

3.77093

Mitteilungen
des
Deutschen Wetterdienstes

Nr. 13
(Band 2)

DK 551.573 : 551.508.72

**Bestimmung des Verdunstungsanspruchs
der Luft mit Hilfe von Piche-Evaporimetern**

von

Siegfried Uhlig

(mit 14 Abbildungen im Text)

Bad Kissingen 1955

I A 11

Inhalt

	Seite
I. Einführung	3
II. Meßmethodik	3
III. Instrumentelle Erfahrungen	5
IV. Erfahrungen hinsichtlich der Aufstellung des Rohres	
a) Einfluß des Niederschlages	6
b) Einfluß weiterer meteorologischer Elemente	6
V. Meßergebnisse	9
VI. Vergleich zwischen dem Verdunstungsanspruch und anderen meteorologischen Größen	
a) Tageswerte	10
b) Pentadenwerte	12
c) Monatswerte	14
VII. Jahresgang des Verdunstungsanspruchs	17
VIII. Die regionale Verteilung des Verdunstungsanspruchs	19
IX. Verdunstungsanspruch und potentielle Evapotranspiration des bewachsenen Bodens	20
Zusammenfassung	23
Literatur	23



Anschrift des Verfassers:

Dr. S. Uhlig, Bad Kissingen, Kurhausstraße 9, Deutscher Wetterdienst,
Zentralstelle, Abt. Agrarmeteorologie

I. Einführung

Seit Jahrzehnten wird — namentlich von seiten der Landwirtschaft — immer wieder eine Erweiterung des meteorologischen Meßprogramms um direkte Messungen des Verdunstungsanspruchs der Atmosphäre gefordert. Diese Größe „Verdunstungsanspruch“ ist noch nicht fest definiert; die Definition ergibt sich vielmehr aus der Methode der Bestimmung. So kann man unter dem Verdunstungsanspruch die pro Zeiteinheit von einem Piche-Evaporimeter mit festgelegten Abmessungen und mit einheitlich freier Aufhängung in 2 m Höhe abgegebene Wassermenge in ccm verstehen. Hat man den Verdunstungsanspruch so definiert, so kann man die nach irgendwelchen anderen Methoden gemessene oder auch berechnete Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf nur dann als Verdunstungsanspruch bezeichnen, wenn gleiche Werte auch mit dem Piche-Evaporimeter entsprechend obiger Definition ermittelt worden wären. Eine Reihe von Untersuchungen beschäftigte sich mit den verschiedenen Methoden, die für eine Messung der Wasserdampf-Aufnahmefähigkeit der Luft in Betracht kommen, ohne daß bisher ein endgültiges Urteil über deren Brauchbarkeit möglich gewesen wäre. Es sind auch Stimmen laut geworden, die derartige Messungen in einem Beobachtungsnetz als unmöglich oder als unnötig bezeichnen. Die Diskussion über diese Fragen hält noch immer an; sie hat sogar in den letzten Jahren im Zusammenhang mit dem Streben, sich einen Überblick über die regionalen Unterschiede in der potentiellen und aktuellen Evapotranspiration des Bodens zu verschaffen, einen neuen Auftrieb erhalten.

Da es dem Deutschen Wetterdienst angebracht erschien, dieser Diskussion eine weitere Grundlage zu verschaffen, führten die nachfolgend aufgeführten Stationen vom 16. Juli bis zum 16. Oktober 1954 netzmäßige Verdunstungsmessungen mit dem bekannten Piche-Evaporimeter (künftig „Rohr“ genannt) durch:

Agrarmeteorologische Versuchs- und Beratungsstellen Hamburg, Braunschweig-Völkenrode, Gießen mit den Versuchsfeldern Heidelberg-Grenzhof und Fuchskaute (Oberwesterwald), Geisenheim, Stuttgart-Hohenheim, Bonn, Trier, Neustadt (Weinstraße) und Würzburg.

Meteorologische Observatorien Hohenpeißenberg (Obb.) und Freiburg (Meßfeld Sulzburg/Baden).

Wetterstationen Weißenburg (Bay.), Wasserkuppe (Rhön) und Stötten (Alb).

Medizin-Meteorologische Forschungsstellen Bad Tölz, Oberstdorf, Wyk und Norderney.

II. Meßmethodik

Da eine einheitliche Meßmethodik die Grundvoraussetzung für alle klimatologischen Untersuchungen ist, waren alle Meßstationen an folgende Abmachungen gebunden:

Instrument: Das Piche-Rohr wurde in deutscher Sprache erstmals in der „Zeitschrift d. österr. Gesellschaft f. Meteorologie“ 8, 270 (1873) beschrieben, und zwar unter Bezugnahme auf das Bulletin de l'Association scientifique de France, X. Band, S. 166

(Abb. 1) Gesamtlänge des Rohres:	335 mm
innere nutzbare Länge:	320 mm
äußerer Durchmesser:	14 mm
innerer Durchmesser:	12 mm

Meßeinteilung: 0.5—30.0 ml (= ccm)

Filterpapierscheiben: weiß, kreisrund, 30 mm Durchmesser

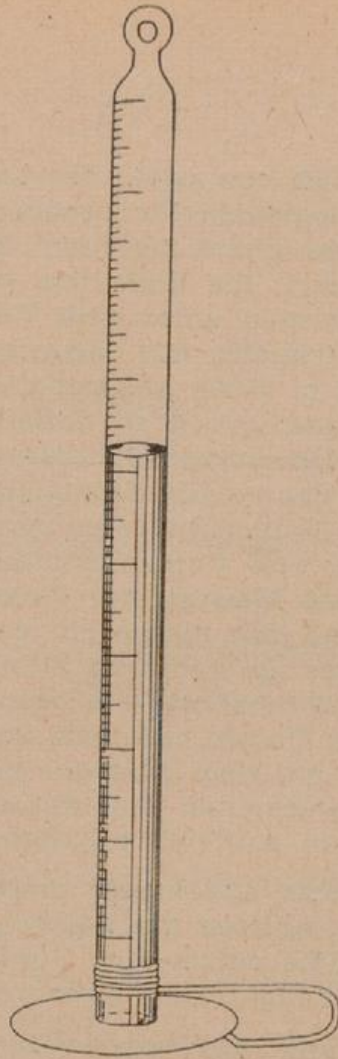


Abb. 1 Piche-Evaporimeter

Aufstellung: Das Rohr wurde abnehmbar derart an einem Pfahl aufgehängt, daß sich die Filtrierpapierscheibe in 2 m Höhe befand. Das Rohr wurde an dem Ausleger eines in der Nähe der Klimahütte völlig frei stehenden Pfahles so aufgehängt, daß es von dem Pfahl wenigstens 10 cm entfernt und nach Süden exponiert war. Eine gute Ventilation sollte gewährleistet sein. Das Rohr wurde an 2 Stellen festgehalten, damit es nicht vom Wind ins Pendeln gebracht werden konnte. Schutz gegen Strahlung und Niederschlag wurde nicht angebracht.

Windmessung: An einigen der Meßstationen wurde in der Höhe der Filtrierpapierscheiben der Windweg in 24 Std. gemessen, woraus sich die mittlere tägliche Windgeschwindigkeit berechnen ließ. Von fast allen Stationen lagen zudem die normalen Windmessungen außerhalb der „Bodenreibungszone“ (mindestens 6 m über Grund) vor.

Beobachtung: Die verdunstete Wassermenge wurde an jedem Morgen um 8.00 Uhr gemessen. Anschließend füllte man das Rohr wieder vollständig mit Wasser auf, brachte (täglich!) eine neue Scheibe Filtrierpapier auf, die vorher in der Mitte mit einer dünnen Nadel durchstoßen worden war, und notierte den neuen Anfangswert nach vollständiger Wassersättigung des Filtrierpapiers. Aus den Windmessungen wurden die mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten jeweils für den gleichen Zeitraum (8.00—8.00 Uhr) ermittelt, für den man die Verdunstungswerte feststellte.

Meßergebnisse: Die Meßergebnisse wurden in einer Manuskript-Vervielfältigung zusammen mit einem Erfahrungsbericht niedergelegt; sie werden von der Zentralstelle des Deutschen Wetterdienstes, Abt. AM, Bad Kissingen, auf Wunsch zur Verfügung gestellt. An speziellen Auswertungen erschien bis jetzt ein Aufsatz von Wächtershäuser (1).

III. Instrumentelle Erfahrungen

Die vor Jahren von Leick (2) veröffentlichten Ausführungen zur instrumentellen Seite der Piche-Evaporimeter-Messungen sind zum größten Teil voll gültig. Das von uns verwendete Rohr und die Art seiner Behandlung können bei späteren Messungen beibehalten werden. Vor allem darf man den Durchmesser der Filtrierpapierscheibe von 30 mm als am besten geeignet ansehen, da bei dieser Größe einerseits eine gleichmäßige Durchfeuchtung der Scheibe — auch bei starker Verdunstung — gewährleistet ist und andererseits der Wasservorrat nicht zu schnell aufgebraucht wird. Bei größeren Scheiben besteht die Gefahr des Ausfransens und Abreißen. Außerdem kann bei großen Scheiben und bei starker Verdunstung der Rand abtrocknen, weil das Wasser nicht schnell genug nachgesaugt wird. Es muß auch als Nachteil angesehen werden, daß große Scheiben ein Nachfüllen des Rohres im Laufe eines Meßtages erforderlich machen können. Kleinere Scheiben (z. B. mit 15 mm Durchmesser) haben den Nachteil, daß sie zu kleine Wasserabgaben erzwingen, was die Messung erschwert. Beim Vergleich der mit verschiedenen großen Scheiben gewonnenen Meßergebnisse muß man daran denken, daß zu Zeiten größerer Insolation der Einfluß der Strahlung wächst, je größer die Scheibe wird. Auch der Einfluß des Windes erhält je nach der Scheibengröße ein unterschiedliches Gewicht. So ist eine einfache Parallelität im Gang der mit verschiedenen großen Filtrierpapierscheiben gewonnenen Meßergebnisse nicht zu erwarten.

Für klimatologische Messungen ist die Farbe der Filtrierpapierscheiben ohne Bedeutung. Im Hinblick darauf, daß wegen der unterschiedlichen Strahlungsabsorption die weißen Scheiben weniger Wasser verbrauchen als etwa grüne (die mitunter für ökologische Messungen bevorzugt werden), wird die Verwendung weißer Scheiben empfohlen. Es empfiehlt sich weiter, eine steife Sorte Filtrierpapier auszuwählen.

Wie Wächtershäuser schreibt, wäre es zulässig, für mindestens 5 Tage die gleiche Scheibe zu verwenden. Da es aber sicher an der einen oder anderen Station hin und wieder unmöglich sein wird, wegen einer Verschmutzung bei Staubtreiben usw. oder wegen Beschädigungen die Scheiben länger als einen Tag zu benutzen, und da die Rohre ohnehin jeden Tag mit Wasser aufgefüllt werden sollen, wird einheitlich eine tägliche Erneuerung der Scheiben auch für künftige Meßnetze empfohlen.

Die Frage, ob es wirklich von Bedeutung ist, daß man immer frisch destilliertes Wasser im Rohr hat, erscheint noch nicht entschieden. Es muß noch experimentell geklärt werden, ob man mit der Verwendung gewöhnlichen Leitungswassers einen nennenswerten Fehler begeht. Dazu wird empfohlen, vor dem Einfüllen in die Rohre die Temperatur der zum Vergleich herangezogenen Wassersorten festzustellen bzw. diese erst auf die gleiche Höhe zu bringen. Es empfiehlt sich, bis zur Klärung dieser Frage weiterhin destilliertes Wasser zu verwenden.

Ein weiteres Experiment müßte entscheiden, ob die Länge der Wassersäule über der Filtrierpapierscheibe einen Einfluß auf die Verdunstungsgeschwindigkeit hat. Da man aber einen solchen Einfluß annehmen kann, sollte man auch weiterhin täglich das Rohr mit Wasser auffüllen, um einen evtl. Fehler möglichst klein zu halten.

Man muß darauf achten, daß der Federring, der die Filtrierpapierscheibe an das Rohr andrückt, genau parallel zur Rohröffnung liegt, damit die Scheibe allseitig mit gleichem Druck gegen diese Öffnung gepreßt wird.

Vor dem Auflegen auf das umgekippte und mit Wasser nachgefüllte Rohr wird die Scheibe, die man vorher 10 Minuten lang in destilliertem Wasser einweicht, in der Mitte mit einer feinen Nadel durchbohrt. Damit will man erreichen, daß einmal das Wasser aus dem Rohr schneller nachfließt und alle Teile der Scheibe gleichmäßig durchfeuchtet werden, und daß zum anderen die an die Stelle des verbrauchten Wassers tretende Luft in kleinen Bläschen im Rohr emporsteigt. Dieses Durchbohren der Scheibe ist eine Schwäche des Verfahrens, da es subjektive Fehler mit sich bringt. In Frankreich soll es U-förmig gebogene Rohre mit einem besonderen Luft-einlaß gegeben haben. Ein solches Modell wäre wahrscheinlich besser als das unsere. Aber man kann bei unserem Modell die möglichen Fehler dadurch klein halten, daß man nur bereits nasse Scheiben durchsticht, so daß ein Zuquellen des Lochs bei nachträglicher Befeuchtung nicht eintreten kann.

IV. Erfahrungen hinsichtlich der Aufstellung des Rohres

a) Einfluß des Niederschlages

Bei der von uns gewählten freien Aufstellung des Rohres sammelt sich bei Regen Wasser auf der Filtrierpapierscheibe an, und diese nicht unerheblichen Wassermengen müssen erst wieder verdunsten, ehe die Papierscheibe wieder Wasser aus dem Rohr nachsaugt. Die in solchen Fällen gemessene Verdunstung fällt zu klein aus.

Leick erwähnte, daß ein reichlicher Taufall in der Nacht zur Folge haben kann, daß am Morgen die Wassersäule im Rohr höher steht als am vorhergehenden Abend. Auch an Regentagen, namentlich bei Gewitterschauern, kann vom Rohr Wasser aufgenommen werden. In einer brieflichen Mitteilung wird diese Erscheinung von Köhn wie folgt erklärt: „Wenn sich bei relativ höherer Temperatur und stärkerer Verdunstung bereits eine größere Luftmenge im Rohr befindet, und es setzt dann plötzlich ein starker Regen mit kräftiger Abkühlung ein, dann kann es vorkommen, daß infolge der Kontraktion der Luft im Rohr trotz des kleinen Loches in der Filtrierpapierscheibe nicht Luft, sondern aus der mit Wasser übersättigten und überschwemmten Papierscheibe Wasser ins Rohr eingesaugt wird. In einem Falle wurde ca. 1 Stunde nach einem starken Regenschauer ein Ansteigen der Wassersäule im Rohr um 0.1 cm^3 sicher beobachtet“.

Man könnte daran denken, diese mögliche Verfälschung durch den Niederschlag dadurch auszuschalten, daß man das Rohr gegen den Niederschlag schützt, z. B. durch einen Stanniolkegel, der den unteren Teil des Rohres bedeckt. Man muß aber bedenken, daß ein solcher Schutz auch den Einfluß anderer meteorologischer Elemente behindert, daß er den Wind abbremst, die Strahlung abschirmt und ein kleines Luftpolster mit veränderter Lufttemperatur und -feuchte über der Papierscheibe festhält. Auf diese veränderten Bedingungen wird nachstehend eingegangen.

b) Einfluß weiterer meteorologischer Elemente

Die Meßergebnisse eines frei aufgehängten Rohres werden außer vom Niederschlag noch von der Lufttemperatur, der Luftfeuchte (dem Sättigungsdefizit), dem Wind und der Strahlung beeinflusst. Eine Reihe von bisherigen Veröffentlichungen ließ erkennen, daß dabei die Abhängigkeit der Tageswerte der Verdunstung vom Tagesmittel des Sättigungsdefizits, d. h. der Resultierenden aus Lufttemperatur und -feuchte, am stärksten ist. In zweiter Linie übt der Wind und anscheinend erst in dritter Linie die Strahlung einen Einfluß auf die Verdunstung des Rohres aus. Ob diese Reihenfolge richtig ist, muß solange dahingestellt bleiben, bis die Strahlungsmessung genau so zu den meteorologischen Standardmessungen gehört wie z. B. die Temperaturmessung. Die Strahlung bestimmt ja erst in entscheidendem Maße das Sättigungsdefizit, weshalb man sich rein gefühlsmäßig dagegen sträubt, die Placierung dieses Elementes an dritter Stelle hinzunehmen.

Wenn man sich nun die Frage vorlegt, ob man bei der freien Aufhängung des Rohres bleiben oder diesem Instrument einen irgendwie gearteten Schutz gegen ein oder mehrere meteorologische Elemente verschaffen soll, dann muß man sich erst darüber klar werden, was man messen will. Geht es darum, eine Größe zu messen, deren Verlauf voraussichtlich den Gang der potentiellen Verdunstung der Erdoberfläche — einer heute in meteorologischen Betrachtungen viel verwendeten Größe — widerspiegeln wird, dann ist nicht einzusehen, warum man das Rohr z. B. gegen die direkte Sonnenstrahlung schützen sollte. Denn ohne Zweifel wird doch auch die Wasserabgabe der Erdoberfläche außer von der Temperatur und der Feuchte der

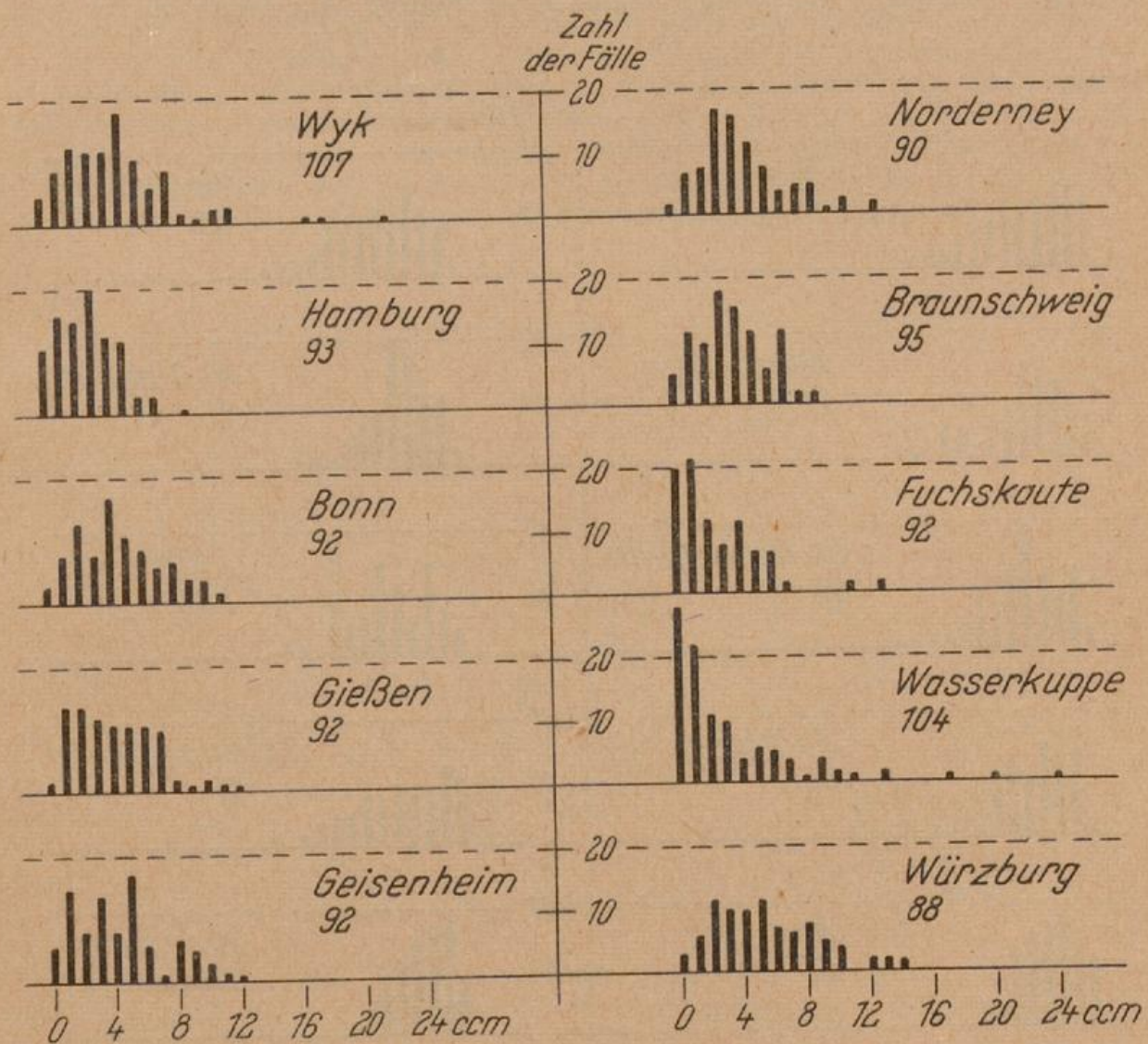


Abb. 2a Verteilung der Meßwerte des Verdunstungsanspruchs (unter dem Ortsnamen Gesamtzahl der Fälle)

Luft sowie der Windgeschwindigkeit auch von der Sonnenstrahlung beeinflusst. Schirmt man die direkte Sonnenstrahlung ab, dann wird die Wasserabgabe des Rohres nur noch von dem Sättigungsdefizit der Luft bestimmt, welche das Rohr umspült, sowie von der Intensität, mit der dieses Umspülen vor sich geht. Diese Intensität hängt ab von der Windgeschwindigkeit, der Turbulenz der Luft und des Austausches sowie von dem Grad des „Schutzes“ gegen eine Ventilation, den der Sonnenschirm ebenfalls bewirkt. Die einzige unbeeinflusste Größe, von der die Wasserabgabe des Rohres dann noch abhängt, ist das Sättigungsdefizit, das wir aber ohne-

hin in der Klimahütte messen. Nur wenn das Rohr der Strahlung und der Ventilation frei ausgesetzt ist, messen wir eine bisher nicht berücksichtigte klimatische Größe. Wir haben dann in dem „Verdunstungsanspruch“ ein Analogon zu der Abkühlungsgröße, d. h. einen Ausdruck für die Wirkung eines Komplexes mehrerer meteorologischer Elemente.

Nun sollen diese Überlegungen nicht heißen, daß man etwa der Meinung sein könne, die Verdunstung der freixponierten Filtrierpapierscheibe laufe jener des bewachsenen Bodens parallel. Bei den beiden Verdunstungskörpern handelt es sich um zwei verschiedene physikalische Systeme. Man denke nur an die mehrfach experimentell nachgewiesenen Abweichungen des Transpirationsverlaufs in den Mittagstunden vom Gang der Wasserabgabe eines Rohres. Aber man dürfte doch er-

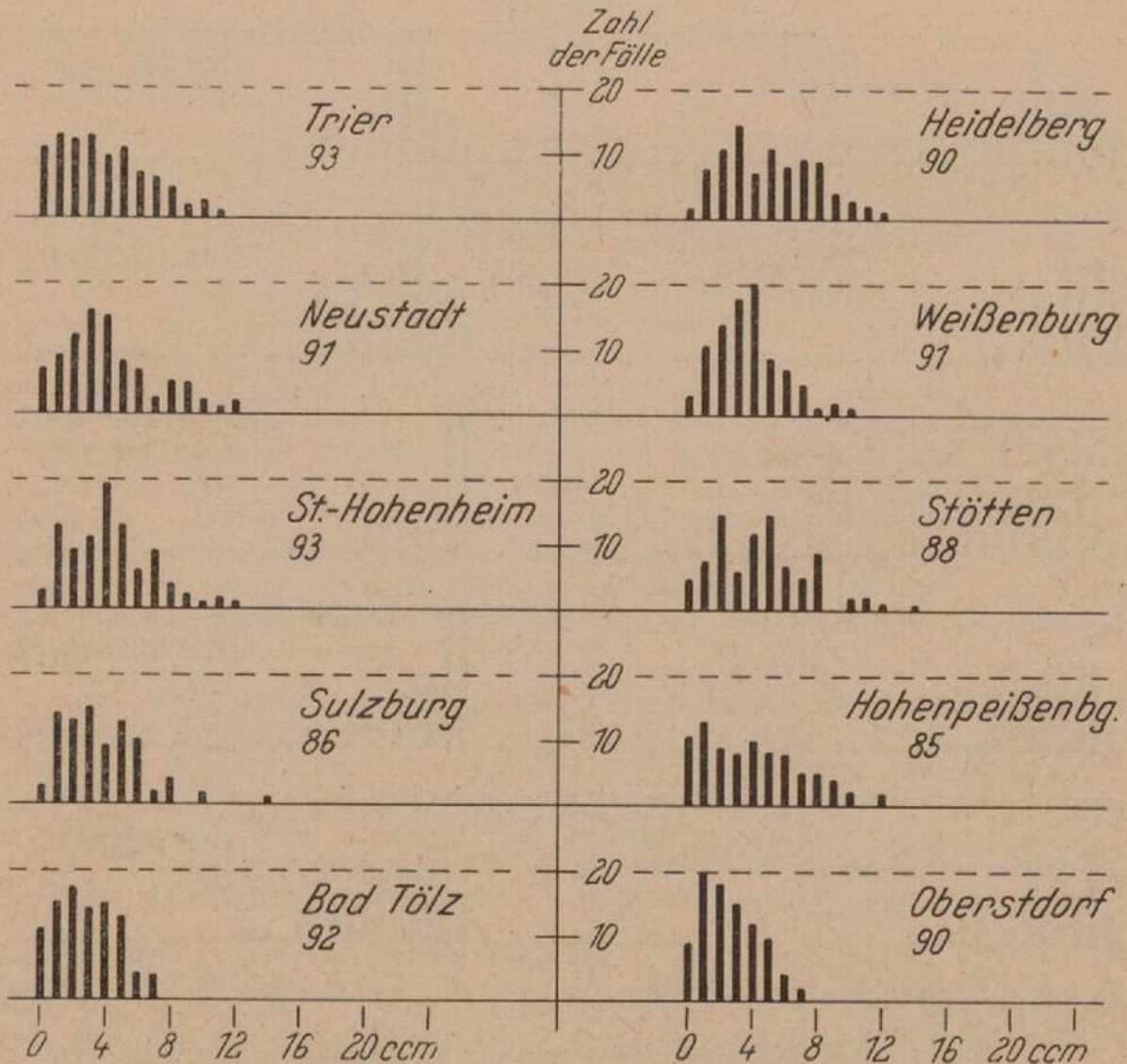


Abb. 2b. (wie 2a)

warten, daß wenigstens die Amplituden der Tageswerte der potentiellen Verdunstung des freien bewachsenen Bodens von dem Gang der Tages-Werte des frei aufgehängten Rohres besser angedeutet werden, als von einem gegen die direkte Sonnenstrahlung und damit teilweise auch gegen den Wind geschützten Instrument. Auch der Gedanke an Penman's Formel zur Berechnung der potentiellen Verdunstung, in welche gerade die Sonnenscheindauer mit großem Gewicht eingeht, war für die Wahl der freien Aufhängung bei unseren Messungen mitbestimmend.

Mit welchen Unterschieden man in den Tageswerten der Verdunstung eines frei und eines geschützt aufgehängten Piche-Rohres rechnen muß, steht allerdings noch nicht fest. Man darf nicht vergessen, daß das Sättigungsdefizit der Luft selbst eine komplexe Größe ist, in welche die Strahlungsverhältnisse indirekt mit eingehen. Es fehlt aber bisher die Möglichkeit, in verschiedenen Klimagebieten gleichzeitig durchgeführte Messungen mit in gleicher Höhe frei und geschützt aufgehängten Piche-Rohren zu vergleichen. Solche Messungen werden im Jahre 1955 vom Deutschen Wetterdienst durchgeführt.

V. Meßergebnisse

Die Meßergebnisse eines jeden Tages und von jeder der beteiligten Stationen wurden in der bereits im Abschnitt II erwähnten Manuskript-Vervielfältigung niedergelegt, die Interessenten zugänglich ist. Abb. 2 zeigt die Verteilung der Tageswerte des Verdunstungsanspruchs auf die einzelnen ccm-Intervalle. Angegeben ist jedesmal die Klassenmitte, unter 0 stehen also die Werte von 0 bis 0.4 ccm, unter 1 jene von 0.5 bis 1.4 ccm usw. Die Säulen deuten die Zahl der Fälle an, die Zahlen unter dem Ortsnamen geben Auskunft über die Gesamtzahl der Meßtage.

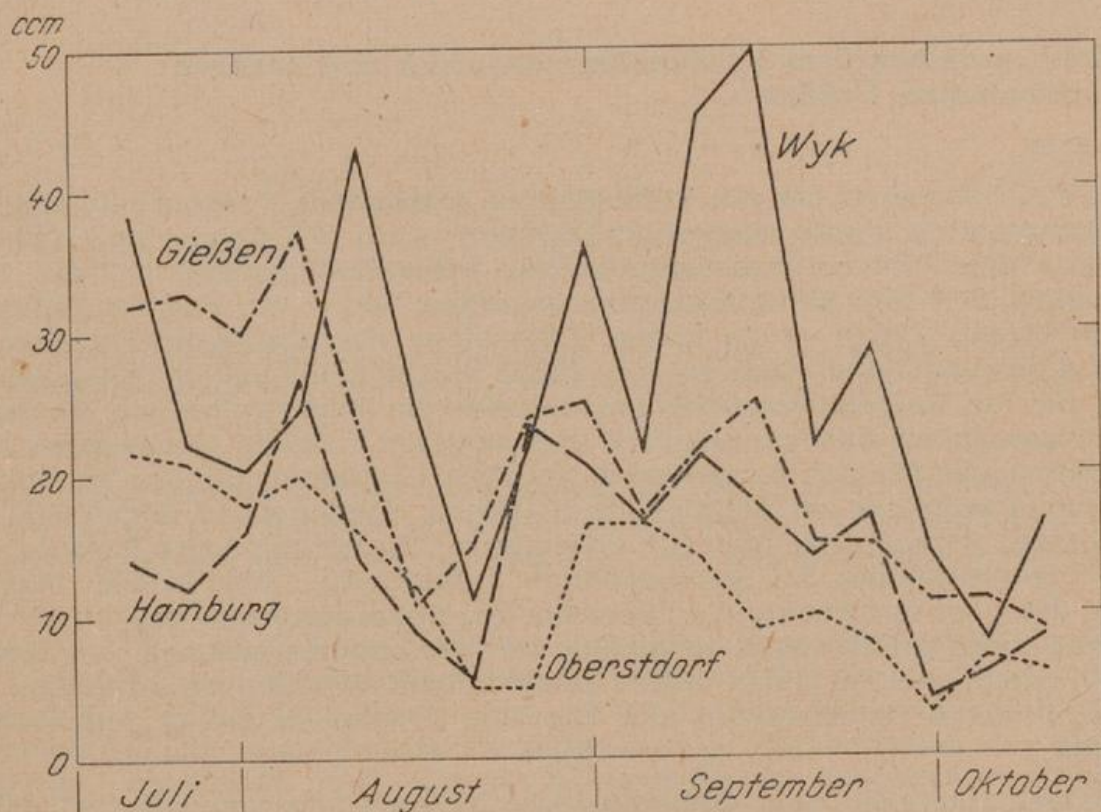


Abb. 3 Verlauf der Pentadenwerte des Verdunstungsanspruchs an vier Stationen

Wir erhalten zunächst ein Bild von der Größenordnung, in der sich die täglichen Wasserabgaben eines Piche-Rohres bewegen. Die Werte liegen in ihrer Masse zwischen 0 und 14 ccm. Nur an der Küste und auf Bergstationen, d. h. an windexponierten Stellen, treten gelegentlich höhere Werte auf. Der häufigste Wert liegt im Durchschnitt aller Stationen bei 3 ccm. Bis zu diesem Verdunstungsanspruch steigt bei der normalen Verteilung für tiefer gelegene Stationen die Zahl der Fälle an, um dann allmählich nach höheren Werten hin abzufallen. Eine hiervon abweichende Verteilung zeigen die Bergstationen Hohenpeißenberg, Wasserkuppe und Fuchskaute, die eine ausgeprägt schiefe Verteilung aufweisen; hier liegen relativ viele Fälle zwischen

0 und 1 ccm. Das mag an der größeren Nebelhäufigkeit (aufliegende Wolken) auf den Bergen liegen. Die Bergwetterwarte Stötten weicht jedoch von diesen Verhältnissen ab.

Abb. 3 zeigt uns für vier ausgewählte Stationen den Verlauf der Pentadenwerte des Verdunstungsanspruchs während der Meßperiode. Dem normalen, vom Sommer zum Herbst hin abfallenden Gang des Verdunstungsanspruchs sind große kurzperiodische Schwankungen überlagert, die offenbar in starkem Maße vom Wind abhängen. Das geht aus einem Vergleich der Stationen Wyk und Hamburg hervor. Die an dem windgeschützten Hamburger Standort gemessenen Werte des Verdunstungsanspruchs schwanken jedenfalls von Pentade zu Pentade weit weniger als die an der Küste (Wyk) ermittelten. Auch der Vergleich der Oberstdorfer Meßergebnisse, die für Alpentäler repräsentativ sind, mit denen der frei gelegenen Station Gießen oder wieder mit Wyk zeigt uns, daß der Verdunstungsanspruch große regionale Unterschiede aufweist, die durch die Unterschiede in den Klimaverhältnissen zwischen den kontinentaleren und den mehr ozeanischen, zwischen den windstarken und den windschwachen Landschaften hervorgerufen werden. Es erscheint daher angebracht, einen statistischen Vergleich zwischen dem Verdunstungsanspruch und dem Gang der meteorologischen Elemente durchzuführen, und zwar mit dem Ziel, die Möglichkeiten für eine Berechnung des Verdunstungsanspruchs zu prüfen.

VI. Vergleich zwischen dem Verdunstungsanspruch und anderen meteorologischen Größen

a) Tageswerte

Die starke Abhängigkeit des mit Piche-Rohren gemessenen Verdunstungsanspruchs vom Sättigungsdefizit wurde wiederholt bewiesen. Auch Wächtershäuser hat Stundenwerte des Verdunstungsanspruchs (der Piche-Verdunstung) mit der Windgeschwindigkeit und dem Sättigungsdefizit korreliert und — bei einer Zufallsgrenze von 0.27 in beiden Fällen — im ersten Falle einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0.45$, im zweiten Falle einen solchen von $r = 0.85$ gefunden. Er gibt auch eine Gleichung für die Regressionsgerade an, der sich die Punktwolke der Wertepaare „Verdunstungsanspruch-Sättigungsdefizit“ gut angleicht. Solche Gleichungen haben jedoch zunächst nur für den betreffenden Standort Gültigkeit, für den sie ermittelt wurden. Abb. 4 zeigt das am Beispiel der Stationen Hamburg und Wyk/Föhr. Auch für diese beiden Stationen wurden die Wertepaare „Tagessumme des Verdunstungsanspruchs-Tagesmittel des Sättigungsdefizits“ aufgetragen. Bei beiden Stationen gleicht sich das Gros der Punkte den (berechneten) Regressionsgeraden gut an, wobei die Streuung umso größer wird, je größer der Verdunstungsanspruch ist. Dadurch bleibt der prozentuale Fehler in jedem Intervall des Verdunstungsanspruchs etwa gleich. Grundsätzlich unterscheiden sich aber die Ergebnisse der beiden Stationen dadurch, daß

1. Die Regressionsgeraden eine unterschiedliche Neigung haben, was besagt, daß für jede Station eine andere Gleichung die Beziehung zwischen Verdunstungsanspruch und Sättigungsdefizit festlegt, und
2. in Wyk „Ausreißer“ auftreten, die nach hohen Werten des Verdunstungsanspruchs hin abweichen, während man in Hamburg keinen der Punkte als Ausreißer bezeichnen kann.

Die Ursache für diese Unterschiede ist darin zu suchen, daß die Hamburger Messungen in einem stark windgeschützten Garten in der Innenstadt durchgeführt wurden, während in Wyk ein extrem bewindeter Meßplatz ausgewählt worden war. So wurden z. B. im August 1954 folgende mittlere Windgeschwindigkeiten in 2 m Höhe gemessen:

Hamburg 0.9 m/sec

Wyk 2.5 m/sec.

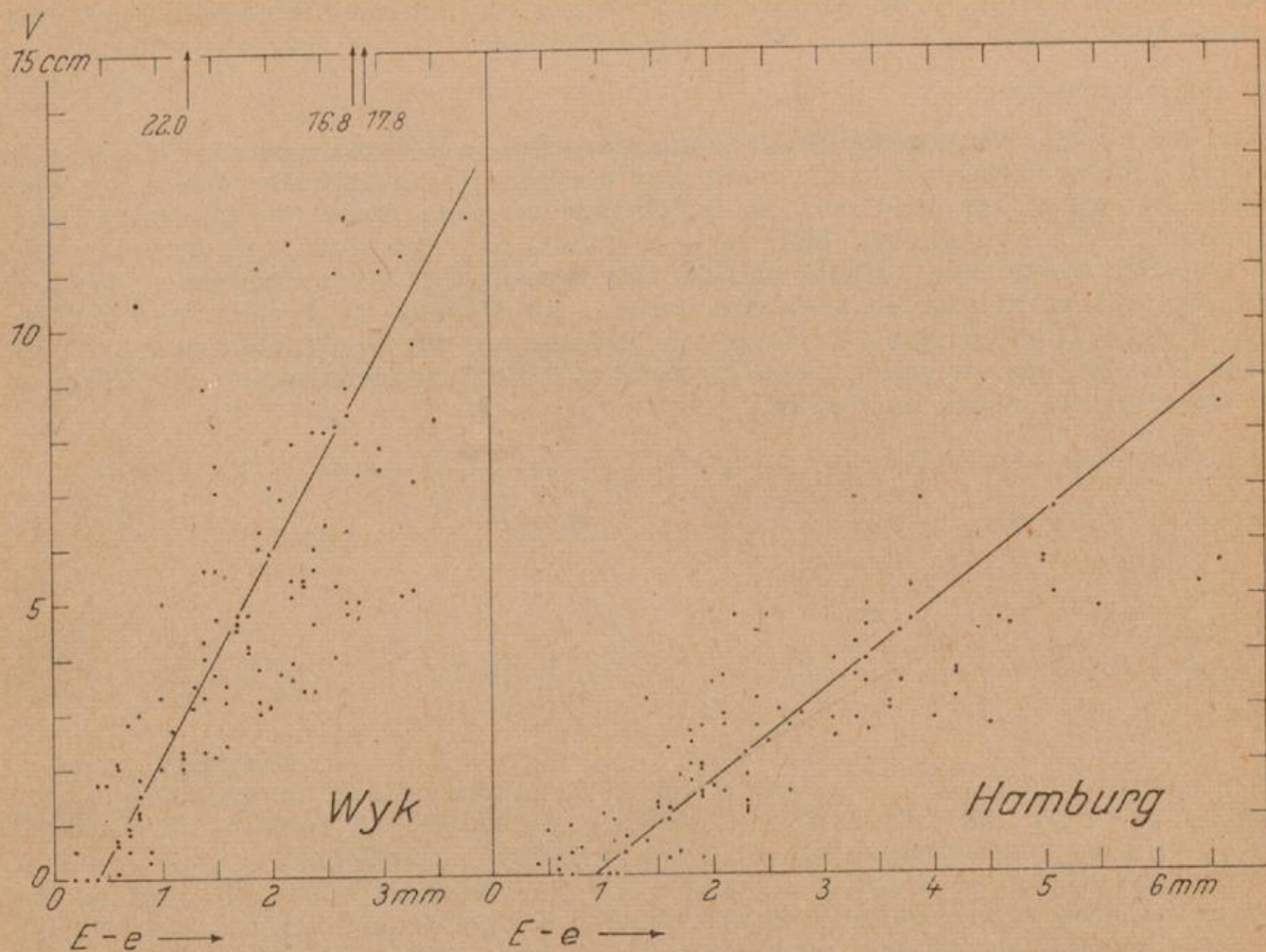


Abb. 4 Abhängigkeit der Tagessummen des Verdunstungsanspruchs V vom Tagesmittel des Sättigungsdefizits an einem windgeschützten (Hamburg) und einem stark bewindeten Standort (Wyk/Föhr)

Infolgedessen ergaben sich bei fast gleichem Sättigungsdefizit (Hamburg 3.2 mm, Wyk 3.0 mm) große Unterschiede im Verdunstungsanspruch. In Hamburg verdunsteten 103 mm Wasser aus dem Rohr, in Wyk aber 164 mm; das sind 159% der Hamburger Menge.

Berechnet man am Beispiel Wyk für die 3 „Ausreißer-Tage“ (siehe Pfeile in Abb. 4) das Tagesmittel der Windgeschwindigkeit in 12.3 m über Grund (permanentes Windmeßgerät), so erhält man einen Wert von 14.0 m/sec, während das Mittel für den gesamten Beobachtungszeitraum 7.3 m/sec beträgt. Es handelte sich also um ausgesprochen windstarke Tage. Für die Abweichung der beobachteten Werte von denen, die man an Hand der für den betreffenden Standort gültigen mittleren Beziehung von Verdunstungsanspruch und Sättigungsdefizit berechnen würde, ist also vornehmlich der Wind verantwortlich. Hinzu kommt der noch kaum zu erfassende Einfluß von Strahlung, Turbulenz und Austausch. Mit dieser Feststellung wird nur eine bereits bekannte Tatsache erneut bestätigt.

Wollte man nach einer Beziehungsgleichung suchen, die in ganz Mitteleuropa Gültigkeit hat, so müßte man nach dem Gesagten mindestens den Wind in diese Gleichung einbeziehen oder für abgegrenzte Gebiete mit annähernd einheitlichen Windverhältnissen jeweils eigene Gleichungen aufstellen, in denen nur der Verdunstungsanspruch und das Sättigungsdefizit zueinander in Beziehung gesetzt sind. Letzteres entspricht wohl den Vorstellungen H a u d e's (3), der zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung das Sättigungsdefizit in 2 m Höhe von 14 Uhr verwendet, wo-

bei er einen Koeffizienten beifügt, der auch den klimatischen Windeinfluß mit berücksichtigen soll.

b) Pentadenwerte

Da bei der Berechnung des Verdunstungsanspruchs aus klimatologischen Daten der Fehler sehr groß werden kann, wenn man als Berechnungszeitraum nur einen einzigen Tag wählt, ermittelt man häufig Gruppensummen, wobei die gebräuchlichste Zeiteinheit die Pentade ist. Man rechnet damit, daß sich dann die Streuung der Tageswerte weitgehend aufhebt und daß die berechneten Pentadensummen den gegebenenfalls zu messenden eher entsprechen. Als Beitrag zu dieser Frage und zu der, welche Chancen eine Gleichung zur Berechnung der Pentadensummen hat, in ganz Mitteleuropa zu gelten, seien nachstehend die Pentadensummen des Verdunstungsanspruchs näher untersucht.

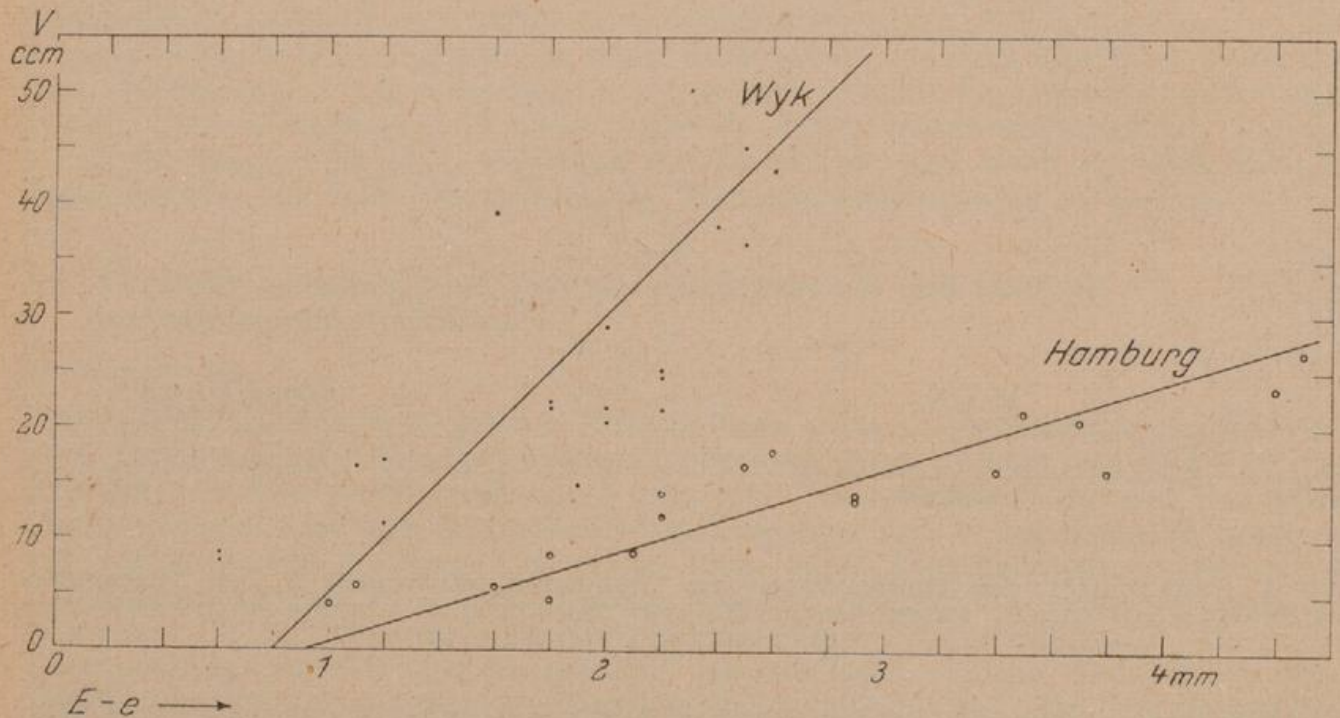


Abb. 5 Abhängigkeit der Pentadensummen des Verdunstungsanspruchs V vom Pentadenmittel des Sättigungsdefizits $(E-e)$ in Hamburg und Wyk

Abb. 5 zeigt die Abhängigkeit der Pentadensummen des Verdunstungsanspruchs (V) vom Pentadenmittel des Sättigungsdefizits $(E-e)$ in Wyk und Hamburg. Die Regressionsgeraden, welche den Gleichungen

$$\text{(Wyk)} \quad V = -20 + 25 (E-e)$$

$$\text{(Hamburg)} \quad V = -6.9 + 7.7 (E-e)$$

gehörchen, scheren auch hier weit auseinander, wengleich sich die Einzelwerte selbst relativ eng um die Regressionsgeraden gruppieren. Daß dabei die Streuung der Werte von Wyk wieder größer ist als die Streuung der Hamburger Werte, und daß die Regressionslinien voneinander abweichen, ist wiederum eine Folge der unterschiedlichen Windverhältnisse. Für die Punktwolke der Werte von insgesamt 15 Stationen findet man die Regressionsgleichung

$$V = -9.2 + 11.5 (E-e) \quad [1]$$

Wenn man die Wasserabgabe des Piche-Rohres nach dieser Gleichung berechnet und die Ergebnisse mit den Meßwerten vergleicht, so ergibt sich eine Standardabweichung von $s = \pm 9.7$ ccm. Bei einem mittleren Verdunstungsanspruch $V = 20.0$ ccm

wäre diese Standardabweichung gleich 50%. Auf Grund dieser großen Abweichung scheidet eine Berechnung der Pentadensummen des Verdunstungsanspruchs nach Gleichung [1] aus.

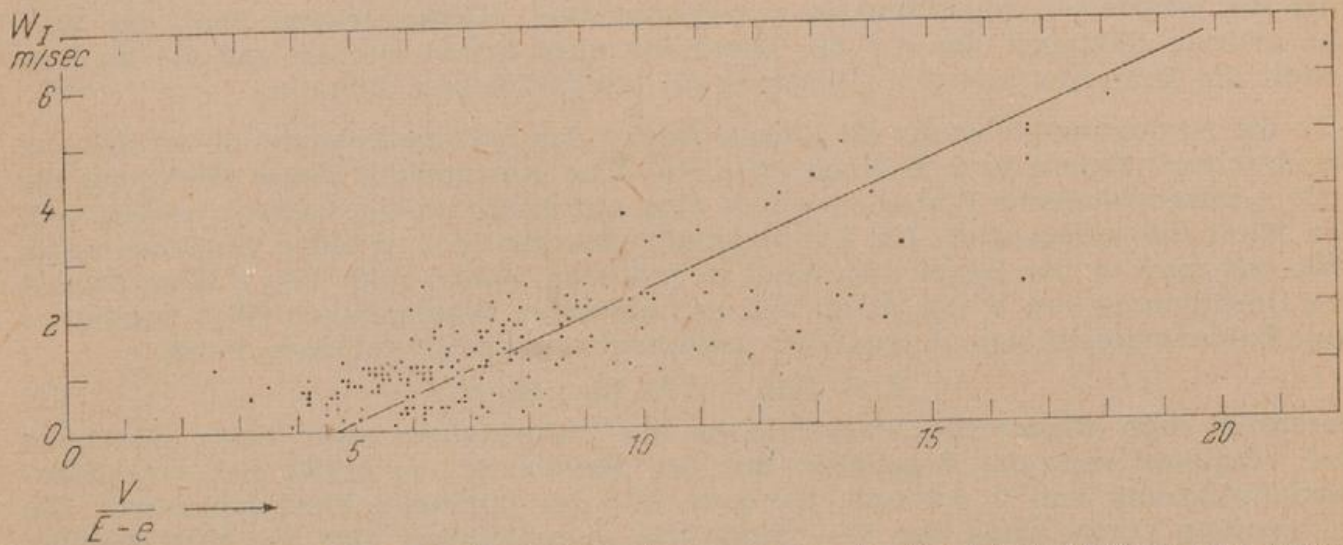


Abb. 6 Abhängigkeit der Quotienten „Pentadensumme des Verdunstungsanspruchs (V) zu Pentadenmittel des Sättigungsdefizits (E—e)“ vom Pentadenmittel der Windgeschwindigkeit in 2 m-Höhe (W_1)

Eine Verbesserung der Bestimmungsgleichung für den Verdunstungsanspruch von Pentaden ist zu erwarten, wenn man den Wind mit berücksichtigt. Abb. 6 zeigt die Abhängigkeit der Quotienten „Pentadensumme des Verdunstungsanspruchs zu Pentadenmitteln des Sättigungsdefizits“ ($V/E-e$) vom Pentadenmittel der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (W_1). Für diese Darstellung standen allerdings nur die Werte von 9 Stationen zur Verfügung. Die Regressionsgerade folgt der Gleichung

$$V = (4.60 + 2.26 W_1) (E-e) \quad [2]$$

Berechnet man die Wasserabgabe des Piche-Rohres nach dieser Gleichung und vergleicht man die Ergebnisse dann mit den Meßwerten, so ergibt sich eine Standardabweichung von $s = \pm 4.0$ ccm; das sind nur mehr 20% der mittleren Pentadensumme.

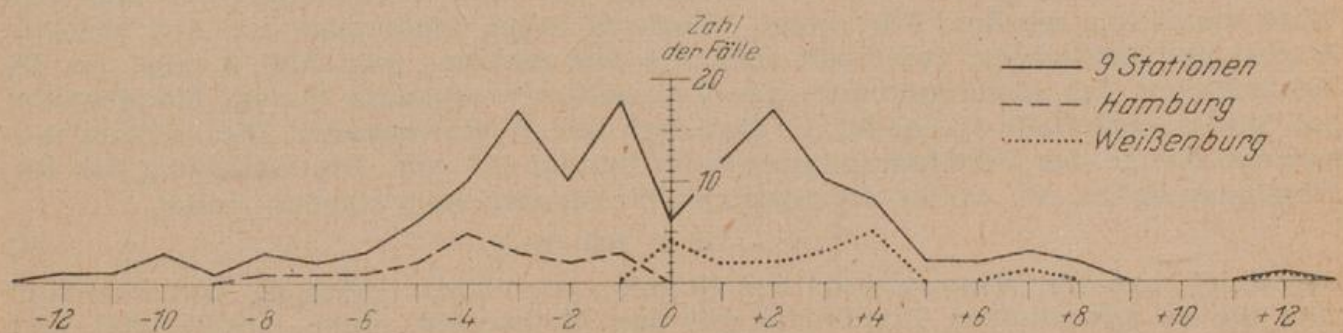


Abb. 7 Verteilung der Abweichungen der mit Hilfe des Windes in 2 m Höhe berechneten Verdunstungsmengen von den gemessenen.

Abb. 7 zeigt Verteilungskurven der Abweichungen der nach Gleichung [2] unter Verwendung des Windes in 2 m Höhe berechneten Verdunstungsmengen von den mit dem Piche-Rohr gemessenen. Die ausgezogene Kurve repräsentiert die Verteilung der für alle 9 Stationen ermittelten Abweichungen. Sicher würde sich beim Vorliegen von mehr als nur 144 Werten und vor allem bei einer größeren Anzahl von Sta-

tionen diese Kurve glätten und schließlich eine Gauß'sche Normalverteilung ergeben. Aber wenn man diese Verteilung für das gesamte Kollektiv auflöst in Verteilungen für die einzelnen Stationen, dann sieht man, daß diese nicht alle symmetrisch um den Nullpunkt gelagert, sondern entweder in Richtung der positiven oder der negativen Abweichungen verschoben sind. Hieran erkennt man das Wirken anderer Faktoren, die von der Gleichung nicht erfaßt werden und die im Einzelfall die Brauchbarkeit der Gleichung [2] beeinträchtigen können.

In die Beziehungsgleichung [2] gingen zuletzt das Sättigungsdefizit ($E-e$) und die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (W_I) ein. Eine Anwendung dieser Gleichung für andere meteorologische Stationen würde aber auf große Schwierigkeiten stoßen, weil der Wind nur gelegentlich für Sonderuntersuchungen in 2 m Höhe gemessen wird, während man in der Regel den Wind in größeren Höhen mißt (W_{II}). Eine Formel zur Bestimmung von V aus ($E-e$) und den normalen Windangaben (W_{II}) wurde aus dem Zahlenmaterial von 15 Stationen berechnet; sie erhielt folgende Form:

$$V = (5.10 + 0.83 W_{II}) (E-e) \quad [3]$$

Berechnet man wieder die Wasserabgabe des Piche-Rohres nach dieser Gleichung und vergleicht man die Ergebnisse mit den Meßwerten, so ergibt sich eine Standardabweichung von ± 5.9 ccm, das sind 29% der mittleren Pentadensumme. Die notwendige Verwendung der W_{II} -Windwerte verschlechtert also die Möglichkeiten zur Berechnung des Verdunstungsanspruches. Jedoch erhält man auch mit den W_{II} -Werten noch immer erheblich bessere Resultate als bei alleiniger Verwendung des Sättigungsdefizits. Man muß auch bedenken, daß die Standardabweichung von 29% nur hinsichtlich der Standorte gilt, die für unsere Piche-Messungen ausgewählt wurden und die durchaus nicht alle für einen größeren Bereich repräsentativ sind. Unter diesen Meßstandorten waren ausgesprochen windgeschützte Lagen, deren Windverhältnisse wohl von dem in unmittelbarer Nähe des Rohres angebrachten Anemometer charakterisiert wurden, aber nicht von den normalen Anemometern der Wetterstationen, für deren Aufstellung im allgemeinen eine Höhe gewählt wird, in der Windverhältnisse herrschen, wie sie in derselben Höhe über einem größeren Gebiet angetroffen werden. Im Mittel über eine größere Fläche darf man eine geringere Standardabweichung erwarten.

c) Monatswerte

Nach der Betrachtung kurzer Zeitspannen soll nun noch der mit den Rohren ermittelte Verdunstungsanspruch von Monaten mit dem Sättigungsdefizit und dem Wind verglichen werden. Für diesen Vergleich liegen Messungen aus den Monaten August und September, vereinzelt auch aus dem Oktober, vor. Abb. 8 zeigt uns die Abhängigkeit der Monatssummen des Verdunstungsanspruches V vom Monatsmittel des Sättigungsdefizits ($E-e$) für 17 Stationen mit 35 Wertepaaren. Die mittlere monatliche Menge des Verdunstungsanspruches beträgt 127 ccm. Die Gleichung der Regressionsgeraden, um welche die einzelnen Wertepaare stark streuen, lautet

$$V = -123 + 100 (E-e) \quad [4]$$

Berechnet man die Wasserabgabe des Rohres nach dieser Gleichung und vergleicht man die so gewonnenen Ergebnisse mit den Meßwerten, dann ergibt sich eine Standardabweichung von $s = \pm 61$ ccm. Bei einer (gemessenen) mittleren monatlichen Menge des Verdunstungsanspruches von 127 ccm wären das 48%. Die Genauigkeit ist damit nicht größer als bei den Pentadensummen. Eine Berechnung des Verdunstungsanspruches nur auf Grund des Sättigungsdefizits ist damit auch für Monatswerte nicht zufriedenstellend.

An Abb. 9 erkennt man, daß sich bei einer Berücksichtigung des Windes W_{II} (in der Höhe) eine engere Anpassung der Wertepaare an die Regressionsgerade ergibt, welche der Gleichung

$$V = (33.5 + 5.7 W_{II}) (E-e) \quad [5]$$

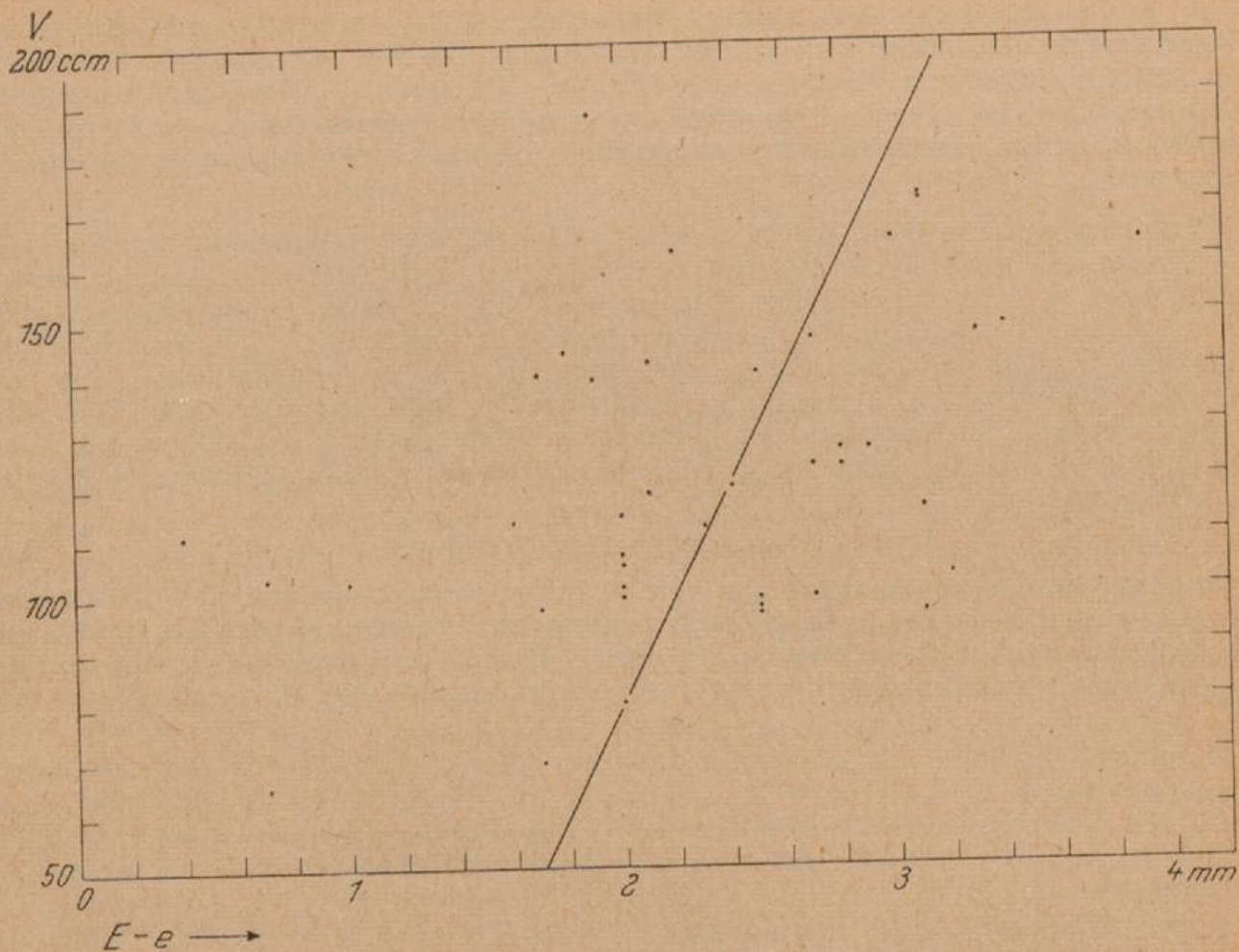


Abb. 8 Abhängigkeit der Monatssummen des Verdunstungsanspruchs V vom Monatsmittel des Sättigungsdefizits ($E-e$) an 17 Stationen im August, September und Oktober 1954

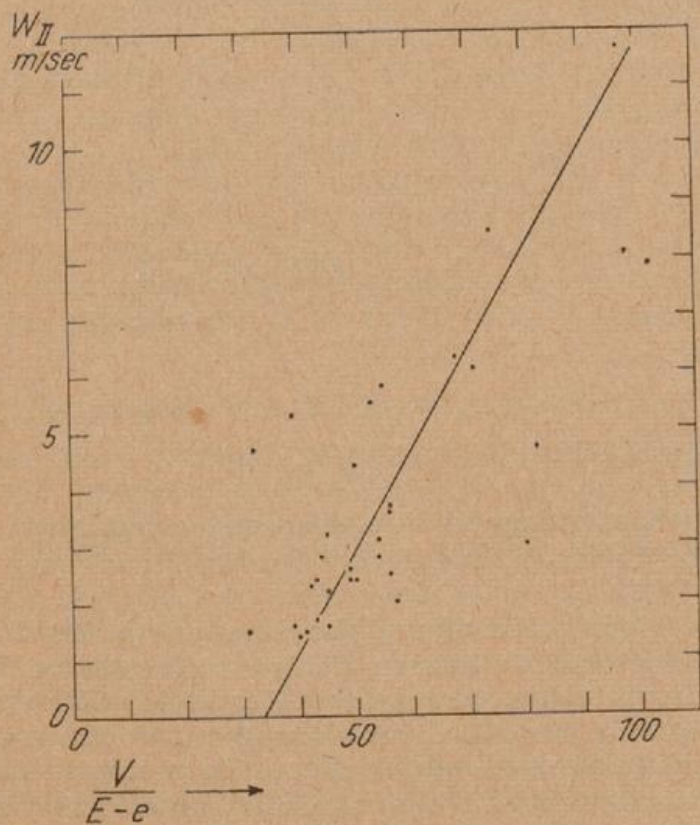


Abb. 9 Abhängigkeit des Quotienten „Monatssumme des Verdunstungsanspruchs V zu Monatsmittel des Sättigungsdefizits ($E-e$)“ vom Monatsmittel der Windgeschwindigkeit in normaler Anemometerhöhe (W_{II})

folgt. Die stochastische Abhängigkeit der Werte $V/E-e$ von W_{II} wird durch den Korrelationskoeffizienten $r = 0.69$ gekennzeichnet. In den „Graphischen Tafeln zur Beurteilung statistischer Zahlen“ von Koller (Darmstadt 1953) liegt der Zufallshöchstwert bei der hier vorliegenden Zahl von Wertepaaren bei $r = 0.48$. Der gefundene Korrelationskoeffizient $r = 0.69$ weist also auf einen strammen Zusammenhang hin.

Wenn man nun die Wasserabgabe des Rohres nach dieser Gleichung berechnet und die Ergebnisse mit den Meßwerten vergleicht, so ergibt sich eine Standardabweichung von $s = \pm 29$ ccm. Bei dem schon mitgeteilten mittleren Verdunstungsanspruch $V = 127$ ccm beträgt die Standardabweichung demnach 23%. Die Beachtung der Windgeschwindigkeit bringt also — wie schon bei den Pentadenwerten — eine wesentliche Verbesserung, obwohl die Windwerte in recht uneinheitlicher Weise ermittelt werden. Ein Vergleich der gemessenen Wasserabgabe des Rohres mit Werten, die unter Zuhilfenahme der in Höhe des Rohres ermittelten Windwerte W_I nach der Gleichung

$$V = (27.7 + 14.2 W_I) (E-e) \quad [6]$$

berechnet wurden, ergab sogar nur eine Standardabweichung von $s = \pm 17.4$ ccm. Da für diesen Vergleich nur 20 Monatswerte zur Verfügung standen, mußte die mittlere monatliche Wasserabgabe aus diesen Werten neu ermittelt werden; sie betrug 123 ccm. Somit machte die Standardabweichung 14% des Mittels aus.

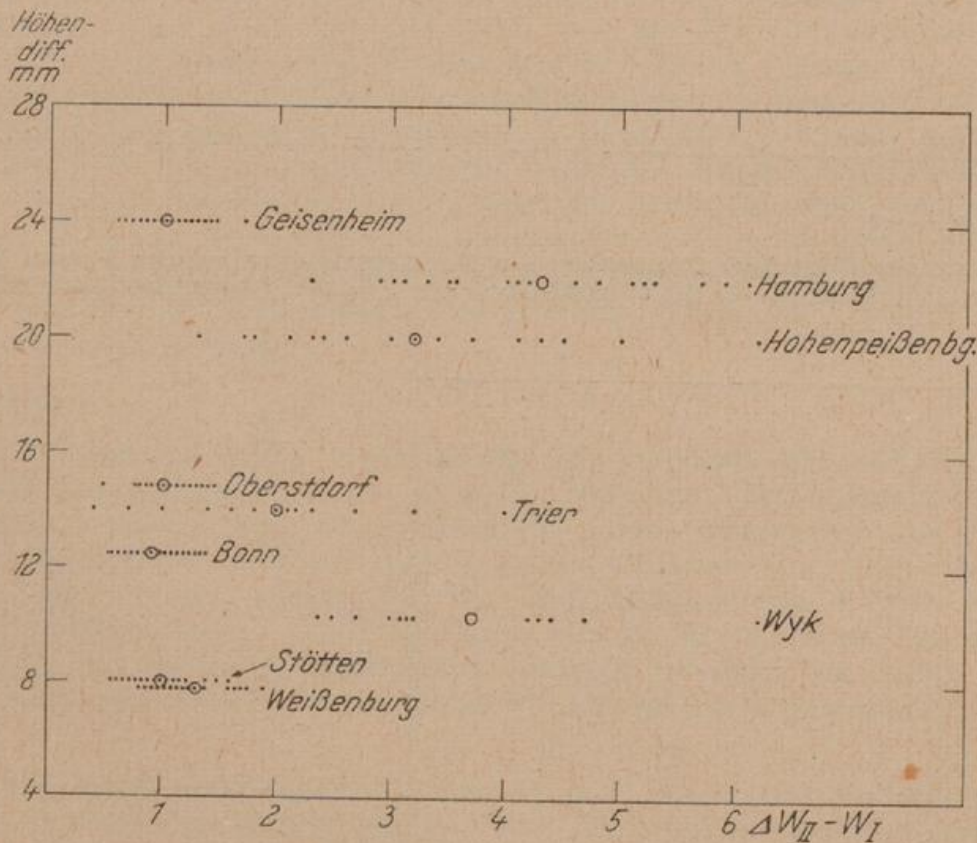


Abb. 10 Beziehung zwischen den Höhendifferenzen zweier Anemometer und deren Geschwindigkeitsdifferenzen. Punkte: Pentadenwerte — Kreise: mittlerer Wert

Wenn — wie wir sahen — bei einer Berücksichtigung der Windwerte aus 2 m Höhe (W_I) der Verdunstungsanspruch mit dem geringsten Fehler zu berechnen ist, so liegt der Gedanke nahe, die in größeren Höhen gemessenen Windwerte (W_{II}) auf das 2-m-Niveau zu reduzieren. Die Formeln von Hellmann oder von Sutton bieten diese Möglichkeit; aber die praktische Anwendung dieser Formeln ist sehr problematisch. Die Formeln wurden für ungestörte Strömungsfelder berechnet; aber

diese findet man im überwiegenden Teil unseres Landes gar nicht. Auch an unseren Meßstationen konnte eine Beziehung zwischen den Höhendifferenzen zweier Anemometer und deren Geschwindigkeitsdifferenzen nicht festgestellt werden, wie Abb. 10 zeigt. Die starke Streuung der Pentadenwerte einzelner Stationen deutet darauf hin, daß hier bei unterschiedlichen Windrichtungen sehr voneinander abweichende Windprofile entstehen. Auf großen Flächen muß man mit einem Windschutz rechnen, so daß in der für die Verdunstung entscheidenden Bodenreibungszone eine wesentlich geringere Windgeschwindigkeit herrscht, als wir nach einer der genannten Formeln berechnen würden. Wollten wir den Wind in 2 m Höhe messen, um für künftige spätere Berechnungen bessere Unterlagen zu haben, so machten wir erst recht einen Fehler, denn je näher ein Anemometer dem Boden steht, desto weniger sind die von ihm angezeigten Windgeschwindigkeiten für ein größeres Gebiet repräsentativ. Es sind auch die an einem Standort in 2 m Höhe gemessenen Werte des Verdunstungsanspruchs streng genommen nur für diesen Standort repräsentativ, und sie werden gegenüber den in der weiteren Umgebung zu erwartenden Werten umso kleiner bzw. umso größer ausfallen, je mehr der betreffende Standort bezüglich seines Windschutzes von den durchschnittlichen Verhältnissen der betreffenden Landschaft abweicht.

So gibt uns die Standardabweichung für Berechnungen des Verdunstungsanspruchs unter Zuhilfenahme des Windes im 2-m-Niveau nur die Höchstgrenze der Genauigkeit, die überhaupt zu erreichen ist. Mit einem Fehler von 10—15% muß man in jedem Falle rechnen, schon deshalb, weil andere meteorologische Größen, welche die Verdunstungskraft beeinflussen, nicht berücksichtigt werden. Hierunter fallen vor allem Strahlung und Austausch. Die Strahlung, d. h. vor allem die Strahlungsintensität, wird noch nicht netzmäßig in befriedigender Weise gemessen. Es hätte auch keinen Sinn, die Größe Austausch in eine Berechnungsformel mit aufzunehmen, da sie schwierig zu bestimmen ist. Die Tatsache, daß der Einfluß des Austausches gegenüber dem der Windgeschwindigkeit regional verschieden ist, verringert die Genauigkeit der Berechnungsmethoden weiterhin. Zum Beispiel ist im Inland die Windgeschwindigkeit kleiner, der Austausch aber größer als an der Küste. Sutton hat versucht, durch die Wahl verschiedener Exponenten in seiner Formel der Tatsache Rechnung zu tragen, daß sich die Abhängigkeit der W_I -Werte vom W_{II} ändert, je nachdem, ob die Atmosphäre zwischen den beiden betrachteten Höhen labil oder stabil geschichtet ist. Aber wir können bei klimatologischen Erwägungen, bei denen es uns auf den mittleren Verdunstungsanspruch größerer Landflächen ankommt, mit solchen Verfeinerungen noch nichts anfangen. Vielmehr werden wir die normalen Windwerte der meteorologischen Stationen verwenden müssen, ohne uns daran zu stoßen, daß die Anemometerhöhen sehr unterschiedlich sind. Die meteorologischen Stationen sind im allgemeinen bestrebt, ihre Anemometer möglichst frei über dem bewachsenen Gelände, über den Dächern usw. zu exponieren, so daß man die gemessenen Werte als für größere Flächen repräsentativ ansehen kann.

VII. Jahrgang des Verdunstungsanspruchs

Die Gleichung [5] wurde an Hand von Messungen der Monate August und September ermittelt. Man kann nicht ohne weiteres annehmen, daß diese Gleichung gleichmäßig zu allen Jahreszeiten Gültigkeit hat, und muß vielmehr erwarten, daß die mit der Jahreszeit variierende Tageslichtlänge eine Korrektur der berechneten Werte erforderlich macht. Leider ist es nicht möglich, dies durch einen Vergleich mit Rohr-Meßwerten nachzuprüfen, da solche Meßwerte einfach nicht vorliegen. Die einzigen direkten Messungen einer unserem Verdunstungsanspruch ähnlichen Größe wurden mit Wild'schen Waagen durchgeführt. In einer Reihe von Vergleichsmessungen wurde festgestellt, was auch wir in Kissingen (4) bestätigt fanden, daß nämlich — abgesehen von den Absolutwerten — ein strammer Zusammenhang zwischen den Werten besteht, die mit dem Rohr und mit der Wild'schen Waage zur gleichen

Zeit gemessen wurden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, berechnete Werte mit denen zu vergleichen, die mit der Wild'schen Waage gemessen wurden. Eine solche Vergleichsmöglichkeit bieten die langjährigen Messungen von Potsdam, über die Antonik u. Branicki (5) berichteten. Für unseren Vergleich wurden die 50jährigen Mittel herangezogen. Aus den Werten für August und September wurde ein Mittel von 45.3 Einheiten errechnet, das wir gleich 100% setzten. Dann drückten wir die Werte für die einzelnen Monate in Prozenten des Wertes 45.3 aus und trugen diese Prozentzahlen in Abb. 11 ein. Danach wurden nach Gleichung [5] die Werte des Verdunstungsanspruches für Potsdam aus den Klimadaten berechnet. Das Mittel der Ergebnisse (185 Einheiten) für die Monate August und September setzten wir ebenfalls gleich 100% und drückten die Monatswerte wieder in Prozenten des Wertes 185 aus. Diese Prozentzahlen wurden ebenfalls in Abb. 11 eingetragen, und wir sehen eine weitgehende Übereinstimmung der beiden Jahrgänge. Die geringfügigen Abweichungen kann man damit erklären, daß die Potsdamer Wild'sche Waage in einer Klimahütte untergebracht war, während die Berechnungsformel für Werte gilt, die den Wasserabgaben eines frei der Sonne und dem Wind ausgesetzten Piche-Rohres entsprechen sollen. Da sich der Wind bei hohen Werten des Sättigungsdefizits stärker auswirkt, und da die Strahlung trotz der geringen Größe des bestrahlten Fließpapiers bestimmt einen Einfluß hat, kann man annehmen, daß die Schwankung zwischen den Sommer- und den Winterwerten eines Piche-Rohres größer ist als die der entsprechenden Werte einer Wild'schen Waage.

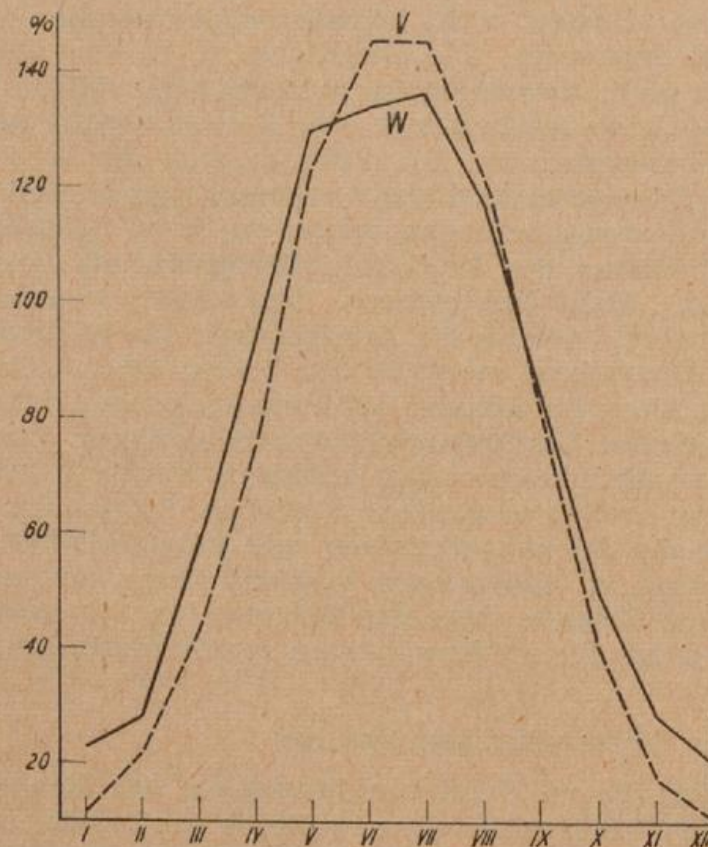


Abb. 11 Jahrgang des Verdunstungsanspruches V (berechnet nach Gleichung [5]) in Potsdam und der dort gemessenen mittleren Wasserabgaben einer Wild'schen Waage W. Die Werte für die einzelnen Monate wurden in Prozenten des Mittels aus den beiden Werten für August und September ausgedrückt, um beide Jahrgänge miteinander vergleichbar zu machen

Wir können also annehmen, daß die Tageslichtlänge schon die Größe des Sättigungsdefizits mitbestimmt und daß deshalb ihre gesonderte Berücksichtigung zur Bestimmung des Verdunstungsanspruches nicht erforderlich ist.

VIII. Die regionale Verteilung des Verdunstungsanspruchs

Wurde die Gleichung [5] aus den Meßwerten von Stationen in verschiedenen Klimagebieten abgeleitet, so muß es nun umgekehrt möglich sein, mit Hilfe dieser Gleichung die regionale Verteilung des Verdunstungsanspruchs zu ermitteln. Unsere Abb. 12 zeigt als Beispiel die mittlere Verteilung des Verdunstungsanspruchs im Monat August für die Bundesrepublik und einen Teil Mitteldeutschlands. Der Monat August wurde gewählt, weil dieser Monat zu der Meßperiode gehörte, in der 1954 die Werte des Verdunstungsanspruchs gewonnen wurden, aus denen schließlich die Gleichung [5] hervorging.

Für die Berechnung wurden der „Klimakunde des Deutschen Reiches“, Band II (Berlin 1939) für 152 Stationen die benötigten Temperatur- und Dampfdruckwerte entnommen. Die Windwerte für eine Reihe von Stationen lieferten der Hell-

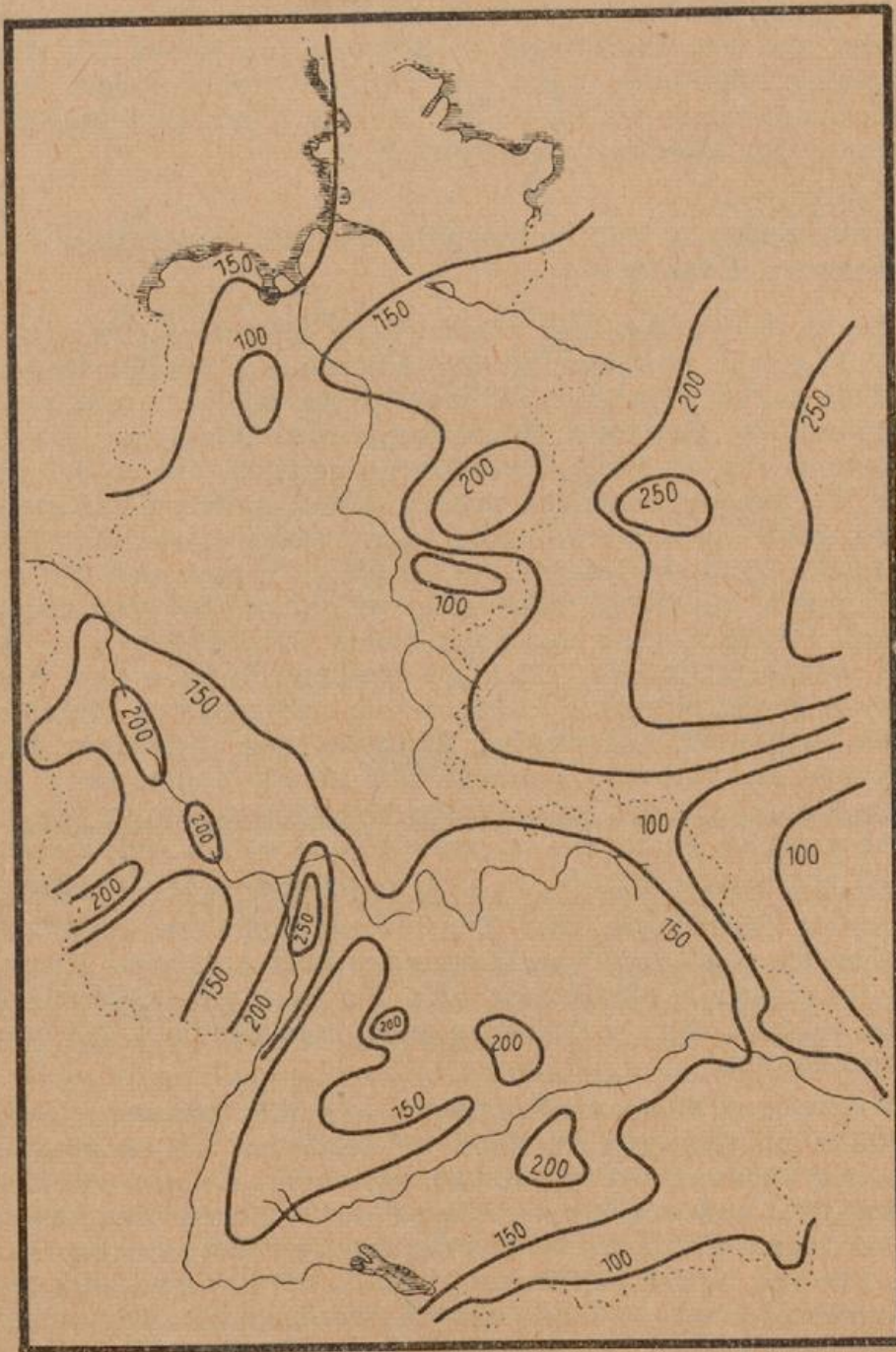


Abb. 12 Mittlere Verteilung des Verdunstungsanspruchs (cm) im August

mann'sche „Klima-Atlas von Deutschland“ (Berlin 1921) und eine Arbeit von Caspar (6). Eine von Manig (7) entworfene Karte der Windverteilung über Westdeutschland ermöglichte es, unter Verwendung der Caspar'schen Zahlenangaben das Monatsmittel der Windgeschwindigkeit für alle jene Stationen zu interpolieren, für die keine eigenen Angaben vorlagen.

Abb. 12 zeigt, daß sich der mittlere Verdunstungsanspruch im August im betrachteten Kartenausschnitt etwa zwischen 100 und 250 ccm bewegt. Extreme Lagen (z. B. Zugspitze: 26 ccm) wurden dabei nicht berücksichtigt. Nördlich der Mittelgebirge beobachten wir eine eindeutige Abnahme des Verdunstungsanspruchs von Ost nach West. Erst an der Küste bewirken die dort herrschenden höheren Windstärken wieder einen Anstieg des Verdunstungsanspruchs; im Rheingraben sind für den Anstieg des Verdunstungsanspruchs die höheren Temperaturen verantwortlich. Südlich der Mittelgebirge, die relativ geringe Werte aufweisen, finden wir wieder einen hohen Verdunstungsanspruch, der aber nur an wenigen Stellen die 200-ccm-Grenze übersteigt und nur in der Rhein-Main-Ebene mehr als 250 ccm erreicht. Nördlich der Mittelgebirge, wo sich im Inland im Sommer ein hohes Sättigungsdefizit mit höheren Windgeschwindigkeiten paart, ist also im großräumigen Durchschnitt der Verdunstungsanspruch höher als im Süden. Zu den Alpen hin, im Schwarzwald und auf der Alb nimmt der Verdunstungsanspruch ab.

IX. Verdunstungsanspruch und potentielle Evapotranspiration des bewachsenen Bodens

An anderer Stelle (8) wurden drei verschiedene Methoden (Penman, Thornthwaite, Uhlig) zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration des bewachsenen Bodens in verschiedenen Klimagebieten erprobt; und zwar für Memel, Bromberg, Swinemünde, Hamburg, Magdeburg, Kaiserslautern, Dresden und München. Dabei zeigte es sich, daß sich diese Methoden nicht nur in der absoluten Höhe der errechneten Verdunstungsmengen unterscheiden, sondern daß sie auch ein sehr unterschiedliches Bild der großregionalen Gegensätze dieser Verdunstungsmengen ergaben. Sowohl die Methode von Penman als auch jene von Thornthwaite ergaben zwischen den klimatisch doch sehr extremen Gebieten der Untersuchung nur 50 bis 60 mm Unterschied in der potentiellen Verdunstung pro Halbjahr (April bis September), während die nach Uhlig's Methode nur aus dem Sättigungsdefizit errechneten Werte große regionale Unterschiede (280 mm pro Halbjahr) aufwiesen. Es wäre wichtig zu wissen, mit welcher Methode man diejenigen Werte ermittelt, die der Wirklichkeit am nächsten kommen, und ob die Zahlenwerte der Abb. 13, in der die mittlere Verteilung der potentiellen Evapotranspiration im August — berechnet nach Penman's Formel — dargestellt wurde, als reell zu bezeichnen sind.

Ein abschließendes Urteil hierüber ist erst möglich, wenn in mehreren Klimagebieten gleichzeitig Messungen mit Evapotranspirometern durchgeführt worden sind. Man darf hoffen, daß derartige Messungen bald beginnen. Unser vorliegendes Material über die regionale Verteilung des Verdunstungsanspruchs gestattet uns aber wenigstens Rückschlüsse, welche der genannten Methode bei uns wahrscheinlich besser brauchbar ist.

In einem der wägbaren Eberswalder Lysimetergefäße wurde in grasbewachsenem Sandboden ständig ein Grundwasserstand in 40—50 cm unter Flur gehalten. Die Monatssummen der Verdunstung dieses Lysimeters hat Friedrich (9) zusammenfassend veröffentlicht, und wir können diese Werte, die für den Zeitraum Mai 1933 bis Juni 1938 vorliegen, als potentielle Evapotranspirationen in diesem Zeitraum ansehen. Für die einzelnen Monate dieses Zeitraums wurden dann die Werte des Verdunstungsanspruchs nach Gleichung [5] berechnet. Die Klimadaten lieferte die Station Schönow bei Bernau, die noch so nahe an Eberswalde liegt, daß man wenigstens im Hinblick auf die Monatswerte der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und

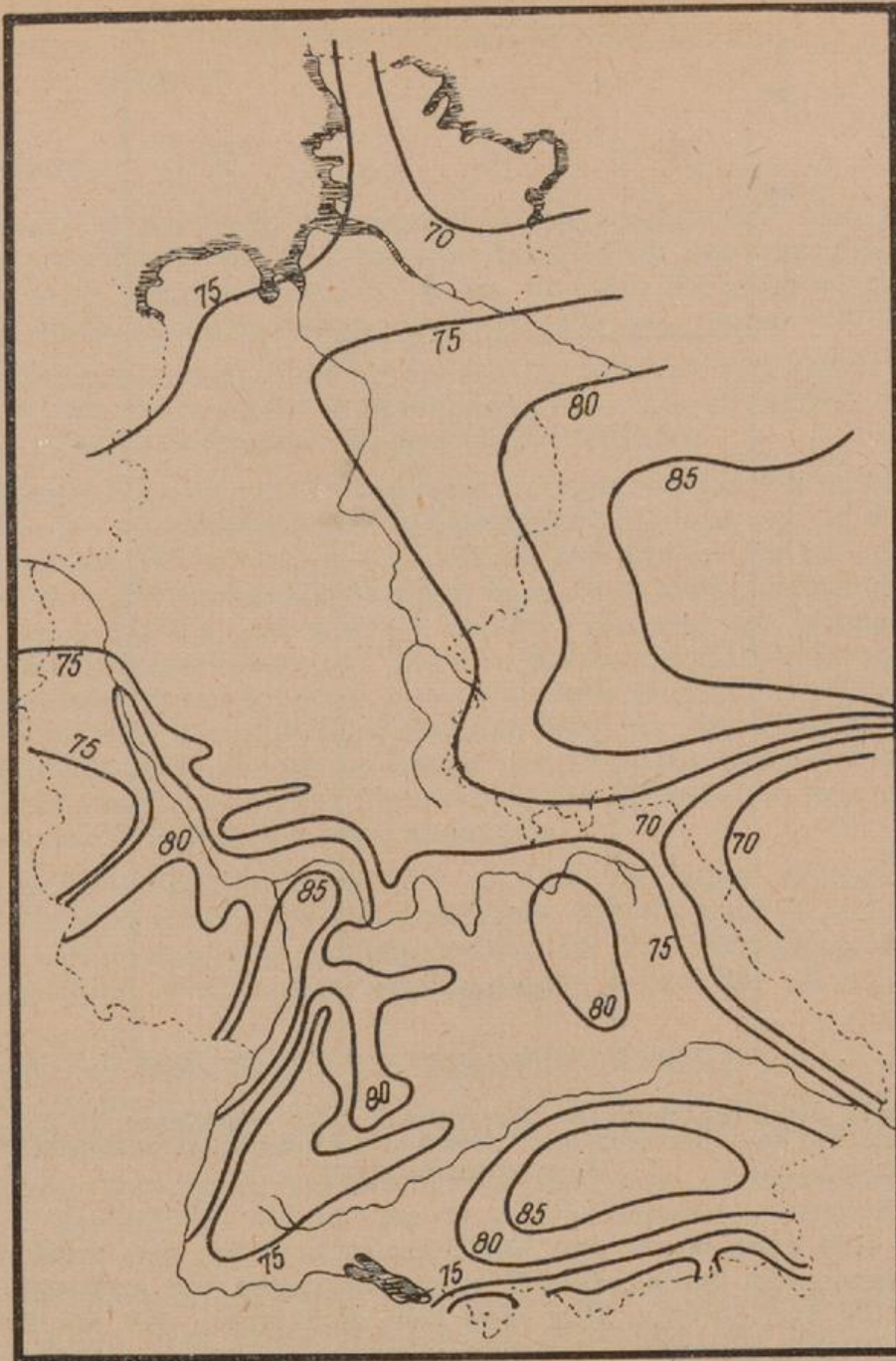


Abb. 13 Mittlere Verteilung der potentiellen Evapotranspiration im August, berechnet nach der Methode von Penman

der Strahlung keine nennenswerten Unterschiede zu erwarten braucht. Die mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten wurden den Müncheberger Beobachtungen entnommen, was ebenfalls unbedenklich erschien. Die so berechneten Werte stehen in Abb. 14 den potentiellen Evapotranspirationen gegenüber. Die Regressionsgerade durch die Wolke der Wertepaare ermöglicht uns eine Abschätzung der großregionalen Differenzen der potentiellen Evapotranspiration im August, indem wir in Abb. 12 die Linien gleichen Verdunstungsanspruchs in Linien gleicher potentieller Evapotranspiration umwandeln. Dies geschieht durch einen Austausch der Zahlen:

für 100 ccm setzen wir 50 mm
 für 150 ccm setzen wir 82 mm
 für 200 ccm setzen wir 115 mm
 für 250 ccm setzen wir 146 mm.

Das Mittel zwischen den Extremen liegt bei 100 mm (= M).

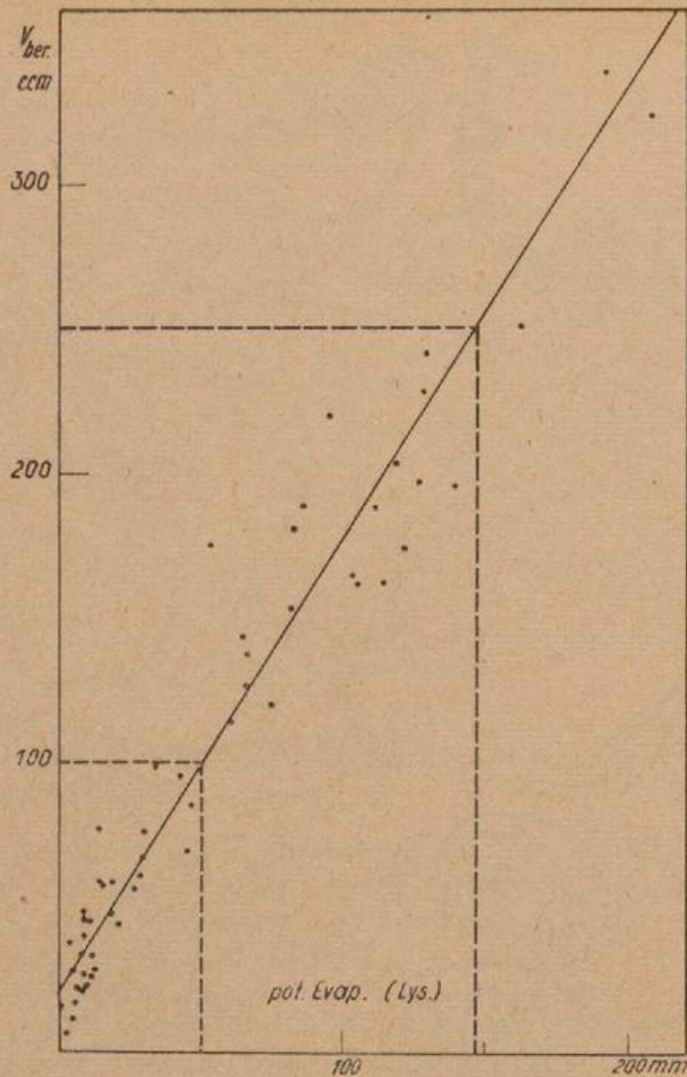


Abb. 14 Beziehung zwischen dem für Eberswalde nach Gleichung [5] berechneten Verdunstungsanspruch und der mit dem dortigen Lysimeter gemessenen potentiellen Evapotranspiration

Damit ergibt sich über West- und Mitteldeutschland bei den durchaus glaubwürdigen Absoluthöhen der potentiellen Evapotranspiration ein großregionaler Gegensatz von rund 100 mm (= Δ). Man muß nun einräumen, daß die Beziehung zwischen der tatsächlichen potentiellen Evapotranspiration und den berechneten Werten des Verdunstungsanspruchs nicht in allen Klimagebieten die gleiche ist wie in Eberswalde, schon deshalb nicht, weil — wie gezeigt wurde — der Verdunstungsanspruch unserer Definition, d. h. die Wasserabgabe des Piche-Rohres, in starkem Maße vom Wind abhängt, während die potentielle Evapotranspiration des Bodens weit weniger windanfällig ist (3). Aber selbst bei Berücksichtigung dieser Tatsache dürfte die großregionale Differenz der potentiellen Evapotranspiration wohl nicht unter 50% des geschätzten Wertes Δ , d. h. nicht unter 50 mm (allein für August) absinken, was immer noch mehr als das Dreifache des nach Penman's Methode ermittelten Gegensatzes von 15 mm potentieller Evapotranspiration (siehe Abb. 13) wäre. 50 mm entsprechen aber gerade 50% des Mittels M zwischen den extremen Werten in gegensätzlichen Klimagebieten, d. h. in unserem Falle zwischen 50 und 147 mm. Damit kann man das Ergebnis wohl allgemeingültig für alle Monate so formulieren:

Wir kommen auf Grund der Piche-Rohr-Messungen des Jahres 1954 zu dem Schluß, daß eine Methode zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration in unserem Klimagebiet dann mit großer Wahrscheinlichkeit nicht anwendbar ist, wenn ihre Ergebnisse für die maritimen und für die kontinentalen Gebiete eine geringere

Differenz aufweisen als etwa 50% des Mittels zwischen den absoluten Werten dieser gegensätzlichen Klimagebiete.

Zusammenfassung

1. Vom Deutschen Wetterdienst durchgeführte Messungen mit dem Piche-Evaporimeter haben eine Reihe von Erfahrungen hinsichtlich des Instruments und seiner Aufstellung sowie über die mittlere Größe und die Schwankungen der täglichen Mengen des Verdunstungsanspruchs erbracht, die besprochen werden.
2. Der Verdunstungsanspruch wird als die pro Zeiteinheit von einem solchen Piche-Evaporimeter mit festgelegten Abmessungen und mit einheitlich freier Aufhängung in 2 m Höhe abgegebene Wassermenge definiert.
3. Ein statistischer Vergleich von Formeln zur Berechnung des Verdunstungsanspruchs einmal nur unter Verwendung des Sättigungsdefizits und zum anderen unter Berücksichtigung des Windes zeigt, daß bei kurzen wie bei längeren Berechnungsperioden mit dem Sättigungsdefizit allein doppelt so große Abweichungen von den Meßwerten zu erwarten sind wie bei Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit außerhalb der Bodenreibungszone. Mit der Gleichung [5] berechnen wir Monatswerte des Verdunstungsanspruchs, deren Fehlerbereich zwischen 15 und 25% liegt. Die unterste Grenze dieses Fehlerbereiches wäre zu garantieren, wenn man die Berechnungen mit Hilfe der an zahlreichen Stellen gemessenen Windgeschwindigkeit im Niveau des Piche-Rohres durchführte. Eine Reduktion der normalen Windwerte auf dieses Niveau wird aber abgelehnt.
4. Eine größere Genauigkeit als 85—90% ist auch bei guter Erfassung der Windstärke-Verhältnisse eines Gebietes und eines Zeitabschnittes nicht zu erreichen, weil andere meteorologische Größen, welche die Verdunstungskraft beeinflussen, nicht berücksichtigt werden können. Hierunter fallen vor allem Strahlung und Austausch.
5. Ein Vergleich mit den langjährigen Potsdamer Messungen mit einer Wild'schen Waage läßt erkennen, daß Gleichung [5] offenbar zur Berechnung der Monatswerte des Verdunstungsanspruches in allen Jahreszeiten geeignet ist.
6. Eine Karte der regionalen Verteilung des mittleren Verdunstungsanspruches im August zeigt, daß sich die Werte über West- und Mitteleuropa etwa zwischen 100 und 250 ccm bewegen.
7. Ein Vergleich der in Eberswalde gemessenen Werte der potentiellen Evapotranspiration mit den nach Gleichung [5] für denselben Ort berechneten Verdunstungsansprüchen ermöglicht eine Abschätzung der großregionalen Differenzen der potentiellen Evapotranspiration an Hand der erwähnten Karte der Verteilung des Verdunstungsanspruches. Die Piche-Rohr-Messungen des Jahres 1954 führen zu dem Schluß, daß eine Methode zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration in unserem Klimagebiet dann mit großer Wahrscheinlichkeit nicht brauchbar ist, wenn ihre Ergebnisse für die maritimen und für die kontinentalen Gebiete eine geringere Differenz aufweisen als etwa 50% des Mittels zwischen den absoluten Werten dieser gegensätzlichen Klimagebiete.

Literatur

- (1) Wächtershäuser, H.: Die Verdunstungsmengen des Piche-Evaporimeters in ihrer korrelativen Abhängigkeit von Sättigungsdefizit und Wind. *Angew. Botanik* 28, 192 (1954).
- (2) Leick, E.: Bestimmung der Transpiration und Evaporation mit Rücksicht auf die Bedürfnisse der Ökologie.

Handb. d. biol. Arbeitsmethoden, hrsg. v. Emil Abderhalden. Abt. XI. chem., physikal. und physik.-chemische Methoden z. Untersuchung des Bodens und der Pflanze, T. 4, H. 8, Lief. 479.

- (3) Haude, W.: Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. Dt. Wetterd. Nr. 11 (1955).
- (4) Uhlig, S.: Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten. Mitt. Dt. Wetterd. Nr. 6 (1954).
- (5) Antonik, B. u. Branicki, O.: Ergebnisse 50jähriger Beobachtungen mit dem Wildschen Evaporimeter in Potsdam. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 42, 73 (1952).
- (6) Caspar, W.: Unterlagen über die Verteilung der Windgeschwindigkeit in Deutschland für Fragen der Windkraftnutzung. Mitt. Studienges. Windkraft Nr. 3 (1954).
- (7) Manig, M.: Karte der Windgeschwindigkeit für das westliche Deutschland. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 34 (1952).
- (8) Uhlig, S.: Zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung bewachsenen Bodens. Wasserwirtschaft **44**, 309 (1954).
- (9) Friedrich, W.: Über die Verdunstung vom Erdboden. Gas- u. Wasserfach **91**, 289 (1950).