

Mitteilungen

des

Deutschen Wetterdienstes

Nummer 8

Bad Kissingen

Mai 1954

DK 551.573

Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation und Evapotranspiration

von

Dr. Waldemar H a u d e, Hannover



In den folgenden Ausführungen soll unter Evaporation die Wasserabgabe einer nicht lebenden Oberfläche und unter Evapotranspiration die Wasserabgabe eines bewachsenen Bodens, d. h. einer lebenden Oberfläche, verstanden werden.

Sutton (1) lehnt die üblichen Evaporimeter als wertvolle meteorologische Instrumente ab. Gemeint ist wohl vor allem die Benutzung von Wassertanks. Nach dem heutigen Stand der Forschung empfiehlt er zur allein möglichen Feststellung der Verdunstung nämlich kleiner gesättigter Oberflächen ihre Berechnung auf Grund von Temperatur-, Feuchtigkeits- und Windmessungen. Aber auch diese Angaben, vorausgesetzt sie lassen sich relativ einfach fortlaufend messen, würden, angewandt auf die natürliche Oberfläche nur die Auswirkung der Verdunstungsbeanspruchung an den bestimmten gewählten Testflächen und damit auch nur ein Relativmaß der Beanspruchung durch das Wetter darstellen.

Es ist nicht einzusehen, warum direkte Abgabemessungen von Wasser an einer irgendwie gearteten, aber immer feuchten Testfläche nicht den gleichen praktischen Nutzeffekt erzielen sollten. Je nach Wahl, ob ich eine Wasserfläche bestimmten Umfanges, eine feuchtgehaltene Stofffläche bekannter Größe, Art und Färbung oder eine immer feucht gehaltene Oberflächengröße eines bestimmten Bodens nehme, so sind diese Meßergebnisse und ihr Verlauf auch immer nur die Folge der Beanspruchung, die der Wetterablauf fordert. Die Absolutbeträge dieser verschiedenen Methoden werden voneinander abweichen, wie schon bekanntlich allein die Größe der verdunstenden Fläche, ihre Färbung in den Endwert der abgegebenen Millimeter Wasser eingeht (2). Die Schwankungen aber sind bei unterschiedlichen Amplituden ähnlich, so daß sich für praktische Nutzenanwendung — worauf es hier vor allem ankommen soll — zulassende gegenseitige Beziehungen ableiten lassen.

Da aber derartige laufende Messungen viel Aufwand machen, werden diese Ergebnisse mit verbreitet angestellten klimatologischen Daten der Luftfeuchte verglichen, um gegebenenfalls mit diesen, auf einfachste Art und Weise gewonnenen Werten, für praktische Zwecke ausreichend genaue Unterlagen zu erhalten.

1. Evaporation von Wasserschale und Piche

Die Evaporationsbeträge feuchter Flächen hängen vom Wetter, von den Gegebenheiten der verdunsteten Fläche und ihrer Umgebung ab. Diese Einwirkung des Wetters auf eine beschränkte Oberfläche freien Wassers, irgend eines feuchten Stoffes, einer immer feuchten, unbewachsen gehaltenen Erdoberfläche kann als eine Art Beanspruchung an die Wasserabgabe aufgefaßt werden, auf die diese Testkörper unterschiedlich reagieren. Die Feststellung des Wasserverlustes gibt eine relative Größe dieser Beanspruchung an.

Die Evaporationsmenge pro Flächeneinheit von Wasserbecken nimmt zunächst mit zunehmender Größe ihrer Oberfläche bei gleich hoher Aufstellung über Grund und mit Erhöhung des Randes ab und damit auch die Amplitude der Schwankungen. Für Dauerbeobachtungen kleiner Becken ist bei sonst einwandfreier Wartung die Berücksichtigung hineingefallenen Niederschlags als unsystematische Abweichungen am störendsten, da durch Spritz- und Störungseffekte die wirklich aufgefangenen Beträge schwer feststellbar sind.

Es wurden daher Wasserschalen von 30 cm Durchmesser, 10 cm Höhe und 8 cm Wassertiefe unter einem weißen Satteldach aufgestellt, um auf diese Weise hineinfallenden Niederschlag praktisch auszuschalten. Naturgemäß tritt damit eine Störung des Windfeldes und Strahlungshaushaltes ein und damit vor allem an klaren Tagen eine Minderung der Wassertemperatur, was zu einer verringerten Evaporation bei dieser Meßanordnung führt.

Vergleichsweise wurde neben den Wasserschalen, mit und ohne Dach, die Evaporation immer feuchter Oberflächen mit Hilfe normaler Piche-Evaporimeter mit weißen Papierscheiben gemessen. Diese wurden einmal mitten unter der über völlig freiem Ackergelände aufgestellten Klimahütte angebracht und außerdem in verschiedenen Höhen an einem Pfahl frei hängend, so daß Niederschlag jeder Art diese Papierstreifen treffen konnte. Die Ergebnisse beider Ablesungen unter der Hütte und frei aufgehängt, von April bis Oktober, zeigten in Pentaden zusammengefaßt allgemein nur eine Differenz von 1% bis 2%. Nur im Mai und Juni war der Wasserverlust unter der Hütte auf 10% (?) bzw. 6% vergrößert. Eine Übernässung der Papierscheibe tropfte während einer Niederschlagszeit, wo so wie so nichts verdunsten kann, weitgehendst ab.

Ein Vergleich der über freiem Ackergelände angestellten Messungen der Wasserschale mit Dach und Wasseroberfläche 1,16 m über Boden und des Piche-Evaporimeters angebracht unter der Klima-Hütte mit Höhe der Papierscheibe 1,30 m über Grund ergab über eine kontinuierliche Vergleichsreihe für 1953 die in Monatssummen zusammengefaßten Daten der Tabelle 1.

Tab. 1

Monatssummen der Evaporation der gegen Regen geschützten Wasserschale in 1,16 m Höhe und des Piche mit weißer Papierscheibe (Durchmesser 5,5 cm) in 1,30 m unter der Hütte (Piche $\text{ccm} \times 0,2 + 4$) in mm, 1953.

	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	1.—25.
Schale	68	122	123	89	128	141	115	49	35	
Piche	—	123	125	89	127	142	117	49	39	

Hier sind zum Vergleich zu den mit 0,2 multiplizierten Ablesungswerten des Piche-Evaporimeters (cm^3 Teilung des Glasrohres) jeweils immer 4 hinzu addiert worden. Die Werte sind praktisch identisch. Natürlich treten von Tag zu Tag Unterschiede auf. Sie sind zum großen Teil durch die Auffüllung der Wasserschale bedingt. Leicht wird bei Wind und der völlig freien Aufstellung mitunter etwas mehr oder weniger aufgefüllt, als erwünscht. Aber dieser Mehr- oder Minderbetrag gleicht sich mit den nächsten Tagen wieder weitgehend aus. Daher wird über Tagesgruppen die Beziehung sehr eng.

Um den Unterschied gegenüber tieferen Lagen festzustellen, wurde eine ähnliche Wasserschale mit gleichem Regendach und einer Höhe der Wasseroberfläche von 30 cm aufgestellt und ein Piche-Evaporimeter völlig frei 10 cm über Boden. Die Monatswerte der Wasserschale in 0,30 m Höhe zu denen in 1,16 m und die Messungen des Piche in 0,10 m zu den in 1,30 m schwanken von April bis November (Tab. 2) nur wenig.

Tab. 2

Verhältnis der Monatssummen der Evaporation geschützter Wasserschalen in 0,30 m Höhe zu 1,16 m und der Piche in 0,10 m Höhe zu 1,30 m in %.

	April	Mai	Juni	Juli	August	Septemb.	Oktober	Novemb.
Schalen	—	(52)	67	63	66	69	63	58
Piche	55	(43)	54	51	56	59	52	—

Nur die Maiwerte fallen heraus und sind nicht vergleichbar. In diesem Monat war das Gras der Wiesenfläche, auf der die Instrumente standen, hochgewachsen. Es wurde

erst in den ersten Tagen des Juni gemäht. Infolgedessen reichten die Grashalme bis über die Wasserschale hinaus, und das Evaporimeter hing, wenn auch frei, in der Halmzone. In den übrigen Monaten wurde das Gras niedrig gehalten.

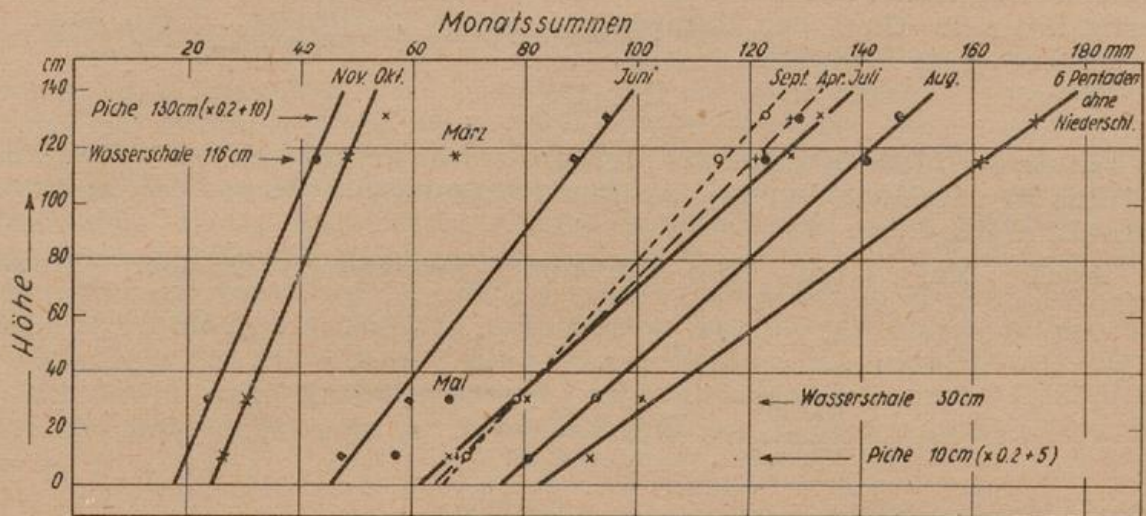


Abb. 1

Lage der Monatssummen der Evaporation von gegen Niederschlag geschützten Wasserschalen in 116 cm und 30 cm Höhe über Boden und von Piche-Evaporimeter in 130 cm und 10 cm Höhe. 1953.

Der Zusammenhang der Monatssummen zwischen den einzelnen Meßstellen und Geräten kommt befriedigend zum Ausdruck (Abb. 1), ohne daß aber die gezogenen Verbindungslinien über den wirklichen Verlauf der Beanspruchung mit der Höhe genaueres aussagen. Hier sind die Werte des Piche auch mit 0,2 multipliziert, zu denen aber in 1,30 m Höhe eine Konstante = 10 und in 10 cm Höhe = 5 zugezählt wurde. Die Monatssummen in 10 cm Höhe liegen demnach bei 48% bis 58% der entsprechenden Angaben in 1,20 m Höhe. Die Differenz zwischen höchster und tiefster Monatssumme liegt in 10 cm Höhe bei 43% des entsprechenden Wertes in 1,20 m Höhe.

Aus 6 Pentaden mit Niederschlägen unter 1 mm aus dem Zeitraum April bis August ist noch eine Wertegruppe der Trockenwetterlagen eingetragen, die gut zu dem Verlauf der Monatswerte paßt. Beide Instrumente gestatten somit, vergleichbare Werte einer relativen Verdunstungsbeanspruchung festzustellen, wobei die Bedienung des Piche einfacher ist. Aber eine Messung im Winterhalbjahr ist nur mit der Schale möglich.

Die reinen Evaporationswerte einer offenen Schale müssen höher ausfallen als unter einem Satteldach, wobei der Unterschied bei Strahlungswetter besonders in die Zeit von 10 — 11 bis 18 — 19 Uhr fällt. Die Wassertemperatur unter dem Satteldach liegt etwas niedriger als die Lufttemperatur in 2 m Höhe, während das Wasser einer frei aufgestellten Schale um einige Grade wärmer sein kann. In Abb. 4a sind ausgeglichene Pentadenwerte der offenen Schale aus der regenarmen Hochsommerzeit zu denen der geschützten Schale und zu den umgerechneten Werten des Piche hinzugesetzt worden, die für diese Zeiten einen ziemlich konstanten Mehrbetrag der Evaporation aufweisen. Desgleichen haben gefärbte Papierblättchen beim Piche höhere Werte.

2. Vergleich zum Sättigungsdefizit

Außerdem wurde versucht, die relative Beanspruchung auf einfachste Weise nur mit Hilfe des täglichen Sättigungsdefizites des 14-Uhr-Klimatermines in 2 m Höhe zu bestimmen, da diese Messungen verbreitet angestellt und regelmäßig ausgeführt wer-

den und nicht durch die Örtlichkeit der Meßstelle so anfällig sind wie z. B. die des Windes. Das Verhältnis der Summe der täglichen Sättigungsdefizite mit den Evaporationswerten der Wasserschale ergab als Prozente der Monatsmittel von 3 Jahren (1951/53) eine Wertereihe mit einem Minimum im Juli/August. Sie verläuft weitgehend gleichartig mit dem Gang der Temperatur, etwas modifiziert durch hohe Windgeschwindigkeiten im Frühjahr.

Tab. 3

Verhältnis der Monatssumme der Evaporation einer geschützten Wasserschale in 1,16 m Höhe zu der Monatssumme täglicher Sättigungsdefizite von 14h in 2 m Höhe in % als Mittel der Jahre 1951 — 1953.

März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November
60	58	56	47	44	43	51	55	52

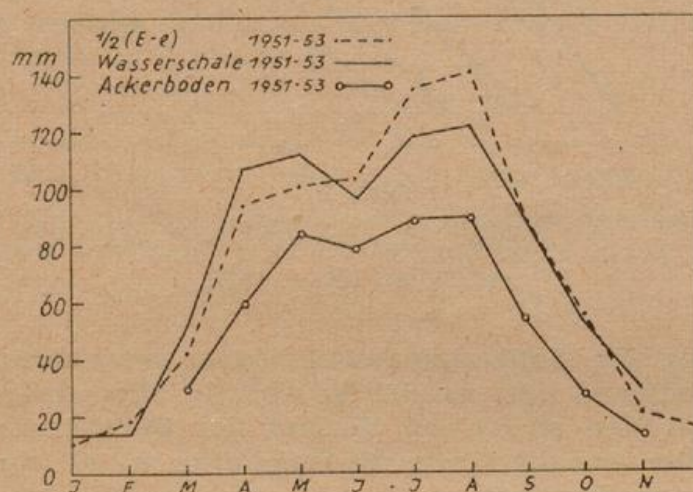


Abb. 2

Mittlere Monatssummen 1951—53 des halben Sättigungsdefizites von 14h und der Evaporation der geschützten Wasserschale in 116 cm Höhe und des anmoorig sandigen Ackerbodens mit gehaltenem Grundwasser in 40 cm Tiefe.

Im 3-jährigen Vergleich 1951/53 (Abb. 2) zeigen sowohl die Evaporationswerte der Wasserschale wie die Summenwerte des Sättigungsdefizites vom März bis August einen Anstieg. Auch im 7-jährigen Mittel des Langenhagener Sättigungsdefizites liegt das Maximum im August. Das ist hier der Monat mit der größten Evaporation „feuchter“ Flächen wie des höchsten Sättigungsdefizites.

Der Verlauf der ausgeglichenen halben Werte des täglichen Sättigungsdefizites von 14h zeigt unter Schwankungen einen Anstieg bis zum August und anschließend einen steileren Abfall (Abb. 4b).

Die Pentadenwerte der Abb. 4 wurden nach der Formel $(a + 2b + c) : 4$ ausgeglichen, um alle Ergebnisse auch mit den Angaben aus den Messungen mittels der Tontöpfe, die nur ausgeglichene Werte gewinnen lassen, (Abb. 4c) vergleichbar zu machen. Denn hier wird der Zu- und Abgangsbetrag erst über die Veränderung des Grundwasserstandes erhalten. Der zweite Kurvengang gibt die gedämpfte Kurve wieder, wie sie sich durch empirische Wahl von Koeffizienten zum Sättigungsdefizit (3) ergibt, um den Werten der Landschaftsverdunstung über verschiedenen Kulturen — bestimmt aus Abflußmessungen einer 7 km² großen Fläche — bei Hannover möglichst nahezu kommen. Es werden hier nur die Koeffizienten b_1 benutzt (3): April, Okt. = 0,3 Sept. 0,33, Mai/August 0,36, Juni/Juli 0,38. Diese so gewonnenen Werte (Abb. 4b) gelten 1953 bis zu dem Augenblick, an dem der verfügbare Vorratsbetrag an Wasser im Boden aufgebraucht ist und praktisch nur noch fallender Niederschlag die Verdunstungs-

beträge steuert (Kurve mit kleinen Kreisen im Juli/August). Im großen und ganzen sind die gleichen Schwankungen wie bei den Evaporationsbeträgen (Abb. 4a) vorhanden, wenn sie auch im Frühjahr kleiner ausfallen.

3. Evaporation annähernd feucht gehaltener Böden

Diese, aus Wasserschale bzw. Piche und dem Sättigungsdefizit erschlossenen Werte der relativen Beanspruchung wurden mit den Werten der Evaporation von Böden verglichen, die unter bestimmten Bedingungen gehalten waren. Hierfür wurden glasierte Tontöpfe von 0,35 m Durchmesser und 0,50 (bzw. 0,40) m Höhe mit dreierlei Böden (hiesigem sandig-anmoorigem Ackerboden, Lößlehm, nämlich Rübenboden und reinem Sand) gefüllt und so vergraben, daß die Topfränder etwa 4 bis 5 cm über dem Boden innen und außen herausragten. Dazu wurden gleichzeitig Messungen der Evaporation des hiesigen natürlichen Ackerbodens mit den Popoff-Zylindern durchgeführt. Ein Topf mit nur 0,40 m Tiefe wurde außerdem mit hiesigem Ackerboden gefüllt. Bei den ersteren Töpfen wurde der Grundwasserstand konstant durch Wasserzugabe und Wasserentnahme in 0,40 m Tiefe gehalten, in dem letzteren Topf in 0,30 m Tiefe.

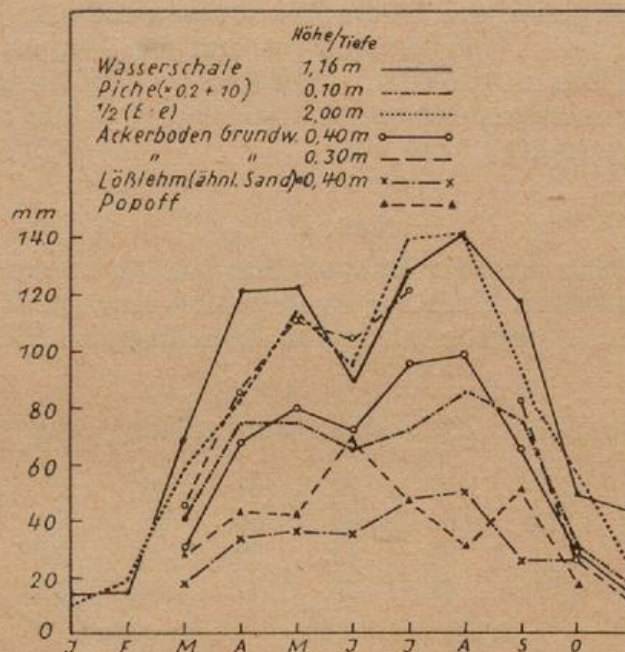


Abb. 3

Monatssummen 1953 des halben Sättigungsdefizites von 14h, der Evaporation einer geschützten Wasserschale in 116 cm Höhe, eines Piche in 10 cm Höhe, von Ackerboden mit gehaltenem Grundwasser in 30 und 40 cm Tiefe und Lößlehm sowie eines Popoff-Zylinderpaares.

Die Monatsergebnisse des Jahres 1953 (Abb. 3) weisen bei dem Topf mit Grundwasserstand in 0,30 m Höhe fast die gleichen Beträge wie die des halben Sättigungsdefizites auf. Auch der Gang der Topfmessungen mit dem Grundwasserstand in 0,40 m Tiefe und hiesigem Ackerboden zeigt mit seinem Evaporationsbetrag annähernd einen ähnlichen Gang, wenn auch die Absolutwerte niedriger liegen (im Sommer um 20 mm gegenüber der Wasserschale in 1,16 m Höhe). Sie betragen im Sommer 75 % — 80 % der Werte der Wasserschale und sinken zum Winter auf 50 % ab. Dagegen machen die Messungen mit Piche (und Wasserschale) in 10 cm Höhe zu denen in 1,16 m Höhe durchweg etwa 52 % aus.

Der feuchte Boden gibt also im Winter ebensoviel oder etwas weniger ab, als eine entsprechende Messung mit der Wasserschale oder Piche in 10 cm Höhe. Aber der

Erdboden mit 0,40 m Grundwasserstand verliert im Sommer rund 25 % der Messung einer geschützten Schale in 1,10 m mehr als etwa eine Schale gleicher Aufstellung in 10 cm Höhe abgeben würde, was auf die stärkere Erwärmung der dunklen Bodenoberfläche durch Einstrahlung zurückzuführen ist.

Die Töpfe mit Lößlehm und Sandboden und 0,40 m tiefem Grundwasser weisen nur sehr abgeschwächt ähnliche Züge ihrer Wasserabgabe auf. Ihre absoluten Evaporationsbeträge sind viel kleiner und betragen nur 47 % bzw. 30 % des hiesigen Ackerbodens. Die obersten Zentimeter dieses Lößbodens trockneten bei niederschlagsfreiem Wetter sehr rasch aus und verkrusteten in einer Art Blättchenstruktur, die den weiteren Wassernachschub von unten hemmte oder eine Folge eines an sich geringen Aufsteigens von Bodenwasser war.

Die Oberfläche des Topfes mit Ackerboden war im Gegensatz zur Umgebung in regenärmeren Zeiten immer dunkel, d. h. die Oberfläche trocknete nicht bis zur hellen Färbung aus. Trotzdem bewirkte der höhere Grundwasserstand in 0,30 m Tiefe in Schönwetterperioden einen beachtlichen erhöhten Evaporationsbetrag, was darauf schließen läßt, daß bei einem Grundwasserstand in 0,40 m Tiefe auch der hiesige Ackerboden in Zeiten größerer Beanspruchung an der Oberfläche nicht mehr als „völlig“ feucht anzusehen ist.

Die Koeffizienten, mit denen die Werte der Wasserschale in 1,16 m Höhe und das Sättigungsdefizit (E-e) versehen werden müßten, um die Evaporation des Bodens mit Grundwasser in 0,40 m Tiefe zu erhalten, schwanken über die Vegetationszeit a) als Mittel in Prozenten zusammengestellt von 3 Jahren und b) für das Jahr 1953 bei der Wasserschale ziemlich regelmäßig (Tab. 4).

Tab. 4

Verhältnis der Monatssummen der Evaporation hiesigen Ackerbodens mit konstantem Grundwasserstand in 0,40 m Tiefe zur Evaporation einer geschützten Wasserschale in 1,16 m Höhe und zum Sättigungsdefizit in 2 m Höhe in % als Mittel der Jahre 1951-53 und von 1953.

	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.
Wasserschale 1951-53	—	57	76	81	81	75	60		
Wasserschale 1953	68	56	68	80	76	70	62	56	32
(E-e) 1951-53	—	37	43	39	37	34*	31		
(E-e) 1953	39	41	36	40	36	34*	38	24	28

* sicher zu klein

Sie zeigen von April bis zum Juni/Juli ein Ansteigen und darauf wieder einen Abfall. Dieser ausgeprägte Gang ist beim Sättigungsdefizit nicht vorhanden. Hier sind die Werte mehr ausgeglichen und fallen leicht vom Frühjahr über den Sommer zum Herbst ab.

In Wirklichkeit sind aber derartig gewonnene Koeffizienten als gültig für eine durch Wasseraufstieg in den Kapillaren feucht gehaltene Ackerfläche im Sommer überhöht, da in dieser Zeit diese kleinen feuchten unbewachsenen Bodenflächen im Topf in meist mehr oberflächlich abgetrockneter Umgebung unbewachsenen Ackerbodens standen, was sich hier nicht vermeiden ließ. Mit daher wurden die schon erwähnten etwas kleineren Koeffizienten b_1 benutzt.

Die entsprechenden Koeffizienten für 1953 sind als Prozente für die Evaporation des nicht voll feuchten Lößlehms zur Wasserschale und dem Sättigungsdefizit in Tabelle 5 zusammengestellt. Hier kommt auch wieder bei der Wasserschale der Anstieg der Prozente zum Sommer und der Abfall zum Herbst (ohne Oktober) zum Ausdruck, also eine Auswirkung des Sonnenstandes. Bei dem Sättigungsdefizit ist ein solcher Gang verwischt.

Tab. 5

wie Tabelle 4 für Lößlehm und nur das Jahr 1953.

	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.
Wasserschale 1953	27	29	32	44	38	37	24	47	18
(E-e) 1953	15	21	17	20	18	18	15	20	16

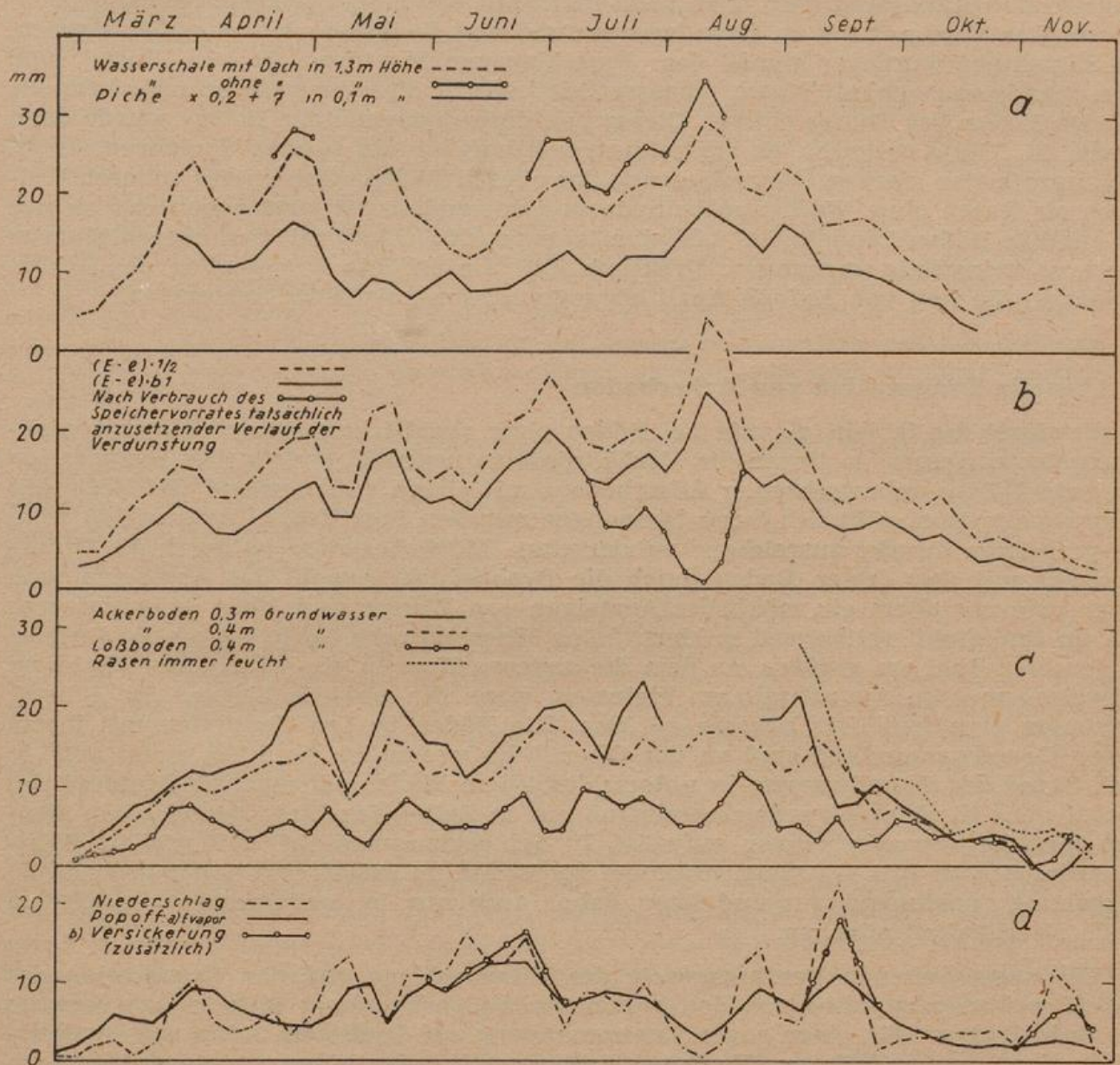


Abb. 4

Ausgeglichene Pentadenwerte 1953

- der Evaporation von geschützten und ungeschützten Wasserschalen in 116 cm und des Piche-Evaporimeters in 10 cm Höhe;
- des Sättigungsdefizites von 14h multipliziert mit $\frac{1}{2}$ und den Koeffizienten b_1 ;
- der Evaporation (bzw. Evapotranspiration) von unbewachsenem (ab September mit Rasen bewachsenem) Boden mit verschieden tief gehaltenem Grundwasserstand (bzw. bei Rasen und 0,30 m Grundwasserstand ab September durch Wasserzugabe von oben mit immer leichter Durchsickerung);
- des Niederschlags und der Evaporation eines Popoff-Zylinderpaares mit auch zugezählt dargestellter Versickerung.

Die Evaporation wirklich feuchter Böden wird sich bis zu einem gewissen Grade durch derartige Messungen mit dem Piche, der Wasserschale und dem Sättigungsdefizit darstellen lassen. Diese ergeben somit eine gute Möglichkeit, den Grad der Beanspruchung, wie sie das Wetter an das Objekt heranträgt, in gewissen Grenzen vergleichbar festzustellen.

Der Verlauf der ausgeglichenen Pentadenwerte (Abb 4c) hat bei hiesigem Ackerboden mit 0,40 m Grundwasserstand eine gute Ähnlichkeit mit dem des Sättigungsdefizites, abgesehen vom August. Anscheinend konnte in dieser Zeit der Wassernachschub in den Kapillaren nach oben nicht mehr mit der hohen Beanspruchung schritthalten. Der Topf mit 0,30 m Grundwasserstand war in diesem Monat außer Betrieb. Ab September wurde er gemäß dem Vorschlag von Mather (8) wie „Rasen“ von oben gerade so stark mit Wasser begossen, daß immer ein schwaches Durchsickern bis auf den Boden des Topfes eintrat. Dieser von dort abgenommene Betrag wurde dann wieder in Abzug gebracht. Es erscheint zweifelhaft, ob ein solches Verfahren wegen der eintretenden starken Überwässerung der oberen Bodenschichten bei anderen Kulturen als Rasen ohne Wachstumsbehinderung anwendbar ist, auch wenn es sich nur um sandige Böden handelt. Bei Lößlehm ist eine Ähnlichkeit mit den oberen Kurven nur noch gringfügig vorhanden. Praktisch fällt die erhöhte Evaporation des Ackerbodens in die Zeit von Anfang April bis gegen Anfang bis Mitte September.

4. Aktuelle Evaporation von Ackerboden

Trocknet das Objekt ab, wie bei Böden ohne oberflächennahes und damit wirksames Grundwasser, so liegen die Verhältnisse naturgemäß anders. Die Evaporation des natürlichen, unbewachsenen Ackerbodens mit einem entsprechend tief liegenden Grundwasserstand, läßt sich durch Messungen mit dem Popoffschen Zylinder (9) wohl für praktische Zwecke ausreichend wiedergeben. Möglicherweise ist durch die Unterbrechung mit dem festen Boden durch die Drahtschicht sowohl das Absickern nach unten, wie vor allem ein mögliches Ansteigen von Wasser nach oben gehemmt, was sich im Endeffekt weitgehend mildert. Seine Wasserabgabe (Abb. 4d) an die Luft ist im feuchten Juni am größten, an dem die anderen Kurven ein sekundäres Minimum aufweisen und im August mit am kleinsten, wenn die anderen Kurven ihr Jahresmaximum erreichen. Die Ursache ist klar. Die Böden in den Tontöpfen mit ihrem hohen Grundwasserstand sind an der Oberfläche wesentlich feuchter, wenn auch je nach Stand des Grundwassers in unterschiedlichem Maße, während der Meßtopf des Popoff ohne direkten Grundwassereinfluß nur in Zeiten feuchten, regnerischen Wetters ähnliche Voraussetzungen aufweist. In der regenarmen Zeit mit großem Sättigungsdefizit von Juli — August trocknete der Boden im Popoff wie in der natürlichen Umgebung zunehmend aus und kann daher auch nur in fortlaufend verringertem Maße Feuchtigkeit abgeben.

Die ausgeglichenen Pentadenwerte des Niederschlags und der Evaporation des Popoff weisen, abgesehen von den kurzen Zeiten vorhandener Sickerwasserverluste des Erdzylinders 1953, einen engen Zusammenhang auf. In diesem Jahre mit einem im allgemeinen immer höheren Verdunstungsanspruch (oder höherer potentieller Evaporation für diesen unbewachsenen Boden) als gleichzeitig Niederschlag in der Vegetationszeit gefallen ist, verdunstet „unbewachsener“ Boden ohne kapillaren Anschluß an hochstehendes Grundwasser gerade immer diesen Niederschlag zuzüglich von Beträgen aus dem verfügbaren Speichervorrat der obersten 8 bis 15 cm tiefen Bodenschicht, bei einzelnen Bodenarten auch bis 20 cm reichend, und abzüglich des Betrages, der bei einem größeren Niederschlag nach Sättigung der obersten Bodenschicht zu tief absickerte. Das Speichervermögen als verfügbare Regenkapazität betrug nach den Meßergebnissen der beiden Jahre 1952 und 1953 etwa 25 bis 28 mm. In der Meßzeit April bis November erhielt der Popoff 364 mm Regen. Durch Evaporation gingen 313 mm verloren und 38 mm als Sickerwasser.

Mit Hilfe der Beanspruchung, ausgedrückt durch das Sättigungsdefizit von 14h und seines Verhältnisses zur Evaporation feuchten Bodens gemäß auch den Topfwerten, läßt sich aus der durch Beifügung geeigneter Koeffizienten bestimmten Evaporation feuchten Bodens auch die „aktuelle“ Evaporation von unbewachsenem, fast ebenem Boden verhältnismäßig genau berechnen, d. h. entsprechend den Werten, die ein Popoff-Zylinderpaar angibt. Für die Angabe der Evaporation feuchten Bodens werden die vorher erwähnten Koeffizienten b_1 benutzt. Zur Berechnung der aktuellen Evaporation für unbewachsenen Ackerboden ist nun entscheidend zu wissen, wie groß seine für natürliche Evaporation zur Verfügung stehende maximale Regenkapazität ist. Nach hiesiger Erfahrung wird sie etwa zwischen 10 mm bei sandigem Boden und 30 mm bei schwererem Boden liegen.

Die Bestimmung wird nun so durchgeführt, daß Tag für Tag die Gestaltung des Wasserhaushaltes berechnet wird aus der Differenz von Niederschlag (N) minus aktueller Evaporation (Ev) = der „Änderung“ der verfügbaren Regenkapazität (dK) plus Sickerwasser und Abfluß (Si), also $N - Ev = dK + Si$. Die aktuelle Evaporation (Ev) ist nun immer solange annähernd gleich der Evaporation feuchten Bodens (potentielle Evaporation pEv) zu setzen, bis die leicht verfügbare Regenkapazität des Bodens (K) nahezu aufgebraucht ist. pEv wird gleich dem Sättigungsdefizit $\cdot b_1$ gesetzt. Sobald die verfügbare Regenkapazität des Bodens annähernd verdunstet ist, kann die aktuelle Evaporation Ev nur noch gleich dem noch fallenden Niederschlag N sein. Erst wenn dieser wieder gleich dem Betrag der jeweils wettermäßig bedingten Evaporation feuchten Bodens = pEv wird oder größer, ist erneut aktuelle = potentieller Evaporation.

Zweckmäßig wird die Rechnung Ende Februar begonnen, wenn der Boden sicher seine volle verfügbare Kapazität hat, oder wenn Abgaben von Sickerwasser eingetreten sind ($K \sim \text{Max}$). Ist jetzt zunächst $N - pEv = a$, also positiv, muß bei vorhandener Sättigung dieser Betrag absickern oder abfließen, $a = Si$. Der Betrag der verfügbaren Regenkapazität ändert sich praktisch nicht, $dK = 0$ und $Ev = pEv$. Wird $N - pEv = -a$, also negativ, dann kann der Boden gemäß der täglichen Differenzbeträge Wasser aus seinem Speichervorrat solange zugeben, $dK = -a$, bis über eine Reihe von Tagen seine ausnutzbare Regenkapazität erschöpft ist. Bis dahin ist annähernd $Ev = pEv$. Bei $K \sim 0$ und $pEv > N$ verdunstet im wesentlichen nur noch der fallende Niederschlag, $Ev = N < pEv$. Wird bei größeren Niederschlägen die Differenz $N - pEv = a$ wieder positiv, so füllt sich der Boden evtl. über einige Tage mit diesem verfügbaren Wasserbetrag wieder auf, $a = dK$, und Ev ist dann wieder $= pEv$. Überschreitet aber die Summe der positiven Werte des Wasserhaushaltes bei größeren Regenfällen auch den Kapazitätsbetrag $K = \text{Max}$ um b, so muß dann dieser Überschuß, $b = N - pEv = Si$, absickern oder abfließen. Er kommt für eine Evaporation nicht mehr in Frage. Wird später wieder bei geringeren Regenfällen $N - pEv = -a$, also wieder negativ, so kann der vorher wieder aufgefüllte Speichervorrat, wie oben schon erwähnt, solange zusätzlich gemäß der vollen Beanspruchung Wasser abgeben, $dK = -a$, bis eben wieder der Betrag der verfügbaren Regenkapazität im Boden verbraucht ist und $K \sim 0$ wird. Dann ist erneut die Evaporation nur noch gleich dem Niederschlag, $Ev = N < pEv$.

Für den Sommer 1953 wurde eine derartige Berechnung durchgeführt, und zwar unter der Annahme, daß der Boden eine gedachte maximal verfügbare Regenkapazität a) von 10 mm, b) von 20 mm und c) von 30 mm hat. (Tab. 6).

Diese so berechneten Werte mit einer Regenkapazität zwischen 20 mm und 30 mm entsprechen weitgehend den Popoffschen Meßwerten. Der Sommersummenwert mit der Regenkapazität von 10 mm liegt seinerseits in gleicher Höhe wie der Summenbetrag der Evaporation des Tonzylinders mit reinem Sand und Grundwasser in 40 cm Tiefe bei einem Betrag von ~ 220 mm. Für diesen reinen Sand liegt der Grundwasserstand von 0,40 m so tief, daß er praktisch für einen Nachschub in die oberste Bodenschicht kaum in Frage kommt.

Tab. 6

Monatssumme und Summe der Sommerwerte der Evaporation zweier Böden mit maximal verfügbarer Regenkapazität von a) 10 mm und b) 20 mm, c) 30 mm, dazu d) die gemessenen Werte mit dem Popoff-Zylinder und e) die Evaporation eines immer feuchten Bodens gemäß dem Sättigungsdefizit $\cdot b_1$.

	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	IV bis IX
a)	17	32	24	52	41	30	38	16	217
b)	27	32	38	65	54	30	50	21	269
c)	35	34	43	66	64	30	54	31	291
d)	25	43	42	67	48	31	49	17	280
e)	35	50	82	72	104	105	63	34	476

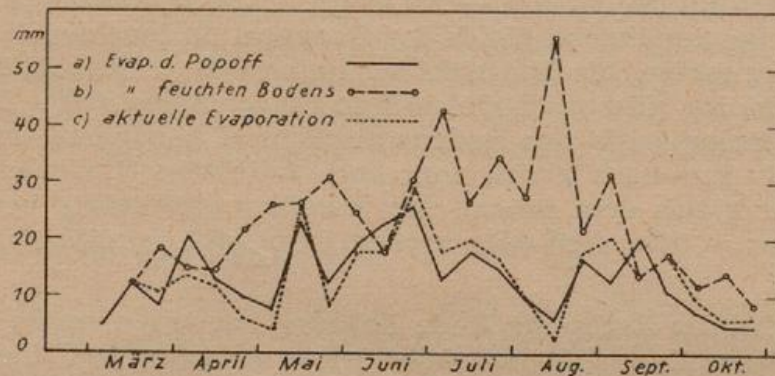


Abb. 5

Verlauf der Dekadenwerte März bis Oktober 1953 der Evaporation von Ackerboden a) bestimmt mittels Popoff-Zylinder, b) berechnet als feuchter Boden mittels des Sättigungsdefizites von 14h b_1 , c) berechne als aktuelle Evaporation bei einer angenommenen verfügbaren Regenkapazität des Bodens von 20 mm.

Der Vergleich der Dekadenwerte (Abb. 5) zeigt an 3 Stellen eine höhere Wasserabgabe, als die Evaporation einer feuchten Fläche angibt. Zwangsläufig war hier die Messung der Tageswerte des Popoff nur von 11h zu 11h durchführbar. Dann hat die Berechnung eine gleichartige Wasserabgabe der verfügbaren Regenkapazität von $K = \text{Max}$ bis $K = 0$ bei gleicher Beanspruchung zur Voraussetzung. Das ist in Wirklichkeit aber nicht der Fall. Frisch beregneter Erdboden bildet zunächst eine geschlossene Verdunstungsfläche. Nach einiger Zeit sind jedoch die Oberflächen aller kleinen Steine trocken und die evaporierende Oberfläche hat sich auf die Kapillarenöffnungen zwischen ihnen verringert. Bei weiterer Abgabe von Bodenfeuchte folgt die Wasserzuführung aus den nächsten Schichten immer langsamer, so daß mit abnehmenden K -Werten die Evaporation bei gleicher Beanspruchung auch kleiner wird. Bei häufigen Regenfällen über mehrere Tage kann daher die aktuelle Evaporation etwas höher ausfallen, als die sonst mit gutem Erfolg benutzten Durchschnittswerte der Evaporation feuchten Ackerbodens p_{Ev} . Diese Ungenauigkeiten können aber zunächst in Kauf genommen werden, zumal 2 Popoff-Zylinderpaare mit möglichst gleichartiger Füllung auch schon merkliche Unterschiede von Tag zu Tag aufweisen.

5. Vergleich zum Boden mit Bewuchs

Beim Erdboden kam das Abtrocknen der obersten Bodenschicht als neuer Faktor zu der reinen Evaporationsfeststellung hinzu. Bei einem Pflanzenbestand erschweren weiterhin 1. die wechselnde Gesamtoberfläche der Blätter wie die nach spezifisch biologischen Gesetzmäßigkeiten der verschiedenen Pflanzen sich schließenden und öffnenden Stomata und 2. die anzusetzende Größe wie Möglichkeit der Erschließung

der ausnutzbaren Regenkapazität des Bodens die Feststellung des Wasserverbrauches auf Grund gewonnener Werte der Beanspruchung von seiten der umgebenden Luft.

Thornthwaite (4) beschrift den recht aussichtsreichen Weg, den Begriff der „potentiellen“ Evapotranspiration einzuführen. Das ist die Wassermenge, die ein Pflanzenbestand an die Luft abgibt, wenn er immer genügend leicht aufnehmbares Wasser im Boden vorfindet. Dieser Wasservorrat darf nach Veihmeyer (5) dazu aber seine ausnutzbare Regenkapazität (Sättigung nach Abgang des mit der Schwerkraft absickernden Bodenwassers abzüglich des Betrages, bei dem Welken einsetzt) nur bis zu einem bestimmten Prozentsatz unterschreiten. Er muß oberhalb, oder besser genügend weit oberhalb des eigentlichen Welkepunktes liegen (z. B. für eine hohe Kartoffelernte nicht unter $\frac{2}{3}$ dieses Differenzbetrages). Nur dann wird die Evapotranspiration von der Beanspruchung durch das Wetter und zum Teil auch von der Art des Pflanzenbestandes abhängen. Eine mögliche Einwirkung einer durch immer feuchten Boden ungünstig zur Nahrungsaufnahme beeinflussten Wurzelausbildung oder von Sperrschichten im Boden kann darüber hinaus die Verhältnisse komplizieren. Veihmeyer behauptet aber auch andererseits, daß seine Experimente bei Aufrechterhaltung eines immer sehr hohen oder überhöhten Feuchtigkeitsgehaltes im Boden keine besonders großen Ernten ergeben, während bei Wiesenflächen Mather (8) fand, daß ein Feuchtigkeitsgehalt „well above“ der ausnutzbaren Regenkapazität höchsten Grasertrag brachte.

Zur Zeit der Aussaat im Frühjahr verhält sich der Boden wie feuchter, unbewachsener. Nach Herauskommen der Saat wird die Evapotranspiration des Ackers erst langsam und allmählich dann schneller mit sich stetig vermehrender, lebender Blattfläche größer werden, als dies bei natürlichem, unbewachsenem Boden bei uns der Fall ist. Sobald „völliger Blattschluß“ erreicht ist und dieser frisch bis zur Fruchtbildung anhält, kann man weitgehend annehmen, daß nun die Evapotranspiration zu gleichen Zeiten bei den verschiedenen einjährigen Kulturen und Gräsern und bei immer vorhandenem, leicht aufnehmbarem Wasser im Boden sich nur noch wenig unterscheidet. Doch scheinen nach hiesigen Messungen mit den im Feld vergrabenen Tongefäßen und gehaltenen Grundwasserstand in 90 cm Tiefe höher wachsende, leicht bewegliche Pflanzen zumindest zeitweise (z. B. Getreide nach Einsetzen des Schossens) vermehrte Wasserbeträge zu verbrauchen. Ein Einfluß größerer oder kleinerer Fruchtbarkeit des Bodens (Düngung) ist noch ungeklärt.

Mit der Reife der Kulturen läßt das Wachstum nach; die einzelnen Blattflächen altern und stellen nach und nach ihre Aufgabe ein. Damit sinkt dann die potentielle Evapotranspiration ab. Es ist anzunehmen, daß unter diesen Voraussetzungen jede einjährige Kulturart bei sonst günstigen Wachstumsbedingungen wie Boden ohne Sperrschicht — richtige Düngung und Pflege — ohne sonstige klimatische Einschränkungen einen nur für sie spezifischen potentiellen Evapotranspirationszyklus hat, der von dem Stand ihrer Lebensentwicklung und von dem Gang der an die Pflanze gestellten Beanspruchung durch das Wetter abhängt. Diese Frage bedarf noch genauere Klärung. Thornthwaite (6) neigt mehr dazu, diese Unterschiede zwischen den Kulturen nach Erreichen des Blattschlusses als klein und daher als zunächst einmal belanglos zu beurteilen.

Für praktische Anwendung ist eine Abschätzung der Landschaftsverdunstung unter natürlichen Bedingungen auf einfache Weise unbedingt notwendig. Sie ermöglicht es, Zeit und Zugabebeträge künstlicher Wassergaben zur Erhaltung einer immer genügend hohen Bodenfeuchte vor allem in der oberen 30 — 50 cm Bodenschicht zu beurteilen. Mit Beginn der Vegetationsentwicklung im Frühjahr kann zumeist der Boden als gesättigt betrachtet werden. Er ist eventuell noch zusätzlich mit einem Teil Sickerwasser in den oberen Schichten versehen und liegt also zwischen Vollsättigung und dem vollen Betrage der ausnutzbaren Regenkapazität. Ende Februar setzt im allgemeinen steigende Beanspruchung ein. Boden und junge Saat haben zunächst durch zuzüglich fallenden Niederschlag genügend Feuchtigkeit zur Verfügung, um

gemäß der Beanspruchung durch das Wetter Wasser entsprechend der potentiellen Evapotranspiration abzugeben. Deckt der fallende Niederschlag nicht diese Abgaben, wird Wasser aus dem erreichbaren Vorrat der nutzbaren Regenkapazität des Bodens entnommen.

Dieser Vorratsraum beschränkt sich, wie erwähnt, bei dem unbewachsenen Boden und tiefer gelegenem Grundwasser auf die oberste 8 bis 20 cm mächtige Schicht im allgemeinen. Er ist also klein. Schon bald liegt hier die Evaporation unter ihrem potentiellen Wert. Die sich aber ständig vergrößernden Pflanzenwurzeln erschließen abhängig von Pflanzenart, Bodengefüge und klimatischer Vorgeschichte einen größeren Vorratsraum. Bei unseren Feldkulturen werden die oberen 30 — 50 cm vor allem entleert, da hier das dichteste Wurzelnetz liegt. Aber auch aus tieferen Schichten wird Wasser herangeholt, jedoch nicht so viel, daß es bei entleertem oberem Speicherraum die Beanspruchung ohne Beeinflussung des Wachstums vor allem in den kritischen Zeiten decken kann. Bei allem spielt die Bodenart und der Pflegezustand schon eine nicht unerhebliche Rolle, je nachdem sie eine mehr oder minder große Menge leicht verwendbaren Wassers zur Verfügung stellen.

Nach den Angaben von Walter (9) speichert ein durchfeuchteter humoser Boden bis zu einer Tiefe von 55 cm etwa 110 mm verfügbares Wasser. Obwohl die Wurzellänge der Ackerkulturen im allgemeinen mit 1 — 1½ m anzusetzen ist, wird man doch nicht viel mehr als 60 mm der oberen 30 cm Zone und etwa 60 bis 80 mm aus tieferen Schichten als den Betrag leicht erhaltbaren Wassers ansehen können, nach dessen Verbrauch die Pflanze ohne genügende natürliche oder künstliche Wasserzufuhr in ihrer Entwicklung zu leiden bzw. zu welken beginnt. Gleichzeitig kommt der Wasserverbrauch schon etwa vor einer derartigen Ausschöpfung des nutzbaren Wasservorrates nicht mehr der unter gegebenen Bedingungen der Umwelt entsprechenden potentiellen Evapotranspiration nach. Bei fast rein sandigem Boden ist dieser Speichervorrat vor allem in den oberen Bodenschichten kleiner, und die Ausnutzung wird etwa bis auf ½ bis ⅔ obiger Werte zurückgehen.

Während des Winters (Oktober bis März) sollte diese Wasserentnahme der vergangenen Vegetationszeit von 80 bis 130 mm im Boden durch entsprechende Niederschläge wieder ausgeglichen werden. Das verlangt eine „Mindest“niederschlagshöhe von 80 — 130 mm zuzüglich der Winterverdunstung, die hier um Hannover etwa bis zu 100 mm beträgt, also insgesamt „~180 — 230 mm“. Diese müßten noch derartig fallen, daß von diesem Betrag nichts abfließen darf, sondern nur überschreitende Beträge. So decken bei uns Regen und Schnee niederschlagsarmer Winter — vom Abfluß unter ungünstigen Bedingungen ganz abgesehen — nicht die Wasserentnahme der vergangenen Vegetationszeit vor allem in tieferen Bodenschichten.

Aber dieser Differenzbetrag von etwa 40 — 50 mm zwischen leichten und schweren Böden ist nicht allein zur günstigeren Wasserbevorratung besserer Böden das Entscheidende. Der vor allem in Frage kommende obere Speicherraum füllt sich in Jahren mit etwas stärkeren Sommerregen, besonders in der oberen 30-cm-Schicht immer wieder einmal weitgehend auf, wobei humoser Boden insgesamt hier etwa annähernd 30 — 40 mm mehr vor dem Absickern zurückhält wie sandiger Boden. Geschieht dies in der Vegetationszeit etwa zwei- bis dreimal, so liegt der humose Boden gegenüber dem sandigen Boden dann um etwa 100 — 150 mm im Vorteil. Diese Zahlen sind Schätzungen, da wirklich gemessene Werte mir nicht vorliegen.

6. Über Einfluß und Berücksichtigung der Luftbewegung

Die potentielle Evapotranspiration wurde mit Hilfe der Beanspruchung durch das Wetter, dargestellt durch das Sättigungsdefizit von 14h und die gleichen Koeffizienten b_1 , zunächst generell zahlenmäßig festzulegen versucht. Es dürfte nur wenig erhöhten Nutzen bringen, die Beanspruchung über mehrere Tage bzw. die potentielle Evapotranspiration aus mehreren zusammengestellten, eventuell in Frage kommenden

meteorologischen Faktoren unter Aufwendung größerer Mühen zu bestimmen, um genauer zu sein, wie das auch die von Uhlig (12) durchgeführte Gegenüberstellung der nach dieser und der Methode von Penman (13) errechneten täglichen Verdunstungswerte zeigt. Das hat wohl Zweck, wenn es sich um die Gewinnung von stündlichen oder täglichen Werten handeln soll.

Auch selbst von einer naheliegenden direkten Berücksichtigung des Windes in Verbindung mit dem Sättigungsdefizit wurde zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration Abstand genommen. Indirekt steckt die klimatologische Windgröße (oder der Austausch) schon weitgehend mit im Sättigungsdefizit und in den Koeffizienten verbunden mit der Tageslänge. Bei der vorher durchgeführten Bestimmung der aktuellen Evaporation unbewachsener Böden wurde auch nur das Sättigungsdefizit benutzt. Es ergab sich eine recht gute Übereinstimmung mit den mittels der Popoffzylinder gemessenen Werten. Die verschiedenen Windstärken haben bei längerer Andauer anscheinend nur bei voll benetzten Flächen wie bei einer Ackerfläche sofort nach Regen, aber nicht bei der Wasserabgabe aus den Kapillaren mit ihrem verzögernden Nachschub einen größeren Einfluß auf die Verdunstung. Zum anderen bin ich mir über die Windwirkung auf die Transpiration der Pflanzen nicht klar, die ja im Sommer die eigentlich wirksame, verdunstende Oberfläche über unseren Kulturlächen darstellen.

Ich stützte mich dabei auf die schon früher (3) angezogene Bemerkung von Walter (10), der als Zusammenfassung diesbezüglich vorliegender Arbeiten schreibt: „Mit zunehmender Windstärke nimmt die Transpiration zunächst zu, doch wird bald ein Maximalwert erreicht, der bei den einzelnen untersuchten Arten bei verschiedener Windgeschwindigkeit (2 — 4 m/sec) und höher liegt.“ (Wo gemessen?) Das sind aber Geschwindigkeiten, die mittags wohl über Feldern fast immer herrschen, wenn auch nicht zwischen den Blättern der Pflanze, worüber aber bei verschiedenen Kulturen und Windstärken keine Messungen vorliegen.

Man muß annehmen, daß diesem Umstande mehr rein pflanzenphysiologische Vorgänge zugrunde liegen und weniger eine so rasch zu weit gehende Austrocknung des nutzbaren Speichervorrates an Wasser im Boden. Sonst dürfte eine solche Bremsung der Transpiration unter Umständen gar nicht oder erst nach einigen Tagen eintreten. Bei heiterem Strahlungswetter und großem Sättigungsdefizit transpirieren die Pflanzen bei noch ungehemmtem Wassernachschub stark, schon zur Abkühlung der Blätter. Aber bei Windzunahme wird dann eine notwendigerweise sich vergrößernde Transpiration als unnötig oder schädlich durch Verengen der Spaltöffnungen verhindert. Jedes erzwungene Schließen der Spaltöffnungen ist aber ein Nachteil (verminderte CO_2 -Assimilation). Infolgedessen beeinflußt nach Walter (10) windiges Wetter stets den Ertrag unserer Kulturpflanzen ungünstig, wenn sich der Schaden auch nicht über eine Störung oder Veränderung des Wasserhaushaltes kundtut.

Außerdem liegt eine wirkliche, örtlich unbeeinflusste Feststellung der Windstärke zumeist nicht vor, sondern es müßte ein mittlerer, wahrscheinlich einer Wetterkarte entnommener Wert benutzt werden. Ist das Gelände aber nur etwas mehr örtlich mit Busch und Bäumen bestanden, so treten diese örtlichen Faktoren, z. B. bei Messungen mit Evaporimetern, stark in den Vordergrund und lassen sich nur durch örtliche Feststellungen erfassen, während es hier doch mehr auf eine Darstellung einer allgemein wirksamen klimatischen Größe über Feldkulturflächen ankommt. Daher ist es zur Gewinnung vergleichbarer Daten wichtig, daß bei aller Unbequemlichkeit alle direkten Messungen der Beanspruchung (Wasserschale, Piche) über freiem Ackergelände durchgeführt werden.

In Langenhagen war 500 m vom Meßfeld im Ackergelände entfernt ein weiterer Piche in 1,30 m Höhe, aber etwas durch die Amtsbaracke und Buschland geschützt, aufgestellt worden. Diese Messungen betrugen vom April bis Juni rund 75 % der Werte über dem Ackergelände und gingen dann mit Abnahme der Sonnenhöhe kon-

tinuierlich auf rund 50 % im Oktober zurück (Tab. 7). Der Unterschied ist beachtlich, dürfte sich aber wohl beim Vergleich mit Messungen in Bodennähe verringern. Die mittleren Windwerte von 14h und die Tagesmittel geben allein keine Erklärung für den einseitig anhaltenden Abfall der %-Werte vom Juni zum Herbst. Es ist anzunehmen, daß im April und auch Mai schützende Belaubung noch nicht so entwickelt war.

Tab. 7

Monatliche Evaporationsbeträge des in gleicher Aufstellung, aber geschützter hängenden Piche in 1,30 m über Boden, außerdem in % der Messung auf freiem Acker-
gelände; dazu mittlere Windstärken in 12 m Höhe.

	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.
cm ³ × 0,2 = ~ mm	86	77	64	60	81	62	20
%	73	71	77	64	60	56	49
Wind 14h	3,0	2,7	1,9	3,3	3,1	3,2	1,8
Wind Tagesmittel	2,3	2,3	1,6	2,2	2,4	2,4	1,3

7. Aktuelle Evapotranspiration

So ergibt sich ein gutes Vermögen, die tatsächliche Evapotranspiration unter natürlichen Bedingungen abzuschätzen. Im Frühjahr sind die Niederschläge noch oftmals größer, als die um diese Zeit wirksame potentielle Evaporation unbewachsenen Ackerbodens oder die potentielle Evapotranspiration junger Wintersaaten. Da dann der Boden meist noch seine volle Regenkapazität besitzt, fließt oder sickert dieser Mehrbetrag mit etwas Verzögerung ab, wie in regenreicheren Klimaten zum großen Teil auch im Sommer ($N > \text{pot. Evapot.}$). Wird der Niederschlag geringer als die potentielle Evapotranspiration, so wird der Differenzbetrag solange aus den jeweils nach Bodenart und Wurzelfülle zur Verfügung stehenden Speichervorrat genommen, bis er annähernd aufgebraucht ist. Anschließend kann nicht viel mehr verdunsten als gerade Niederschläge fallen, sofern sie nicht in kurzer Zeit so heftig niedergehen, daß ein oberflächlicher Abfluß eintritt. Diese Minderverdunstung wird erst wieder beendet, wenn die Niederschläge größer als die gleichzeitig herrschende potentielle Evapotranspiration geworden sind. Das tritt hier im Herbst ein. Es kann aber auch schon im Sommer der Fall sein, wenn auch u. U. nur vorübergehend. Dann wiederholt sich obiger Vorgang. Mit den Überschüssen der Niederschläge füllt sich der Speicherraum wieder auf. Weitere Überbeträge müssen dann absickern oder abfließen.

Auf Grund der Sommerniederschläge April bis September — die hier im allgemeinen kleiner sind als die potentielle Evapotranspiration — schwankte somit die größtmöglich gewesene Verdunstung in den einzelnen Jahren von 1947 bis 1953 bei Hannover auf humosem Boden zwischen 430 und 550 mm über das Sommerhalbjahr (Tab. 8).

Tab. 8

- A) Summe der Niederschläge April — Sept. für die Jahre 1947 — 1953 in Langenhagen und vieljährig von Hannover
 B) Höchstmöglich gewesene Sommer-Evapotranspiration (April bis Sept.)
 C) Aus Abflußmessungen bestimmte Jahres-Evapotranspiration
 D) Gemessene Abflußbeträge April — September (alles in mm)

	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	vieljährig
A)	325	448	364	401	392	329	345	365
B)	430	550	470	500	500	430	450	480
C)	—	—	—	566	565	—	—	—
D)	—	—	—	40	31	—	—	—

Die Sommer-Evapotranspiration unter B) wurde berechnet unter der Annahme, daß die Beträge in dieser Zeit für Abfluß und Absickern klein und demnach zu vernachlässigen sind.

Da aber 1950 und 1951 40 bzw. 31 mm abgeflossen sind, hat die wirkliche sommerliche Evapotranspiration etwa bei 460 bzw. 470 mm gelegen und die winterliche Oktober — März bei 90 — 100 mm.

Dieser Abfluß einer 7 km² Einzugsfläche (12) stammte z. Teil von langsam abfließendem Senkwasser, also von Niederschlägen, die im Winterhalbjahr gefallen waren, und aus dem Absickern und Abfluß von größeren Niederschlägen vor allem im Frühjahr. Letzteres kann man bei normalen Niederschlägen etwa mit durchschnittlich 20 bis 30 mm befriedigend genau berücksichtigen, so daß sich daraus die effektive Verdunstung der hiesigen Landschaft während der Vegetationszeit April — September mit 400 — 500 mm ansetzen läßt. Auf rein sandigen Böden dürften die Beträge der Landschaftsverdunstung „mindestens“ um 50 mm kleiner gewesen sein.

Wirkliche Verdunstung über Gelände „fortlaufend“ zu messen, ist z. Zt. kaum oder nur mit recht großem Aufwand möglich. Auch für die nähere Zukunft ist kaum eine Besserung zu erwarten. So ist zu versuchen, mit den Werten der relativen Beanspruchung unter Zuhilfenahme von bekannten Werten der Jahresverdunstung und dem Pflanzenverhalten in, wenn auch abgesonderten Testgefäßen inmitten des Ackers den wahren Gang der potentiellen Evapotranspiration (4) zu bestimmen. Aus diesen Angaben und dem Niederschlag läßt sich auch der wirkliche Evaporationsbetrag über den Sommer angeben. Erforderlich ist hierzu die Kenntnis von dem Verhalten des Bodens im Hinblick auf seine nutzbare Regenkapazität, also die Speicherung von leicht den Kulturpflanzen zur Verfügung zu stellendem Wasser.

8. Beobachteter Wasserbedarf und Beregnung

Über die Zeit von April bis September 1951 hat aber ein im Rasen eingegrabener Tontopf mit gleichem Rasen bepflanzt und gehaltenem Grundwasser in 0,40 m Tiefe 700 mm verbraucht, d. h. 200 mm und mehr als obiger Höchstwert der aktuellen Evapotranspiration angibt. Eine Wiese hätte also zur Deckung dieses Fehlbetrages 7 Beregnungen zu je 30 mm benötigt. 1952 verbrauchte von April bis September ein Tontopf, bepflanzt mit Zuckerrüben inmitten eines Zuckerrübenfeldes und gehaltenem Grundwasser in 0,85 m Tiefe, 650 mm; ein solcher mit Kartoffeln in entsprechendem Feld 600 mm und ein gleicher mit Hafer und mit über August und September belassenem Stoppelboden 650 mm.

Diese Werte können zunächst nur einen Anhalt geben und bedürfen der Wiederholung und besserer Versuchsbedingungen. Sie zeigen jedoch, daß „hier“ unter allen Umständen gemäß der potentiellen Evapotranspiration oder dem Wasseranspruch der Pflanzen, um sorglos wachsen zu können, etwa um 150 bis 200 mm zu wenig Niederschlag fallen oder besser gefallen sind. In gleicher Höhe liegen die Wassergaben, die in den beiden letzten Jahren bei ähnlichen Böden zum Rübenanbau mehr gefühlsmäßig auf Grund von Beobachtungen der Bodenfeuchte künstlich zugegeben worden sind, um bessere Erträge zu erzielen.

Bei angenommener voll ausnutzbarer Zuführung einer solchen Wassermenge durch Niederschlag oder künstliche Zugabe ist noch in einem gewissen Umfang eine leidlich ausgeglichene Verteilung erforderlich. Eine Auffüllung zu irgendeinem Zeitpunkt bis an oder über den Wert der nutzbaren Regenkapazität hinaus, muß auf jeden Fall vermieden werden, schon damit kein Wasser unwirtschaftlich absickert. Aber der Betrag des leicht von der Pflanze aufnehmbaren Wassers in der oberen, etwa 30 bis 50 cm tiefen Schicht soll auch nicht nur vorübergehend unter einen Schaden verursachenden Grenzwert sinken. Doch empfiehlt sich aus wirtschaftlichen Gründen, bei einer Beregnung möglichst nahe an diesen unteren Grenzwert heranzugehen und mit

einem gewissen Abstand jeweils vom oberen entfernt zu verbleiben; nicht zuletzt mit aus dem Grunde, daß gelegentlich auftretende stärkere Sommerregen auch dann immer noch die Möglichkeit finden, ganz oder wenigstens teilweise nutzbringend gespeichert werden zu können.

Die monatlichen Evaporationsbeträge (3) zeigen bei Kartoffeln und Hafer ein ganz ausgeprägtes Julimaximum. Bei Rasen halten sie sich über Juni, Juli und August etwa gleich hoch wie bei der Zuckerrübe Juli — August. Durch die gefallenen Niederschlagsmengen wurden die geforderten Wasseransprüche nur z. T. gedeckt. Unter der Annahme, daß der Boden noch einen leicht verfügbaren Wasservorrat von 100 mm zur Verfügung stellt, hätten hier 1953 zur Befriedigung der Wasseransprüche bei Rasen im Juni 2, im Juli 3 und im August und September 1 Wassergabe von je 30 mm künstlich hinzugefügt werden müssen; beim Hafer im Juni 2 und im Juli 6, bei der Zuckerrübe im Juli 3, August 3 und September 1 und bei der Kartoffel im Juli 5 und im August 1. Mit diesen Gaben plus dem gefallenen Niederschlag plus einem mittleren Bodenvorrat von 100 mm wären die Ansprüche der einzelnen Kulturen gerade befriedigt worden. Aber nach dem Abernten z. B. des Hafers oder der Kartoffel wäre der Boden trotz aller dieser Wassergaben für die Pflanze annähernd trocken geblieben (trockener Untergrund), sofern nicht bald folgender Regen bei einer nun geringer gewordenen Evaporation unbewachsenen Bodens eine Anreicherung herbeiführt.

Bei Braunschweig hat man im Sommer bei Zuckerrüben „mittels Beobachtung der Bodenfeuchte“ versucht, durch künstliche Beregnung den Boden nicht unter einen, das Wachstum schädigenden Betrag abtrocknen zu lassen. Es wurden in 5 Gaben ~ 190 mm zugeführt. Stellt man nachträglich mit Niederschlag und Sättigungsdefizit von $14h \times b_1$ eine Summenkurve täglicher Haushaltswerte auf, so passen sich die einzelnen, aus den Feuchtebeobachtungen des Bodens am Ort gegebenen Wasserspenden jeweilig gerade den Zeitpunkten an, an denen ein Defizit von höchstens 120 mm erreicht wird (Abb. 6). Die untere Kurve zeigt den Verlauf der an sich so

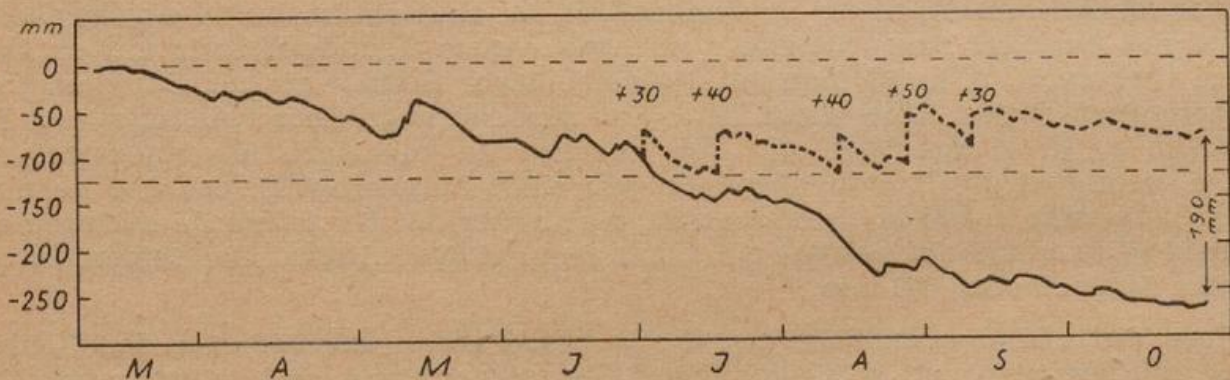


Abb. 6

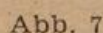
- a) Wasserhaushaltskurve eines Zuckerrübenfeldes für Braunschweig-V., berechnet aus Niederschlag und Sättigungsdefizit b_1 ;
b) Verlauf der Kurve unter Hinzufügung künstlicher Beregnungsgaben, 1953.

berechneten, unter einem Defizit von 125 mm aber fiktiven Haushaltsskurve, die obere den Verlauf des täglichen Haushaltsstandes mit den eingesetzten künstlichen Regengaben.

Der März war in diesem Jahre 1953 sehr trocken, so daß die Haushaltsskurve von der Null-Linie, als dem Zustand der Bodensättigung der obersten Schichten, an sofort absinkt. 1952 war dies nicht der Fall. Siehe unter (3) Abb. 5. Dort zeigte die Haushaltsskurve einen Anstieg Ende März bis etwa $+50$ mm. Der größte Teil dieses Betrages mußte daher abfließen oder absickern. Es ist dies verlorenes Wasser, wenn wie 1952 der Betrag der nutzbaren Regenkapazität durch Niederschläge über das Winterhalbjahr von über 200 mm mit wieder vollständig aufgefüllt worden ist. In derartigen

Diese mit Hilfe der Bodenfeuchte gesteuerte Berechnung besonders im Hinblick auf den jeweilig ausgewählten Zeitpunkt bestätigt die Brauchbarkeit der hier nachträglich auf die vorher geschilderte Art aufgestellten, fortlaufenden Bestimmung des Wasserhaushaltes im Boden mit Hilfe einfachster klimatologischer Werte.

In Abb. 7 befindet sich als untere Kurve wieder die berechnete Haushaltskurve.



die naturgemäß unter einem Defizit von etwa 120 mm (im Falle a) sicher schon eher) wieder nur einen fiktiven Wert hat. Darüber sind die Haushaltskurven gezeichnet, die unter Einbezug der Regengaben entstanden sind. Im Falle a) setzte die Beregnung im April sowohl aus Haushaltsgründen wie auch aus pflanzenphysiologischen Gründen viel zu zeitig ein und wurde im Juli für den tonigen Boden etwas zu spät und dann zu stark durchgeführt. Es ist als sicher anzunehmen, daß ein Teil dieser Gabe von 100 mm und vor allem der nächsten von 70 und 40 mm „nutzlos und zumindest unwirtschaftlich“ abgesickert ist oder sogar durch Überwässerung des Bodens schädlich gewesen sein kann, schätzungsweise zu 50 mm, ein Betrag, der aber in der Haushaltskurve hier absichtlich noch mitgeführt wird. Diese sonst am Ende in der Gesamtsumme dann fehlenden 50 mm hätten, wenn notwendig, ohne weiteres auch dann aus dem angereicherten Speichervorrat des Bodens entnommen werden können. Immerhin wurde bei diesem tonigen Boden ein „Mehrertrag“ gegenüber unberegnetem Feld der Umgebung von 160 dz/ha erzielt (Tab. 9).

Zuckerrüben Erträge in dz/ha, Bodenzahl und berechnete Fläche in Marzhausen 1953.

— 8/19 —

Bei den anderen Versuchen b) und c) ist in beiden Fällen, vor allem aber bei c), zu spät begonnen und nicht ausreichend genug berechnet worden. Im Falle c) fehlten auch weitere Wassergaben im August von gut 50 mm. Daher verminderte sich hier sicher die Zunahme des Ertrages unter Berechnung erheblich auch gegenüber dem ebenfalls nicht zweckmäßig berechneten Versuchsfeld b).

Insgesamt dürfte die Evapotranspiration als Summe der Zeit April bis Oktober Werte von 530 bis 600 mm ergeben haben (Tab. 9). Bei dem trockenen März ist ein Abfluß des geringfügig gefallenen Niederschlags bei wenig geneigtem Gelände praktisch nicht zu berücksichtigen. Sobald jedoch die Haushaltskurve die Grenze von etwa —125 mm, bzw. bei leichten Böden schon eher, als Entnahme aus dem Speichervorrat des Bodens unterschreitet, vermindert sich die Evapotranspiration weitgehend und ein fortschreitendes Absinken der wirklichen Haushaltswerte hört annähernd auf. Daher das Abzugsglied in der Tabelle 10.

Tab. 10
Summe der Evapotranspiration

	Niederschlag IV—X		Berechnung		Speicher- vorrat	Abzugsglied)	Summe
Braunschweig V.	320	+	190	+	90	—	= 600
Friedland M. a)	314	+	300	+	0	—	= (614)
Friedland M. b)	314	+	160	+	125	—40	= 559
Friedland M. c)	314	+	100	+	190	—70	= 534

*) (bei Unterschreiten eines unteren Grenzbetrages der leicht ausnutzbaren Regenkapazität)

Das letzte Beispiel lehrt deutlich, daß mehr oder weniger nach Gefühl oder rein arbeitstechnischen Gründen durchgeführte Berechnungsversuche unzweckmäßig und unwirtschaftlich sind und der Landwirtschaft kaum Hinweise auf eine rationelle Berechnung erbringen. Mit Hilfe einer derartigen, wie hier als ersten Versuch durchgeführten Berechnung des Wasserhaushaltes des Bodens besteht die Möglichkeit, den Zeitpunkt einer notwendigen Berechnung und ihre zweckmäßige Gabe anzugeben, damit die Restgröße der ausnutzbaren Regenkapazität oberhalb eines unteren Grenzbetrages gehalten wird. Bei Anwendung der Berechnung mit Hilfe einer derartigen Haushaltsbestimmung, vielleicht spezifisch für jede Kultur, wird diese nie Mangel leiden, sondern kann gemäß der Verdunstungsbeanspruchung durch die umgebende Luft bei möglichst geringen Wasserabgaben doch soviel Wasser erhalten, als sie zu bestem Gedeihen notwendig hat. Desgleichen können stärkere Sommerregen weitgehendst im Bodenspeicherraum noch aufgefangen und für weitere Verwendung bereit gestellt werden.

Zusammenfassung

Das Wetter steuert die Wasserabgabe der verschiedenen immer gleichmäßig feucht gehaltenen Flächen. Die Größe des Wasserverlustes hängt bei Testflächen von der Art und Größe, der Färbung und der Aufstellungshöhe über Boden ab. Alle derartigen Meßanordnungen geben nur relative Werte der Beanspruchung durch das Wetter. Sie sind aber aufeinander reduzierbar.

In weitem Umfang genügt allein die Feststellung des Sättigungsdefizites von 14h als eines sehr wesentlichen Klimafaktors, um über Tagesgruppen ähnliche relative Werte der Beanspruchung zu gewinnen, die auf obige Meßwerte reduzierbar sind.

Die Wasserabgabe von Ackerböden, unbewachsen oder mit Kulturen bestanden, an die Luft wird, wenn sie immer als feucht (aber nicht voll benetzt) angesehen wer-

den können, nach Thornthwaite potentielle Evaporation oder Evapotranspiration genannt zum Unterschied von den wirklich eingetretenen aktuellen Werten.

An Hand der gemessenen Werte der Beanspruchung und auf Grund der Flächenverdunstung begrenzter Kulturlandschaft wurde durch Wahl von passenden Koeffizienten das Sättigungsdefizit von 14h ohne Zusatz eines Windfaktors benutzt, um die potentiellen Werte zu bestimmen. Es wurde hier zunächst kein Unterschied zwischen verschiedenen Gruppen von sonst unbehindert wachsenden Kulturpflanzen gemacht, obwohl er anzunehmen ist.

Bei Kenntnis der potentiellen Verdunstungswerte ist es relativ einfach, die aktuelle Wasserabgabe als die Evaporation von Ackerböden oder die Evapotranspiration von Pflanzendecken über Pentaden bzw. Dekaden fortlaufend zu bestimmen. Hierzu muß die verfügbare oder ausnutzbare Regenkapazität des betreffenden Bodens bekannt sein.

Die berechnete aktuelle Evaporation des Ackerbodens kann mit den Werten eines Popoffgerätes verglichen werden. Bei bewachsenem Boden läßt sich an Hand von Beregnungsversuchen die Brauchbarkeit und damit die Nützlichkeit einer derartigen Abschätzung des Wasserhaushaltes aufzeigen und Wert und Unwert von künstlichen Regengaben nach Zeitpunkt und Größe beurteilen. So ist die wirtschaftliche Steuerung einer Beregnung ohne großen Aufwand möglich.

Für beregenbare Flächen ist es vorteilhaft, den Entzug an Bodenfeuchte bis nahe an die untere Grenze zuzulassen, von wo ab durch Mangel an Wasser eine Beschränkung im Pflanzenwachstum eintritt.

Auf nicht bewässerbaren Äckern wird es möglich sein, die Einwirkungen von Wassermangel auf die zu erwartenden Erträge auch gemäß solcher Bilanzkurven mit abzuschätzen. Die aus Wassermangel resultierenden Nachteile können allerdings durch erleichterten Krankheitsbefall bei den durch Welkeerscheinungen geschwächten Pflanzen noch verstärkt werden.

Diese noch genauer festzulegenden Zusammenhänge werden der Klimatologie eine dankenswerte Aufgabe zuweisen, „an Hand des vorhandenen Beobachtungsmaterials“ die verschiedenen Landstriche auf die unterschiedlichen, den Wasserhaushalt beeinflussenden Faktoren und die daraus resultierenden Folgen zu untersuchen.

Ich habe den Herren Harry Müller und Walter Schulz für ihre Hilfe bei den Messungen zu danken.

Literatur

- (1) Sutton, O. G.: Micrometeorology. London 1953).
- (2) Foster, E. E.: Rainfall and Runoff. New York (1949).
- (3) Haude, W.: Verdunstungsmenge und Evaporationskraft eines Klimas. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 42, 228 (1952).
- (4) Thornthwaite, C. W.: An approach toward a rational classification of climate. The Geogr. Rev. 38, 55 (1948).
- (5) Veihmeyer, F. G. and Hendrickson, A. H.: The permanent wilting percentage as a reference for the measurement of soil moisture. Transact. Amer. Geophys. Un. 29, 887 (1948).
- (6) Thornthwaite, C. W.: Agricultural climatology at Seabrook Farms. Weatherwise 4, 27 (1951).

- (7) Thornthwaite, C. W. and Mather, I. R.: The role of evapotranspiration in climate. Arch. Meteor. Geophys. Biokl. B 3, 16 (1951).
- (8) Mather, R.: Design and evaluation of a modified evapotranspirometer. Micro-meteorology of the surface layer of the atmosphere. Interim. Rep. The John Hopkins Univ. No 15, 11 (1951).
- (9) Schubach, R.: Wasserhaushaltsuntersuchungen an verschiedenen Bodenarten. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 40 (1952).
- (10) Walter, H.: Grundlagen der Pflanzenverbreitung. Ludwigsburg (1950).
- (11) Uhlig, S.: Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten. Mitt. Dt. Wetterd. Nr. 6 (1954).
- (12) Haude, W.: Abfluß, Grundwasserstand, Verdunstung einer fast ebenen begrenzten landwirtschaftlichen Nutzfläche. Wasser und Boden 5, 255 (1953).
- (12) Penman, H. L.: Physics in agriculture. J. Sci. Instr. Phys. Industr. 25, No 12 (1948).

