boden“ gefüllt und mit einer Rasennarbe versehen. Das Lysimeter II wurde 1860 in derselben Weise wie das vorige hergestellt, aber mit grobem Sand gefüllt, welcher durch ein Sieb von 1,3 mm Maschenweite gefallen war. Die Oberfläche wurde nackt gehalten. Greaves wollte mittelst dieses zweiten Apparates das Maximum des Sickerwassers feststellen, welches in der Wirklichkeit etwa entstehen kann.

Tabelle V.
Verhältnis zwischen Regenfall und Sickerwasser.

Bezeichnung der Mittel:	Lysimeter B I.		Lysimeter B II.	
	Boden mit Gras:		Kalkkies mit Gras:	
	x_0 cm	b	x_0 cm	b
Jahr: 1835—75 = 40 Jahre	31,6	0,52	30,8	0,66
1855—75 = 20 „	32,6	0,44	30,7	0,665
Winter: 1835—75 = 40 „	16,7	0,80	10,1	0,68
1855—75 = 20 „	15,6	0,58	9,1	0,66
Sommer: 1835—75 = 40 „	9,1	0,14	18,5	0,51
1855—75 = 20 „	16,0	0,22	17,9	0,49
Monatsmittel: 1855—75 = 20 Jahre:				
September	10,7	—0,02	—2,0	0,02
Oktober	4,2	0,12	2,5	0,38
November	2,7	0,70	0,8	0,63
Dezember	1,5	0,59	1,5	0,94
Januar	1,0	0,75	0,6	0,91
Februar	0,1	0,70	—0,3	0,82
März	2,0	0,71	1,1	0,86
April	1,6	0,25	0,9	0,40
Mai	3,6	0,26	3,4	0,49
Juni	4,3	0,24	4,0	0,45
Juli	3,1	0,04	3,8	0,37
August	3,4	0,00	4,0	0,18

Ausserdem wurde noch die Wassermenge bestimmt, welche von einer freien Wasserfläche verdunstet wird. Eine kupferne Pfanne von 3 Fuss im Quadrat wurde im Flusse Lee ständig schwimmend erhalten und die Menge des daraus verdunstenden Wassers gemessen. Die Menge des Niederschlages wurde in einem Regenmesser von 3 Fuss im Quadrat Auffangfläche gemessen, der mit den Lysimetern in gleicher Höhe stand.

Die in den Minutes of Proceedings of the Institute of Civil Engineers Vol. XLV, 1876 veröffentlichten Versuchsergebnisse beginnen mit dem Jahre 1860 und endigen 1873. Das Lysimeter I hatte also 1860 bereits 9 Jahre gestanden und die Erde darin sich schon stark gesetzt. Das Lysimeter II ist allerdings neu hergestellt, als auch mit den Beobachtungen begonnen wurde; es ist dies aber weniger schädlich, weil sich der grobe

Sand sofort ziemlich dicht lagert und die Durchlässigkeit desselben auch so gross ist, dass die Lagerung daran doch nichts Wesentliches ändern kann. Die in Jahrfünften zusammengefassten Sickerwassermengen liefern für den ersten Zeitabschnitt den kleinsten Wert von 80 % gegen 88 % und 83 % der folgenden Abschnitte. Der letzte Abschnitt 1870—1873 enthält bloss 3 Beobachtungsjahre.

Tabelle VI.

Jahre:	Anzahl der Jahre	Regenhöhe mm	Sickerwasser:						Verdunstung:					
			I.		II.		III.		scheinbar		scheinbar		wirklich	
			Boden mit Rasen mm	Sand mm	Wasser mm	Boden mit Rasen %	Sand %	Wasser %	Boden mm	Sand mm	wirklich Wasser mm	Boden %	Sand %	wirklich Wasser %
1860/65.	5	587	165	466	70	28	80	12	422	121	517	72	20	88
1866/70.	5	640	208	565	103	32	88	16	432	75	537	68	12	84
1871/73.	3	736	204	611	220	28	83	31	532	125	516	72	17	69
Mittel:	13	653	193	547	131	29	84	20	460	106	522	71	16	80
Winter:														
1860/65.	5	307	122	252	184	40	82	60	185	55	123	60	18	40
1866/70.	5	372	180	354	230	48	95	62	192	18	142	52	5	38
1871/73.	3	405	175	364	274	43	90	68	230	41	131	57	10	32
Mittel:	13	361	159	323	229	44	89	63	202	38	132	56	11	27
Sommer:														
1860/65.	5	280	45	216	— 117	16	77	— 42	235	64	397	84	23	142
1866/70.	5	266	29	205	— 127	11	77	— 48	237	61	393	89	23	148
1871/73.	5	328	29	249	— 55	9	76	— 17	299	79	383	91	24	117
Mittel:	13	292	34	224	— 99	12	77	— 36	257	68	390	88	23	136

Im Mittel von 13 Jahren sind 653 mm Regen gefallen; davon lieferte im Mittel der mit Gras bewachsene Boden in Lysimeter I 193 mm (29 % des Niederschlags) Sickerwasser, der Sand des Lysimeters II 574 mm (84 %) und die freie Wasserfläche III 131 mm (20 %); im letzten Versuch ist unter Sickerwasser der Überschuss des Niederschlags über die Verdunstung zu verstehen. Die freie Wasserfläche hat also am wenigsten Sickerwasser geliefert, der beraste Boden das Einundeinhalbfache, der Sand dagegen mehr als das Vierfache davon.

Im Winter liefert Lysimeter I das wenigste Sickerwasser (159 mm = 44 %), das meiste wieder Lysimeter II (323 mm = 89 %), während die freie Wasserfläche eine mittlere Stellung einnimmt (229 mm = 63 % des Niederschlags).

Im Sommer verändert sich aber das Bild vollständig: die Verdunstung von Boden und Gras im Lysimeter I wird so stark, dass hier die Sickerwassermenge nur etwa $\frac{1}{7}$ von der beträgt, die das Lysimeter II liefert. Die freie Wasserfläche lässt aber nicht nur kein Wasser abfließen, sondern

es reicht auch der Niederschlag bei weitem nicht aus, um die verdunstende Wassermenge zu ersetzen, und das daraus restierende Defizit beträgt 99 mm oder 36 % des Niederschlags.

Wenn man die vom Sand gelieferte Sickerwassermenge als Einheit annimmt, so ergibt sich folgende Aufstellung:

Im Mittel	Menge des Sickerwassers			Menge des verdunsteten Wassers		
	Sand	Boden mit Gras	Wasser	Sand	Boden mit Gras	Wasser
des Jahres . . .	100	35	24	100	430	490
des Winters . . .	100	49	71	100	530	350
des Sommers . .	100	15	(- 44)	100	380	570

Betreffs der Verdunstung sei nochmals hervorgehoben, dass für Lysimeter I und II nur der Unterschied zwischen Regenfall und Sickerwasser, „die scheinbare Verdunstung“, angegeben werden kann. Im vieljährigen Mittel kann diese nur wenig von der wirklichen Verdunstung abweichen; anders verhält es sich aber mit den Angaben für Sommer und Winter, weil der Boden am Ende des Sommers in den meisten Fällen beträchtlich trockener sein wird als am Anfang desselben. Aus diesem Grunde wird die wirkliche Verdunstung des Sommers jedenfalls erheblich grösser sein als die scheinbare, im Winter aber kleiner als diese. Die Verdunstung einer reien Wasserfläche ist, wie bekannt, nur mit geringer Genauigkeit festzustellen.

Der wahrscheinliche Fehler des Niederschlags beträgt

für das Jahresmittel	$r = \pm 24$	$mm = \pm 3,8\%$	des Niederschlags.
„ „ Mittel des Winters . . .	$r = \pm 13$	$„ = \pm 3,6\%$	„
„ „ „ „ Sommers . . .	$r = \pm 19$	$„ = \pm 6,5\%$	„
„ „ „ „ Februars . . .	$r = \pm 4$	$„ = \pm 11\%$	„
„ „ „ „ Julis . . .	$r = \pm 5,5$	$„ = \pm 12\%$	„

Auf Taf. IX, Fig. 10 ist das Verhältnis zwischen Regenfall und Sickerwasser für die Jahresmittel der dreizehn Beobachtungsjahre, die Mittel des Winters und Sommers dargestellt. Die Linien des Lysimeters II halten sich alle drei in der Nähe der Linie: Regenfall = Sickerwasser. Ihnen zunächst liegen die beiden anderen Winterlinien für Lysimeter III und I, bei welchen Sickerwassermenge und Verdunstung mittlere Werte besitzen, während die Linien des Sommers und die der Jahre für Lysimeter I und III infolge der hohen Verdunstung weit abliegen. Bei 75 cm Regenhöhe schneiden sich letztere beiden Linien; bei höherem Regenfall, der aber nur sehr selten eintritt, liefert III die grösseren Sickerwassermengen, bei geringerem Regenfall aber wesentlich kleinere. Da bei kleineren Regenhöhen im Sommer und Jahr die Verdunstung der freien Wasserfläche grösser wird als der Regenfall, die Sickerwassermenge in der Rechnung demgemäss mit negativem Vorzeichen erscheint, so gehen auch die Sickerwasserlinien des Sommers und Jahres für Lysimeter III auf die negative Seite der Abszisse hinüber.

Tabelle VII enthält die Niederschlagshöhen, Sickerwassermengen, sowie scheinbare und wirkliche Verdunstung für die einzelnen Monate in absoluten Werten und ihr Verhältnis zum Regenfalle; beide laufen nicht parallel.

Die Höchstwerte der absoluten Sickerwassermenge liegen für alle drei Lysimeter im Januar, die der relativen aber für Lysimeter I im Januar (71 %), für Lysimeter II im November (97 %) und für Lysimeter III im Dezember (76 %). Dagegen wird im Juli die Menge des Sickerwassers in Lysimeter I fast Null, während für die freie Wasserfläche die Verdunstung in den Monaten April bis August grösser ist als der Niederschlag. Das daraus entstehende Defizit ist am grössten im Juli (42 mm = 94 %), die Verdunstung beträgt hier 194 % des Niederschlags. Die scheinbare Verdunstung der Lysimeter mit Boden und die der freien Wasserfläche lassen sich für die einzelnen Monate kaum vergleichen.

Tabelle VII.

Monat:	Regenhöhe mm	Sickerwasser:						Verdunstung:					
		I.		III.	I.		II.	I.		II.	III.		
		Boden	Sand	Wasser	Boden	Sand	Wasser	scheinbar Boden	scheinbar Sand	wirklich Wasser	scheinbar Boden	scheinbar Sand	wirklich Wasser
	mm	mm	mm	%	%	%	mm	mm	mm	%	%	%	
September	60	2	44	19	3	73	32	58	16	41	97	27	68
Oktober	69	13	63	43	19	90	61	56	6	26	81	10	39
November	51	21	50	34	41	97	67	30	1	17	59	3	33
Dezember	62	38	55	47	62	90	76	24	7	15	38	10	24
Januar	73	52	69	54	71	94	74	21	4	19	29	6	26
Februar	41	28	39	25	68	96	62	13	2	16	32	4	38
März	49	22	41	22	44	81	44	27	8	27	56	19	56
April	36	7	28	— 17	19	78	— 47	29	8	53	81	22	147
Mai	52	3	42	— 18	5	80	— 34	49	10	70	95	20	134
Juni	56	4	40	— 23	7	71	— 41	52	16	79	93	29	141
Juli	45	(0,3)	31	— 42	1	68	— 94	45	14	87	99	32	194
August	59	3	45	— 13	5	76	— 22	56	14	72	95	24	122
Summa:	653	193	547	+ 131	—	—	—	460	106	520	—	—	—

Auf Taf. IX, Fig. 11 und 12 ist das Verhältnis zwischen Regenfall und Sickerwassermenge für die verschiedenen gemessenen Regenhöhen dargestellt, und zwar in Fig. 11 für den Lysimeter I, in Fig. 12 für Lysimeter II und die freie Wasserfläche III. Tabelle VIII gibt die durch Ausgleich ermittelten Werte der Abszisse des Schnittpunktes der Sickerwasserlinien mit der Abszissenachse x_0 und der Neigung beider gegeneinander gemessen in der Längeneinheit der Abszisse.

Die Linien für Lysimeter II entfernen sich der grossen Durchlässigkeit des Sandes entsprechend nur wenig von der Linie: Regenfall = Sickerwasser. Die Niederschläge versinken so schnell in die Tiefe, dass auch die Wärme der Sommermonate nicht imstande ist, durch Verdunstung grösserer Wassermengen die Sickerwasserbildung wesentlich einzuschränken. Ganz anders verhält sich Lysimeter II. Die Linien stärkster Versickerung für Januar und Februar liegen noch in dem Raum, den die Linien für Juni bis September bei Lysimeter II einnehmen; die für Dezember und März

liegen aber schon weit ausserhalb des letzteren. Die steigende Verdunstung des Bodens und vor allem der Pflanzen verringert dann in Lysimeter I die Sickerwassermenge sehr schnell und in den Monaten Juni, Juli, August entsteht nur ganz ausnahmsweise bei anhaltendem, starkem Regen noch eine Wenigkeit. Es sind 42 Monatsmittel vorhanden, aber nur siebenmal ist Sickerwasser gemessen, dreimal im Juni und je zweimal im Juli und August. Für Juli ist die Sickerwassermenge gleich Null.

Von den Linien (Fig. 12) für die Wasserfläche treten nur die für die Wintermonate Oktober, November, Dezember, Januar und Februar in den Raum, den die für Lysimeter II bedecken, ein; die für die Sommermonate entfernen sich sehr schnell und sehr weit davon und ragen auch sehr weit in die negative Seite unterhalb der Abszisse hinein, wie schon bei Besprechung der Mittel hervorgehoben.

Tabelle VIII.
Verhältnis zwischen Regenfall und Sickerwasser.

Bezeichnung der Mittel:	C I. Boden mit Gras:		C II. Sand nackt:		C III. Wasserfläche:	
	x_0 cm	b	x_0 cm	b	x_0 cm	b
Jahr 1860/61—1872/73 = 13 Jahre . . .	14,2	0,38	9,8	0,98	53,2	1,06
Winter 1860/61—1872/73 = 13 Jahre . .	14,4	0,73	4,3	1,01	51,7	0,73
Sommer 1860—73 = 14 Jahre	23,5	0,62	1,4	0,80	37,9	1,15
Monate:						
September	3,5	0,07	0,6	0,81	4,2	1,08
Oktober	0,2	0,18	1,1	1,08	3,7	1,34
November	0,1	0,42	0,4	0,95	2,1	1,11
Dezember	0,5	0,68	— 0,1	0,88	0,35	0,81
Januar	1,2	0,85	1,5	1,19	1,0	0,85
Februar	0,9	0,87	0,1	0,97	1,0	0,83
März	1,4	0,64	— 1,2	0,66	2,4	0,86
April	1,6	0,34	— 0,5	0,69	5,2	1,07
Mai	2,5	0,10	0,1	0,82	6,7	1,23
Juni	3,9	0,24	0,1	0,72	7,6	1,17
Juli	3,8	0,00	0,2	0,71	8,0	1,21
August	4,1	0,16	0,5	0,83	7,4	0,83

Mit Hilfe der Gleichungen, welche das Verhältnis zwischen Niederschlag und Sickerwasser darstellen (Tabelle VIII), wurden für verschiedene Regenhöhen innerhalb der tatsächlich beobachteten Grenzwerte die Sickerwassermengen für das Jahr, sowie für Winter und Sommer berechnet und auf Tabelle IX (S. 635) zusammengestellt.

Brachparzellen sind zwei vorhanden: A von Rothamsted mit schwerem Lehm in natürlicher Lagerung und CII von Greaves mit grob-

Tabelle IX.
Sickerwassermenge bei verschiedener Höhe des Regenfalls.

Bezeichnung:	Regenhöhe bei Millimetern												
	500	600	700	800	900	1000	500	600	700	800	900	1000	
	in Millimetern:						in Prozenten der Regenhöhe:						
	Im Jahr (September bis August).												
A	Brache	189	266	343	420	497	574	38	44	49	52	55	57
CII	" Sand	394	492	590	688	—	—	79	82	84	86	—	—
BI	" Kalkboden	77	121	165	209	253	297	15	20	24	26	28	30
BII	" Kalkuntergr.	128	195	262	328	395	462	26	32	37	41	44	46
CI	" Boden	136	174	212	250	—	—	27	29	30	31	—	—
CIII	" Wasserfläche	—34	72	178	284	—	—	—7	12	25	35	—	—
	Im Winter (September bis Februar).												
		200	300	400	500	600	—	200	300	400	500	600	—
A	Brache	91	181	272	362	453	—	45	60	68	72	75	—
CII	" Sand	159	260	361	462	—	—	80	87	90	92	—	—
BI	" Kalkboden	26	83	141	199	257	—	13	28	35	40	43	—
BII	" Kalkuntergr.	72	138	204	270	336	—	36	46	51	54	56	—
CI	" Boden	41	114	187	260	—	—	20	38	47	52	—	—
CIII	" Wasserfläche	108	181	254	327	—	—	53	60	63	65	—	—
	Im Sommer (März bis August).												
A	Brache	1	69	137	205	—	—	0,5	23	34	41	—	—
CII	" Sand	149	229	309	389	—	—	74	76	77	78	—	—
BI	" Kalkboden	9	31	53	75	—	—	5	10	13	15	—	—
BII	" Kalkuntergr.	10	59	108	157	—	—	5	20	27	31	—	—
CI	" Boden	—22	+40	102	164	—	—	—11	13	25	33	—	—
CIII	" Wasserfläche	—206	—91	+24	+139	—	—	—103	—30	+6	+28	—	—

körnigem Sande; die von letzterem Material abgegebenen Sickerwassermengen dürften wohl dem in der Natur möglichen Maximum nahe kommen; sie sind natürlich auch sehr viel grösser als die von A abgegebenen, dessen Boden aber auch noch nicht zu den schwersten zu rechnen ist.

Die Spannung zwischen den Werten für die Sickerwassermenge beider Reihen A und CII wird mit steigendem Niederschlag kleiner; es beträgt das Verhältnis von A : CII für Regenhöhen jährlich:

von	500	600	700	800	900	1000 mm
= 100 :	208	185	172	164	(158)	(154)
	42 %	38 %	35 %	34 %	der Regenhöhe.	

Das Verhältnis scheint sich einem Grenzwerte zu nähern, der bei 1 : 1,5 liegt. (In der Beobachtungsreihe CII steigen die Werte für die Regenhöhe nur bis 800 mm.)

Mit Gras bestandene Lysimeter haben drei Versuchsreihen geliefert: BI mit Kalkverwitterungsboden, BII mit dem Untergrund davon und CI mit einem nicht weiter beschriebenen Boden, der BI jedenfalls sehr ähnlich, aber etwas durchlässiger war. BII lässt wegen seiner grobkörnigen Beschaffenheit ebenfalls mehr Sickerwasser entstehen als BI; CI ist ebenfalls durchlässiger als BI, aber weniger als BII. Das Verhältnis der Sickerwassermengen der letzten beiden Böden zu BI berechnet sich für die jährlichen

Regenhöhen =	500	600	700	800	900	1000 mm
BI : BII = 1 :	1,66	1,61	1,59	1,57	1,56	1,56
BI : CI = 1 :	1,77	1,44	1,29	1,20	(1,14)	(1,10)

Die Wasserfläche CIII lässt bei geringen jährlichen Regenhöhen auch sehr viel geringere Wassermengen abfließen als die Böden in Brache und mit Gras bestanden; in Jahren, die mehr Niederschlag haben als das Mittel, steigt aber die abfließende Wassermenge so an, dass sie grösser wird als die der bewachsenen Böden BI und CIII, aber hinter BII und den gebrachten Böden doch zurückbleibt.

Noch deutlicher lassen sich diese Verhältnisse darstellen, wenn man die Verdunstung betrachtet; da es sich nur darum handelt, den allgemeinen Gang der Erscheinung darzustellen, so kann man wohl auch die Mittel der einzelnen Gruppen berechnen.

Regenfall	500	600	700	800 mm =	500 : 800
Verdunstung $\frac{A + CII}{2}$	209	221	234	246	= 100 : 113
	= 42	37	33	31 %	
„ $\frac{BI + BII + CI}{3}$	386	437	484	538	= 100 : 139
	= 77	73	69	67 %	
„ CIII	534	528	522	516	= 100 : 98,5
	= 107	88	75	65 %	

Bei steigender jährlicher Regenhöhe steigt die Grösse der Verdunstung bei den Bracheparzellen — absolut gemessen — nur wenig; die der freien Wasserfläche sinkt sie so wenig, dass man sie wohl als annähernd konstant annehmen kann; dagegen steigt die des mit Gras bestandenen Landes von 100 auf 139. Feuchte Jahre begünstigen den Graswuchs sehr und die starke Vegetation verbraucht viel Wasser.

Die relative Grösse der Verdunstung im Verhältnis zum Regenfall sinkt aber in allen drei Reihen, am wenigsten bei dem mit Gras bestandenen Boden, am meisten bei der Wasserfläche.

Da in den verschiedenen Beobachtungsreihen verschiedene Böden benutzt sind, so lässt sich über die Höhe der durch das Gras allein bewirkten Verdunstung leider nichts Sicheres ermitteln; der Unterschied der zweiten und ersten Reihe beträgt für

500	600	700	800 mm Regenhöhe
177	216	250	292 mm.

Rechnet man 320 kg Wasser auf 1 kg produzierte Trockensubstanz, so könnten mittelst dieses verdunsteten Wassers folgende Mengen an Trockensubstanz erzeugt sein von 1 ha: 5530 kg, 6760 kg, 7800 kg, 9100 kg.

Im Winter sind, da infolge der niedrigen Temperatur die Verdunstung gering ist, die unter denselben Verhältnissen wie im ganzen Jahr gebildeten Sickerwassermengen wesentlich grösser als bei ersteren. Bei weitem am grössten sind sie, sowohl absolut als auch relativ, bei dem Sand CII, darauf folgt die Wasserfläche CIII und der Lehm Boden in Brache A. Die mit Gras bewachsenen Böden lassen wesentlich geringere Mengen Wasser in die Tiefe sinken als die unbebauten Böden, was nicht nur auf das in milden Wintern lange anhaltende Wachstum des Grases, sondern auch auf die durch die Vegetation im Sommer bewirkte starke Austrocknung des Bodens zurückzuführen ist.

Die Verdunstung der Böden ist mit der der freien Wasserfläche nicht vergleichbar; die letztere beträgt für

	200	300	400	500 mm Regenhöhe
	92	119	146	173 „
=	47	40	37	35 %.

Die scheinbare Verdunstung der Böden dagegen beträgt

im Mittel von A + CII.	75	80	84	88 mm
„ „ „ BI + BII + CI	154	188	223	257 „
<hr/>				
oder Prozente	{ 38	27	21	18 %
	{ 77	63	56	51 %

Im Sommer wird im schweren Boden A die Sickerwassermenge sehr gering, so dass sie bei 200 mm Regenfall nur noch $\frac{1}{2}$ % im Sandboden unter denselben Verhältnissen dagegen noch 75 % beträgt. Dies erklärt die sommerliche Wasserarmut der Flüsse im Gebiet des schweren Bodens und die meist reichliche Sommerwassermenge derer im Gebiet des durchlässigen Bodens. Der Unterschied gegen den Winter ist beim schweren Boden sehr auffallend, aber nur recht mässig beim Sandboden. Bei weitem am geringsten ist die abfliessende Wassermenge bei der freien Wasserfläche; bei schwacher Regenhöhe reicht hier der Niederschlag bei weitem nicht aus, die Verdunstung zu decken, und auch in den nassesten Sommern fliesst kaum so viel Wasser ab, als von dem bebauten Boden, welcher letzterer hier von allen die geringsten Sickerwassermengen liefert.

Die Verdunstung beträgt hier im Mittel:

Regenhöhe	200	300	400	500 mm															
A + CII Brache	125	151	177	203 „															
BI + BII + CI bebauter Boden	201	260	312	368 „															
CII Wasserfläche	406	391	376	361 „															
oder in Prozenten der Regenhöhe	<table border="1"> <tbody> <tr> <td></td> <td>62</td> <td>50</td> <td>44</td> <td>41 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100</td> <td>87</td> <td>78</td> <td>74 „</td> </tr> <tr> <td></td> <td>203</td> <td>130</td> <td>94</td> <td>72 %</td> </tr> </tbody> </table>					62	50	44	41 %		100	87	78	74 „		203	130	94	72 %
	62	50	44	41 %															
	100	87	78	74 „															
	203	130	94	72 %															

Auch hier ist die Verdunstung der Böden mit der Wasserfläche nicht vergleichbar. Bei geringer Niederschlagshöhe verdunstet letztere sehr viel mehr Wasser, als der Regen liefert; noch bei 300 mm Sommerregen beträgt die Verdunstung selbst im englischen Klima 390 mm. Hieraus erklärt sich der geringe Erfolg, den man erreicht hatte, als man versuchte, im trocknen Klima Winterwasser in flachen Becken für die wasserknappe Zeit des Hochsommers und Herbstes aufzuspeichern, wie z. B. für Schifffahrtzwecke in den Seen der oberen Netze in Posen.

Wie das Verhältnis zwischen Regenfall und Sickerwasser in den einzelnen Monaten und bei verschiedenen mittleren monatlichen Regenhöhen sich gestaltet, lässt sich am besten aus den Zeichnungen der Sickerwasserflächen auf Taf. X, Fig. 13 ersehen; die Tabelle X ist davon gewissermassen ein Auszug, wobei noch die sich ähnlich verhaltenden Monate November bis Februar und Mai bis Juli in ein Mittel zusammengefasst sind.

Die Sickerwasserflächen von A (Rothamsted, Lehmboden), CI (grober Sand von Greaves), welche beide un bebaut blieben, und die Wasserfläche CIII zeigen einen ähnlichen Verlauf der Sickerwasserbildung, ebenso wie die drei anderen mit Gras bestanden gewesenen Böden.

Die Linie, welche die Punkte bezeichnet, bis zu denen die Regenhöhe im Monatsmittel steigen muss, damit überhaupt sich Sickerwasser bildet (mit Sickerwasser = 0 bezeichnet), liegt bei CII ganz in der Nähe der Achse; ihre höchsten Punkte liegen bei 1 und 1,5 cm Regenhöhe; überall liegt diese Linie unterhalb der geringsten beobachteten Regenhöhe, die in der Figur mit Punkten bezeichnet ist. Der Fall, dass in einem Monat die mittlere Sickerwassermenge Null würde, kommt danach überhaupt nicht vor. Bei CIII dagegen liegt der Scheitelpunkt, der in den Monat Juli fällt, bei 8 cm Regenhöhe. Unterhalb dieser Linie ist die Sickerwassermenge negativ, d. h. die Verdunstung übersteigt den Regenfall. In den Monaten März bis November liegt die Linie höher als der geringste monatliche Regenfall; sie zeigt, dass in allen diesen Monaten die Sickerwassermenge Null und negativ wird; bloss in den Monaten Dezember bis Februar kommt das nicht vor, die mittlere Verdunstung ist hier kleiner als der kleinste beobachtete Regenfall.

In dem Versuche A mit Lehmboden nimmt die Grenzlinie der Sickerwasserbildung im Vergleich zu CII und CIII eine mittlere Lage ein.

Die Schichtenlinien der Zeichnungen ausserhalb der Nulllinien bestimmen nun die Höhe des Sickerwassers in den einzelnen Monaten, ähnlich wie die Horizontalkurven einer topographischen Karte die Höhen des Terrains.

Die Entfernung der Linien voneinander, welche bei einer Karte das Mafs für das relative Gefälle der Terrainoberfläche ist, ist in unserer Figur

Tabelle X.
Durchschnittliche monatliche Sickerwasserhöhen in Millimetern.

Regenhöhe:	September	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August
A Rothamsted, Lehmboden in Brache.												
20	0	0	10			4	0	0			0	
50	10	18	39			28	15	9			5	
100	48	61	83			69	46	33			34	
130	71	88	115			93	64	47			51	
160	94	114	—			—	—	—			68	
CII grober Sand, nackt.												
20	11	10	15			21	17	14			12	
50	36	42	45			41	38	36			37	
100	76	95	95			74	72	74			79	
130	100	128	125			—	—	92			104	
CIII freie Wasserfläche.												
20	- 24	- 20	+ 8			- 3	- 34	- 65			- 45	
50	+ 9	+ 17	34			+ 22	- 2	- 29			- 20	
100	63	84	80			65	+ 51	+ 31			+ 22	
130	95	124	106			—	—	+ 67			+ 46	
BI Kalkboden mit Gras.												
20	0	0	3			0	1	0			0	
50	0	1	25			21	8	2			0	
100	0	7	59			57	21	11			0	
130	0	11	80			—	28	12			0	
BII Kalkkies mit Gras.												
20	0	0	11			8	4	0			0	
50	1	10	35			34	16	6			2	
100	2	28	77			77	36	27			11	
130	3	40	104			—	—	41			16	
CI Boden mit Gras.												
20	0	3	8	9			4	1	0		0	0
50	1	9	21	33			23	12	3		0	0
100	5	18	42	73			55	29	11		0	9
130	7	23	54	97			—	—	16		0	14
160	9	28	—	—			—	—	—		0	19

das Maß für die Intensität der Sickerwasserbildung; je näher die Linien zusammenrücken, ein um so grösserer Teil des Regens (oberhalb der Nulllinien gemessen) erscheint als Sickerwasser wieder; je weiter sie sich voneinander entfernen, um so stärker ist die Verdunstung und um so weniger Wasser versickert von einer bestimmten Regenmenge, die oberhalb der Nulllinien gemessen ist. Einen recht gleichmässigen Verlauf zeigen die Linien in Fig. CII; den grössten Abstand voneinander halten sie im März, welcher allmählich kleiner wird und ein Minimum erreicht im Oktober und November. Bei Versuch A ist die Entfernung der Schichtenlinien ein Minimum im Januar und ein Maximum im Juni. Bei CIII ist das Verhältnis aber anders: hier liegt die grösste Entfernung im Dezember, die geringste im August. Die Nulllinie steigt hier, wohl zumeist infolge der Bestimmung der wirklichen Verdunstung, so hoch hinauf, dass das Schema des Planes ein ganz anderes wird als bei den beiden vorigen Versuchen.

Die Mengen von Sickerwasser, die in den verschiedenen Versuchen unter denselben Bedingungen entstanden sind, sind ausserordentlich verschieden. So liefern z. B. 10 cm Regen im Monat Juli folgende mittlere Sickerwasserhöhen in Versuch

$$A = 3 \text{ cm, CII} = 7 \text{ cm, CIII} = 7,9 \text{ cm,}$$

dagegen im Monat Dezember

$$A = 8,4 \text{ cm, CII} = 8,8 \text{ cm, CIII} = 7,9 \text{ cm.}$$

Aus der Figur, die durch die Tabelle X kontrolliert wird, lassen sich leicht für alle Regenhöhen die mittleren Sickerwasserhöhen entnehmen, nur ist dabei nicht zu vergessen, dass die Genauigkeit der ganzen Darstellung wegen geringer Genauigkeit der Beobachtungsergebnisse nur eine beschränkte ist.

Nach ganz anderem Schema sind die Sickerwasserflächen des mit Gras bewachsenen Bodens geformt. Nur in den Monaten November bis März, in welchen der durch die Vegetation des Sommers ausgetrocknete Boden schon wieder mit Wasser gesättigt ist, ähnelt der Verlauf der Schichtenlinien denen der Versuche mit Brachland. Aber schon im April steigen die Linien steil aufwärts, da jetzt bereits ein grosser Teil der Niederschläge von dem wachsenden Grase aufgenommen und verdunstet wird. In den Monaten Mai bis September verbraucht die Vegetation die in dortiger Gegend in dieser Zeit ohnehin schwachen Niederschläge fast vollständig, so dass nur ganz ausnahmsweise bei länger anhaltenden und starken Niederschlägen ein wenig Sickerwasser entsteht, und dies wohl nur dadurch, dass ein Teil des überschüssigen Regenwassers durch die Spalten und grösseren Hohlräume des Bodens absickert, da von einer vollständigen Übersättigung der ganzen Bodenschicht doch nicht die Rede sein kann.

Im Verlaufe der ganzen Beobachtungsperiode, die für BI 32 Jahre, BII 25 Jahre und CI 14 Jahre umfasst, sind nur aufgeführt von den Monaten:

	Mai	Juni	Juli	August	September
bei BI	5 mal	2 mal	2 mal	1 mal	2 mal
„ BII	9 „	8 „	4 „	4 „	2 „
„ CI	5 „	3 „	2 „	2 „	3 „

Sickerwassermengen, welche mitunter noch so klein sind, dass sie sich sehr der Null nähern; und wenn man die Summe auf die Anzahl der Monate verteilt, so wird das Mittel so klein, dass es sich praktisch von Null nicht mehr unterscheidet. Demgemäss sind in die Figuren die entsprechenden Eintragungen gemacht, und es entsteht danach bei BI durchschnittlich im August und September kein Sickerwasser, im Juli nur bei sehr starken Regenfällen durchschnittlich weniger als 1 cm im Maximum; auch der Oktober hat noch nicht viel mehr als der Juli. Da im April, Mai und Juni ebenfalls nur sehr wenig Wasser versickert, so bleiben nur die Monate November bis März, in denen sich der Boden wieder mit Wasser sättigt und Wasser zur Speisung von Quellen und Grundwasser abgeben kann.

Ähnlich verhält sich auch BII, der Untergrund des Kalkverwitterungsbodens, nur ist die Durchlässigkeit desselben noch grösser als die von BI und infolge schlechterer Beschaffenheit wohl auch der Graswuchs wesentlich geringer gewesen als bei dem Ackerboden. Im Monat September sind in 20 Jahren 24 mm Sickerwasser entstanden, was in der Darstellung des Mittels zu Null angenommen wurde. Die Monate Oktober, Juli, Juni, auch Mai und April liefern etwas mehr Sickerwasser als die entsprechende Reihe des Versuches BI.

Die Sickerwasserfläche des Versuches CI von Greaves ist denen von BI und BII ähnlich, doch liegt das Minimum hier im Juli; in 13 Jahren sind in diesem Monate überhaupt nur einmal und zwar 3 mm Sickerwasser gemessen. Aber auch die im August und September entstandenen Mengen sind sehr gering; im ersteren Monate wurde 2mal gemessen 18 + 20 mm und im September 1 + 24 mm, so dass man auch hier annehmen könnte, dass in Wirklichkeit alles Regenwasser verdunstet. Die Monate Oktober, November und Dezember sind denen von BII ganz entsprechend, und auch die anderen Wintermonate unterscheiden sich nur wenig davon. In den Sommermonaten ist aber die Verdunstung wohl infolge besseren Graswuchses merklich stärker, und die Sickerwasserbildung dementsprechend schwächer als in BII, während die letztere in BI fast überall geringer ist. Wie auch schon oben aus den Mittelwerten abgeleitet, steht der Boden des Versuches CI nach seiner Durchlässigkeit zwischen denen von BI und BII.

Im Vorstehenden wäre die Aufgabe, das Verhältnis zwischen Regenhöhe und Sickerwassermenge zu bestimmen, gelöst, soweit es die benutzten Versuche gestatten. Es wäre nun noch zu erwägen, ob man diese Versuche nicht benutzen kann, um die Wassermenge zu bestimmen, welche durch eine systematische Röhrendrainage abgeleitet werden muss. Bei den Versuchen von Rothamsted, welches die bei weitem vollkommensten nach Anlage und Durchführung sind, findet die Bildung des Sickerwassers so statt, dass der auf die Oberfläche gefallene Regen die 50—150 cm starke Bodenschicht in senkrechter Richtung passiert und dann vom Trichter aufgefangen wird. Die Verhältnisse sind hier so, wie wenn ein Tonboden in der angegebenen Mächtigkeit auf einer wasserfreien Sandschicht lagert; für diese Bodenverhältnisse stellen also die Rothamsteder Versuche die bei der Bildung des Drainwassers vorhandenen Verhältnisse richtig dar. Wesent-

lich anders liegen diese aber, wenn sehr tief stehender Tonboden durch Röhrendrainage entwässert wird. Die Drains liegen dann 8—15 m voneinander entfernt; nur der Teil des Wassers, welcher auf die Oberfläche des bei Ausführung der Drainage hergestellten Draingrabens fällt, sickert in annähernd senkrechter Richtung durch den Boden und fliesst in den Drains ab. Das Wasser, welches auf die anderen Teile der Ackeroberfläche fällt und in den Boden eindringt, hat aber wesentlich längere Wege zu durchlaufen, ehe es in den Drain gelangen kann. Selbstverständlich braucht es für Zurücklegung dieses Weges auch mehr Zeit, zumal als auf ihm auch oft nicht wesentlich mehr Gefälle vorhanden ist als der senkrechte Abstand von der Bodenoberfläche bis zum Drain oder die Tiefe der Lysimeter. Ich habe deshalb auch bei den Lysimeter-Versuchen die Bezeichnung „Drainwasser“ absichtlich vermieden. Bei dem drainierten Boden dauert es wesentlich länger als bei den Lysimetern, bis dass das Regenwasser, das der Boden nicht festhalten kann, in der Drainage abgeflossen ist; der Boden ist also im ersten Falle auch durchschnittlich feuchter, die Verdunstung grösser und die Drainwassermenge geringer als die der Lysimeter. Vor allem wenn der Boden in die Lysimeter eingefüllt ist — wenn auch gestampft —, muss der Unterschied gegen den natürlichen Boden sehr beträchtlich sein. Man kann deshalb annehmen, dass die in den Lysimetern entstandene Sickerwassermenge ein Maximum darstellt, welches im natürlichen Boden durchschnittlich kaum je erreicht wird.

Zuerst haben wohl Möllendorf, Wäge und John durch Lysimeterversuche mit verschiedenen Bodenarten in der Nähe von Görlitz die Menge des Sickerwassers festgestellt und sind zu dem Resultat gekommen, dass die Drainage bei undurchlassendem Boden 0,33 l für 1 ha und Sekunde, bei durchlassendem Boden 0,45 l abführen müsse. Die Versuche erstreckten sich über 12 Monate und waren in sehr primitiver Weise ausgeführt, in Kästen von einem Quadratfuss Oberfläche. Die genannten Versuchsansteller haben aber auch häufig die von den im natürlichen Boden liegenden Drainagen ausgeworfenen Wassermengen gemessen und gefunden, dass das Maximum 0,36—0,49 l für 1 ha und Sekunde betrug. Diese Messungen sind an einer $3\frac{1}{2}$ ha grossen Drainage in der Gemarkung Görlitz ausgeführt worden (Zeitschr. für deutsche Drainierung 1855, S. 11).

Es sind dann später mehrfach Versuche gemacht worden, die Menge des Wassers zu bestimmen, welches die Drainage abführen muss; es würde zu weit führen, diese alle aufzuführen, nur ein solcher von Wollny (Forschungen 19. Bd., S. 221) sei erwähnt. Er füllte fünf Lysimeter von 500 qcm Oberfläche und 1,05 m Tiefe mit verschiedenen Bodenarten, sättigte den Boden mit Wasser und bestimmte die daraus abfliessende Wassermenge.

Am wenigsten floss ab (5,29 l) von 500 qcm Fläche beim humosen Kalksand, welche Menge nach Vincents Annahme in 15 Tagen abgeführt werden muss, so dass, so schliesst W., vom Hektar in 1 Sekunde 0,816 l abzuführen sind.

Solch hohe Abflussmengen sind aber in der Wirklichkeit sehr selten zu beobachten, und dann halten sie auch nur einen oder zwei Tage an,

aber nicht 14 Tage hintereinander, wie W. annimmt. Schon hierdurch erscheint die ganze Aufstellung recht problematisch.

Zur vollständigen Sättigung braucht der Torfboden bei Wollny 805 mm, der Kalksand 450 mm Regenhöhe.

Die Sickerwassermenge, welche aus dem Torf abfließt, beträgt nach Ws. Versuch 518 mm und für Kalksand 105 mm; diese Wassermasse soll in 14 Tagen durch die Drainage abgeleitet werden. In Breslau hat keiner der Wintermonate, die für Berechnung der Drainwassermenge nur in Betracht kommen, je solche Regenmengen und noch weniger solche Sickerwassermengen gebracht. Nach den Rothamsteder Versuchen beträgt das höchste Monatsmittel 58 mm Regen. Wenn in einem Monate wirklich einmal so viel Regen fallen sollte, als Ws. Sickerwasser bei Kalksand entspricht, so wird sicher ein grosser Teil davon oberirdisch ablaufen, und die Drainage wird auch sehr viel mehr Zeit haben zur Ableitung des Überschusses, als 14 Tage.

Der ganze Versuch entfernt sich in seiner ganzen Anordnung viel zu weit von der Wirklichkeit, als dass man daraus Schlüsse auf die Praxis ziehen könnte; will man ihn überhaupt gelten lassen, so kann man daraus höchstens schliessen, dass die Drainage in Wirklichkeit in unserem Klima bei weitem nicht die Wassermenge abzuführen braucht, die Wollny berechnet.

Durch seine gediegene Schrift „Die Drainage“ (1. Aufl. 1853) hat Vincent einen grossen Einfluss auf die Art der Projektierung und Ausführung dieser Melioration gewonnen. Er nimmt an, dass von dem grössten monatlichen Regenfall, den er zu 13 cm annimmt, 10 cm in 14 Tagen durch die Drainage abgeleitet werden müssten, was einer sekundlichen Lieferung von 0,76 l von 1 ha entspricht.

Nach den Rothamsteder Versuchen gehört zu einer Regenhöhe von 130 mm eine Sickerwassermenge von 115 mm im Winter; da hier aber gar kein Wasser oberirdisch abfließen kann, so erscheint Vincents Annahme von 100 mm Sickerwasser doch sehr hoch.

In Breslau ist der mittlere Regenfall 1850—1905 gewesen im

Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
27	28	34	36	56	61	77	75	45	38	35	33 mm.

Die Sommermonate April bis September kommen wegen der grossen Verdunstung für Berechnung der Drainwassermenge gar nicht in Betracht. Die höchsten monatlichen Regenhöhen betragen in den 25 Jahren in den Wintermonaten

Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März
94	93	71	72	90	84 mm.

Die von Vincent angenommene Maximum-Höhe von 130 mm ist in diesen Monaten bei weitem nicht erreicht, sie kann also auch gar nicht für Berechnung des Abflusses massgebend sein. Aber auch die oben angeführten höchsten Regenmengen brauchen wir nicht zu berücksichtigen, da sie viel zu selten vorkommen.

In der folgenden Tabelle ist zusammengestellt, wie oft Monats-Niederschläge von 70, 60 und 50 mm in den 330 Monaten der Beobachtungszeit vorgekommen sind:

	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	
70 mm . . .	4 mal	2 mal	2 mal	0 mal	1 mal	2 mal	= 11 mal.
60 „ . . .	6 „	8 „	0 „	1 „	2 „	3 „	= 20 „
50 „ . . .	12 „	8 „	0 „	6 „	4 „	9 „	= 39 „

Auch Monate mit 70 mm Niederschlag sind noch viel zu selten (3,3 % aller), als dass sie als massgebend anerkannt werden müssten; man würde also auf die mit 50 und 60 mm zurückgehen können. Es beträgt die Sickerwassermenge nach den Rothamsteder Beobachtungen

bei 70 mm Regenhöhe	57 mm Sickerwasser	= 0,53 l
„ 60 „	„ 48 „	= 0,45 l
„ 50 „	„ 39 „	= 0,37 l

Abflussmenge für 1 ha und Sekunde, wenn man annimmt, dass diese monatliche Sickerwassermenge innerhalb 14 Tagen abgeführt werden müsste, immer für unser verhältnismässig trocknes Klima mit 500—650 mm jährlichem Niederschlag, aber jedenfalls höherer Verdunstung als Rothamsted gerechnet. Tatsächlich gaben auch schlesische Kulturtechniker in der ersten Zeit der Drainage, als noch Raum war für selbständiges Denken und Handeln (während heute alles nach Vorschrift und Schema F erledigt werden muss), folgende abzuführenden Wassermengen an:

Stocken in Schweidnitz	= 0,35 l,
Möllendorf, Wäge und John 1854 . . .	= 0,32—0,46 l,
Gropp in Isterbies	= 0,40 l;
erst Vincent ist auf	= 0,76 l für 1 ha u. Sek.

hinaufgegangen und die Generalkommission hat in der ersten Auflage ihrer „Anweisung“ die abzuführende Wassermenge zu 0,65 l angenommen.

Nun beruft sich Vincent darauf, dass seine sehr zahlreichen Anlagen, die unter der Annahme einer sekundlichen Abflussmenge von 0,76 l vom Hektar projektiert seien, gezeigt hätten, dass die Rohrweiten richtig bemessen sind. Demgegenüber ist aber festzustellen, dass die Formel, nach welcher er die Rohrweiten berechnet, ganz unrichtige Resultate liefert, und zwar fließt durch eine Rohrleitung viel weniger Wasser, als die Berechnung ergibt, im Mittel vielleicht nur zwei Drittel der berechneten Menge. Daraus muss man aber rückwärts schliessen, dass die angenommene Abflussmenge statt 0,76 etwa nur $0,76 \times \frac{2}{3} = 0,5$ l zu betragen braucht; und wenn die Anweisung der Generalkommission 0,65 annimmt, so wird man vielleicht der Wirklichkeit auch näher kommen, wenn man dafür $\frac{2}{3} \times 0,65$, also etwa 0,45—0,50 l einsetzt, womit man an den von Möllendorf etc. für richtig erkannten Zahlen wieder angekommen wäre.

Es wurde bereits erwähnt, dass die Formeln, welche man gewöhnlich benutzt, um die Weiten der Drainröhre zu berechnen, sehr ungenaue Resultate liefern. Vincent hat das Verdienst, als Erster den Weg gewiesen zu haben,

auf welchem man die Drainrohrweiten überhaupt in rationeller Weise annähernd bestimmen kann. Er legte die bereits 1796 von Eytelwein aufgestellte Formel für Wasserleitungsröhren zugrunde, nach welcher die mittlere Geschwindigkeit v berechnet wird aus der Länge der Leitung l , dem Durchmesser d und dem absoluten Gefälle h :

$$v = 6,42 \sqrt{\frac{46,5 \cdot dh}{1 + 46,5 \cdot d}} \text{ für rhein. Fuss oder abgerundet } v = 3,59 \sqrt{\frac{50 \cdot dh}{1 + 50 \cdot d}}$$

für Metermafs.

Um diese Formel für Berechnung von Drainröhren geeignet zu machen, hat er in der zweiten Auflage seiner Schrift 1854 die bekannten Sicherheitskoeffizienten für Rohre:

$$\begin{array}{cccc} d = 1'' & 2'' & 3'' & 4'' \\ \text{Koeffizient} = \frac{2}{3} & \frac{3}{4} & \frac{4}{5} & \frac{5}{6} \text{ etc.} \end{array}$$

eingeführt und Tabellen für die schnelle Auswertung berechnet.

Die Nachfolger Vincents bis auf die allerletzten haben diese Formel immer wieder gewissenhaft abgeschrieben, auch versucht, sie zu verbessern; aber es scheint niemand aufgefallen zu sein, dass diese Formel doch eine ganz merkwürdige Form hat. Wenn man in Eytelweins Hydraulik, die als Quelle angeführt wird, nachsieht, so zeigt sich, dass Vincent leider eine falsche Formel genommen hat. Die absonderliche Form des Ausdrucks unter der Wurzel kommt daher, dass die Formel entwickelt ist unter der Bedingung, dass die Rohrleitung das Wasser aus einem Reservoir ableitet; die Kontraktion des Wasserstrahls am Anfang der Leitung ist mit berücksichtigt, und daher stammt auch die Form des Ausdrucks unter der Wurzel. Die richtige Formel für Bewegung des Wassers in einer einfachen Rohrleitung muss nach Eytelwein heissen:

$$v = 44,8 \sqrt{\frac{dh}{l}} \text{ für rhein. Fuss und}$$

$$v = 25 \sqrt{\frac{dh}{l}} \text{ für Metermafs.}$$

Schon 1852 hat der Kulturtechniker Stocken in Schweidnitz aus der Formel von Prony $v = 26,3 \sqrt{\frac{dh}{l}}$ eine solche für Berechnung der Drainrohrweiten abgeleitet:

$$v = 20 \sqrt{\frac{dh}{l}}.$$

Auch diese gibt wohl die Geschwindigkeit auch noch zu gross an, vor allem für engere Röhren.

Aus dem Vorstehenden geht hervor, dass sowohl die Wassermenge, welche bei Projektierung der Drainage als abzuführen angenommen wird, als auch die Formeln, welche zur Berechnung der Rohrweiten dienen, durchaus nicht einwandfrei resp. nachweislich falsch sind. Ich hatte diese beiden Übelstände schon Ende der achtziger Jahre festgestellt und mich auch bemüht, sie nach Möglichkeit zu verbessern, was nicht bloss theoretisch interessant, sondern auch für die praktische Ausführung von erheblicher Wichtigkeit ist, weil durch Verbesserung der Grundlagen dem ganzen Drain-

plan mehr Sicherheit gegeben und unnötiger Kostenaufwand für unnützerweise weite Hauptdrains vermieden wird. Ich habe deshalb bereits im Jahre 1890, als ich den kulturtechnischen Dienst in Rheinessen übernahm, die für gewöhnlich abzuführende Wassermenge auf 0,4 l für 1 ha und Sekunde und bei zu erwartendem stärkeren oberirdischem oder unterirdischen Zufluss auf 0,5 l festgestellt, wobei mir damals die älteren wohlbegründeten Vorschläge, die auf ähnliches hinauslaufen, nicht bekannt waren. Es sind dann damals auch die für Berechnung der Rohrweiten nötigen Tabellen und zum ersten Male auch der Rechenschieber für diesen Zweck hergestellt und bei der Projektierung der ausgedehnten Genossenschaftsanlagen mit oft sehr grossen Drainsystemen verwendet worden. Die Rohre, von denen oft solche bis 30 cm Durchmesser zur Verwendung kamen, sind stets ausreichend gewesen, ja es hat mir oft geschienen, als ob sie immer noch überflüssig weit wären.

Im grossen und ganzen wurde das Vorstehende bereits mitgeteilt in einem am 19. Oktober 1904 im schlesischen Verein zur Förderung der Kulturtechnik gehaltenen Vortrage.



Fig. 1.

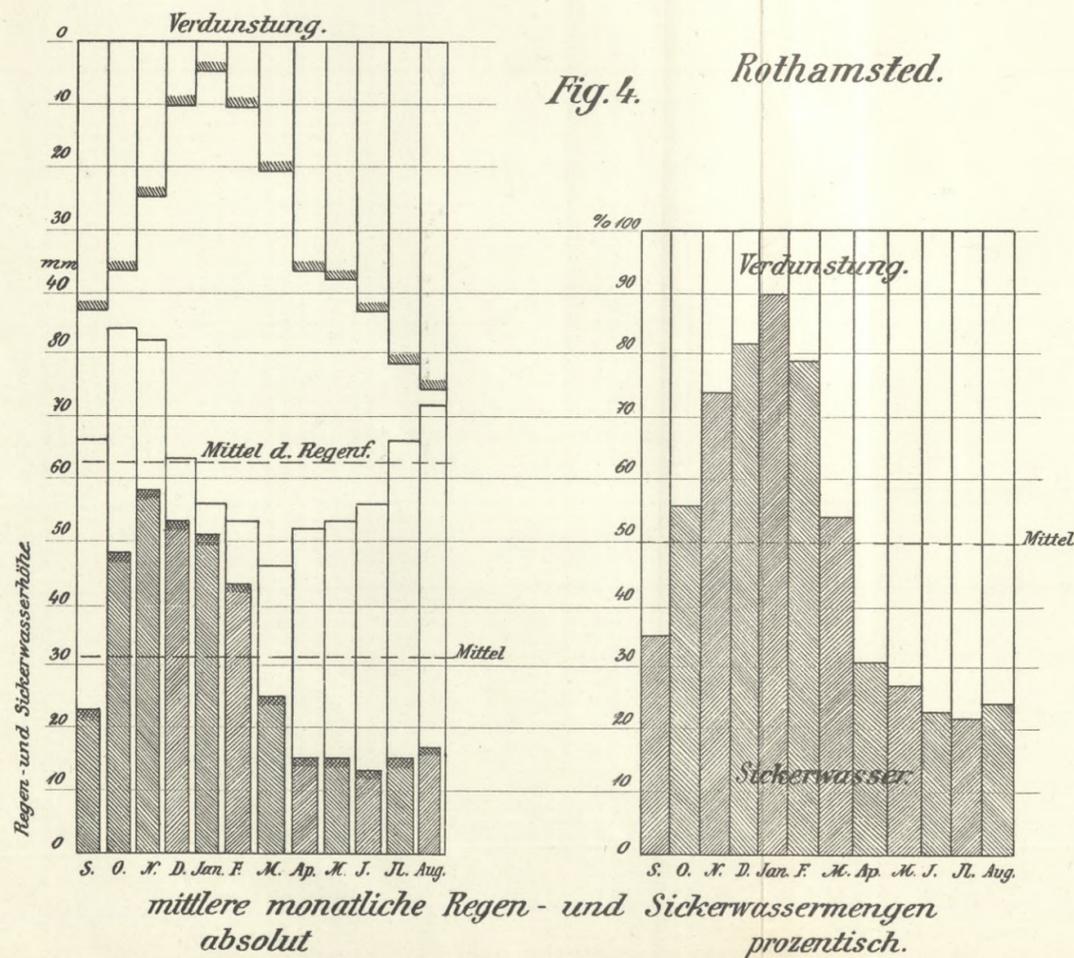
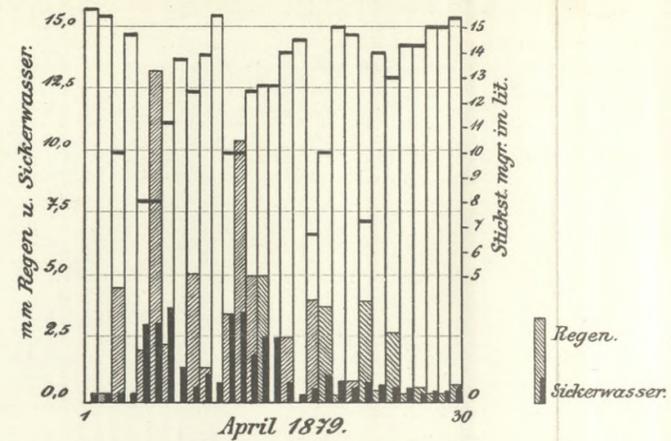


Fig. 6^a

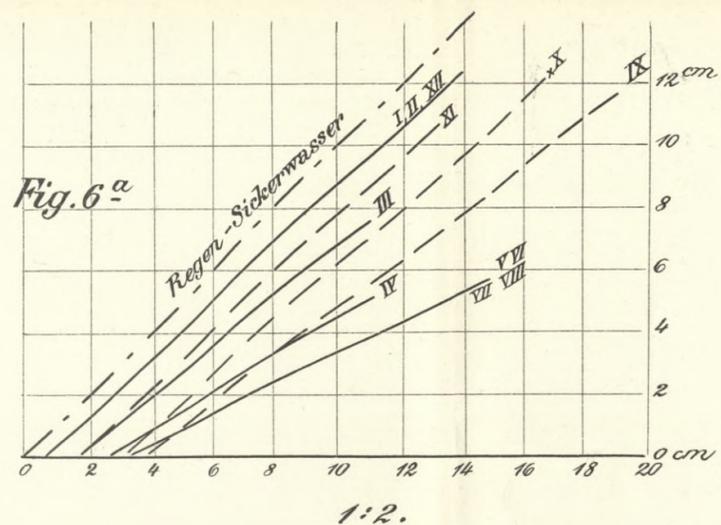


Fig. 6

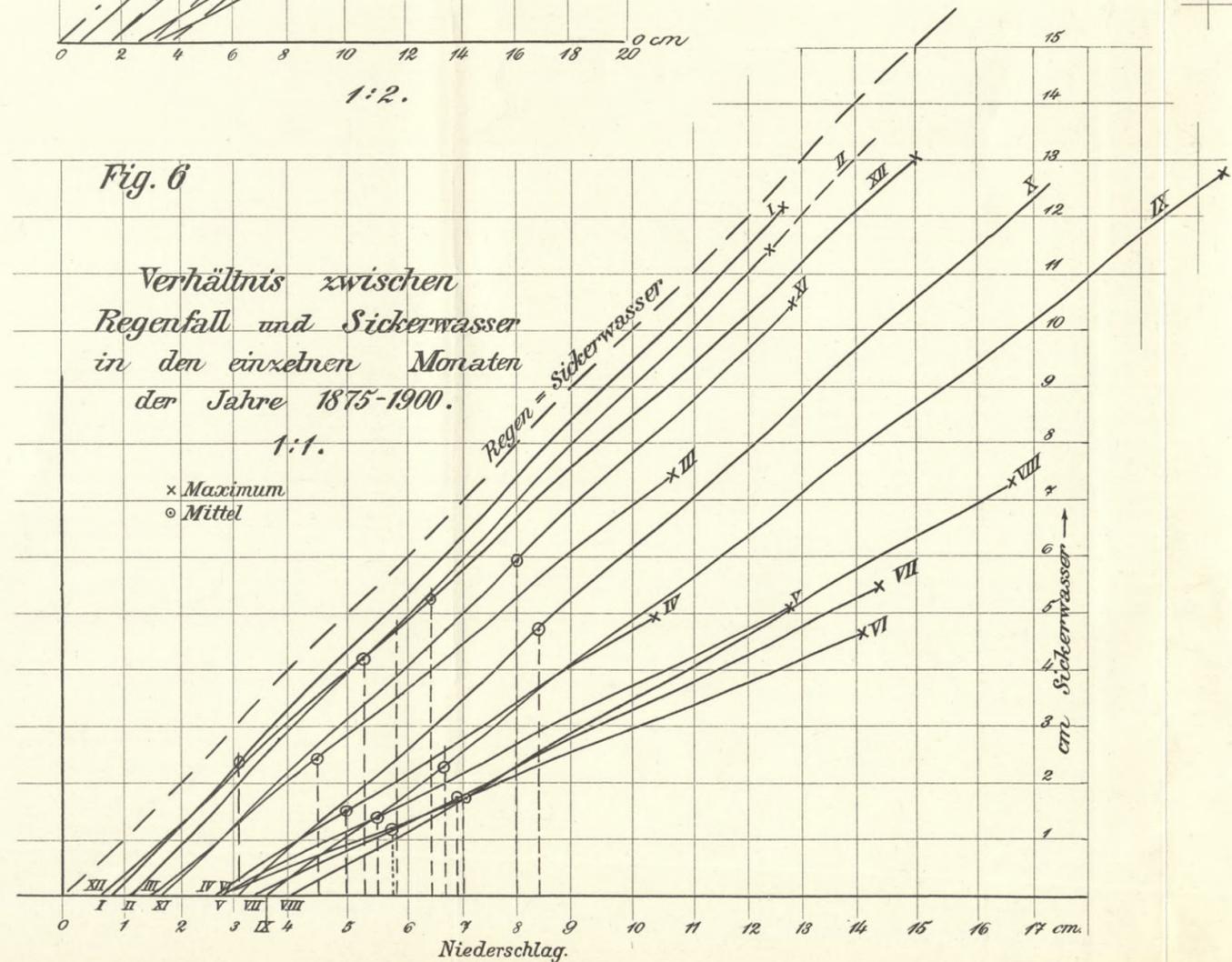


Fig. 5.

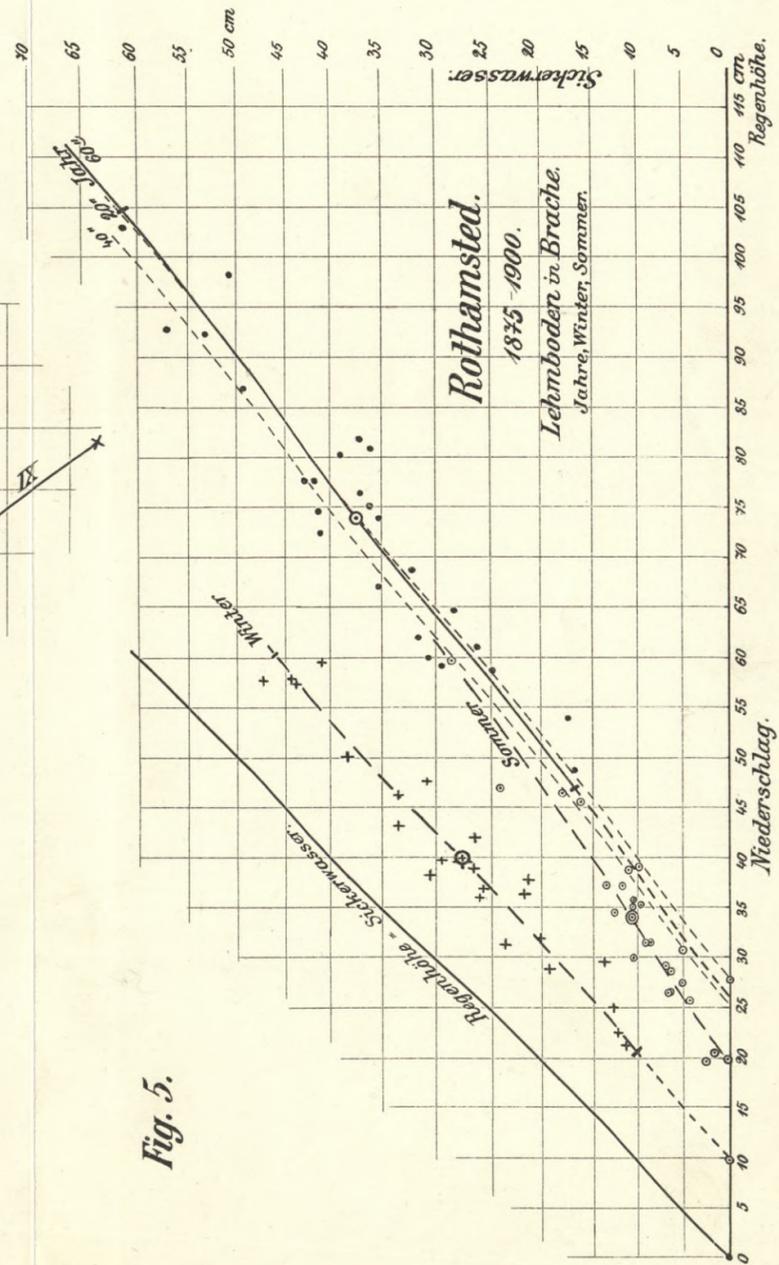


Fig. 2.

Rothamsted: Regenhöhe, Sickerwasser und Verdunstung

1875/6 bis 1899/1900 - 25 Jahre.

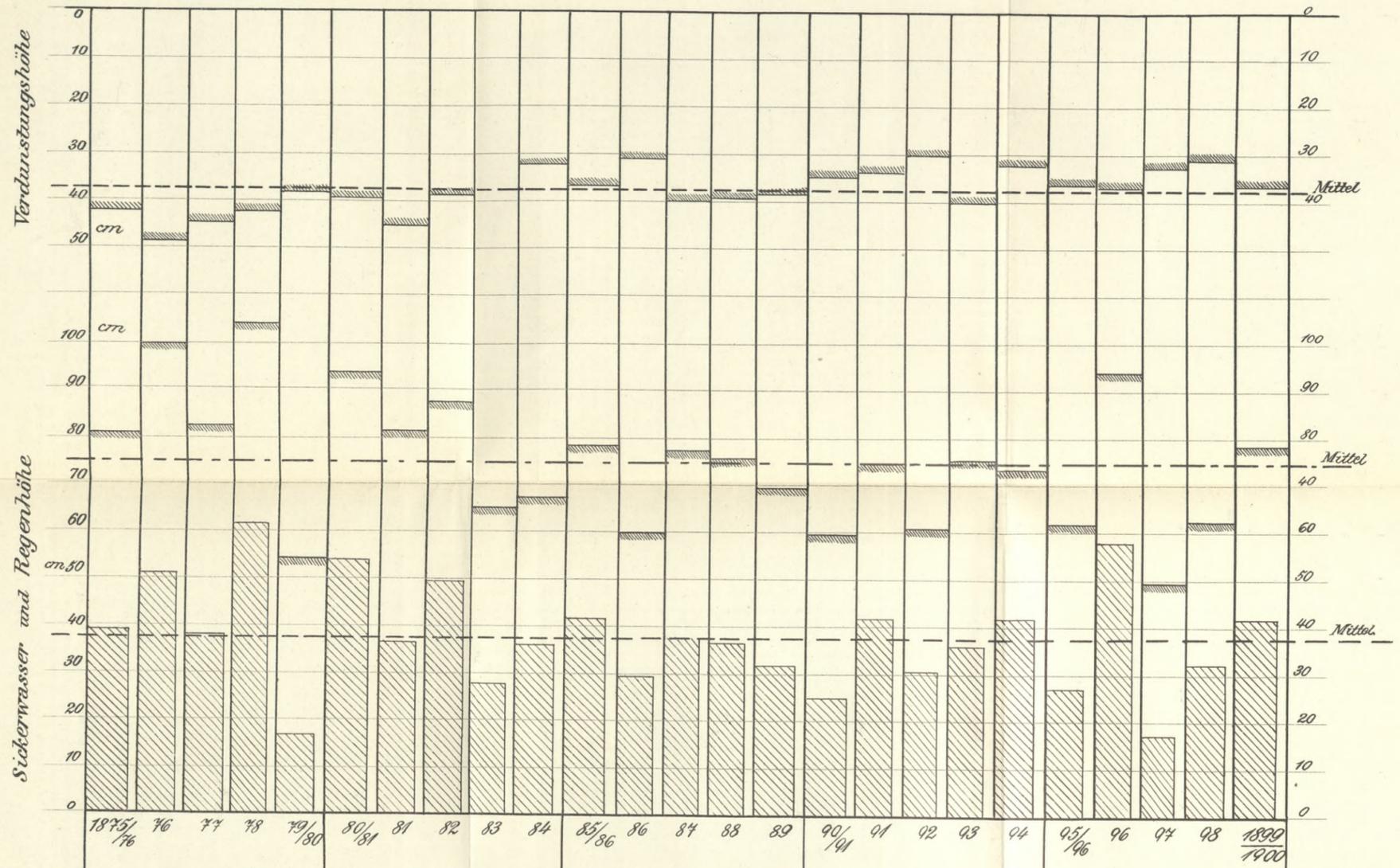


Fig. 3.

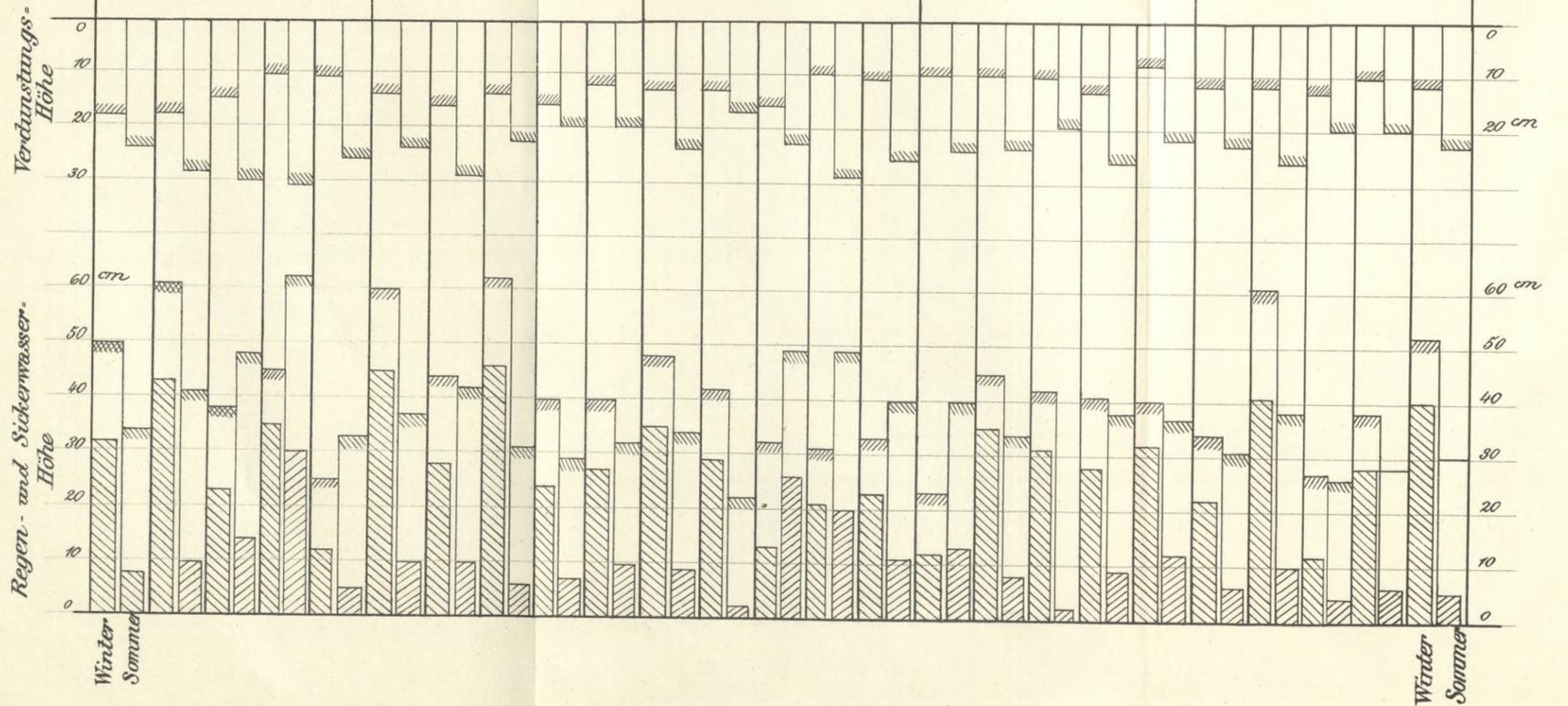




Fig. 7. Regenhöhe, Sickerwasser u. Verdunstungshöhe.

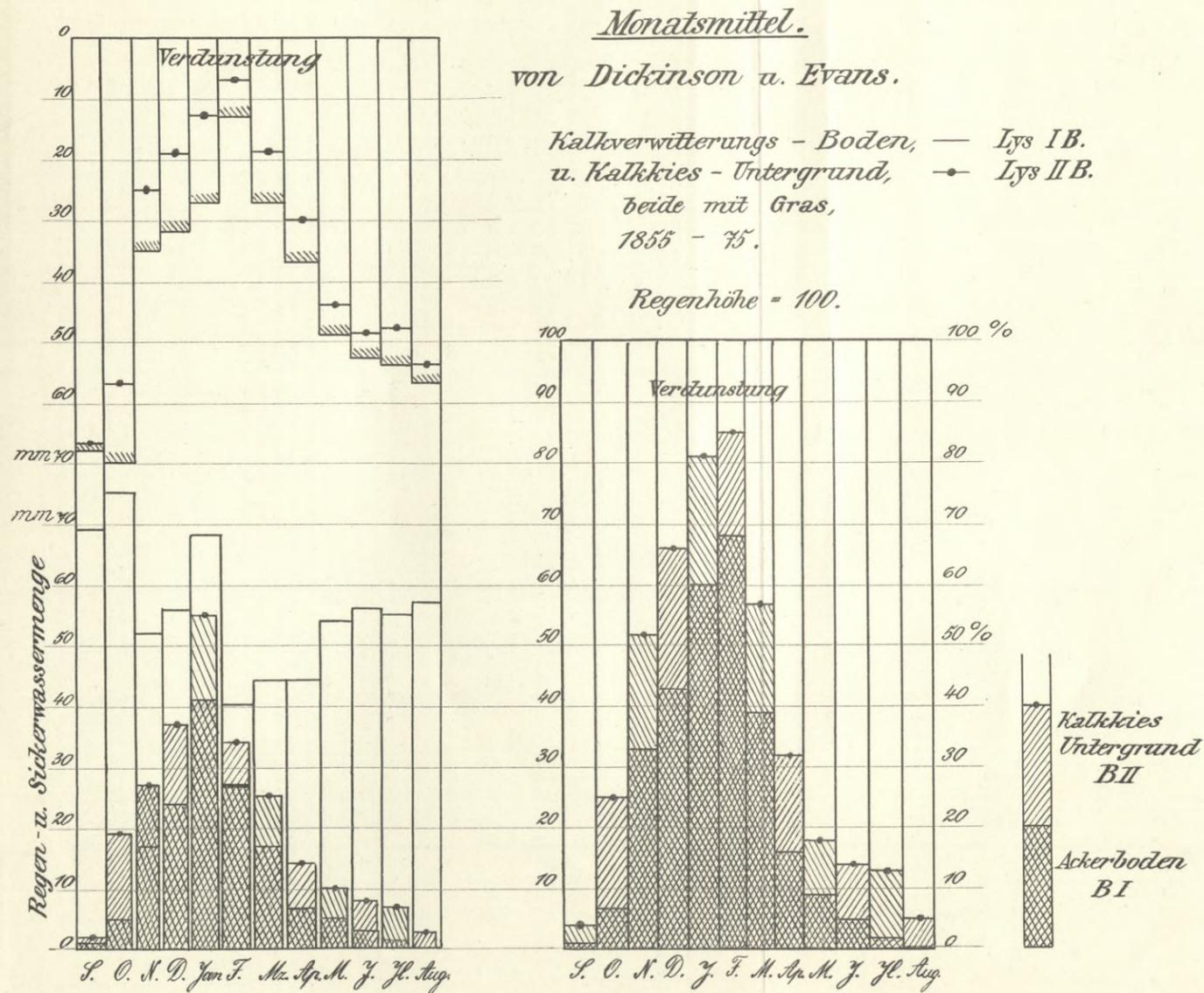


Fig. 7^a
Greaves.

Versickerung und Verdunstung in den einzelnen Monaten
absolut. prozentisch.

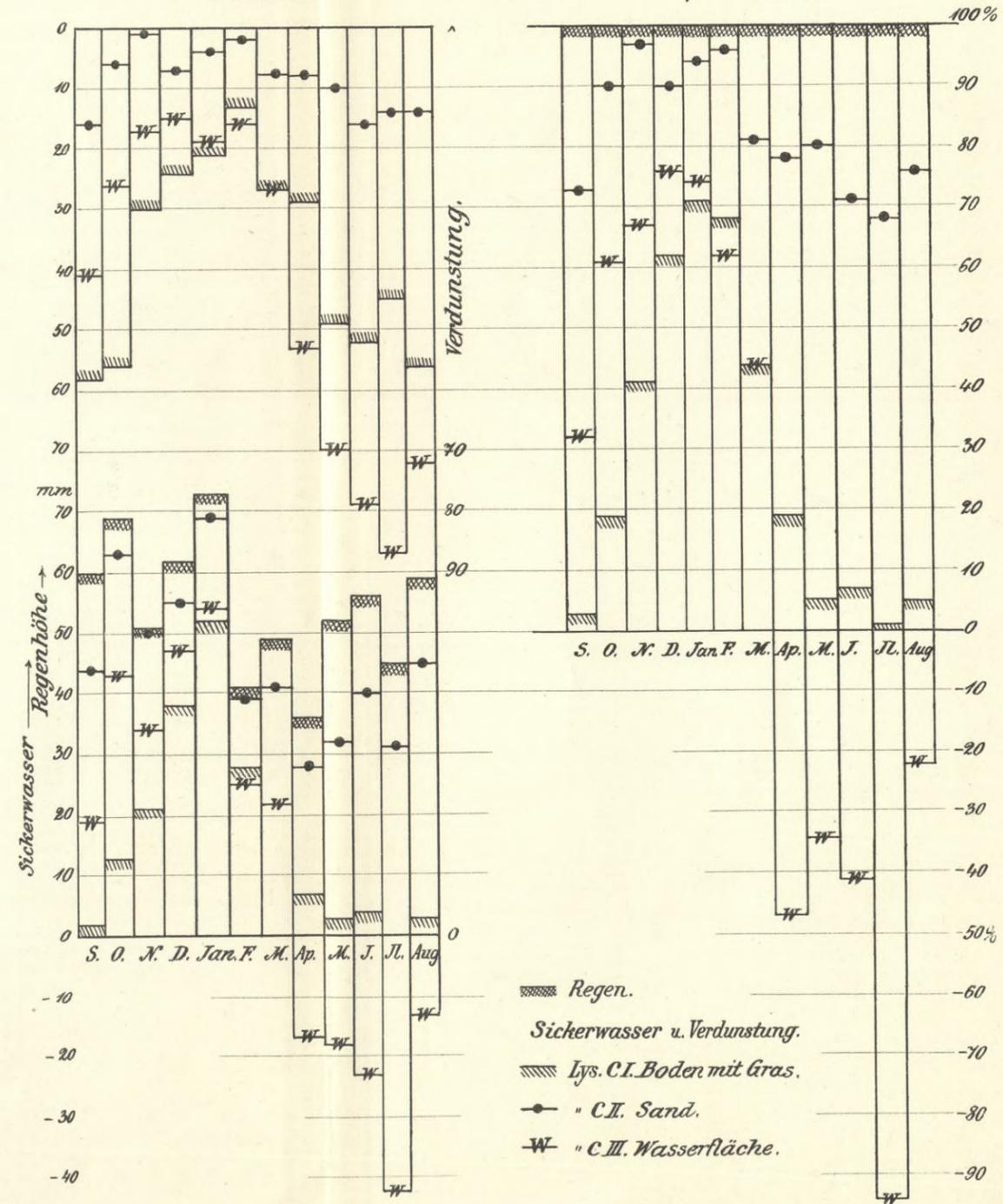




Fig. 8.

Dickinson & Evans 1855-75.

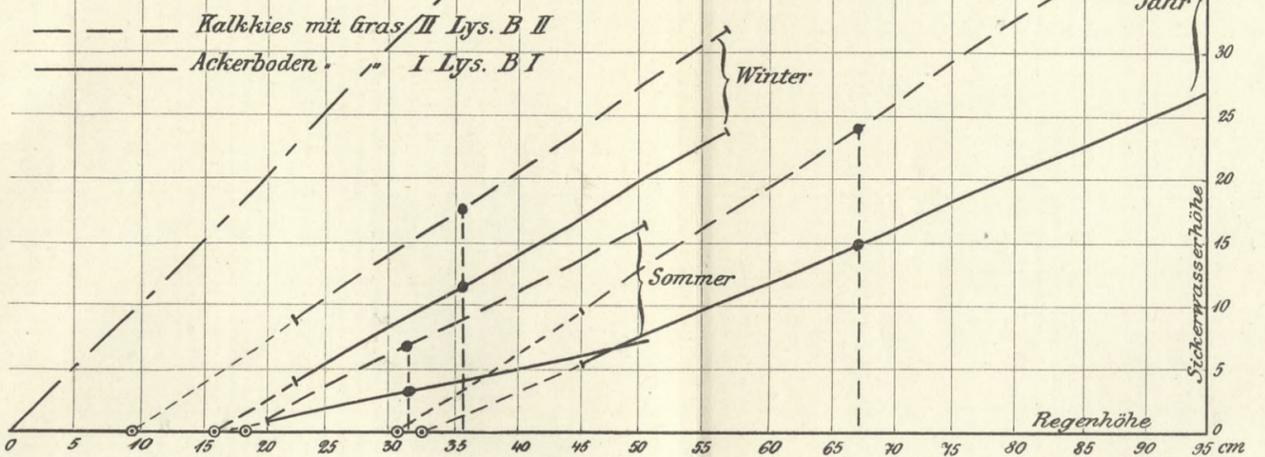
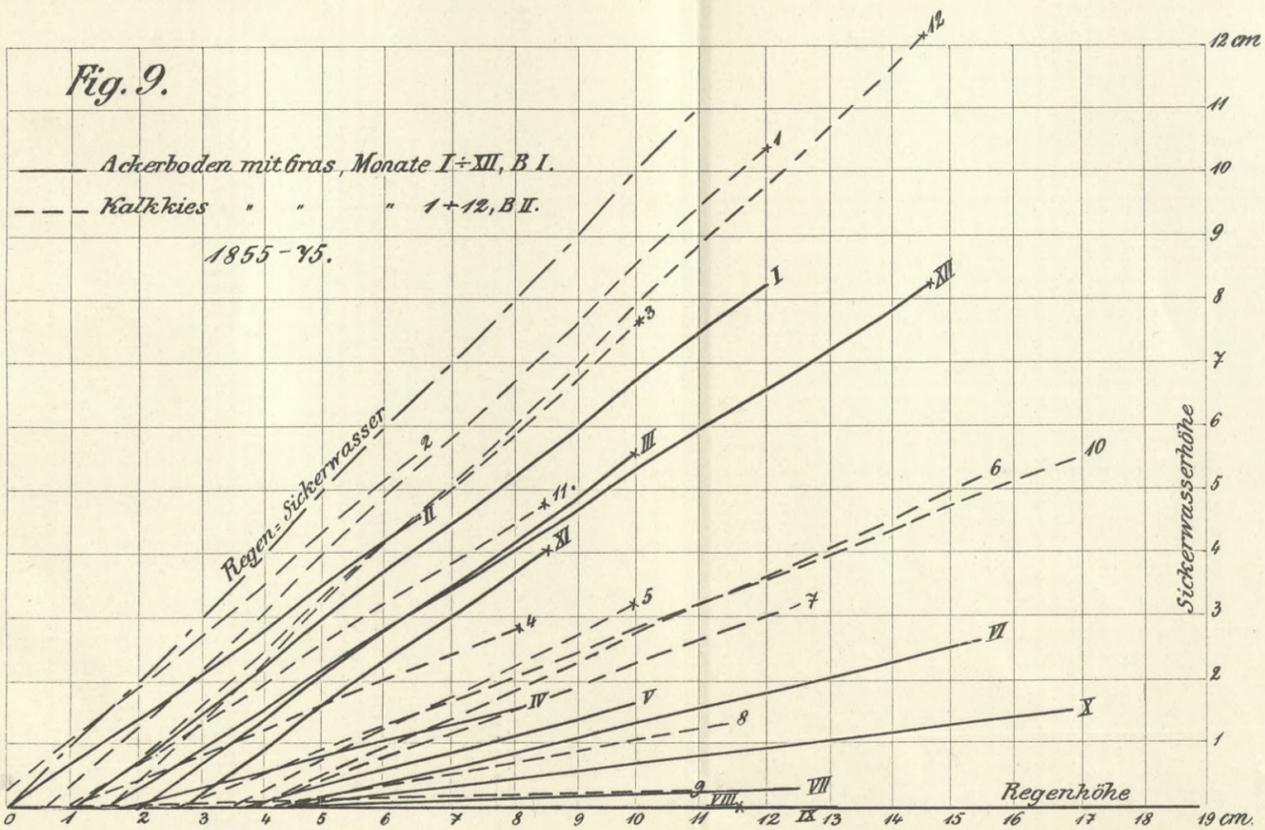


Fig. 9.

Ackerboden mit Gras, Monate I-XIII, B I.
Kalkkies " " 1-12, B II.
1855-75.



Greaves C II III.

Fig. 10.

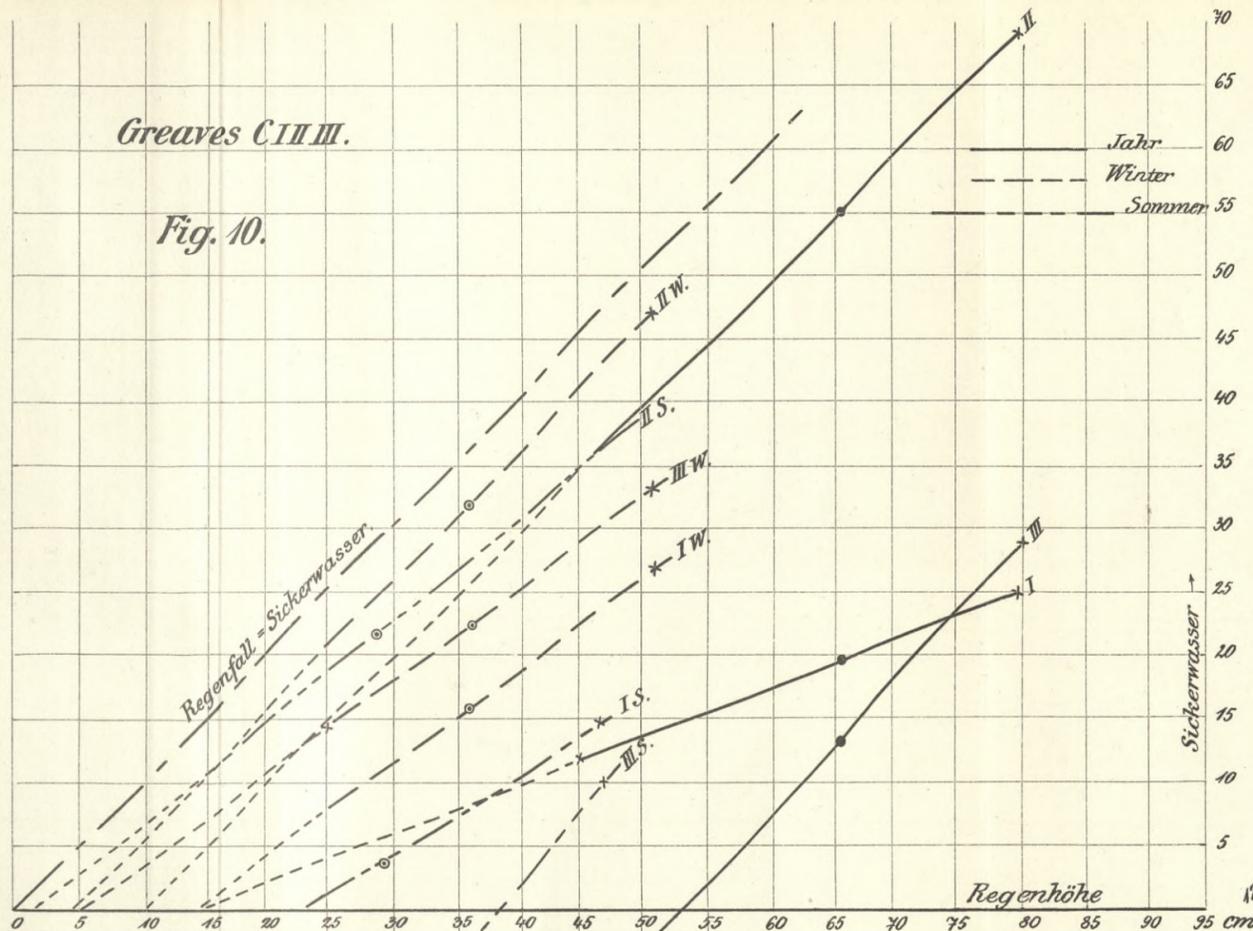
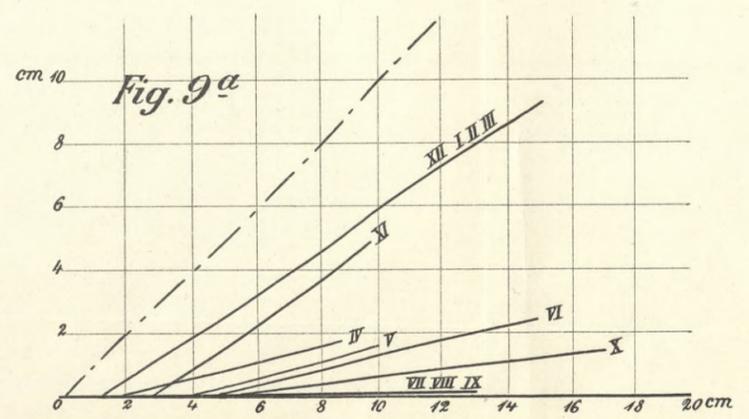


Fig. 9a

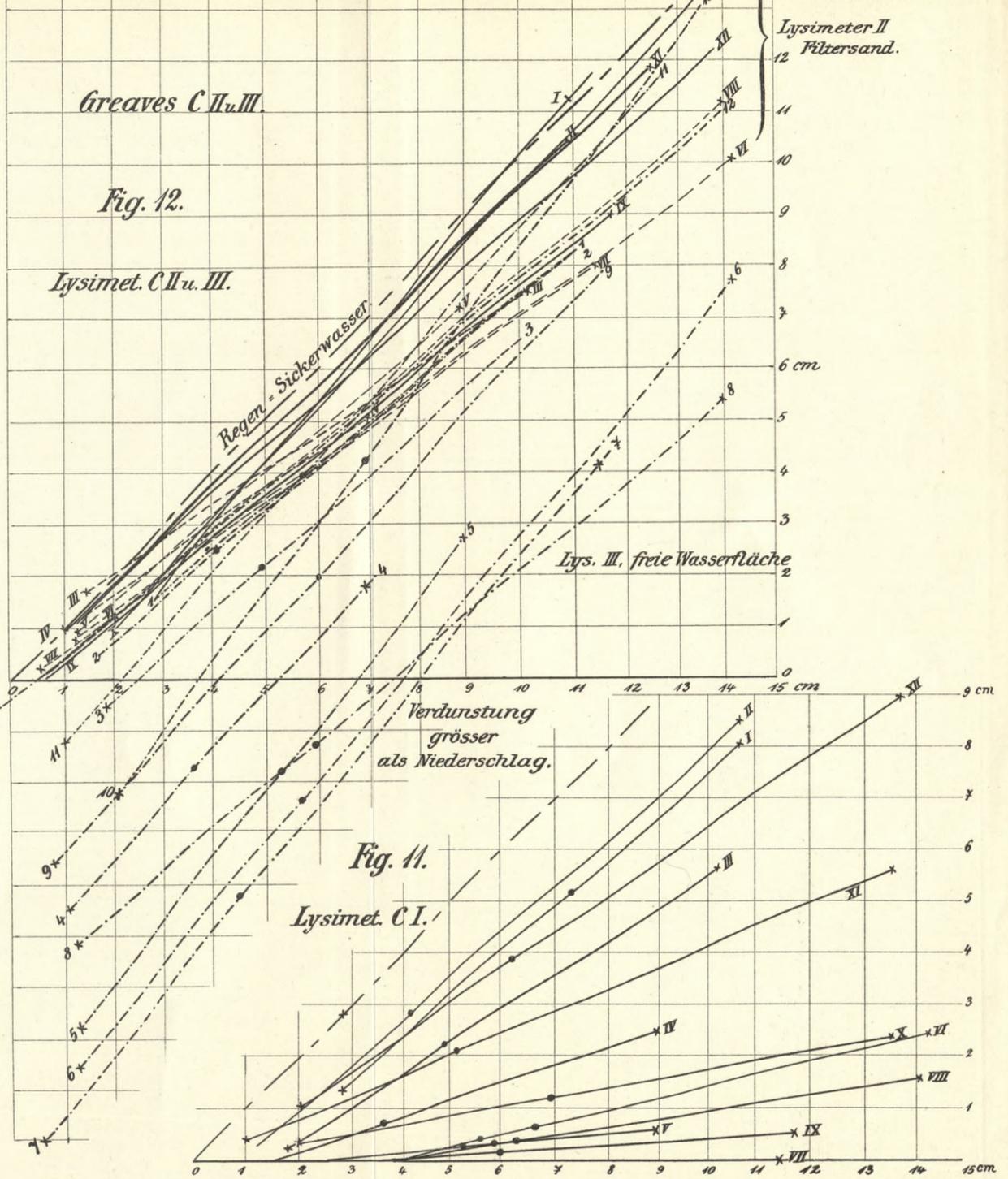


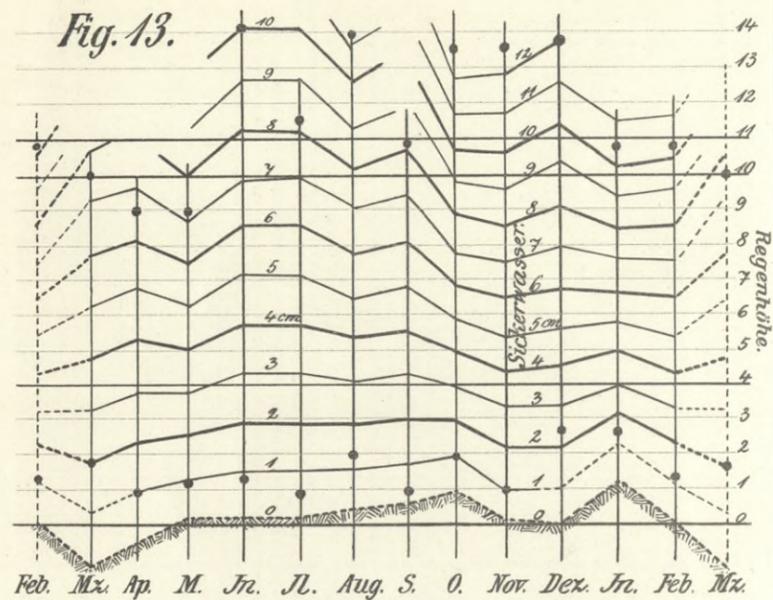
Tafel 9.

Greaves C II u. III.

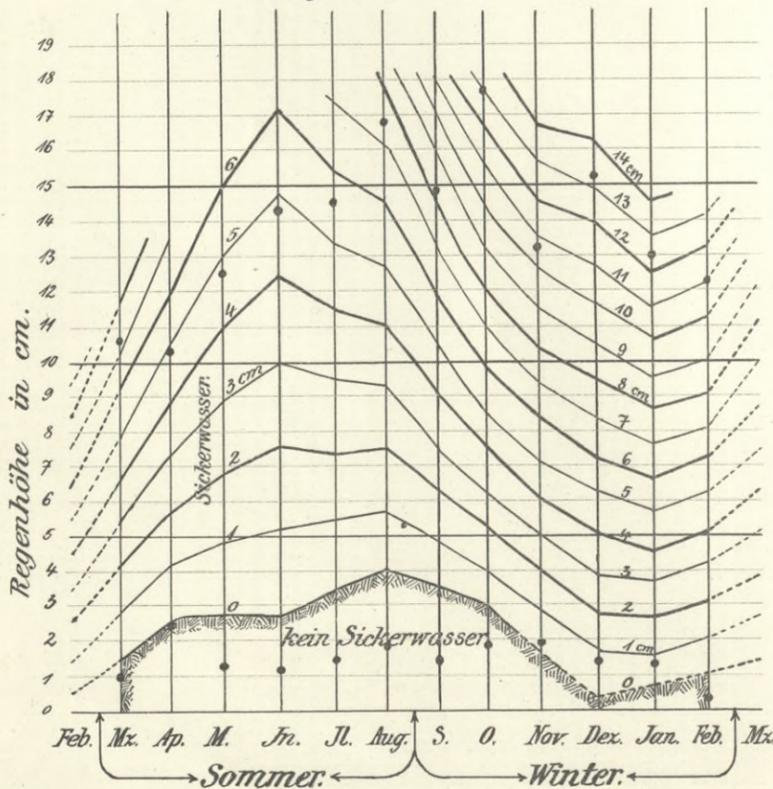
Fig. 12.

Lysimet. C II u. III.



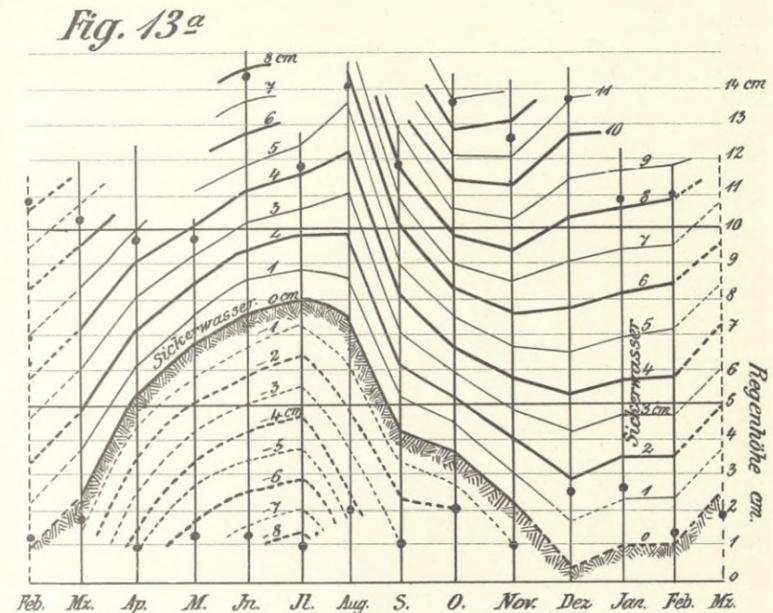


CII. grober Sand.

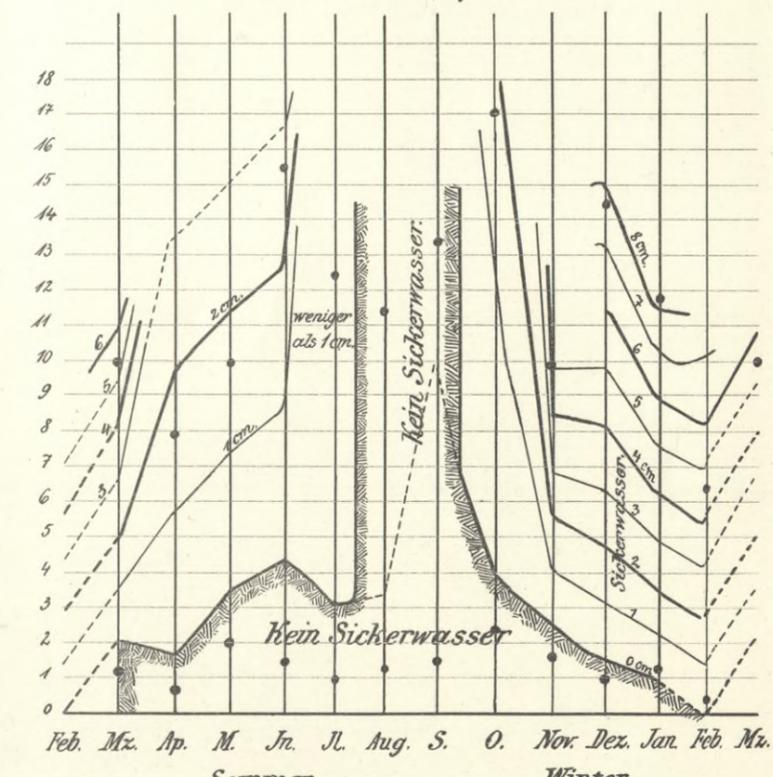


• grösste und geringste monatliche Regenhöhen.

A. Rothamsted: Lehmboden in Brache.

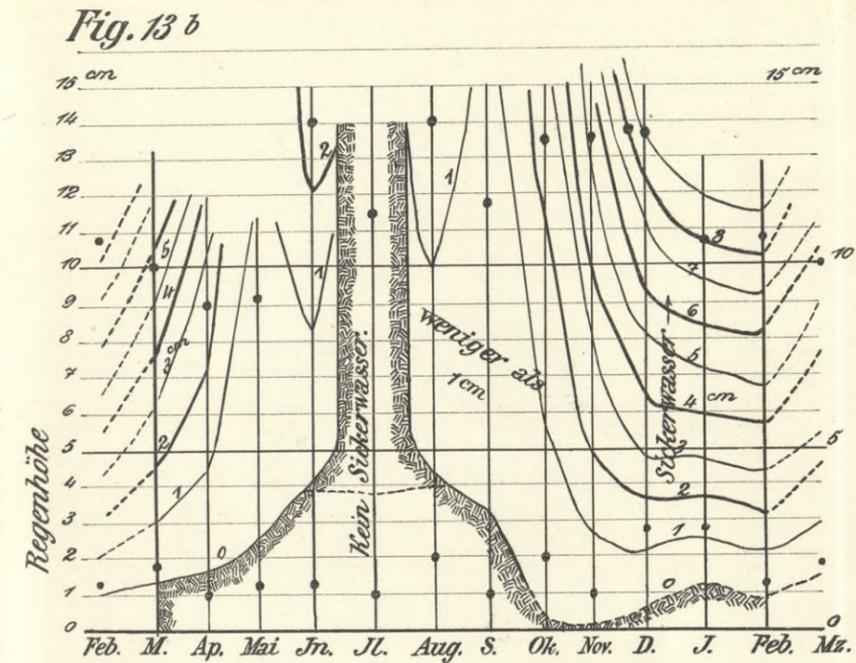


CIII. Freie Wasserfläche.

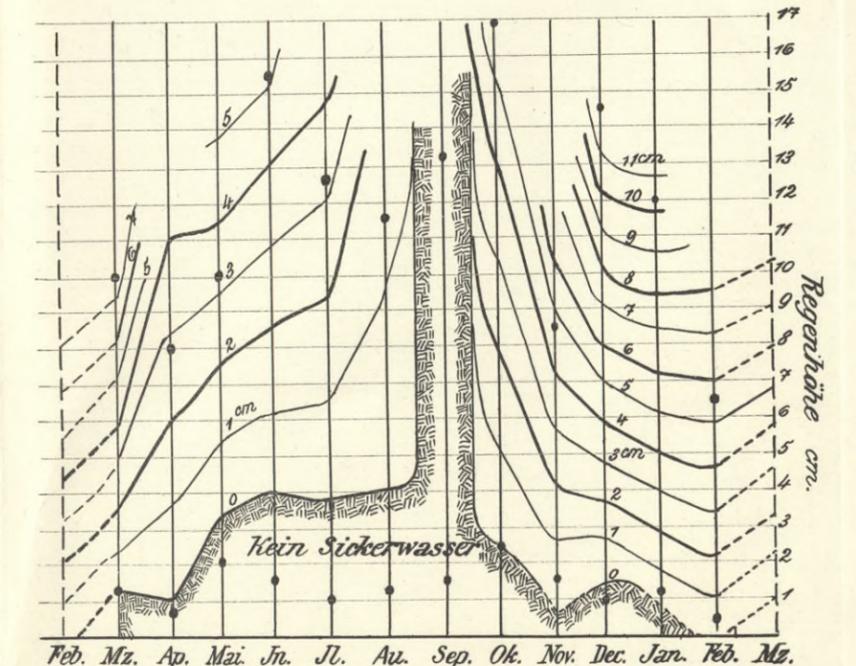


B I. Dickinson u. Evans.

Kalkverwitterungsboden mit Gras.



C I. Greaves: Boden mit Gras.



B II. Kalkies mit Gras.



S. 61

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

33412

Kdn., Czapskich 4 — 678. 1. XII. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000305612