

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.

# Mitteilungen

des

Deutschen Wetterdienstes

---

Nummer 6

Bad Kissingen

Januar 1954

---

DK 551.573

## Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten

von

Dr. Siegfried Uhlig, Bad Kissingen

Einige Ergebnisse dieser Untersuchung wurden auf der 1953 in Berlin stattgefundenen Tagung der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, Zweigverein Bad Kissingen, vorgetragen.

## INHALT

	Seite
A. Einführung .....	3
B. Vergleichsmessungen .....	4
1. Wildsche Waage .....	4
2. Piche-Rohr .....	4
3. Popoff-Gerät .....	4
4. Bodenfeuchte-Messung .....	5
C. Methoden zur Berechnung der potentiellen Verdunstung aus klimatologischen Daten .....	5
1. Berechnung nach Albrecht .....	6
2. Berechnung nach Haude .....	7
3. Berechnung nach Penman .....	8
4. Berechnung nach Thornthwaite .....	10
D. Ergebnisse vergleichender Verdunstungsbestimmungen in Bad Kissingen .....	10
E. Methoden zur Berechnung der aktuellen Verdunstung aus klimatologischen Daten .....	15
1. Berechnung nach Albrecht .....	15
2. Berechnung nach der „Kissinger Methode“ .....	17
3. Beispiele .....	19
F. Zusammenfassung .....	23
Literatur .....	23



## A. Einführung

Für den im praktischen Dienst stehenden Agrarmeteorologen ist es immer wieder sehr unbefriedigend, auf Anfragen von Landwirten, Gärtnern und anderer Interessenten nach dem mittleren Gang der Verdunstung an einem Ort oder nach der dort in einem bestimmten Zeitraum tatsächlich verdunsteten Wassermenge keine wenigstens einigermaßen befriedigende Antwort erteilen zu können. Bei den praktischen Problemen, die für solche Anfragen meist den Hintergrund abgeben (z. B. eine genau kontrollierte Beregnung) kommt es in der Regel gar nicht auf eine allzu große Genauigkeit der Verdunstungsmengen an, sondern vielmehr auf Angaben über die Größenordnung der Verdunstung in einem bestimmten Zeitabschnitt. Wir brauchen also nicht auf eine endgültige und genaue Methode zu warten, sondern wir können dem Praktiker schon mit einigermaßen realen Abschätzungen einen großen Dienst erweisen.

Für den Agrarmeteorologen ist es naheliegend, sich für eine solche Abschätzung der klimatologischen Daten zu bedienen. Allen anderen bekannten Methoden gegenüber bietet eine Berechnung der Verdunstung aus Klimawerten zwei wesentliche Vorteile:

1. Man benötigt keine neuen instrumentellen Messungen, sondern kann das Beobachtungsmaterial des bereits vorhandenen, relativ dichten klimatologischen Beobachtungsnetzes verwerten.
2. Man kann die Verdunstung für bereits vergangene Zeiträume, aus denen keine direkten Messungen dieser Größe vorliegen, berechnen und damit noch nachträglich für interessante Perioden eine Wasserbilanz aufstellen.

Die Entwicklung einer Methode zur Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten setzt allerdings das Vorhandensein glaubwürdiger Meßwerte der Verdunstung voraus. Da wir die mittlere Gebietsverdunstung, also etwa die Verdunstung in dem unterfränkischen Trockengebiet, im Emslandmoor oder in der Magdeburger Börde kennen wollen, könnte man daran denken, die monatlichen Verdunstungssummen der Flußgebiete als Vergleichswerte zu benutzen. Diese wurden errechnet, indem man die aus Niederschlag und Abfluß gewonnene jährliche Verdunstungsmenge auf die einzelnen Monate nach einem Schlüssel verteilte, den die an verschiedenen Stellen durchgeführten Lysimetermessungen lieferten. Allerdings beziehen sich diese Zahlen auf ganze Flußeinzugsgebiete, während wir unseren Testgebieten meist engere Grenzen ziehen und darauf achten müssen, daß es sich um möglichst einheitliche Gebiete handelt, für die eine bestimmte Klimastation wirklich repräsentativ ist.

Auch die Lysimeter selbst und die Bodenfeuchte-Bestimmungen geben uns Vergleichszahlen vor allem für kürzere Zeitspannen. Man muß nur mit der nötigen Kritik an die Werte herangehen. So ist beispielsweise in einem Flußgebiet das Verhältnis der Verdunstung zum Abfluß ein anderes als zur Summe aus Oberflächenabfluß und Sickerung in 25 cm Tiefe bei einem P o p o f f -Gerät. Daß gerade dieses Verhältnis bei der Berechnung der aktuellen Verdunstung aus Klimadaten eine Rolle spielt, wird noch gezeigt werden. Damit sind die wesentlichsten Quellen für Vergleichsmaterial bereits genannt.

Die schon bekannten, mit klimatologischen Werten operierenden Methoden haben sich fast ausnahmslos die Bestimmung der potentiellen Verdunstung zum Ziel gesetzt.

Eine potentielle Verdunstung findet dann statt, wenn genügend Wasser vorhanden ist, das entsprechend dem Verdunstungsanspruch der Luft (Dampfhunger) von

einer Wasserfläche oder von einer beliebigen anderen Oberfläche, also auch vom Boden aus, verdunsten kann. Damit steht diese Größe im Gegensatz zur aktuellen Verdunstung bei nicht mehr ausreichender Wasserversorgung der verdunstenden Oberfläche.

In Bad Kissingen wurden 1953 für einen Zeitraum von zwei Monaten (11. Mai bis 10. Juli) vier Methoden zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung bewachsener Landflächen untereinander und mit instrumentellen Messungen verglichen. Obwohl die angewandten Methoden zum Teil ausdrücklich nur für längere Zeiträume entwickelt wurden, betrachteten wir vor allem Tages- und Pentadenwerte, da uns in der Agrarmeteorologie meist die Verhältnisse kürzerer Zeiträume interessieren. Als Versuchsgelände wählten wir ein durch Hecken und Häuser stark windgeschütztes Rasenstück. Die benötigten klimatologischen Werte wurden in einer normalen Thermometerhütte in 2 m Höhe gewonnen; in gleicher Höhe wurde auch der Windweg gemessen und daraus das Tagesmittel der Windgeschwindigkeit berechnet. Über die Vergleichsmessungen wird zuerst, über die Berechnung der potentiellen Verdunstung in den folgenden Kapiteln berichtet.

Das bei unseren Versuchen gewonnene Beobachtungsmaterial wurde schließlich noch zu einigen Versuchen herangezogen, die aktuelle Verdunstung aus Klimadaten zu errechnen, wobei die Albrechtschen Arbeiten richtungweisend waren. Die Ergebnisse wurden im Kapitel E zusammengefaßt.

Die Beobachtungen hat Herr A. K i e s e l unter Opferung vieler freier Stunden angestellt; er war auch an dem Aufbau der Instrumente und an der Auswertung der Meßergebnisse hervorragend beteiligt. Dafür gebührt ihm besonderer Dank.

## B. Vergleichsmessungen

### 1. Wildsche Waage

Eine Wildsche Waage mit einer verdunstenden Wasserfläche von 250 cm<sup>2</sup> wurde in 1 m Höhe in einer Thermometerhütte aufgestellt, deren Seitenwände so weit herausgenommen waren, daß die Waage noch gegen Regen und direkte Sonnenstrahlung geschützt blieb. Die verdunstete Wassermenge konnte jeden Morgen um 8 Uhr an einer Skala unmittelbar in mm abgelesen werden. Nach der Ablesung wurde die Schale immer wieder mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Damit wurde vermieden, daß sich durch ein Größerwerden des Randes der Schale über dem Wasserspiegel dessen Windschutz ständig vermehrte.

### 2. P i c h e - Rohr

In der offenen Hütte war neben der Wildschen Waage ein P i c h e - Rohr angebracht worden, das damit ebenfalls gegen Strahlung und Niederschlag geschützt war. Dieses Piche-Rohr bestand aus einem oben geschlossenen, in 0.1 ccm geteilten Bürettenrohr mit einem äußeren Durchmesser von 13.5 mm, das mit etwa 12—15 ccm Wasser gefüllt und durch ein kreisrundes Stück weißen Fließpapiers von 3 cm Durchmesser verschlossen wurde. Das Fließpapier wurde mit Hilfe einer feinen Feder auf die Öffnung des Glasrohres aufgepreßt; es saugte das Wasser an und verdunstete es an der freien Oberfläche. Abgelesen und mit destilliertem Wasser aufgefüllt wurde das P i c h e - Rohr zusammen mit der Wildschen Waage jeden Morgen um 8<sup>00</sup> Uhr.

### 3. P o p o f f - Gerät

Auf dem Versuchsplatz wurde bereits 1951 ein P o p o f f - Gerät installiert, das mit dem am Ort vorhandenen Boden gefüllt war und den gleichen Rasen trug wie die Umgebung. Seine jeden Morgen bestimmten Verdunstungswerte wurden in unseren Versuch mit einbezogen. Beim Einbau des Gerätes und bei der Auswertung

der Meßergebnisse hielten wir uns streng an die von der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle Gießen ausgearbeiteten Vorschriften.

Auf den Einbau eines Regenmessers am Boden verzichteten wir, da die Versuchsparzelle stark windgeschützt war und man somit annehmen konnte, daß der Unterschied zwischen den gemessenen Niederschlagsmengen und den tatsächlich auf den Boden aufgefallenen nur gering sein würde.

#### 4. Bodenfeuchte-Messung

Während der Dauer unserer vergleichenden Verdunstungs-Bestimmungen führten wir wöchentlich je eine Bodenfeuchtemessung bis zu 50 cm Tiefe durch. Da für die Versuchsparzelle das Volumengewicht der einzelnen Bodenschichten nicht bekannt war, konnten die Millimeterwerte des Wassergehalts und damit auch die Verdunstungsmengen nicht aus den Bodenfeuchtwerten berechnet werden. Die Gewichtsprozentangaben machten aber die Bodenfeuchteschwankungen deutlich und ermöglichten eine Bestimmung des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts; das ist ein von Uhlig (2) für praktische Zwecke empfohlenes Relativmaß der Bodenfeuchte. Zu diesem Zwecke wurden die Gewichtsprocente der 10-cm-Schichten addiert; für die Summe der obersten 25 cm mußte der Wert für 20—30 cm Tiefe halbiert werden. Nach sehr starken Regenfällen wurden bestimmte Summen-Werte nicht überschritten, die man daher als oberste Grenze ansetzen konnte, während man von den niedrigsten Werten im trockenen Mai 1953 noch einige Gewichtsprocente abziehen mußte, um auf den vermutlich niedrigsten möglichen Wert zu kommen. Die Differenz zwischen beiden Angaben nennen wir den maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalt, den wir gleich 100% setzen. Man errechnet diese Größe natürlich ebenso gut aus einem Mittelwert der Bodenfeuchte für die Schicht von 25 cm oder jeder beliebigen anderen Dicke.

Wir ermittelten folgende Werte:

##### Schicht von 0—25 cm Tiefe

Oberster Summenwert	71 Gew. %
Untester Summenwert	21 Gew. %
maximal ausschöpfbarer Bodenfeuchtegehalt	50 Gew. % = 100%

Liegt der maximal ausschöpfbare Bodenfeuchtegehalt fest, dann kann man den Bodenfeuchtegehalt eines bestimmten Meßtages für eine bestimmte Bodenschicht in % des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts ausdrücken. Am 11. Mai wurden beispielsweise folgende Bodenfeuchte-Werte gemessen:

Schicht	Gew. %	Summe
0—10 cm	25.0	25.0
10—20 cm	14.1	14.1
20—30 cm	12.4	6.2
		45.3 Gew. % für 0—25 cm Tiefe

Von 45.3 Gew. % wird der unterste Grenzwert (21.0 Gew. %) abgezogen: das ergibt 24.3 Gew. %. Das sind dann 48.5% des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts. Dieser Wert geht z. B. in Kap. E 2 als Anfangswert in eine Formel zur Berechnung der aktuellen Verdunstung ein. Er würde sich auch bei einer Rechnung mit Mittelwerten ergeben.

#### C. Methoden zur Berechnung der potentiellen Verdunstung aus klimatologischen Daten

Die Methoden zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung aus klimatologischen Daten, die hier besprochen werden sollen, stammen von Thornthwaite,

Penman, Albrecht und Haude; sie beziehen sich alle auf bewachsenen Boden. Penman macht sogar die Einschränkung, daß es sich um grün bewachsene Flächen handeln müsse. Im Idealfall wäre also die potentielle Verdunstung zu bestimmen für ein sehr ausgedehntes, ebenes, grasbewachsenes Gebiet. Wir sind auf der Suche nach einer Formel, die uns diesen Wert mit der größtmöglichen Genauigkeit liefert. Dann kennen wir die Verdunstung für eine Standardfläche, von der wir ausgehen können, wenn wir die Verdunstung von Landflächen mit einem überwiegend anderen Bewuchs bestimmen wollen.

Die Vergleichsmessungen fanden über Rasen statt, müßten also mit den errechneten Werten auch tatsächlich vergleichbar sein.

### 1. Berechnung nach Albrecht

Da die potentielle Verdunstung ein Maß für die Fähigkeit der Atmosphäre ist, Wasserdampf aufzunehmen, lag es nahe, sie aus dem Sättigungsdefizit zu errechnen, das ja den „Dampfhunger“ der Luft charakterisiert. So berechnet Albrecht (3) die monatliche „mögliche Verdunstung“ (V), unter der wir wohl unsere potentielle Verdunstung verstehen können, nach der Gleichung

$$V' = F (E - e) \quad (V' \text{ in mm/Monat})$$

E (mm Hg) ist der mittlere Sättigungsdampfdruck der Luft in dem betreffenden Zeitabschnitt, der von dem Temperaturmittel T dieses Zeitabschnitts abhängt. e (mm Hg) ist der mittlere Dampfdruck der Luft im betrachteten Zeitraum, der aus den Ablesungen des trockenen und des feuchten Thermometers berechnet wird.

Natürlich ist der Faktor F, mit dem (E — e) multipliziert wird, von der Windgeschwindigkeit abhängig; die Zahl 16 — mit der Albrecht operiert — soll etwa mittleren Windverhältnissen entsprechen. Albrecht empfiehlt, für höhere Windstärken noch zusätzliche Konstanten zu wählen. Für sehr kleine Windgeschwindigkeiten rechnet Albrecht mit einem Kleinerwerden des Faktors bis auf den Wert 10 bei 0.5 m/sec = 1.8 km/h. Der Grenzwert, unterhalb dessen 16 nicht mehr gelten soll, wird mit 1 m/sec = 3.6 km/h angegeben. Diese Aussage führt zu dem Diagramm der Abb. 1. Natürlich würde eine reelle Kurve weder geradlinig sein noch eine Unstetigkeit aufweisen. Für die Praxis wird man aber das Diagramm der Abb. 1 zur Bestimmung des Faktors F, mit dem (E — e) multipliziert wird, verwenden können, und es ist anzunehmen, daß dies im Sinne der Albrechtschen Ausführungen ist.

Zur Berechnung der Tageswerte der potentiellen Verdunstung dividiert man die Faktoren F durch 30; die so gewonnenen Größen wurden in Abb. 1 mit aufgetragen.

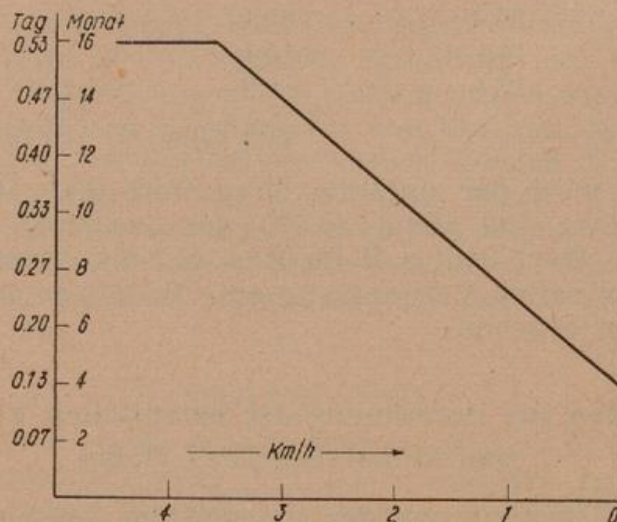


Abb. 1 Die Größe des Albrechtschen Faktors F bei kleinen Windgeschwindigkeiten

In Abb. 2 ist die Beziehung der Albrechtschen potentiellen Verdunstung  $V'$  bei Verwendung der aus Abb. 1 entnommenen  $F$ -Werte zur gemessenen Verdunstung (Popoff) dargestellt. In der 4. bis 6. Dekade war der Boden überwiegend naß, so daß man annehmen kann, daß die gemessene Verdunstung in dieser Zeit gleich der potentiellen war. Eine solche Beziehung wäre durch die gestrichelte  $45^\circ$ -Linie gekennzeichnet. Die Punktwolke liegt aber weit unterhalb dieser  $45^\circ$ -Linie, und das bedeutet, daß die errechneten  $V'$ -Werte zu klein ausgefallen sind. Die Verhältnisse in den drei ersten, trockenen Dekaden weisen darauf hin, daß man mit dem korrigierten  $F$  eher die aktuelle Verdunstung in Trockenzeiten bestimmt. Aus diesem Grunde verwandten wir zur Multiplikation mit dem Tagesmittel des Sättigungsdefizits ( $E - e$ ) den Höchstwert  $F = 0.53$ , obwohl die Tagesmittel der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe immer unter 3.6 km/h blieben (starker Windschutz).

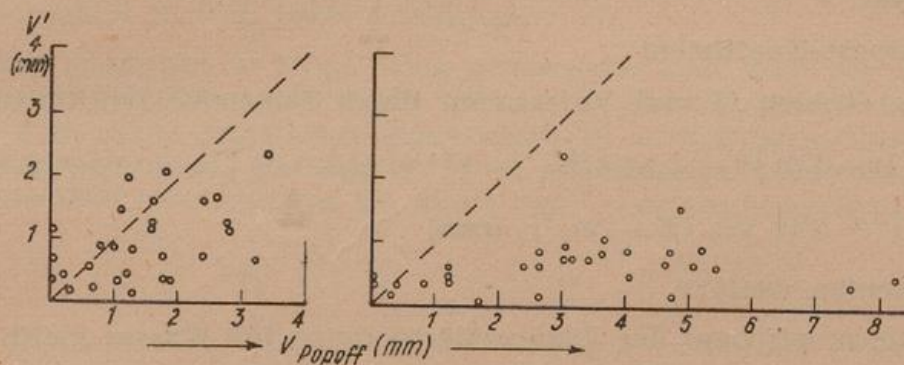


Abb. 2 Vergleich der aktuellen Verdunstung (nach Popoff) mit der potentiellen Verdunstung (nach Albrecht) bei Verwendung des korrigierten  $F$  für kleine Windgeschwindigkeiten

Links: 1.—3. Dekade (trocken), rechts: 4.—6. Dekade (naß)

## 2. Berechnung nach Haude

Auch Haude (4) stützt sich ausschließlich auf das Sättigungsdefizit. Er verwendet aber die 14-Uhr-Werte, die zweifellos für die Tagesverdunstung ausschlaggebend sind und gehört damit zu dem stets wachsenden Personenkreis, welcher den mittäglichen Klimabeobachtungswerten bei klimatologischen und ökologischen Untersuchungen den Vorzug gegenüber den Tagesmitteln gibt. In Österreich (5) erwägt man sogar, für die Zwecke der Bodenschätzung die Mittagstemperaturen als Temperaturfaktor heranzuziehen.

Das Sättigungsdefizit von 14 Uhr wird von Haude mit Koeffizienten multipliziert, die von Monat zu Monat variieren. Obwohl Haude in neueren Arbeiten (6) andere Koeffizienten angab, verwandten wir zur Errechnung der Tagesverdunstung die vorher von ihm publizierten Faktoren:

für Oktober bis April	0.3
für Mai	0.36
für Juni und Juli	0.38
für August	0.36
für September	0.33

Es soll vorweggenommen werden, daß die Haude'sche Rechenmethode — wenigstens in diesem Falle — sehr befriedigende Ergebnisse lieferte. Ihr Nachteil liegt jedoch darin, daß für sie die in der Einführung erwähnten Vorzüge einer Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten in vielen Fällen nicht gelten. Die 14-Uhr-Werte der Klimastationen sind oft nur schwer zu erreichen, vor allem für vergangene Zeiträume.

### 3. Berechnung nach Penman

Die mittlere tägliche Verdunstungssumme („potentielle Evapotranspiration“) einer freien Wasserfläche errechnet Penman (7) für einen bestimmten Zeitraum, der meist länger als eine Woche gewählt wird, nach der Gleichung

$$V_0 = \frac{2 \Delta H + V_a}{2 \Delta + 1} \quad (\text{mm Wassersäule pro Tag}) \text{ oder} \\ \text{kurz: (mm Tag}^{-1}\text{),}$$

sofern unser Maßsystem zugrunde gelegt wird. In dieser Gleichung bedeuten:  
 $\Delta$  Steigung der Sättigungs-Dampfdruck-Kurve bei T im betrachteten Zeitraum (mm Hg  $\cdot$   $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), wobei T die mittlere Lufttemperatur (gemessen in der Thermometerhütte) im betrachteten Zeitraum ( $^{\circ}\text{C}$ ) ist. Man entnimmt diesen Wert der Psychrometertafel.

H Wärmeverrat

$V_a$  Dampftransport-Koeffizient

Die beiden Größen H und  $V_a$  werden durch folgende Gleichungen bestimmt:

$$H = \frac{R_A}{59} (1-r) (0.18 + 0.55 n/N) - \sigma T^4 (0.56 - 0.09 \sqrt{e}) (0.10 + 0.9 n/N) \quad (\text{mm})$$

$$V_a = 0.35 (1 + 0.15 u_2) (E - e) \quad (\text{mm})$$

Hierin bedeuten weiter:

- r Reflektionskoeffizient der Erdoberfläche (wird für Wasser gleich 0.05 gesetzt)
- $R_A$  Totale tägliche Sonnenstrahlung, welche die Erde erreichen würde, wenn keine Atmosphäre vorhanden wäre (cal cm  $^{-2}$  Tag  $^{-1}$ )
- $\frac{R_A}{59}$  repräsentiert die Wassermenge in (mm Tag  $^{-1}$ ), die von  $R_A$  verdunstet werden könnte. Diese Größe  $R_A$  kann den Smithsonian Meteorological Tables (Washington 1951) entnommen werden, die in der Tabelle 132 die totale tägliche Sonnenstrahlung am Rande der Atmosphäre in cal cm  $^{-2}$  für verschiedene geographische Breiten und verschiedenes Datum angeben. Für die Untersuchungen in Bad Kissingen ( $50^{\circ} 12' \text{N}$ ) wurden die Werte für  $50^{\circ} \text{N}$  verwandt.
- n wirkliche Sonnenscheindauer (Std.)
- N astronomisch mögliche Sonnenscheindauer (Std.)
- e u. E wie im Kapitel C 1
- $u_2$  mittlere Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (km/Std.-1)
- $\sigma$  Stefan-Boltzmannsche Konstante =  $8.132 \cdot 10^{-9}$  (cal cm $^{-2}$  min $^{-1}$   $^{\circ}\text{K}^{-4}$ )
- $\sigma T^4$  Strahlung eines schwarzen Körpers bei T (cal cm $^{-2}$  min $^{-1}$ ), wobei T in  $^{\circ}\text{K}$  ausgedrückt wird.

Mit der Temperatur T ( $^{\circ}\text{C}$ ) + 273.2 $^{\circ}$  = T ( $^{\circ}\text{K}$ ) geht man z. B. wieder in die Smithsonian Meteorological Tables (Washington 1951) ein, wo man aus der Tabelle 129 den Wert für  $\sigma T^4$  in (cal cm $^{-2}$  min $^{-1}$ ) direkt ablesen kann. Man errechnet dann den Tageswert und ändert durch Division durch 59 die Dimension in (mm Tag  $^{-1}$ ).

Wie gesagt, gilt  $V_0$  nur für freie Wasserflächen. Um die potentielle Verdunstung  $V_r$  einer mit grünen Pflanzen bewachsenen Landfläche zu bestimmen, muß man  $V_0$  mit einem Faktor multiplizieren, der zu verschiedenen Jahreszeiten einen unterschiedlichen Wert annimmt, und zwar ist er:

- 0.6 im November bis Februar
- 0.7 im März, April, September, Oktober
- 0.8 im Mai bis August

0.75 im Mittel für das Jahr

Gegenüber den anderen Methoden wird die Penman'sche Methode durch die Berücksichtigung mehrerer meteorologischer Faktoren kompliziert. Vor allem geht die Strahlung mit ziemlichem Gewicht in die Verdunstungsformel ein, was auch bei der Art der praktischen Beratung der Beregnungsbetriebe in England zum Ausdruck kommt. Hierauf kann jedoch an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

Weiter geht die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe in die Penman'sche Verdunstungsformel ein. Aus diesem Grunde wurde bei der hier besprochenen Untersuchung der Windweg in 2 m Höhe mit Hilfe eines Schalenkreuz-Anemometers gemessen. Wo das nicht möglich ist, soll man aus Messungen in größeren Höhen die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe errechnen.

Die in Bad Kissingen in 30 m Höhe gemessenen und nach der Hellmann'schen Formel auf 2 m Höhe reduzierten Tagesmittel der Windgeschwindigkeit stehen den hier in 2 m Höhe tatsächlich gemessenen in Abb.3 gegenüber. Die Punktwolke gruppiert sich nicht, wie das bei einer brauchbaren Reduktion der Fall sein müßte, um die 45°-Linie, sondern sie lehnt sich — eingeschlossen in einen spitzen

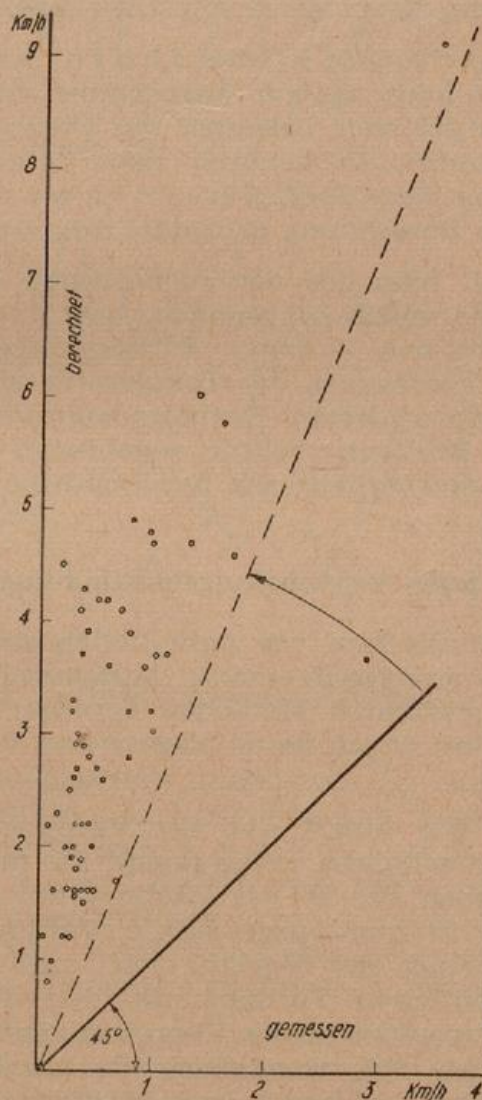


Abb. 3 Gegenüberstellung der in 2 m Höhe gemessenen und der in 30 m Höhe gemessenen und auf 2 m Höhe reduzierten Windgeschwindigkeiten des Versuchszeitraumes

Winkel — eng an die Ordinate an. Die gemessenen Werte lagen also viel niedriger als die reduzierten. Dieser Sachverhalt hätte eigentlich keiner Nachprüfung bedurft, denn die Hellmannsche Formel wurde für ein ungestörtes Windfeld aufgestellt und kann für einen windgeschützten Standort nicht gelten. Wir wollten aber die Größe der Abweichung einmal kennenlernen. Die Winkeldifferenz zwischen der Begrenzungslinie der Punktwolke und der 45°-Linie kann man sogar als Maß für den Windschutz eines Standortes ansehen.

Die Abb. 3 und die daran geknüpften Betrachtungen sollen unterstreichen, daß eine Einführung der Windgeschwindigkeit in eine Verdunstungsformel eine genaue Überlegung erfordert, welche Werte man wählen will. Verlangt man eine Reduktion der Meßwerte auf 2 m Höhe, so muß man auf die Geländeeinflüsse Rücksicht nehmen. In der Heckenlandschaft Schleswig-Holsteins z. B. ist eine Verwendung der Hellmannschen Gleichung in der obigen Form nicht zu vertreten.

#### 4. Berechnung nach Thornthwaite

Die Thornthwaite'sche Methode geht davon aus, daß die Temperatur die potentielle Verdunstung bestimmend beeinflusst, und benutzt allein dieses Element zur Berechnung der „potentiellen Evapotranspiration“. In einer seiner Publikationen (8) stellte Thornthwaite fest, daß man eine enge Beziehung zwischen der Monatsmitteltemperatur und der monatlichen potentiellen Evapotranspiration festlegen kann, wenn man Korrekturen für die variierende Tageslänge in verschiedenen Gebieten (d. h. in verschiedenen geographischen Breiten) anbringt.

In der oben genannten Arbeit (8) ist die Thornthwaite'sche Methode genau beschrieben; sie enthält auch die zur Berechnung von Monatswerten der potentiellen Evapotranspiration nötigen Tabellen und Diagramme. Will man tägliche Verdunstungsmengen bestimmen, so benötigt man besondere, bisher nicht veröffentlichte Tabellen, die uns Herr Prof. Thornthwaite freundlicherweise zur Verfügung stellte. Die ganze Berechnung erfordert drei Arbeitsgänge:

Mit dem ersten ermittelt man aus den monatlichen Mitteltemperaturen einen sogenannten zur Station gehörenden Wärmeindex, der für Bad Kissingen 31.83 ist. Der zweite Arbeitsgang gibt uns — unter Berücksichtigung des Wärmeindex — die von den Monats- bzw. Tageswerten der Temperatur abhängigen Werte der monatlichen bzw. täglichen unkorrigierten Evapotranspiration, und mit dem dritten Schritt wird schließlich die Breitenkorrektur angebracht, womit man die von Ort zu Ort wechselnden Strahlungsverhältnisse berücksichtigt.

#### D. Ergebnisse vergleichender Verdunstungsbestimmungen in Bad Kissingen

Die Abb. 4 zeigt uns den Verlauf der potentiellen und der aktuellen Verdunstung während des Untersuchungszeitraumes, zusammengesetzt aus den Tageswerten, die mit Hilfe der erwähnten Methoden berechnet bzw. gemessen wurden. Lediglich für die Bodenfeuchte liegen keine Tageswerte vor, sondern nur wöchentliche Messungen.

Im obersten Diagramm der Abb. 4 sind die Verdunstungskurven der Wildschen Waage und des Piche-Rohres aufgetragen; sie laufen parallel zueinander. Man braucht die ccm-Angaben des Piche-Rohres nur mit dem Faktor 0.69 zu multiplizieren, um auf die in mm ausgedrückte Verdunstungshöhe der Wildschen Waage zu kommen. Auch der Verlauf der nach den vier besprochenen Methoden berechneten potentiellen Verdunstung, den die folgenden Diagramme der Abb. 4 zeigen, weist eine weitgehende Übereinstimmung mit dem Verlauf der Werte der Wildschen Waage auf, wenngleich die Amplituden sehr unterschiedliche Stärken erreichen. Thornthwaites Methode befriedigte allerdings in der dritten Junidekade nicht. In dieser Zeit wies die nach ihr errechnete Verdunstungskurve nicht den markanten Einschnitt auf, wie die anderen Kurven, die in

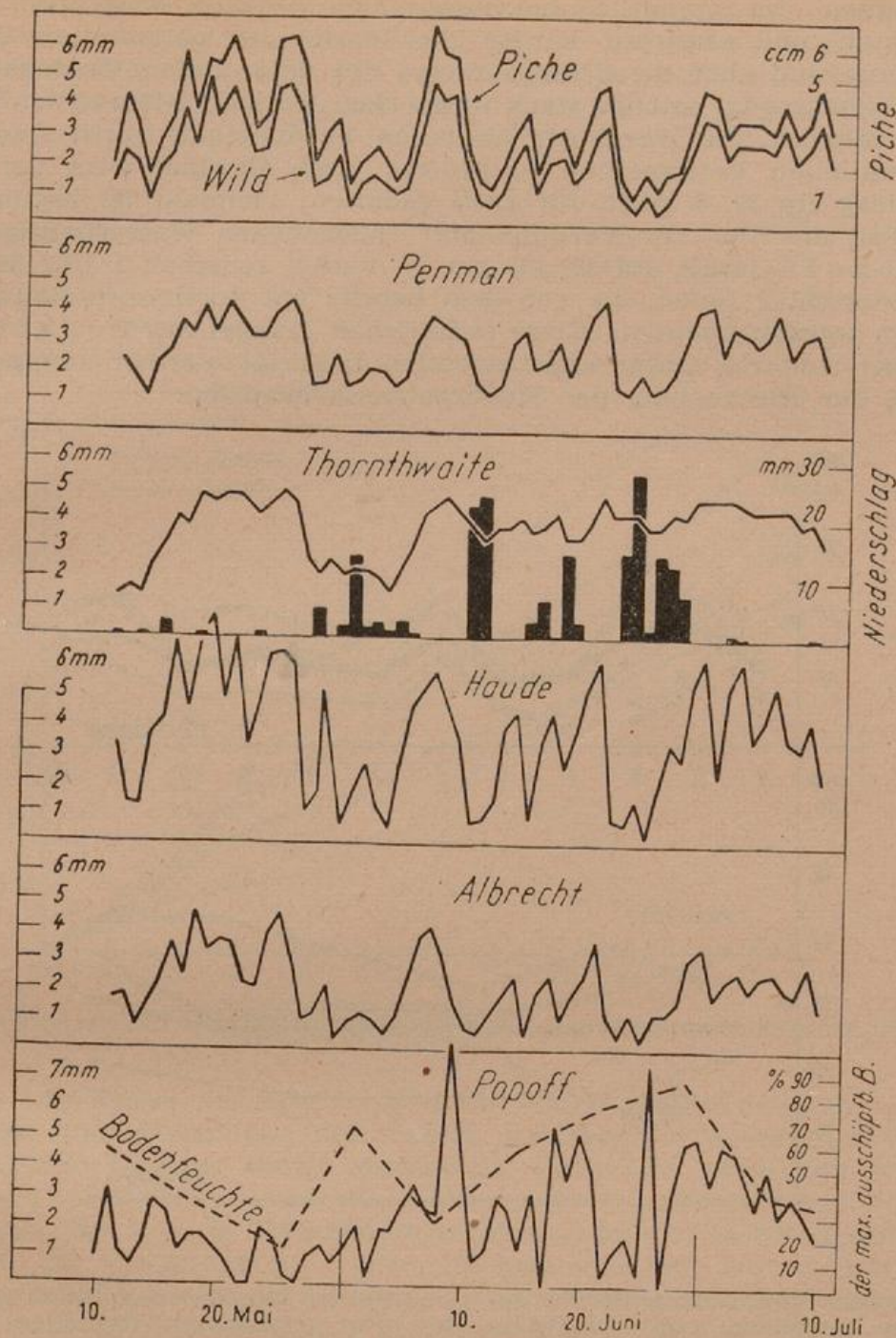


Abb. 4 Vergleichende Verdunstungsbestimmungen in Bad Kissingen (1953)

starkem Maße vom Sättigungsdefizit abhängen. Es erscheint aber plausibel, daß die potentielle Verdunstung in einer regnerischen Periode kaum so hohe Werte erreichen wird, wie in einer trockenen, wie z. B. vom 7. bis 17. Mai. Es ist jedoch zu bedenken, daß man in vielen Ländern, vor allem auch vielerorts in Amerika, allein auf Temperaturwerte angewiesen ist und keine andere Wahl hat, als eine Methode zur näherungsweisen Bestimmung der potentiellen Verdunstung zu verwenden, die sich einzig auf Temperaturmessungen stützt.

Betrachten wir schließlich die im untersten Diagramm unserer Abbildung 4 aufgezeichnete, mit dem Popoff-Gerät gemessene aktuelle Verdunstung, dann fällt auf, daß der ausgetrocknete, bodenfeuchtearme Boden im Mai längst nicht so viel Wasser abgab, wie man das im gleichen Zeitraum von einem feuchten, zur potentiellen Verdunstung fähigen Boden auf Grund der berechneten Werte hätte

erwarten können. Im wesentlich feuchteren Juni dagegen stieg auch die aktuelle Verdunstung an und erreichte häufig die Werte der potentiellen Verdunstung. Darüber hinaus sind aber die Schwankungen der potentiellen Verdunstungskurven meist auch — mehr oder minder stark — bei der „Popoff-Kurve“ zu finden. Damit wird es möglich, die Werte der aktuellen Verdunstung durch einen Vergleich mit der potentiellen Verdunstung zu prüfen. Zum Beispiel wird der hohe Verdunstungsbetrag am 27. 6. nicht für reell gehalten; vielmehr ist anzunehmen, daß ein großer Teil des hier als „Verdunstung“ angegebenen Wasserbetrages über den Rand des Popoff-Geräts abfloß, als am 27. nachts zwischen 1 Uhr 20 und 3 Uhr 12.6 mm Niederschlag fielen, die von dem bereits gut durchfeuchteten Boden nicht aufgenommen werden konnten. Diese technischen Mängel des Popoff-Geräts, die hoffentlich bei weiteren Entwicklungsarbeiten beseitigt werden können, muß man natürlich bei der Auswertung der Meßergebnisse beachten.

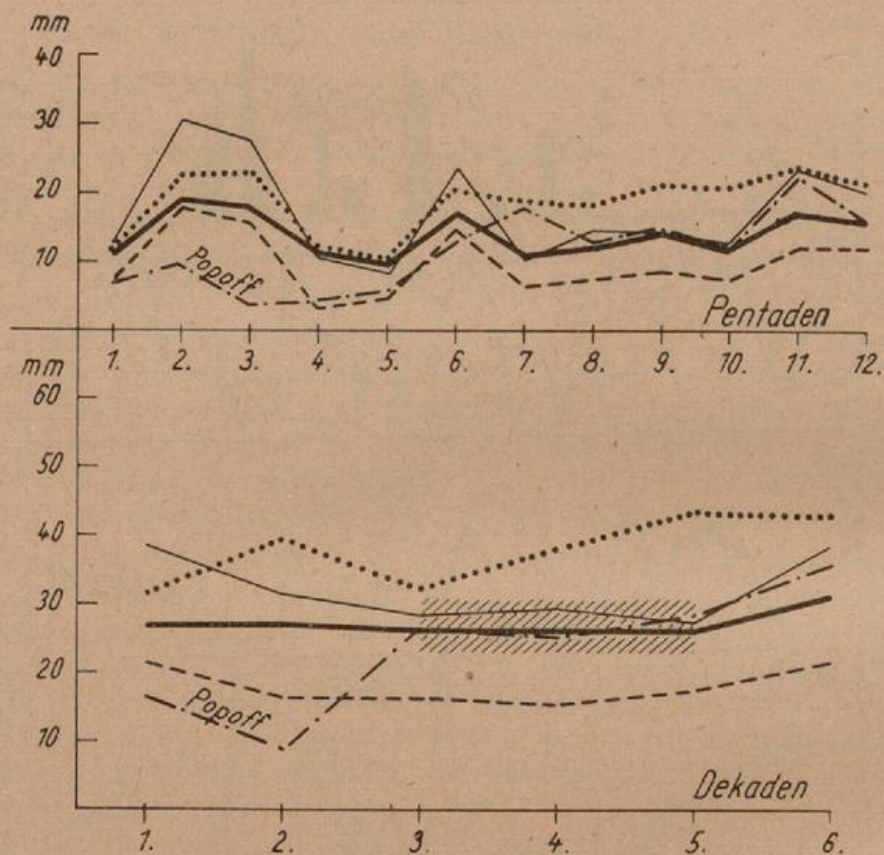


Abb. 5 Pentaden- und Dekadenwerte der potentiellen Verdunstung, berechnet nach vier verschiedenen Methoden und verglichen mit der gemessenen aktuellen Verdunstung (Methode Popoff) (1953)

— Penman, ..... Thornthwaite, — Haude, --- Albrecht

Damit ist die Überleitung zur entscheidenden Frage nach der Glaubwürdigkeit der potentiellen Verdunstungs-Mengen vollzogen, welche wir nach den geprüften vier Methoden errechneten. Von Thornthwaite, Haude und Penman wissen wir, daß sie ihre Formeln aus direkten Messungen mit sogenannten Evapotranspirometern, d. h. aus gemessenen potentiellen Verdunstungswerten, ableiteten. Es überrascht deshalb, wenn wir an den Pentaden- und Dekadenwerten der Abb. 5 (die nicht durch Summation der Tageswerte der Verdunstung entstanden, sondern aus den Klimawerten für Pentaden und Dekaden neu berechnet wurden) erkennen, daß zwischen den nach den vier Methoden errechneten potentiellen Verdunstungssummen erhebliche Differenzen auftreten. Die Albrechtsche Methode liefert die niedrigsten Werte, die von Thornthwaite die höchsten. Dieses Ergebnis belegt auch die Abb. 6, in der die Summenlinien der Verdunstung über die 12 Pen-

taden unseres Versuchs dargestellt wurden. In der Summe über den ganzen Beobachtungszeitraum errechneten wir nach Thornthwaites Methode eine verdunstete Wassermenge (224 mm), die fast doppelt so groß war, wie jene, die wir nach Albrechts Methode (118 mm) ermittelten. Dieses Ergebnis befriedigt uns nicht.

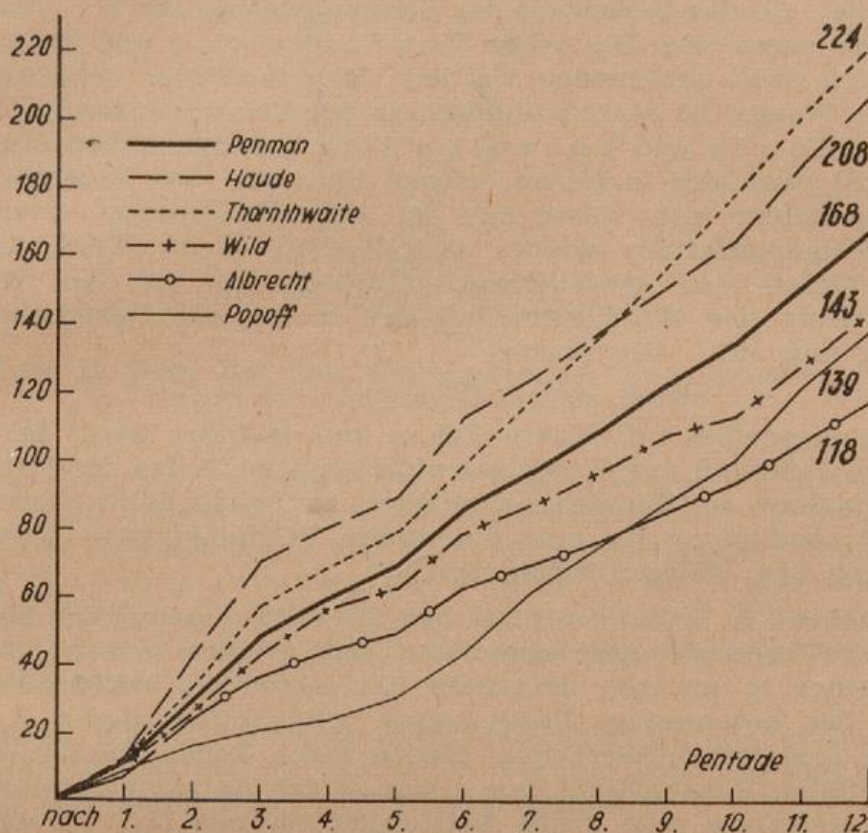


Abb. 6 Summenlinien der berechneten bzw. gemessenen Verdunstungswerte (für Pentaden)

Die Popoff-Kurve in Abb. 6 ist durch einen Knick deutlich in zwei Abschnitte geteilt, von denen nur der zweite, steilere, die potentielle Verdunstung repräsentiert. Die Neigung dieses Abschnitts entspricht etwa der Neigung der Haude-Kurve im gleichen Abschnitt, während diese beiden Kurven in dem trockenen Zeitraum der 1. bis 4. Pentade einen Winkel von etwa  $30^\circ$  einschließen. Die Tatsache, daß die zweimonatige Verdunstungsmenge der Popoff-Messung nur wenig größer ist als die nach Albrecht errechnete Menge, besagt nichts. Es kommt überhaupt nicht so sehr auf die Summe der Verdunstungswerte in Abb. 6 an, als vielmehr auf die Einzelwerte in jener Periode, in der die Voraussetzungen für eine wirkliche potentielle Verdunstung gegeben waren. Man kann doch sagen, daß die Haudesche Methode und die von Thornthwaite die gleiche Verdunstungssumme erzielten, denn 16 mm Unterschied liegen noch im Fehlerbereich der Berechnung. (Man erhält einen Unterschied von der gleichen Größenordnung, wenn man die Summe für den Untersuchungszeitraum von 2 Monaten aus den mit der gleichen Methode einmal für Tage und einmal für Dekaden errechneten Werten bildet!). Daß aber zwischen der Thornthwaiteschen und der Haudeschen Methode ein wirklich entscheidender Unterschied besteht, zeigt die Abb. 5 und zwar in dem Zeitraum, der durch eine Schraffur besonders kenntlich gemacht wurde und in welchem man die Dekadensummen der Popoff-Verdunstung als echte potentielle Verdunstung ansehen kann. So läßt auch die während der feuchten Zeitspanne beobachtete Neigung der Albrecht-Kurve gegenüber der Popoff-Kurve den Schluß zu, daß die Albrechtsche Methode zu kleine Werte liefert.

H a u d e (4) hat gezeigt, daß ein zur potentiellen Verdunstung fähiger Rasenboden mit hohem Grundwasser (Lysimeteranlage Eberswalde) mehr Wasser abgibt als die Wildsche Waage. Wir müssen deshalb erwarten, daß auch die errechnete potentielle Verdunstung höhere Werte annimmt als die mit der Wildschen Waage gemessene. Bei den Methoden von Th o r n t h w a i t e, P e n m a n und H a u d e ist das im vorliegenden Beispiel auch der Fall; die A l b r e c h t s c h e Methode liefert zu kleine Werte. Ob das Verhältnis des Summenwertes der Wildschen Waage zu dem der Berechnungen nach H a u d e, Th o r n t h w a i t e und P e n m a n allerdings reell ist, kann nicht entschieden werden. Man muß hier bedenken, daß sich auf die Wildsche Waage der starke Windschutz des Versuchs-Standorts auswirkte. Die Methoden von H a u d e und Th o r n t h w a i t e berücksichtigen aber die Luftbewegung gar nicht, was sich in einem solchen Falle auf das Ergebnis auswirken kann, wenn dieser Fehler nicht durch eine mit dem Windschutz verbundene Verringerung des Sättigungsdefizits wieder ausgeglichen wird. Wenigstens für die Berechnung von Tages- und Pentadenwerten drängt sich uns der Wunsch nach einer Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit u bei der Berechnung der potentiellen Verdunstung auf. Die Formel

$$V' = f(u) \cdot (E - e),$$

bei der das Sättigungsdefizit mit einem Faktor multipliziert wird, der nicht konstant, sondern eine Funktion der Windgeschwindigkeit ist, trüge der Tatsache Rechnung, daß eine Zunahme der Windgeschwindigkeit zu Zeiten hoher Bodenfeuchte — und das ist die Vorbedingung für eine potentielle Verdunstung — auch eine Verdunstungssteigerung über Wiesenflächen bewirkt.

Aus den vorstehenden Erläuterungen über die sehr voneinander abweichenden Ergebnisse unserer Verdunstungsberechnungen geht hervor, wie nötig es ist, bei der Suche nach einer in unseren deutschen Klimagebieten brauchbaren Methode zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung mitzuhelfen, deren Kenntnis für uns einen großen praktischen Wert hat. Neben ihrer Bedeutung als Klimafaktor kommt der potentiellen Verdunstung, vor allem in der Agrarmeteorologie, zur Abschätzung der Wasserbilanz eine große Bedeutung zu, was U h l i g (9) bereits an anderer Stelle ausführte. Es wird in diesem Bericht noch gezeigt werden, daß auch eine Berechnung der aktuellen Verdunstung aus Klimadaten möglich ist, wenn man vorher die Größe der potentiellen Verdunstung zu ermitteln weiß. Allerdings werden wir nicht umhin können, zunächst an einigen Stellen Messungen mit Evapotranspirometern, deren Boden stets über ausreichende Wassermengen verfügt, durchzuführen, damit wir Beobachtungsreihen erhalten, an denen wir die in Betracht kommenden Methoden erproben können. Ein Vorbild eines solchen Evapotranspirometers wurde von Th o r n t h w a i t e und M a t h e r (10) beschrieben.

Die Möglichkeit eines solchen Vergleichs unserer berechneten Werte der potentiellen Verdunstung mit gemessenen hatten wir bei unserem Versuch noch nicht; aber man darf — wie schon gesagt — die mit dem P o p o f f-Gerät in dem relativ feuchten Zeitabschnitt der 3. bis 5. Dekade (Abb. 5) gemessenen Verdunstungsmengen sicher als potentielle Verdunstung ansehen. Dann stellen wir fest, daß in dieser Periode die nach den Methoden von P e n m a n und H a u d e errechneten Verdunstungswerte der P o p o f f-Kurve am nächsten kommen (Schraffur!). An Hand unseres Versuchs würden wir also die P e n m a n s c h e Methode an erster Stelle, die H a u d e s c h e Methode wegen der oben besprochenen Vernachlässigung des Windfaktors erst an zweiter Stelle für künftige Entwicklungsarbeiten in die engere Wahl ziehen. Die P e n m a n s c h e Methode hat aber den Nachteil, sehr zeitraubend zu sein, so daß man es im Falle der Gleichwertigkeit beider Methoden vorziehen wird, die Methode von H a u d e zu benutzen, deren Tageswerte übrigens — wie Abb. 7 zeigt — in einer engen Beziehung zu denen stehen, die nach P e n m a n s Methode ermittelt wurden und leicht nach der Gleichung

$$V \text{ (Penman)} = 0.44 \cdot V \text{ (Haude)} + 1.2$$

deren Größenordnung angepaßt werden können.

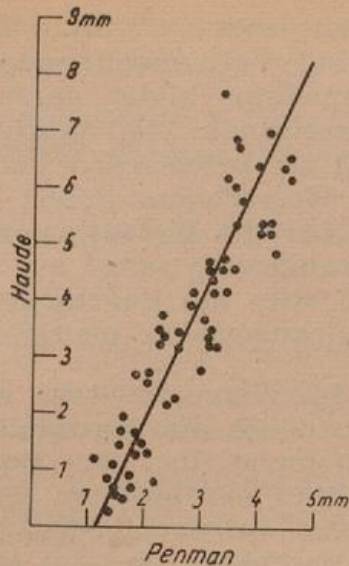


Abb. 7 Beziehung zwischen den nach der Penman'schen und Haude'schen Methode errechneten täglichen Verdunstungswerten

Zum Vergleich seien in Abb. 8 noch die nach Haude's Methode errechneten Werte denen gegenübergestellt, die mit Thornthwaites Verfahren ermittelt wurden. Da man in dem einen Fall von der Temperatur, in anderem Fall vom Sättigungsdefizit ausging, war eine solche Streuung der Punktwolke, wie sie unsere Abbildung zeigt, auch zu erwarten. Bemerkenswert ist es, daß bei größeren Verdunstungsmengen die Beziehungen zwischen den nach beiden Methoden festgelegten Werten enger werden.

Im folgenden Kapitel wird entsprechend dem Untersuchungsergebnis dieses Kapitels die zur Berechnung der aktuellen Verdunstung benötigte potentielle Verdunstung nach der Methode von Haude bestimmt.

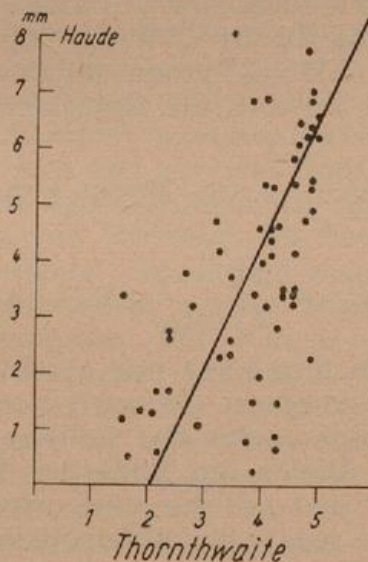


Abb. 8 Beziehung zwischen den nach der Thornthwaite'schen und Haude'schen Methode errechneten täglichen Verdunstungswerten

## E. Methoden zur Berechnung der aktuellen Verdunstung aus klimatologischen Daten.

### 1. Berechnung nach Albrecht

Mit Hilfe der potentiellen Verdunstung kann man eine „klimatische Wasserbilanz“ aufstellen, indem man sich zunächst Klarheit über den Wassergehalt im

Boden zu einem bestimmten Zeitpunkt verschafft, dann die Differenzen zwischen den täglichen Niederschlags- und Verdunstungsmengen errechnet und schließlich aus diesen Bilanzen eine Summenlinie bildet, deren Verlauf die Gunst oder Ungunst der Wasserversorgung bezeichnet. Man beachtet also die Bodenfeuchte erst bei der praktischen Verwertung der potentiellen Verdunstung, nicht aber bei ihrer Berechnung. Diese klimatische Wasserbilanz liefert uns aber in vielen Fällen keinen befriedigenden Überblick über die Bodenwasserverhältnisse, weshalb wir den Wunsch haben, die aktuelle Verdunstung selbst aus klimatologischen Daten zu bestimmen. Hierzu müssen wir aber die Bodenfeuchte schon für die Berechnung selbst kennen, da sie die Verdunstungshöhe maßgeblich beeinflusst.

Albrecht (3) hat versucht, dieser Tatsache mit einer Kalkulationsmethode Rechnung zu tragen, die sich lediglich auf Messungen des Niederschlages und des Sättigungsdefizits und auf Annahmen über den Bodenwassergehalt stützt. Dabei wird das Verhältnis des tatsächlich verdunsteten Wassers (d. i. die aktuelle Verdunstung  $V$ ) zu dem vom Boden aufgenommenen Wasser ( $W$ ) mit der Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Atmosphäre ( $E - e$ ) und der Aufnahmefähigkeit des Bodens für flüssiges Wasser in Zusammenhang gebracht. Dies führt zu dem Ansatz:

$$\frac{V}{W} = \frac{c \cdot 16 (E - e)}{\sum W_{\text{Max}} - \sum W} \quad (I)$$

Es bedeuten:

- $\sum W$  Gesamtwassergehalt des Bodens zu Beginn des Zeitraumes, für den  $V$  und  $W$  ermittelt werden sollen,  
 $\sum W_{\text{Max}}$  maximal möglicher Gesamtwassergehalt des Bodens,  
 $c$  Konstante, die empirisch festgelegt werden muß und bei Albrecht zu 1.36 angenommen wurde.

Die Größe  $16 (E - e)$  ist die nach der Albrechtschen Methode errechnete potentielle Verdunstung  $V'$ . Die Größe  $\sum W_{\text{Max}}$  ist für jede Bodenart eine Konstante. Albrecht hat für  $\sum W_{\text{Max}}$  einen Mittelwert von 100 mm eingeführt, wobei er annimmt, daß diese 100 mm als Kapillarwasser in den obersten 50 cm des Bodens hängen.

Die Verdunstung  $V$  für den  $n$  - ten Monat kann dann berechnet werden aus der Gleichung

$$V_n = N_n - W_n + \frac{\sum W_{n-1}}{\sum W_{\text{Max}}} \cdot V_n' \cdot g \quad (II)$$

Die Verdunstung errechnet sich also nicht nur als Differenz zwischen Niederschlag  $N_n$  und Wasseraufnahme  $W_n$ , sondern sie wird noch erweitert um den Verdunstungsbetrag, der aus der Wasserreserve des Bodens bestritten wird.  $\sum W_{n-1}$  gibt den Wassergehalt an, den der Boden am Ende des Vormonats aufwies.  $g$  ist von der Bodenbedeckung abhängig und soll für eine vegetationslose Gegend den Wert 0.37, für bewachsenes Land — sogar für Waldgebiete — den Wert 0.5 annehmen. Wenn aber — wie wir feststellten — eine nach Albrechts Methode berechnete potentielle Verdunstung ohnehin zu kleine Werte liefert, dann muß die Einführung dieses Faktors den Fehler noch vergrößern. Entnimmt man das  $W$  aus der Gleichung (I) und setzt es in die Gleichung (II) ein, so erhält man die Formel:

$$V_n = \frac{N_n + \frac{\sum W_{n-1}}{\sum W_{\text{Max}}} \cdot V_n' \cdot g}{1 + \frac{\sum W_{\text{Max}} - \sum W_{n-1}}{c \cdot V_n'}} \quad (III)$$

Der Wassergehalt des Bodens wird bestimmt durch die Gleichung

$$\sum W_n = N_n + \sum W_{n-1} - V_n \quad (\text{IV})$$

Für die Wintermonate bis einschließlich März wird praktisch  $\sum W = 100$  mm angenommen und für die weiteren Monate der Bodenwassergehalt dann jeweils errechnet.

Die Anwendung der Formeln (III) und (IV) wird dann durch folgende Regeln begrenzt:

1. Solange  $V' < N$  ist, gilt  $V = V'$
2.  $\sum W$  darf den Wert 100 mm ( $= \sum W_{\text{Max}}$ ) nicht überschreiten.
3. Wegen des Reifniederschlags ist in den Monaten mit Mitteltemperaturen unter  $0^\circ \text{C}$  von  $V$  ein Betrag von 5 mm abzuziehen.

Wir haben diese Albrechtsche Methode aufgegriffen; aber dann doch so stark verändert, daß wir sie in der von uns benutzten Form vorsichtshalber die „Kissinger Methode“ nennen wollen.

## 2. Berechnung nach der „Kissinger Methode“

Bezüglich des „maximal möglichen Wassergehalts“ des Bodens, den Albrecht generell mit 100 mm annahm, wünschten wir zuerst eine Änderung der eben besprochenen Verdunstungsformel. Die Bodenfeuchtemessungen an einer Reihe von Stationen des Deutschen Wetterdienstes haben gezeigt, daß der maximal mögliche Wassergehalt eines Bodens stark von Boden zu Boden differiert und daß außerdem verschiedene Böden bis zu sehr verschiedenen Feuchtwerten ausgetrocknet werden. Die tatsächlichen Bodenfeuchtwerte kann man aber natürlich nicht in die Verdunstungsformel eingehen lassen, da man diese sonst ständig ändern müßte. Wir müssen auch auf einen konstanten Wert für den maximal möglichen Wassergehalt kommen und dafür sorgen, daß der aktuelle Bodenfeuchtegehalt dann größenordnungsmäßig immer in einem bestimmten Verhältnis zu diesem Maximalwert steht. Deshalb meinten wir, daß wir als Höchstwert für den Wassergehalt, der für die Verdunstung über einem bestimmten Boden in Betracht kommt, besser die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten auf diesem Boden zu erwartenden Feuchtwert wählen und sie immer gleich 100% setzen sollten. Diese Differenz wurde von Uhlig (2) der „maximal ausschöpfbare Bodenfeuchtegehalt“ genannt (siehe Kapitel B 4). Dann läßt sich der aktuelle Bodenfeuchtegehalt  $B$  in Prozenten des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts ausdrücken und man kann zeigen, daß diese relative Größe von Bodenart zu Bodenart weit weniger schwankt als die absoluten Bodenfeuchtwerte. Es ist eine Erleichterung, daß man den maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalt und  $B$  sowohl aus Volumprozentangaben als auch aus Gewichtsprozentangaben der Bodenfeuchte errechnen kann. — Bei der Umwandlung der Albrechtschen Formel führten wir die Größe  $B$  ein, die wir zunächst aus Messungen in der obersten 25-cm-Schicht ermittelten, d. h. in derselben Schicht, für die uns das Popoff-Gerät Meßwerte der aktuellen Verdunstung lieferte. Für die Rechnung heißt das praktisch, daß wir — ebenso wie Albrecht — einen scheinbaren Wassergehalt von 100 mm annehmen und daß wir auch mit  $B$  so rechnen, als handele es sich um mm-Angaben. Die Wahl des Buchstaben  $B$  an Stelle des  $W$  soll uns aber immer daran erinnern, daß es sich eben nicht um den tatsächlichen Wassergehalt handelt, sondern nur um eine Verhältniszahl, die wir immer erst in mm oder Gewichtsprozent (Summe oder Mittel) umrechnen müssen, um den wirklichen Wassergehalt zu bekommen.

Außerdem wird nunmehr als potentielle Verdunstung das nach der Methode von Haude errechnete  $V'$  eingesetzt. Da diese Größe ausdrücklich für Grasland berechnet wird, ist  $g = 1$ . Wir wollen aber diesen Faktor  $g$  in der Verdunstungsformel lassen, da er uns die Möglichkeit einer Korrektur für anders bewachsene Landflächen bietet.

Es ergab sich empirisch, daß nach diesen Veränderungen die Konstante  $c = 2$  werden mußte, wenn man die „Kissinger Methode“ auf Pentaden anwenden will und nicht mehr nur auf Monate. Damit lautet nun die Verdunstungsformel

$$V_n = \frac{N_n + \frac{1}{(\text{m. a. B.})} \cdot B_{n-1} \cdot V'_n \cdot g}{1 + \frac{(\text{m. a. B.}) - B_{n-1}}{c \cdot V'_n}}$$

maximal ausschöpfbarer Bodenfeuchtegehalt = 100% = m. a. B.

$g = 1$  bei Grasland

$c = 2$  bei Pentaden

$n = \text{Meßpentade}$

Errechnet man einen Wert von  $V_n^*$ , der größer ist als  $V'_n$ , so gilt  $V'_n = V_n$ .  $B_n$  wird nie größer als 100% eingesetzt. Die Bodenfeuchte soll zu Beginn eines Untersuchungszeitraumes gemessen werden, sofern nicht feststeht, daß sie (vor Beginn der sommerlichen Austrocknung) gleich dem maximal ausschöpfbarem Bodenfeuchtegehalt ist. Dann aber wird sie laufend berechnet nach der Gleichung

$$B_n = N_n + B_{n-1} - f \cdot V_n$$

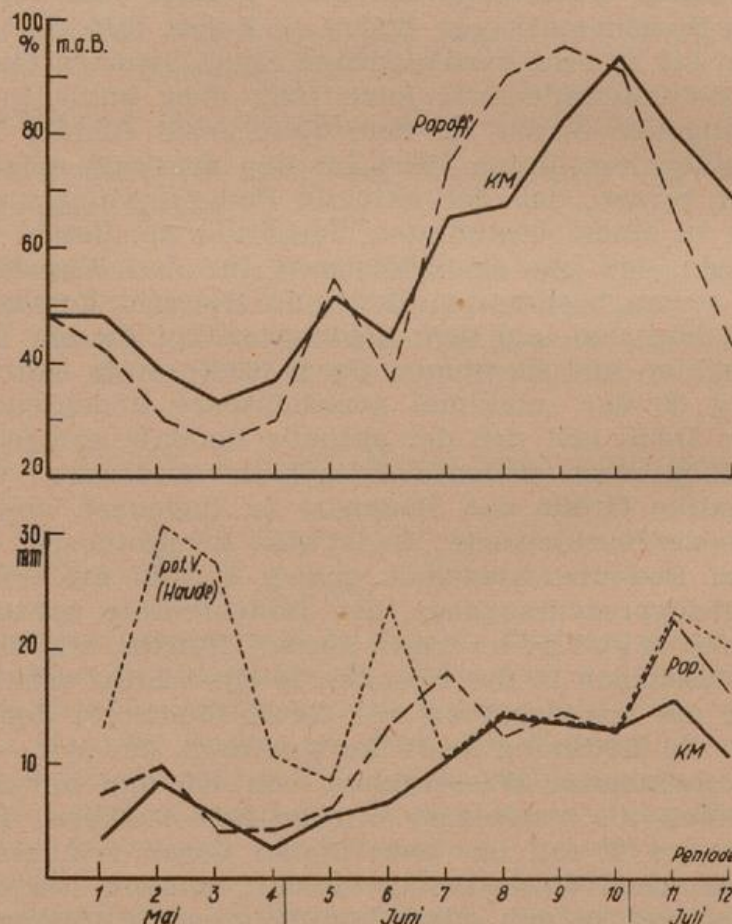


Abb. 9 Gemessener und berechneter Gang der aktuellen Verdunstung (unten) und des Bodenwassergehalts (oben) in Bad Kissingen, 1953 (Potentielle Verdunstung zum Vergleich)

Der Faktor  $f$  bezieht sich auf das Verhältnis der Verdunstung zum Gesamtwasserverlust, der im Mittel etwa folgende Werte annimmt:

f =

Pentaden-Niederschlag (mm)	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.
0—15	2.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.4
15—25	2.2	1.4	1.4	1.2	1.2	1.8
25—35	2.6	1.8	1.7	1.5	1.5	2.3
35—45	3.1	2.3	2.0	1.9	1.9	2.8
45—55	3.6	2.8	2.4	2.3	2.3	3.4
55—65	4.2	3.4	2.8	2.7	2.7	4.0

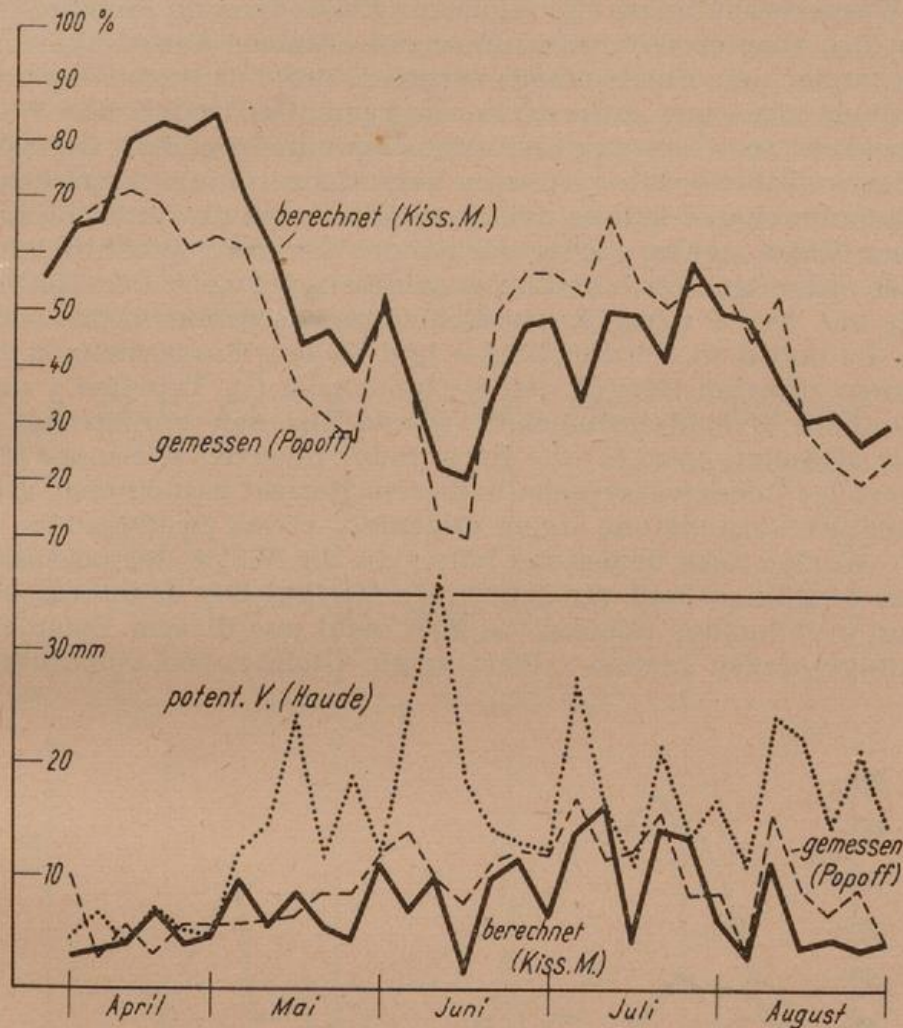


Abb. 10 Gemessener und berechneter Gang der aktuellen Verdunstung (unten) und des Bodenwassergehalts (oben) in Gießen, 1950 (Potentielle Verdunstung zum Vergleich)

Für die Sommermonate kann man diese mittleren  $f$ -Werte für ganz Deutschland benutzen. Im Winter gehen diese Werte aber auseinander. Nach einer Zusammenstellung Friedrichs (11) über den durchschnittlichen jährlichen Gang des Wasserhaushalts deutscher Flußgebiete ist im Januar das Verhältnis Verdunstung: Gesamtwasserverlust z. B. im Donaauraum 11.7, im Allerggebiet 6.0 und im Wartheland nur 3.5.

### 3. Beispiele

In Abb. 9 zeigt der untere Teil zunächst die aus dem Zahlenmaterial unseres Kissinger Versuchs nach Haude errechnete potentielle Verdunstung und zum Vergleich dazu die aktuelle Verdunstung, wie sie mit dem Popoff-Gerät gemessen wurde.

Wir sehen, daß sich die beiden Linienzüge weit voneinander entfernen, während die ebenfalls eingezeichnete, nach der Kissinger Methode errechnete aktuelle Verdunstung der P o p o f f - Linie sehr nahe kommt und vor allem in der Trockenperiode (mit ihren hohen Werten der potentiellen Verdunstung) die tatsächlich verdunsteten Wassermengen recht gut anzeigt. Auch die errechnete und die gemessene Kurve des Bodenwassergehalts (im oberen Teil der Abbildung) stimmen verhältnismäßig gut überein. Zur Berechnung des Bodenwassergehalts nach der Kissinger Methode und auf Grund der P o p o f f - Bilanzwerte wurde ein Anfangswert der Bodenfeuchte nach der Bohr- methode ermittelt (Kapitel B. 4).

Der  $f$ -Wert wurde in diesem ersten Beispiel der im Kapitel E 2 veröffentlichten Tabelle entnommen. In gleicher Weise sollte in einem zweiten Beispiel bei der Berechnung der Wasserverhältnisse des Gießener Lößbodens im Sommer 1950 verfahren werden, wobei sich aber größere Abweichungen ergaben. Die Ursache für diese Unstimmigkeiten fanden wir durch einen Vergleich der mit dem P o p o f f - Gerät gemessenen Verdunstungs- und Sickerwassermengen. Der Anteil der Verdunstung am Gesamtwasserverlust des Gießener Lößbodens war im fraglichen Zeitraum größer als die  $f$ -Werte unserer Tabelle. Wir rechneten versuchsweise mit einem konstanten  $f = 2$  für den ganzen Sommer und kamen damit zu dem Ergebnis der Abbildung 10. Im unteren Teil dieses Bildes stehen wieder die hohen Werte der potentiellen Verdunstung den Werten der aktuellen Verdunstung gegenüber, die nach der Kissinger Methode berechnet oder mit dem P o p o f f - Gerät gemessen wurden. Dabei entstammen die Angaben über die täglichen Verdunstungs- und Boden-Wassermengen im P o p o f f - Gerät dem bereits zitierten Bericht von S c h u b a c h (1), Tabellen 1 und 3. Der maximal ausschöpfbare Bodenfeuchtegehalt wurde aus den einjährigen Angaben der gleichen Arbeit geschätzt. Auch für die Berechnung nach der Kissinger Methode wurde der Anfangswert des Bodenwassergehalts diesem Bericht entnommen. Die errechneten Werte der aktuellen Verdunstung fielen allgemein etwas zu klein aus, kommen aber den P o p o f f - Werten doch bedeutend näher als die Werte der potentiellen Verdunstung. Auch der berechnete und der gemessene Verlauf des Bodenwassergehalts stimmen wieder gut miteinander überein. — Man sieht aus diesem Beispiel, wie wichtig es ist, einen einigermaßen reellen  $f$ -Wert in die Gleichungen einzuführen.

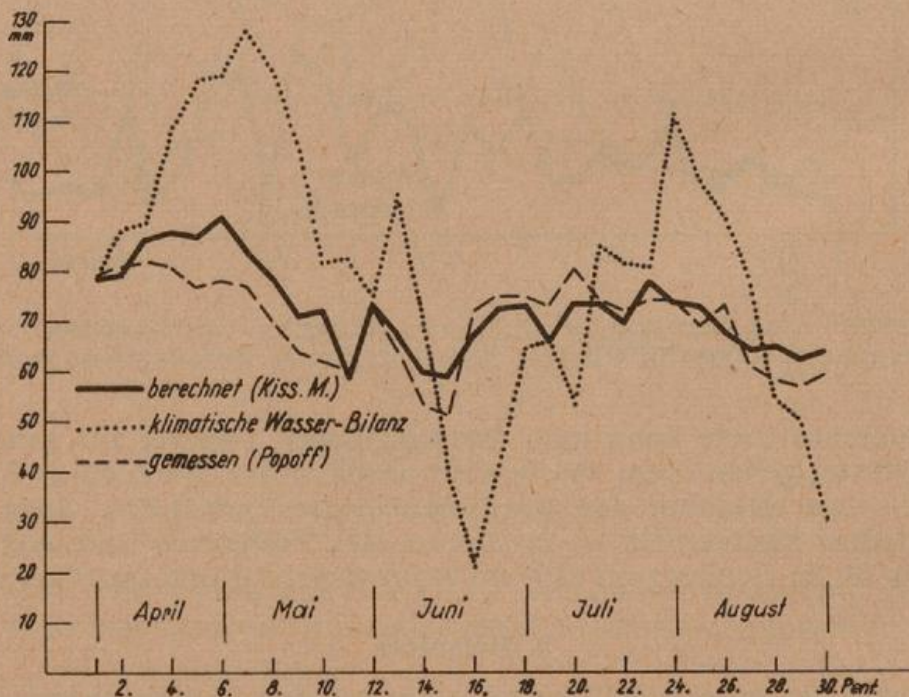


Abb. 11 Der Bodenwassergehalt im Gießener Lößboden, bestimmt nach verschiedenen Methoden (1950)

Den Grad des Fortschrittes, den die Albrechtsche bzw. die Kissinger Methode bringt, zeigt die Abb. 11. Hier wurden — wie das in der Praxis für alle Felder möglich ist, von denen man den möglichen maximalen und minimalen Bodenfeuchtegehalt kennt — die für Gießen errechneten relativen Werte von B wieder in mm-Angaben umgewandelt und zusammen mit den Popoff-Werten dem Gang der klimatischen Wasserbilanz gegenübergestellt. Gemessen an ihren Differenzen gegenüber der Kurve der klimatischen Wasserbilanz stimmen der berechnete und der gemessene Bodenfeuchteverlauf gut miteinander überein.

In einem dritten Beispiel wurde der Bodenwassergehalt für Stuttgart-Hohenheim im Jahre 1950 berechnet und mit den Bodenfeuchtwerten dieser Station verglichen. Die Meßwerte lieferte eine Arbeit von Baier (12), der in Tab. 2b für die Wiese einen maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalt von  $375 - 160 = 215$  mm auf 1 m Bodentiefe angibt. Am 16. Mai 1950 wurde auf der gleichen Wiese ein B von  $330.3 - 160 = 170$  mm gemessen, das sind 79% des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts. Mit diesem Wert wurde die Rechnung begonnen und es ergab sich der in Abb. 12 den gemessenen Werten (BF) gegenübergestellte Verlauf des Bodenwassergehalts (KM), nach dem die Resultate wieder in mm umgewandelt worden waren. Auch hier wurden der gemessene und der nach der Kissinger Methode berechnete Verlauf der Bodenfeuchte wieder der Differenzlinie aus Niederschlag und potentieller Verdunstung (N-V') gegenübergestellt, und wir sehen, daß die Berücksichtigung der potentiellen Temperatur ein zu großes Bodenwasserdefizit vorspiegelt.

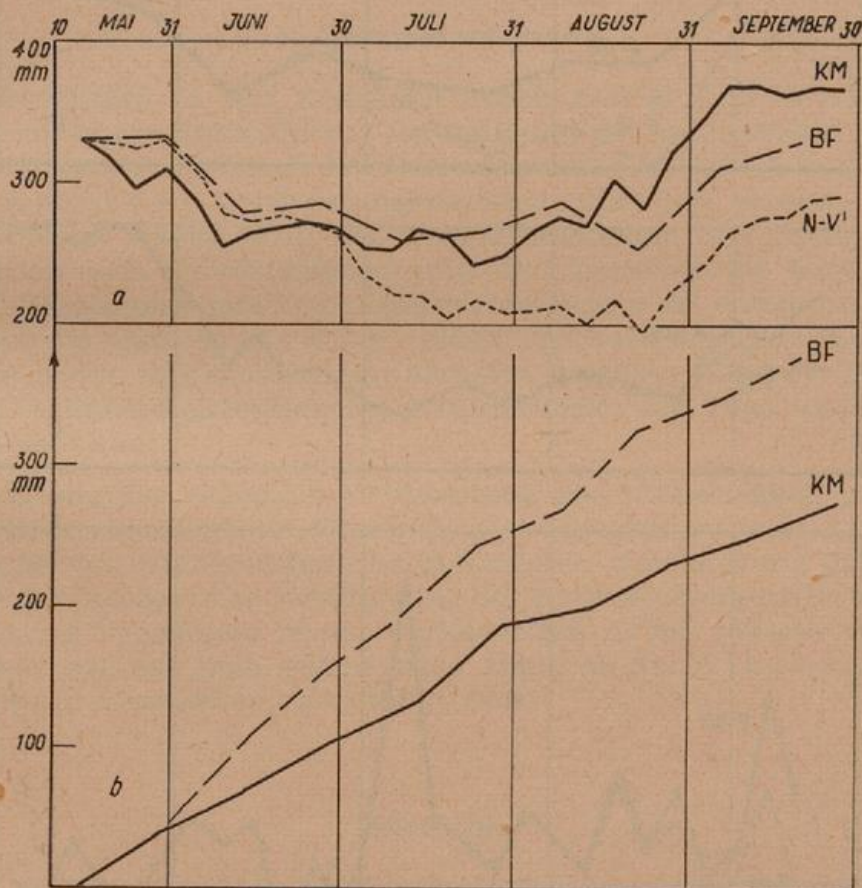


Abb. 12 a) errechneter und gemessener Bodenwassergehalt in mm (0—100 cm Tiefe) sowie klimatische Wasserbilanz  
 b) Summenlinien des Gesamt-Wasserverlustes (BF) und der Verdunstung auf Rasen in Hohenheim, 1950

Im unteren Teil der Abb. 12 sind einmal die Summenlinie der nach der Kissinger Methode errechneten Verdunstung und zum anderen die aus der Bodenfeuchte errech-

nete Summenlinie des Gesamtwasserverlustes der untersuchten Hohenheimer Wiese dargestellt. Beide Kurven laufen stark auseinander; sie sind auch gar nicht ohne weiteres miteinander zu vergleichen. Während sich die BF-Linie auf die Untersuchungsparzelle bezieht, für die B a i e r keine wesentlichen Verluste durch Abfluß oder Versickern annimmt, berücksichtigen wir diese Verluste durch den Faktor  $f$  entsprechend unserer Tabelle. Unsere Berechnung bezieht sich nur im Anfangsbodenfeuchtegehalt auf den Untersuchungsstandort; die Rechnung aber faßt ein viel größeres Gebiet ins Auge, auf das die B a i e r'schen Angaben nicht übertragbar sind. Bilden wir das Mittel aus allen benutzten  $f$ -Werten, so erhalten wir für den ganzen Untersuchungszeitraum ein  $f = 1.4$  und damit reduziert sich der Parzellenwasserverlust von 375 mm auf eine Gebietsverdunstung von 268 mm, auf einen Wert also, der dem nach der Kisinger Methode errechneten Wert sehr nahe kommt.

Die Frage, die uns nach diesen Beispielen beschäftigt, ist die nach der Bodenschicht, auf welche sich  $B$  und  $f$  beziehen sollen. Wir wollten ja keine absoluten Bodenfeuchtemengen in die Verdunstungsgleichung eingehen lassen, sondern nur eine Charakterzahl für die Durchfeuchtung des Bodens. Soll sich nun der maximal ausschöpfbare Bodenfeuchtegehalt, der für die Berechnung von  $B$  maßgeblich ist, auf 25 cm, auf 50 cm, auf 100 cm oder auf noch größere Tiefenbereiche erstrecken?

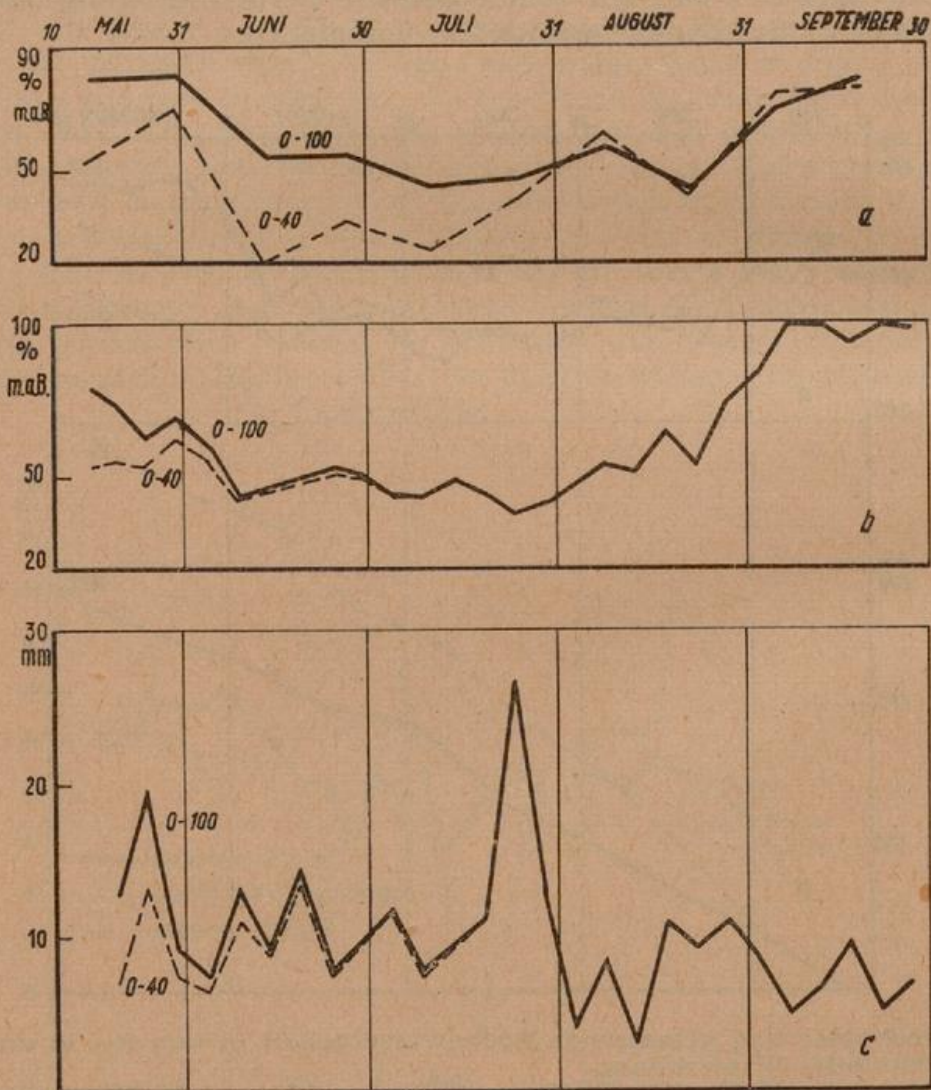


Abb. 13 a) gemessener Gang der Bodenfeuchte für 0—40 bzw. 0—100 cm Tiefe  
 b) berechneter Gang der Bodenfeuchte für dieselben Schichten  
 c) Verdunstung, einmal berechnet mit  $B$  für 0—40 cm Tiefe und dann mit  $B$  für 0—100 cm Tiefe

Die Entscheidung über diese Frage hängt davon ab, wieweit sich die Charakterzahl  $B$  beim Übergang von einer Schichtdicke zu einer anderen ändert. In der Abb. 13 ist im Teil a der gemessene Gang der Bodenfeuchte (in % des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts) für die beiden Schichtdicken 0—40 cm und 0—100 cm Tiefe dargestellt. In den Monaten Mai bis Juli laufen die Kurven durchschnittlich um 20% auseinander. Das heißt, daß sich die Austrocknung der oberen 40 cm des Bodens natürlich in der Bodenwassersumme für eine 40-cm-Schicht stärker als für eine 100-cm-Schicht ausprägt. Leider kam aber bei der Berechnung des Bodenwassergehalts für die beiden Schichten dieser Unterschied nicht so gut heraus. (Abb. 13b.) Die stärkere Austrocknung der obersten 40 cm muß sich auf die Berechnung der Verdunstungswerte auswirken, und wir können annehmen, daß die geringeren Verdunstungswerte für Mai und Juni — die mit einem auf 40 cm Tiefe bezogenen  $B$  ermittelt wurden — reeller sind (Abb. 13c). Im ganzen kommt aber nur ein Unterschied von 20 mm heraus, und man kann feststellen, daß es für die Berechnung der Verdunstung sicher keinen entscheidenden Unterschied bedeutet, wenn man  $B$  statt auf 100 auf 50 cm Schichtdicke bezieht. Da man aber grundsätzlich den Hauptwurzelbereich als die für eine Verdunstung entscheidende Bodenschicht ansehen kann, wird vorgeschlagen, alle Berechnungen generell auf 50 cm Bodentiefe zu beziehen, wie das auch Albrecht getan hat. Da es uns in erster Linie — wie der Titel der Arbeit sagt — auf die Berechnung der Verdunstung ankommt, können wir auf diese Weise sicher brauchbare Werte für diese Größe bekommen.

#### F. Zusammenfassung

Die Untersuchungen in Bad Kissingen haben gezeigt, daß es nötig ist, eine für Mitteleuropa brauchbare Methode zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung zu entwickeln. Die Tatsache, daß nach den Methoden von Thornthwaite, Penman, Haude und Albrecht Verdunstungssummen errechnet wurden, die stark voneinander verschieden waren, wird als Beweis angesehen, daß wenigstens zwei der jetzigen Methoden noch unbefriedigend sind. Die Entscheidung darüber, welche das sind, kann ohne Messungen mit Evapotranspirometern nicht endgültig gefällt werden. Es scheint, als ob die nach der Penman'schen und nach der Haude'schen Methode errechneten Werte den tatsächlichen am nächsten kommen. Eine Berücksichtigung des Windes in der Verdunstungsformel, bei Berechnungen für Tage und Pentaden, wird für notwendig gehalten.

Eine Berechnung der aktuellen Verdunstung aus Niederschlag, potentieller Verdunstung und Bodenwassergehalt ist möglich, mindestens in guter Annäherung. Eine gute Bestimmung von Niederschlag und potentieller Verdunstung vorausgesetzt, bereitet nur noch die rechnerische Bestimmung des Bodenwassergehalts Schwierigkeiten. Die befriedigenden Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit müssen sich an weiteren Beispielen bestätigen, ehe man sicher sagen kann, ob die Albrecht'sche Methode bzw. ihre Kissinger Abwandlung brauchbar sind.

#### Literatur

- (1) Schubach, K.: Wasserhaushaltsuntersuchungen an verschiedenen Bodenarten unter besonderer Berücksichtigung der Verdunstung (nach Methode Popoff). Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 40 (1952).
- (2) Uhlig, S.: Die Untersuchung und Darstellung der Bodenfeuchte. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 30 (1951).
- (3) Albrecht, F.: Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche. Arch. Meteor. Geophys. Biokl. B, 2, 1 (1951).

- (4) Haude, W.: Zur Möglichkeit nachträglicher Bestimmung der Wasserbeanspruchung durch die Luft und ihrer Nachprüfung an Hand von Topfversuchen und Abflußmessungen. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 32, 27 (1952).
- (5) Jesser, E., Dimitz, L., Wilfinger, H.: Die 14-Uhr-Temperatur, ein wichtiger Klimafaktor für das Pflanzenleben. Wetter und Leben 5, 57 (1953).
- (6) Haude, W.: Verdunstungsmenge und Evaporationskraft eines Klimas. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone, Nr. 42, 225 (1952).
- (7) Penman, H. L.: A general survey of meteorology in agriculture and an account of the physics of irrigation control. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 75, 293 (1949).
- (8) Thornthwaite, C. W.: An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38, 55 (1948).
- (9) Uhlig, S.: Der praktische Wert einer Berechnung der potentiellen Verdunstung. Im Druck.
- (10) Thornthwaite, C. W., Mather, John R.: The role of Evapotranspiration in climate. Arch. Meteor. Geophys. Biokl. B 3, 16 (1951).
- (11) Friedrich, W.: Hydrographie. Naturforschung und Medizin in Deutschland, 1939 bis 1946, 18, Geophysik, Teil II, Wiesbaden (1948).
- (12) Baier, W.: Ergebnisse von Bodenfeuchteuntersuchungen in Stuttgart-Hohenheim. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 37 (1952).