

Berichte
des
Deutschen Wetterdienstes

Nr. 49
(Band 7)

DK 551.573

**Registrierungen der Verdunstungsgröße in Wyk/Föhr
und in Hohenpeißenberg**

von

Johannes Grunow und Walter Leistner

(mit 15 Abbildungen und 13 Tabellen im Text)

Offenbach a. M. 1958

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	3
Abstract	3
Einleitung	3
1. Die Meßmethode	4
2. Charakteristik der Verdunster	5
2.1. Vergleich Leistner-Kugel/Piche-Scheibe	5
2.2. Vergleich Leistner-Kugel/Vilkner-Kugel	6
3. Abhängigkeit der Verdunstungsgröße von den meteorologischen Faktoren	7
3.1. Theoretische Grundlagen	7
3.2. Sättigungszustand und Luftbewegung	8
3.3. Eliminierung des Strahlungsanteils	9
3.4. Sättigungsdefizit und Globalstrahlung	14
4. Verdunstungsklimatologie Wyk/Hohenpeißenberg	16
4.1. Der Tagesgang des Verdunstungsanspruchs	16
4.2. Der Jahresgang des Verdunstungsanspruchs	20
4.3. Häufigkeitsverteilung von Stufenwerten der Tagesverdunstung	22
4.4. Quantitativer Vergleich zwischen Wyk und Hohenpeißenberg	22
4.5. Vergleich mit dem Jahresgang anderer Elemente	23
Literatur	23

Anschriften der Verfasser:

Dr. J. Grunow, Hohenpeißenberg/Obb., Observatorium

Dr. W. Leistner, Wyk/Föhr, Med.-Meteor. Beratungsstelle

Zusammenfassung

Es werden die Ergebnisse mehrjähriger Verdunstungsregistrierungen in Wyk (Nordseeküste) und Hohenpeißenberg (Alpenvorland) mit dem Leistner-Evaporimeter vorgelegt und das Verhalten der Leistnerkugel gegenüber dem Wind- und Strahlungseinfluß mit anderen Verdunstungskörpern (Piche-Scheibe, Vilknier-Kugel) verglichen.

Von den auf die Verdunstung einwirkenden Faktoren ist die Strahlung an der Wasserabgabe während der Sommermonate zu weit mehr als der Hälfte beteiligt. Der Strahlungsanteil kann durch die Globalstrahlung oder durch die Sonnenscheindauer ausgedrückt werden. Zur Kennzeichnung des Feuchtezustandes kann sowohl die relative Feuchtigkeit als auch das Sättigungsdefizit ($E-e$) verwendet werden. Der Windeinfluß vermag die Verdunstung bei Geschwindigkeiten über 5 m/sec nicht mehr wesentlich zu steigern.

Im klimatologischen Teil werden der Tagesgang sowie der Verdunstungsanspruch einzelner Tagesabschnitte abgeleitet. Im Jahresgang zeigen sich Parallelitäten zur Sonnenscheindauer. Fälle übernormal hoher Verdunstung sind an wenige typische Wetterlagen mit absinkender Luftbewegung gebunden. Die Stufenwerte der Tagessummen streuen im Nordseeklima stärker als in Hohenpeißenberg. Ein quantitativer Vergleich ergibt für das Alpenvorland niedrigere Sommerwerte, jedoch eine höhere Verdunstung in den Übergangsmo­naten. Im Vergleich mit dem Jahresgang anderer den Wasserverbrauch beeinflussender Elemente stimmt die Verdunstung am besten mit der relativen Feuchtigkeit und der Sonnenscheindauer überein.

Abstract

Results of several years records with the Leistner-evaporimeter, made at Wyk on the coast of the North Sea and at Hohenpeißenberg in the foreland of the Alps are discussed. The characteristic of the Leistner-ball is compared with the work of other evaporimeters, e. g. Piche-disc, Vilknier-ball.

Regarding all factors reacting on evaporation, more than half of the water loss in summer months is caused by radiation. This share can be represented both by global radiation or by duration of sunshine. The representation of humidity situation can be done as well by relative humidity as by saturation deficit ($E-e$). Concerning the influence of wind a velocity of 5 m/sec cannot increase evaporation essentially.

The climatological part discusses diurnal variation of evaporation and the shares of the single times of day. In annual variation a parallelism is given to the duration of sunshine. Cases of maximal high diurnal sums of evaporation are connected with some typical weather situations with descending air masses. The step values of diurnal sums in the climate of the North Sea disperse more than in Hohenpeißenberg. In the climate of the foreland of the Alps the evaporation in summer is lower, in periods of transition higher than in coastal climate. In comparison with the annual variation of other elements reacting on evaporation it conforms best with relative humidity and duration of sunshine.

Einleitung

Im Energiehaushalt der Atmosphäre mit ihren Wechselbeziehungen zur Erdoberfläche bildet die Verdunstung ein wichtiges Bindeglied. Ihre Berücksichtigung in der Bilanzrechnung setzt eine Kenntnis der Verdunstung vom bewachsenen Erdboden einschließlich des Wasserverbrauchs der Pflanzen voraus. In zahlreichen neueren Arbeiten wurde diese Größe, die „Evapotranspiration“, untersucht. Ihrer laufenden und netzmäßigen Erfassung stehen jedoch meßtechnische Gründe, vor allem aber die Vielfalt der Standortbedingungen, des Bodenzustandes, des Wasseranspruchs bzw. Wasserverbrauchs der verschiedenen Bestandsarten und dessen Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Pflanze entgegen. Die Bemühungen gehen dahin, die Geländeverdunstung unter Beachtung individueller Faktoren aus der Verdunstungskraft der Atmosphäre, der „potentiellen Verdunstung“, abzuleiten und diese aus leicht meßbaren Größen zu berechnen (1). Solange dem Boden und der Pflanze genügend Wasser zur Verfügung steht — und das ist in unserem Klima für längere Zeitabschnitte der Fall —, kann der Gang der Geländeverdunstung dem der Verdunstungskraft der Atmosphäre weitgehend parallel gesetzt werden. In Trockenperioden während der Vegetationszeit oder auf trockenen Standorten kommt die Geländeverdunstung dem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre nicht mehr nach. Messungen der potentiellen Verdunstung können dann mit Vorbehalten, die sich auf das Entwicklungsstadium der Pflanze beziehen, auf Problemstellungen zur physiologischen Beanspruchung der Vegetation durch die Verdunstung angewandt werden.

Von meteorologischer Seite steht das Problem an, den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre nach dem Wasserverbrauch einer definierten verdunstenden Oberfläche in seiner Abhängigkeit von den meteorologischen Faktoren, seinem zeitlichen Ablauf und seinen regionalen Unterschieden zu erfassen. Hierfür stehen verschiedene einfache Geräte („Evaporimeter“) zur Verfügung, deren Wirkungsweise wegen der unterschiedlichen Beschaffenheit der verdunstenden Oberflächen (Wasserfläche, Tonkugel oder -zylinder, Fließpapierscheibe oder -kugel) nur unter definierten Bedingungen übereinstimmende, aufeinander beziehbare Ergebnisse liefern (2, 3, 4, 18). Vergleichende Beobachtungen mit gleichem Gerät sind in Deutschland erst in letzter Zeit zur Durchführung gekommen (6). Messungen mit dem Evaporimeter sollten bei einer Neuordnung des Arbeitssystems der praktischen Klimatologie (7) in das Beobachtungsprogramm einer Auswahl von Hauptstationen einbezogen werden.

Über die rein meteorologischen und klimatologischen Fragestellungen hinaus finden Evaporimetermessungen in zunehmendem Maße praktische Anwendung. In der landwirtschaftlichen Betriebspraxis werden sie mit gutem Erfolg zur Steuerung der künstlichen Beregnung herangezogen. Bei biometeorologischen Problemen, die von dem Verhalten feuchter Oberflächen bei Mensch, Tier und Pflanze ausgehen, kann das Evaporimeter wichtige Hinweise liefern. Neuerdings wird ihnen auch von hydrologischer Seite Interesse entgegengebracht, um die örtlichen Verschiedenheiten der Gebietsverdunstung im Anschluß an Lysimetermessungen, die nur aus einem sehr weitmaschigen Netz verfügbar sind, abzuleiten (19).

Das Bedürfnis, näheren Einblick in den tageszeitlichen Ablauf des Verdunstungsvorgangs zu gewinnen und dessen Beziehungen zu transpirationsphysiologischen Fragestellungen zu klären, führte zur Entwicklung von Registrierungsverfahren. Neben dem Wägeprinzip, das sowohl in Wyk (8) als auch in Hohenpeißenberg mit der Leistnerkugel als Verdunster angewandt wird, wurde auch — für das Piche-Evaporimeter — das Schwimmerprinzip von Boss (21) mit photochemischer oder mit mechanischer Registrierung und neuerdings von Klau-sing (22) benutzt. Längere, kontinuierlich registrierte Meßreihen liegen bisher, soweit bekannt, nur mit der Leistner-Wage vor.

Aus der Kenntnis der tageszeitlichen Schwankung des Verdunstungsanspruches der Atmosphäre ergeben sich nicht nur wichtige Erkenntnisse zum Verdunstungsproblem, sondern auch vielfache praktische Nutzenwendungen. Für die künstliche Bewässerung und die Feldberegnung spielen die Zeitabschnitte geringer potentieller Verdunstung im Hinblick auf eine schonende Bewirtschaftung der Wassergaben eine wichtige Rolle. Gewisse Feldarbeiten sollten zur Schonung des Bodenwasservorrats in die Tageszeiten mit nur kleinem Verdunstungsanspruch verlegt werden.

Die fortlaufend aufgezeichnete Verdunstung vervollständigt das aus der Registrierung der üblichen meteorologischen Elemente abgeleitete Bild der Wetterwirksamkeit, wie es durch Terminbeobachtungen niemals gewonnen werden kann. Innerhalb von Trockenperioden kann der Verdunstungsanspruch am Tag und in der Nacht sehr verschieden sein. Wenn es trotz starker Lufttrockenheit am Tage in der Nacht zu hoher Feuchtigkeit und Tau kommt, dann bedeutet dies für die Pflanze eine „Erholungsphase“. Treten aber in der Nacht Absinkbewegungen auf, die mit einer starken

Abnahme der Luftfeuchtigkeit verbunden sind, so wird die Pflanze auch in der Nacht einer erhöhten Beanspruchung ausgesetzt. Gerade die Verdunstungsregistrierungen in den Nachtstunden sind von großer Anschaulichkeit und lassen auf einen Blick meteorologische Vorgänge erkennen, die aus den üblichen Registrierungen in der Thermometerhütte nur schwer ersichtlich sind.

Registrierungen der potentiellen Verdunstung wurden in Wyk auf Föhr (7 m) im Jahre 1951, in Hohenpeißenberg (977 m) 1952 aufgenommen. Die vorliegende Arbeit untersucht die Charakteristik der Leistner-Kugel im Vergleich zu anderen Verdunstern, leitet die Abhängigkeit der Verdunstungsgröße von den einzelnen meteorologischen Faktoren ab und berichtet über die Ergebnisse der bis zum Jahre 1957 vorliegenden Verdunstungsregistrierungen. Hierbei werden die Eigenschaften in Bezug auf den Verdunstungsanspruch herausgestellt.

1. Meßmethode

Die Messungen wurden an beiden Standorten mit dem Verdunstungsmesser nach Leistner-Robitzsch durchgeführt. Als verdunstende Oberfläche ist eine mit Fließpapier bespannte Hohlkugel von 100 cm² wirksam. Die Wasserzufuhr erfolgt aus einem kalibrierten Glasrohr, an dessen unteres Ende die Kugel mit einer Feder leicht angedrückt wird. Zur Registrierung kommt das mit einsetzender Wasserverdunstung sich ändernde Gewicht des gesamten Systems (Gerät plus Wasser). Täglich erfolgt eine Neufüllung des Rohres, wobei das Ausgangsgewicht wieder hergestellt wird. In Wyk arbeitet die Einrichtung nach dem Prinzip der Federwage (8), in Hohenpeißenberg ist sie als Balkenwage ausgebildet

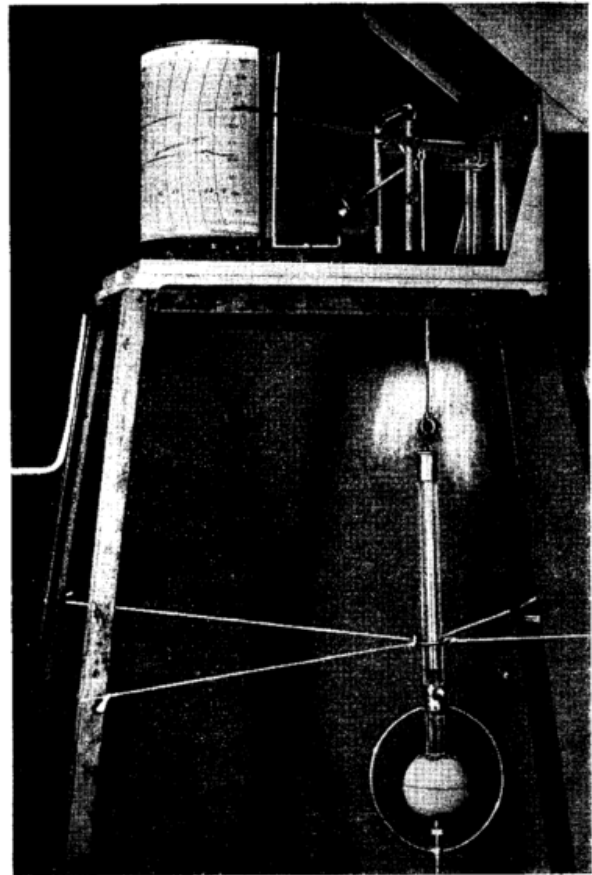
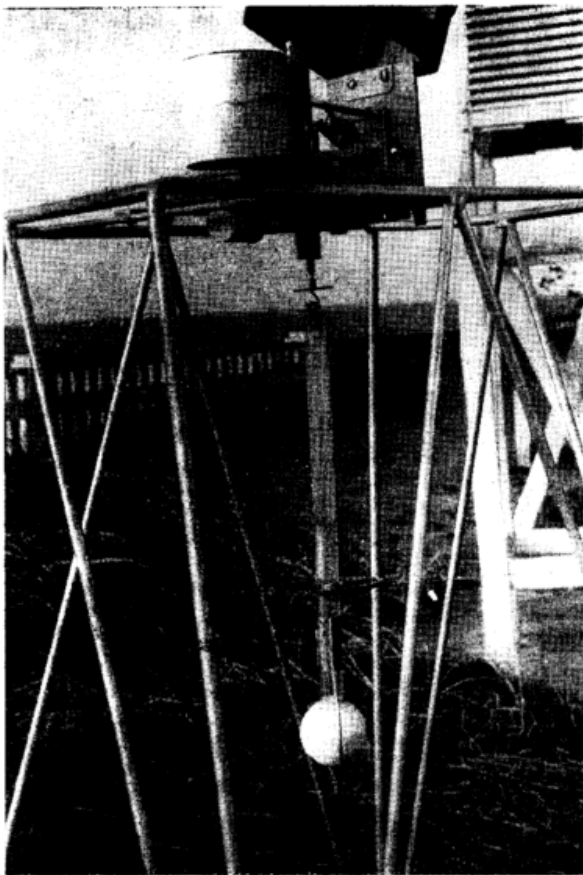


Abb. 1

Ansicht der registrierenden Verdunstungsmesser nach Leistner.
Links: Wyk (Federwage). Hersteller: Hanseatische Werkstätten
Fr. Friedrich & Co., Hamburg-Schnelsen.
Rechts: Hohenpeißenberg (Balkenwage). Hersteller: Meteorol. Observatorium

(Abb. 1). Die Registrierwerke sind auf eiserne Gestelle aufgesetzt, deren Füße die natürlichen Verhältnisse (Strahlung, Lufttemperatur, Strömung) kaum beeinflussen. Die Leistner'sche Apparatur in Wyk besitzt zur Bremsung der bei Wind durch Schwingungen des Rohres vorgetäuschten Gewichtsschwankungen eine kleine Öldämpfung, deren Wirksamkeit jedoch, wie die in (8) wiedergegebenen Registrierungen zeigen, nur begrenzt ist. Die durch Wind hervorgerufene Unruhe im Kurvenzug vermittelt andererseits ein anschauliches Bild von der Struktur der an der Kugel vorbeistreichenden Luft. Um diese Erläuterung zur Wetterwirksamkeit nicht zu unterdrücken, wurde bei der Hohenpeißenberger Apparatur bewußt auf den Einbau einer Dämpfung verzichtet. Die Rohre beider Aufstellungen werden in ihrem unteren Ende durch einen Distanzring festgehalten, um das Pendeln bei Wind zu unterbinden.

Das Registrierwerk in Wyk hat eine Uhrtrommel von 93.3 mm Durchmesser mit einem Wochenumlauf und 25 mm/50 g Schreibhöhe, während das Hohenpeißenberger Gerät über eine Trommel von 133 mm Durchmesser mit Tagesumlauf und eine Schreibhöhe von 85 mm/50 g Wasserverdunstung verfügt. Beide Verfahren haben ihre Vorzüge: Der Wochenstreifen vermittelt eine anschauliche Übersicht des Verlaufs während mehrerer aufeinanderfolgender Tage, der Tagesstreifen eine genauere Aufzeichnung im Hinblick auf den Wetterablauf eines einzelnen Tages.

Das Meßfeld in Wyk befindet sich im Garten der medizin-meteorologischen Beratungsstelle südlich des niedrigen Dienstgebäudes, etwa 60 m vom Strand entfernt. Es unterliegt dem ungestörten Seeklima. Nach Osten hin schließt sich ein Dünengelände mit niedrigem Kiefernbestand an, im Westen liegt ein schmaler Streifen höheren Waldbestandes. Das Meßfeld beim Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg liegt auf einem west-östlich verlaufenden Bergrücken, dessen grasbestandener, 15° geneigter Nordhang freie Exposition bietet. Der steil abfallende Südhang trägt einen Fichtenbestand, der südlich des Meßfeldes eine etwa 20 m breite Lücke aufweist, durch die ein Richtungs- und Düseneffekt gegeben ist. Die Kuppen der tiefer stehenden Bäume am Südhang decken die Strömung aus dem südlichen Sektor geringfügig ab. Beide Meßfelder tragen einen kurzgehaltenen Graswuchs.

Die Kugel in Wyk ist in 1.0 m Höhe aufgehängt. Vergleichsbeobachtungen wurden auch in 2 m Höhe und Registrierungen in 0.10 m Höhe durchgeführt. In Hohenpeißenberg befindet sich die Kugel dagegen 0.5 m über dem Erdboden. Durch Vergleichsmessungen in 2.0 m Höhe und mit Piche-Evaporimetern in verschiedenen Höhen und im völlig freien Gelände des Hohenpeißenberges wurden Bezugswerte ermittelt, die eine Reduktion der Meßergebnisse vom Meßfeld des Observatoriums auf das völlig ungestörte Freigelände und damit einen Vergleich der Absolutwerte beider Standorte ermöglichen.

2. Charakteristik der Verdunster

Die von einem Evaporimeter angezeigte Verdunstung wird bestimmt

- von Faktoren, die von der physikalischen Beschaffenheit des Verdunstungskörpers abhängen, und
- von meteorologischen Faktoren, die den Prozeß fördern oder verzögern.

Die Beschaffenheit des Verdunsters bedingt seine Individualität und stellt seine Reaktion auf die einwirkenden meteorologischen Faktoren in ein bestimmtes Verhältnis zum Verhalten des bewachsenen Erdbodens. Der Vorschlag von Robertson (9) zielt auf eine internationale Vereinbarung über die einheitliche Verwen-

dung einer ebenen, horizontalen, schwarzen, befeuchteten Oberfläche hin, die allen einwirkenden meteorologischen Faktoren voll ausgesetzt ist. Die Wassermenge, die dabei vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand übergeht, wird als „latente Verdunstung“ definiert. Wir verwenden hier nicht diesen Ausdruck, weil der verdunstende Körper des Leistner-Evaporimeters, die mit hellem Fließpapier bezogene Hohlkugel, nicht diesem Definitionsvorschlag entspricht. Wir glauben auch, daß die Kugel sich im Vergleich zu den Wirkungen der meteorologischen Faktoren auf die Vegetation angemessener verhält als die horizontale Scheibe. Der vielfach vertikalen Gliederung der Pflanzenteile ist die Kugel eher vergleichbar als die Scheibe, so daß der von der Wirkung der direkten Sonnenbestrahlung und der Luftströmung herrührende Anteil am Verdunstungsbeitrag bei der Kugel den Bedingungen natürlicher Verdunster besser entspricht. Die weitgehende Linearität des Verhältnisses von Kugelverdunstung zur Verdunstung eingetopfter Tomatenpflanzen konnte Leistner experimentell nachweisen (8). Die abgeleiteten Beziehungen lassen daher auch eine Beurteilung des Verhaltens der Pflanze gegenüber den die Verdunstung fördernden Faktoren zu.

Für die kritische Sichtung des vorliegenden Materials und die Herausarbeitung physikalischer Zusammenhänge erschien es darum wichtig, die Charakteristik des Verdunsters herauszuarbeiten und mit anderen Formen zu vergleichen.

2.1. Vergleich Leistner-Kugel/Piche-Scheibe

Wenn allein die verdunstenden Oberflächen das Verhältnis des tatsächlich verdunsteten Wassers bestimmen würden, so wäre bei der Kugel (100 cm²) gegenüber der Pichescheibe von 30 cm Durchmesser (12.64 cm²) eine um 7.8 mal größere Verdunstung zu erwarten. Vergleichsmessungen in Wyk im Sommer 1954 in 2.0 m Höhe ergaben aber einen mittleren Umrechnungsfaktor von 4.46 (Tab. 1a). Das Piche-Evaporimeter verdunstet

Tab. 1
Verhältnis der Verdunstungsmengen
Leistner : Piche in 2 m Höhe, Wyk auf Föhr

a) Terminbeobachtungen				
1954	7h	14h	21h	
Juli (16.—31.)	3.91	5.12	4.74	
August	4.18	5.44	4.78	
September	3.88	5.32	5.48	
Oktober	3.47	4.42	2.92	
Juli — Oktober	3.82	5.08	4.48	Mittel 4.46

b) Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit am Gerät (VII — IX 1954)			
m/sec	Lei : Pi	n	Beob.
0 — 0.9	6.2	6	
1.0 — 1.9	5.5	16	
2.0 — 2.9	5.5	11	
3.0 — 3.9	5.4	7	
4.0 — 4.9	4.2	12	
5.0 — 5.9	4.1	3	8
6.0 — 6.9	4.6		
7.0 — 7.9	4.2	2	5
8.0 — 8.9	4.9	1	
9.0 — 9.9	—	—	
10.0 — 10.9	4.5	2	

also im Durchschnitt 22.4% der Kugel, statt nur 12.64%, wie es nach dem Oberflächenverhältnis zu erwarten wäre. Die Mittelwerte für die drei Termine lassen deutlich einen täglichen Gang des Quotienten erkennen. Im Vergleich zur Kugel verdunstet von der Fließpapier-

scheibe in den Vormittagsstunden weniger Wasser als in den Nachmittags- oder in den Nachtstunden, weil die morgens einsetzende Bestrahlung auf die Kugel sogleich voll wirksam ist. Mit der im Laufe des Vormittags aufkommenden und am Nachmittag sich steigernden Turbulenz zeigt der Faktor zum Abendtermin die größten Schwankungen.

Diesem Strahlungseinfluß ist ein Ventilationseinfluß überlagert, der bei Ordnung aller Werte nach den am Gerät gemessenen Windgeschwindigkeiten (Tab. 1b) deutlich hervortritt. Der Faktor liegt bei schwachem Wind über 6 und verkleinert sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit bis nahe 4. Das mittlere Verhältnis von 4.46 stimmt damit, einer mittleren Windgeschwindigkeit an der Nordsee von 4—5 Bf entsprechend, gut überein. Gleichwertige Ergebnisse erbrachte eine für den Zeitraum September bis Oktober 1956 durchgeführte Meßreihe. Die Scheibe des Piche unterliegt also viel stärker dem Windeinfluß, während der Strahlungseinfluß besser durch die Kugel des Leistner-Evaporimeters wiedergegeben wird. Zu gleichem Befund kam *B a u m b a c h* (2) bei Vergleichsmessungen im Windkanal.

Die relativ größere Verdunstung der Fließpapier-scheibe des Piche kann teilweise mit der angewandten Technik erklärt werden, die Scheibe vor dem Auflegen zu durchstechen. Durch das Loch fließt das Wasser aus dem Rohr leichter aus und steht auf der Scheibe im Überfluß zur Verfügung. Bei der Fließpapierkugel muß es dagegen durch Sog herangeschafft und verteilt werden und zum Ausfließen erst den Unterdruck im oberen Teil des Rohres überwinden. *H e i g e l* (17) hat diesen Effekt im Windkanal untersucht. Die Wasserabgabe von der durchstochenen Scheibe erhöht sich bei Luftruhe um nur 0.02 g/h, bei 2 m/sec jedoch um 0.2 g/h, steigert sich dann aber nicht mehr. Bei einer Windgeschwindigkeit von 2 m/sec (Tab. 1b) würde sich der Quotient von 5.5 (bei durchstochener Scheibe) auf 6.5 (bei nicht durchstochener Scheibe), maximal um etwa 20% erhöhen und damit dem Flächenverhältnis 7.8 näher kommen.

Viel stärker wird das Verhältnis *Lei : Pi* jedoch durch den Einfluß von Regenwasser verändert, das vom Rohr abgefangen wird und auf die verdunstende Fläche herabläuft. Bei der Leistnerkugel hält schon die Manschette etwas Regenwasser zurück, und die gewölbte Oberfläche läßt es schneller ablaufen als die Scheibe. In der niederschlagsreichen Periode vom 1.—18. November 1956, in der nur 6 Tage trocken blieben, ergaben sich in Wyk — gegenüber einem Oberflächenverhältnis von 7.8 — folgende Quotienten:

Termin	I	II	III	Mittel
	7.3	11.3	5.0	7.3

Hier wirkt sich deutlich — besonders in dieser Zeit mit ohnehin geringer Verdunstung — die verstärkte Zufuhr von Regenwasser auf die Scheibe des Piche aus. Eine Fälschung der Messungen durch Regenwasser fällt um so mehr ins Gewicht, je kleiner die verdunstende Oberfläche ist.

Vergleichsmessungen auf dem Hohenpeißenberg (Tab. 2), über die *H e i g e l* berichtete (17), ergaben in gleicher Höhe, aber bei windgeschützter Aufstellung, einen mittleren Quotienten von 5.36. In 0.5 m Höhe steigerte sich das Verhältnis im Mittel der Jahre 1954 bis 1956 sogar auf über 7, obwohl bei diesen wie bei den anschließend besprochenen Messungen von *B a i e r* die Scheiben ebenfalls durchstochen wurden. In der bodennahen Luftschicht tritt also die Windwirkung zugunsten des Strahlungseinflusses zurück, so daß sich im Vergleich zur Meßhöhe 2.0 m die Wasserabgabe der Kugel gegenüber der Scheibe soweit steigert, daß das Flächenverhältnis 7.8 nahezu erreicht wird. Das Verhältnis Juni 1954 von 8.76 wird durch besonders hohe Einzel-

Tab. 2
Verhältnis der Verdunstungsmengen
Leistner : Piche

Hp: Hohenpeißenberg, 0.5 m bzw. 2.0 m Höhe
(nach *H e i g e l*)

Ho: Stuttgart-Hohenheim, Leistner 0.2 m,
Piche in Hütte 2.0 m Höhe (nach *B a i e r*)

	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Mai-Sept.
Hp 0.5 m						
1954	7.46	8.76	7.42	7.33	7.26	7.65
1955	6.82	7.16	6.66	7.24	6.28	6.83
1956	6.84	7.07	5.72	7.76	6.37	6.75
1954—1956	7.04	7.66	6.60	6.44	6.64	7.08
2.0 m						
1956	5.14	5.40	5.48	5.21	5.56	5.36
Ho 0.2 / 2.0 m						
1953	5.87	6.45	6.65	7.52	5.21	6.34

werte des Quotienten an Tagen mit gewittrigen Störungen bewirkt, wo die Scheibe durch häufige Regenschauer immer wieder zusätzlich benetzt wurde.

Den auf die Kugel stärker wirksamen Strahlungseinfluß belegen auch Vergleichsmessungen von *B a i e r* (4), bei denen das Piche-Evaporimeter zum Schutz gegen Bestrahlung in der Hütte 2.0 m, die Leistnerkugel jedoch in nur 0.2 m Höhe frei exponiert war. Die Monatsmittelwerte des Quotienten sind der Tabelle 2 beigegefügt. Sie kommen den Hohenpeißberger Werten aus 0.5 m Höhe nahe. Bei einer für verschiedene Witterungsperioden vorgenommenen Aufteilung der Einzelwerte nach den Bewölkungsverhältnissen (Tab. 3) liegt der

Tab. 3

Verhältnis der mittleren Tageswerte der Wasserabgabe
Leistner : Piche, Leistner 0.2 m Höhe, Piche in Hütte
2.0 m Höhe (nach *B a i e r*)

Witterungsperiode	Trübe Tage	Bewölkte Tage	Heitere Tage	Sommertage
Regen	3.94	5.16	—	—
nach Regen	5.63	6.97	6.84	7.22
Trockenheit	6.25	6.34	5.91	6.91

Quotient an bewölkten und heiteren Tagen wesentlich höher als an trüben Tagen und erreicht seinen größten Betrag an bewölkten Tagen und im Witterungsabschnitt „nach Regen“, der die größere Turbulenz einschließt und häufig als Rückseitenwetter in Erscheinung tritt. An Sommertagen kommen die Quotienten dem Verhältnis der wirksamen Oberflächen schon sehr nahe.

2.2. Vergleich Leistner-Kugel/Vilkner-Kugel

V i l k n e r (10), dessen Verdunstungskörper aus porösem Filterstein besteht, hat bei Vergleichen mit der Leistner-Kugel aus 24 Meßwerten ein sehr gleichbleibendes Verhältnis *Lei : Vi* von 4.3 gefunden. Vergleiche, die in den Jahren 1956 und 1957 zwischen verschiedenen Porzellankugeln nach *V i l k n e r* und Fließpapierkugeln nach *Leistner* in Wyk durchgeführt wurden (18), ergaben jedoch für den Quotienten einen ausgeprägten jahreszeitlichen Gang (Abb. 2). Die Verhältniszahlen von 1957 liegen dabei tiefer, weil sich die Leistner-Kugel in nur 1 m Höhe befand. Zur Klärung dieses Verhaltens wurden zunächst der Windeinfluß untersucht. Die folgende Zusammenstellung zeigt, daß der

Abhängigkeit des Quotienten Lei-Kugel : Vi-Kugel von der Windgeschwindigkeit

m/sec	1.0—1.9	2.0—2.9	3.0—3.9	4.0—4.9	5.0—5.9	6.0—7.9	8.0—11.9
Quotient	5.5	5.2	5.1	5.0	5.0	4.5	4.6
Zahl der Beob.	33	32	19	11	12	5	4

mittlere Quotient mit zunehmender Windgeschwindigkeit stetig abnimmt. Damit ist ein unterschiedlicher Windeinfluß auf die beiden verschieden großen Verdunstungskörper angezeigt. Nach aerodynamischen Gesetzen wird bei höheren Geschwindigkeiten ein größerer Durchmesser rotationssymmetrischer Körper mehr umströmt als ein kleinerer, d. h. die Luftbahnen wer-

den immer mehr um das Profil herumgeführt, ohne auf die Oberfläche aufzutreffen. Hier ist eine Parallelität zu den Ablagerungsbedingungen von Masseteilchen an Zylindern gegeben, wie sie Albrecht (20) auf meteorologische Probleme anwandte.

Der Strahlungseinfluß wird aus der folgenden Zusammenstellung ersichtlich:

Abhängigkeit des Quotienten Lei-Kugel : Vi-Kugel von der Strahlungsintensität

calcm ⁻² d ⁻¹	9—199	200—299	300—399	400—499	500—599	600—699	700—799
Quotient	4.7	4.4	4.6	5.2	5.7	6.0	6.0
Zahl der Beob.	10	16	25	29	17	14	10



Abb. 2

Gang des Quotienten Leistner-Kugel : Vi-Kugel Wyk 1956 (Pentadenmittel) Lei-Ku und Vi-Ku in 2 m Höhe 1957 (Wochenmittel) Lei-Ku in 1 m Höhe Vi-Ku in 2 m Höhe

Mit zunehmender Strahlung nimmt auch der Quotient ziemlich gleichmäßig zu. Die Änderung ist hier wesentlich größer als bei der Windgeschwindigkeit. Der Strahlungseinfluß dominiert über die Windgeschwindigkeit. Im Mittel aller Beobachtungen beträgt das Verhältnis Lei : Vi = 5.2. Die Messungen von Vilknier, die ein Verhältnis von 4.3 ergaben, müßten sich demnach auf Untersuchungen im Laboratorium beziehen, bei denen ein wesentlicher Strahlungseinfluß fehlte. Mit dem Quotienten 5.2 bei einem Oberflächenverhältnis Lei : Vi von 8.2 erweist sich das Verdunstungsvermögen der Fließpapierkugel niedriger als das der Porzellankugel. Bezogen auf die Fließpapierschibe des Piche-Evaporimeters verdunstet die größere Lei-Kugel nur 70%, die kleinere Vi-Kugel jedoch 113%, als nach den wirksamen Oberflächen zu erwarten wäre. Beim Vilknier-Evaporimeter wird der Verdunstungsvorgang offenbar durch einen höheren Kapillardruck innerhalb der massiven Porzellankugel gefördert. Die Empfindlichkeit gegenüber Strahlungseinflüssen ist jedoch geringer als die der Lei-Kugel.

Zusammenfassend ergibt sich: Der Quotient Lei-Ku : Vi-Ku wird bei zunehmender Windgeschwindigkeit kleiner und mit wachsender Strahlungsintensität größer. Da aber im jahreszeitlichen Ablauf vom Sommer zum Winter der Wind zu- und die Strahlung abnimmt, rufen beide Elemente eine gleichsinnige Änderung hervor, was zu der starken jahreszeitlichen Abnahme des

Quotienten führt. Die Ergebnisse der beiden kugelförmigen Verdunstungsmesser sind daher, besonders bei extremen klimatischen Bedingungen, nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar.

Für einen regionalen Vergleich, der sich auf Messungen mit gleichartigem Gerät stützt, spielt die Individualität des Verdunsters keine Rolle, sofern nicht - wie bei den Tonkörpern, bei denen sich mit zunehmender Verstopfung der Poren ihre Charakteristik ändert - ein schwer kontrollierbarer Zeitfaktor das gegenseitige Verhältnis beeinflusst (5). Bei regelmäßiger Erneuerung der Fließpapierschalen behält das Evaporimeter nach Leistner-Robitzsch seine Charakteristik bei. Von den vorliegenden Ergebnissen kann also erwartet werden, daß sie dem Einfluß der meteorologischen Faktoren auf die Verdunstung gleichartig folgen.

3. Abhängigkeit der Verdunstungsgröße von den meteorologischen Faktoren

3.1. Theoretische Grundlagen

Die Gesamtwirkung aller für die Verdunstung maßgeblichen meteorologischen Elemente faßte Walter (11) in dem Sammelbegriff „Verdunstungskraft der Atmosphäre“ zusammen. Einwirkende Faktoren sind die Sonnen- und Himmelsstrahlung, die Lufttemperatur, das Sättigungsdefizit, die Windgeschwindigkeit.

Nach der theoretischen Ableitung des Verdunstungsvorgangs, die für die Leistnerkugel (12) die Form

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c_p}{L} \frac{dm}{dt} (T_L - T_K)$$

hat, hängt die Verdunstungsgeschwindigkeit von dem Massenaustausch $dm : dt$ an der Kugeloberfläche, der eine Funktion der Ventilation ist, und von dem Temperaturunterschied zwischen Luft (L) und Kugeloberfläche (K) ab. Die Oberflächentemperatur wird im allgemeinen nicht gemessen. Sie mit der Temperatur des feuchten Thermometers, die Differenz $(T_L - T_K)$, also mit der psychrometrischen Differenz gleichzusetzen, ist nur im Spezialfall möglich (13). Ebenso tritt der Fall, daß die Oberflächentemperatur der Kugel gleich der Lufttemperatur, das Differenzglied also proportional dem Sättigungsdefizit $(E - e)$ ist, in der Natur nur selten auf. Dennoch hat sich empirisch das Verhältnis der Verdunstungsmenge zum Sättigungsdefizit als eine charakteristische Größe erwiesen. Streuungen dieser Proportionalität sind infolge stärkerer Überwärmung der Kugeloberfläche bei direkter Sonnenbestrahlung zu erwarten, wobei auch die Eigenkonvektion an der Verdunstungsfläche gesteigert wird.

Der Ventilationsfaktor $dm : dt$ gilt, streng genommen, nur für eine laminare Strömung. Die turbulente Struk-

tur des natürlichen Luftstromes, deren Grad sich mit der je nach Luftmasse verschiedenen Größe des Austausches ändert, stört ebenfalls eine strenge Linearität, die nach der theoretischen Ableitung zu erwarten wäre. Sie rief bei den Versuchen von *Leistner* zur empirischen Bestimmung des Ventilationsfaktors unter natürlichen Bedingungen eine starke Streuung der Werte hervor, der theoretisch kaum zu begegnen ist (12). Auch die Eigenkonvektion in ihrer Abhängigkeit vom mittleren Windweg trägt zur Streuung der Werte bei.

Neuerdings hat *Hofmann* (14) die Verdunstung als Glied des Wärmehaushalts auf energetischer Grundlage betrachtet. Danach setzt sich der Verdunstungswärmestrom V aus einem Ventilations-Feuchte-Anteil V_V und einem Strahlungsanteil V_S zusammen, dem die thermodynamische Verdunstungsformel

$$V = V_S + V_V$$

entspricht. Beide Teilbeträge erweisen sich als mindestens gleichberechtigt, in der Verdunstungssumme des Jahres und insbesondere in der Vegetationsperiode übertrifft der Strahlungsanteil den Ventilations-Feuchte-Anteil erheblich. Die Messungen von *Frankenberg* (15) bestätigen, daß der Strahlungsanteil mehr als die Hälfte ausmacht. Der Ventilations-Feuchte-Anteil an der Gesamtverdunstung über dem Wiesengelände von *Quickborn* blieb dagegen in der Vegetationsperiode unter 25%.

Für praktische Fragestellungen interessiert, die Verdunstungswerte aus verfügbaren Beobachtungswerten abzuleiten. Es liegt nahe, hierfür das Sättigungsdefizit ($E-e$) zugrunde zu legen, weil in dieser Größe die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit, aber auch der Strahlungscharakter eines Tages in seiner Auswirkung auf die Tagesgänge der Lufttemperatur und der relativen Feuchtigkeit enthalten sind. Der Wind wäre als Zusatzglied zu berücksichtigen. Die zur Berechnung der potentiellen Verdunstung aus klimatologischen Daten vorgeschlagenen Beziehungen (1) von *Albrecht*, *Haude* und *Penman* stützen sich auf das Sättigungsdefizit, nur *Thornthwaite* benutzt allein die Temperatur. *Albrecht* und *Penman* schließen die Windgeschwindigkeit in Zusatzgliedern ein, *Penman* auch noch die Strahlung. Anzustreben bleibt eine Beziehung, in der höchstens zwei Variable Berücksichtigung finden, weil dann auch eine Möglichkeit zur graphischen Berechnung mittels Isoplethendarstellungen gegeben ist. Die „*Kissinger Methode*“, eine Weiterentwicklung des von *Albrecht* angegebenen Verfahrens, leitet dann aus der potentiellen Verdunstung, unter Berücksichtigung der Bodenfeuchte, zur Berechnung der aktuellen Verdunstung über. Jeder Beitrag, der einen tieferen Einblick in das Verhalten der potentiellen Verdunstung entsprechend dem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre vermittelt, trägt also auch zur Klärung des Problems der aktuellen Verdunstung bei.

3.2. Sättigungszustand und Luftbewegung

Nachdem bei allen einschlägigen Untersuchungen vom Sättigungsdefizit als der wichtigsten Bezugsgröße für die Errechnung des Verdunstungsanspruchs ausgegangen wurde und *Baier* (4) bei Evaporimetermessungen mit der *Leistner-Kugel* für die Beziehung der Tagesverdunstung zum Sättigungsdefizit ($E-e$) (Tag) einen Korrelationskoeffizienten von 0.870 fand, der auch bei Unterteilung nach Windgruppen keine wesentliche Verbesserung erfuhr, stellten wir unsere Auswertungen darauf ab, die Gültigkeit der Beziehungen zu einem Feuchtemaß für Stundenwerte, Tages- und Monatssummen und die Bedeutung der Zusatzkomponenten Wind und Strahlung zu überprüfen. Es schien wichtig, die Bezugsgrößen den allgemeinen Beobachtungen zu entnehmen, wie grundsätzlich anzustreben ist, die Be-

rechnung der Verdunstung aus den üblichen klimatologischen Daten abzuleiten, um sie für jeden Ort mit vorliegenden Beobachtungen, auch für zurückliegende Zeitabschnitte, durchführen zu können. Als Maß für den Sättigungszustand der Luft wurde zunächst die relative Feuchtigkeit verwendet, die - auch in Stundenwerten - eher allgemein verfügbar ist als die Größe ($E-e$).

In Isoplethendarstellungen wurde die Wasserabgabe der Kugel zur relativen Feuchtigkeit (Stundenwerte nach den Registrierungen eines Hygrographen in der Hütte) und zur Windgeschwindigkeit (Stundenwerte nach den Registrierungen eines Anemographen *Fuess-Universal* in *Wyk* aus 12.3 m (ab 6. VI. 55 erhöht auf 16.3 m) bzw. in *Hohenpeißenberg* aus 21.6 m Höhe) in Beziehung gesetzt (Abb. 3a). Die Beschränkung auf den

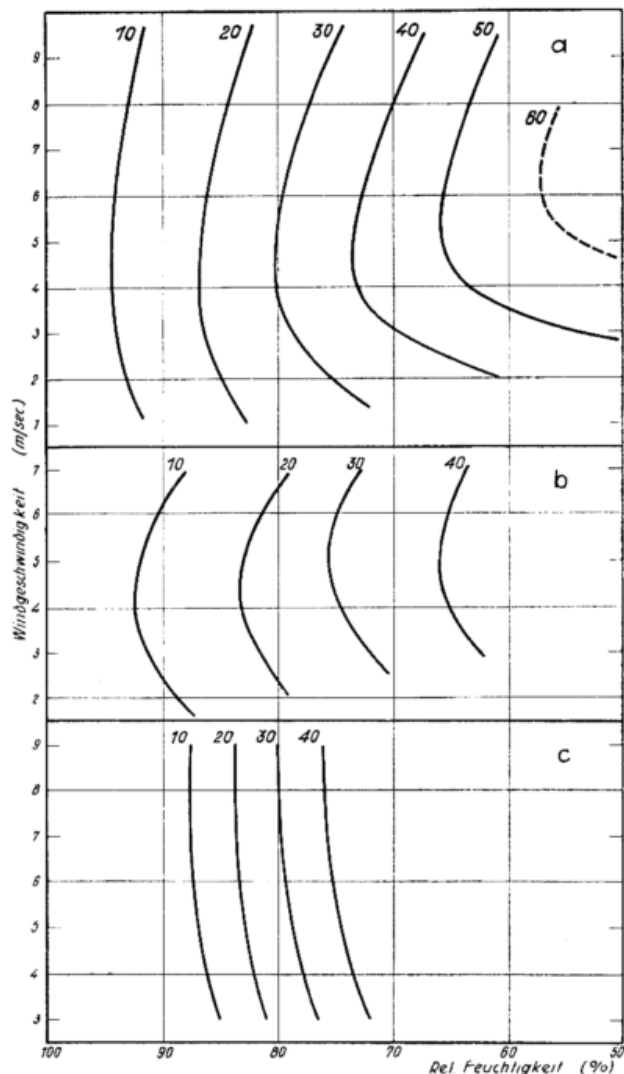


Abb. 3

Abhängigkeit der Wasserverdunstung einer *Leistner-Kugel* von der relativen Feuchtigkeit und von der Windgeschwindigkeit.

- a) Tagessummen. *Hohenpeißenberg*. Mai bis August 1955. 0.5 m Höhe.
- b) Dekadenmittel der Tagessummen. *Hohenpeißenberg*. August bis Oktober 1952, Mai bis Oktober 1953 bis 1955.
- c) Monatsmittel der Tagessummen. *Wyk*. März bis Oktober 1951 bis 1957.

Zeitraum Mai bis August (1955) schien geboten, um den Vergleich nicht durch ein zu stark abweichendes Temperaturmilieu zu stören. Der Verlauf der Isolinien läßt erkennen, daß bei hoher Feuchte der Wind die Verdunstung nicht mehr zu steigern vermag. Im Bereich niedrigerer Feuchten erhöht sich die Wasserabgabe durch Windeinfluß nur bis Geschwindigkeiten von 3 m/sec,

mit wachsendem Sättigungsdefizit bis 5 m/sec. Diese Feststellung deckt sich mit dem von Baumbach (2) unter definierten Versuchsbedingungen im Windkanal und mit dem von Baier (4) im Freiland ermittelten Befund. Das Zurückfluchten der Isolinien bei wachsender Windgeschwindigkeit ist als eine Besonderheit des Strömungsfeldes am Meßplatz zu werten.

Die mittlere Abweichung, aus den Differenzen aller Einzelwerte zum jeweiligen Sollwert des Diagramms berechnet und in Prozenten des Sollwertes ausgedrückt (Tab. 4a 1), ist recht beträchtlich und unterschreitet erst bei einer Tagessumme von 45 g Wasserabgabe die 10%-Grenze. Die Streuung der kleineren Tageswerte muß, da sie mit höherer Feuchtigkeit bei stärkerer Bewöl-

Tab. 4
Abhängigkeit der Verdunstung von relativer Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit.
Mittlere Abweichung der Einzelwerte von den graphisch errechneten Sollwerten.

Wasserabgabe in g		0—5	6—15	16—25	26—35	36—45	46—55	56—65	66—75	76—85	
a	Tageswerte.	V. bis VIII. 1955					Hohenpeißenberg				
	absolut	6.3	8.6	8.2	10.1	6.6	3.6	8.0			
	Abw. in % v. Sollwert	253	86	41	34	16	7	13			
2	Tageswerte.	V. 1953, 1954, 1955					Hohenpeißenberg				
	absolut	2.2	9.0	9.8	11.3	13.1	6.0	9.5	4.2	16.0	
	Abw. in % v. Sollwert	87	90	49	38	33	12	16	6	20	
b	Dekadenmittel der Tageswerte.	VIII.—X. 1952, V.—X. 1953—1955.				Hohenpeißenberg					
	absolut		3.1	2.9	3.4	3.9					
	Abw. in % v. Sollwert		31	15	11	10					
	Berechnung-Mess.		2.1	0.0	0.7	-2.8					
c	Monatsmittel der Tageswerte.	III.—X. 1951—1957.					Wyk				
	absolut		4.2	4.6	4.8	5.1	5.8				
	Abw. in % v. Sollwert		168	46	24	17	14				
	Berechnung-Mess.		-2.5	1.2	-2.9	0.2	2.4				

kung oder trübem Wetter gekoppelt ist, auf das Überwiegen zusätzlicher Turbulenzeinflüsse zurückgeführt werden. Die viel stärkere Neigung der Isolinien bei geringerer Feuchte läßt auf den dann wachsenden Strahlungseinfluß schließen. Eine gleichartige Darstellung, zeitlich auf die Maimonate 1953—1955 beschränkt, vermag die Streuung nicht zu verbessern (Tab. 4a 2), weil die Temperaturschwankungen dieses Monats nicht geringer sind als in den Sommermonaten eines einzelnen Jahres.

Eine wesentlich geringere Streuung zeigen dagegen die zu Dekadenmitteln zusammengefaßten Tageswerte (Abb. 3b und Tab. 4b). Schon bei 25 g täglicher Wasserabgabe sinkt die mittlere Abweichung auf die 10%-Fehlergrenze ab. Die unter Beachtung des Vorzeichens ermittelten Differenzen zwischen berechnetem und gemessenem Dekadenmittelwert fallen ab 15 g nicht mehr ins Gewicht, die größeren bei Mengen unter 15 g bleiben für das Gesamtergebnis einer Dekade bedeutungslos. Der Übergang zum weiter ausgleichenden Monatsmittel, mit dem für Wyk die Abb. 3c entworfen wurde, zeigt einen gleichartigen Verlauf der Isolinien, vermag aber die Güte der Beziehungen nicht mehr zu verbessern (siehe Tab. 4c).

Die relative Feuchtigkeit als Bezugsgröße für die Ableitung der Verdunstungswerte aus klimatologischen Daten liefert befriedigende Ergebnisse, wenn ein annähernd gleichbleibendes Temperaturniveau vorausge-

setzt werden kann. Die Mitteltemperaturen innerhalb der Vegetationszeit schließen jedoch, besonders in den Frühjahrsmonaten, größere Schwankungen, 10 bis 15° übersteigend, ein, die zur Streuung der berechneten Verdunstungswerte beitragen. Der theoretischen Bedingung ($T_L - T_K$) (siehe S. 7) entspricht bei allen Temperaturlagen besser das Sättigungsdefizit ($E - e$), weil in diese Größe auch das Temperaturniveau eingeht. Eine Isoplethendarstellung der Verdunstung mit dem Sättigungsdefizit ($E - e$) und der Windgeschwindigkeit als Bezugsgrößen zeigt den gleichen Verlauf der Isolinien, wie er aus der Abb. 3 mit der relativen Feuchtigkeit als Maß des Dampfhungers der Atmosphäre ersichtlich ist. Auf eine Wiedergabe der Kurven wird verzichtet. Die mittlere Abweichung als Maß der Streuung der Einzelwerte bleibt hier bei den Tagessummen kleiner als bei Verwendung der relativen Feuchtigkeit als Bezugsgröße (Tab. 5a). Sie bleibt annähernd in gleicher Größenordnung, wenn die Berechnung sich auf Dekaden- oder gar Monatsmittel stützt. Bei der Ergänzung von Monatsabschnitten zur Ableitung eines mittleren Jahresganges der Verdunstung wurde von diesen Beziehungen Gebrauch gemacht.

3.3. Eliminierung des Strahlungsanteils

Die Eliminierung des Strahlungseinflusses auf die Verdunstung erfolgte nach verschiedenen Verfahren. Zunächst wurden nach dem Hohenpeißenberger Mate-

Tab. 5

Mittlere Abweichung bei Errechnung der potentiellen Verdunstung Hohenpeißenberg

a) aus dem Sättigungsdefizit und der Windgeschwindigkeit

Wasserabgabe	g/100 cm ² Tag	0—5	6—15	16—25	26—35	36—45	46—55	56—65	66—75	76—85
Tagessummen	absolut	1.7	9.0	5.9	7.7	11.1	7.0	8.85	16.1	7.2
V 1953, 54, 55	in % vom Sollwert	67	90	29	26	25	14	15	23	9
Dekadensummen	absolut		2.8	3.6	5.8	4.9				
V—X 1953—55	in % vom Sollwert		28	18	19	12				

b) aus der Globalstrahlung und der Windgeschwindigkeit

Dekadensummen	absolut		4.6	4.7	3.4	10.2				
	in % vom Sollwert		46	23	11	25				

rial die Stundenwerte der Verdunstung aus der Tageszeit 09 bis 15 h in ihrer Abhängigkeit von Stundenwerten der relativen Feuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Bewölkungsgraden gesondert betrachtet. Die Zuordnung zu den einzelnen Witterungsgruppen erfolgte nach Registrierungen der Globalstrahlung mit einem Solarimeter. Aufgeteilt wurde in „heitere Tage“ mit einer ungestörten Strahlungskurve, in „bewölkte Tage“, an denen sonnige mit wolkenigen

Abschnitten häufig und schnell wechselten, und in „trübe Tage“, an denen der Himmel völlig bedeckt blieb, ohne daß es zu Niederschlägen kam. Die Bezugswerte für die Windgeschwindigkeit wurden hierbei nicht der entfernteren Dachaufstellung entnommen, sondern einem Anemographen mit Selsyn-Geber (6 m) auf dem Hauptfeld, wo auch die Verdunstung registriert wird. Die Iso-plethendarstellungen der drei Gruppen (Abb. 4) zeigen deutlich, wie sich mit zunehmendem Strahlungseinfluß

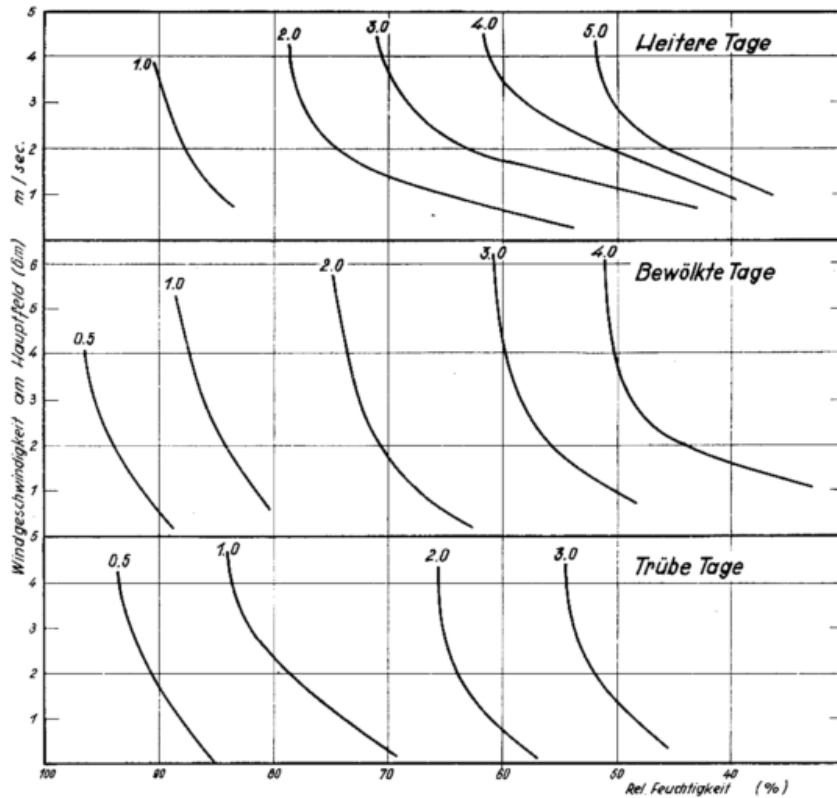


Abb. 4

Abhängigkeit der Wasserverdunstung einer Leistner-Kugel in 0.5 m Höhe von der relativen Feuchtigkeit und von der Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Bewölkungsverhältnissen. Hohenpeißenberg.

Mittlere Stundenwerte 9—15 Uhr. Mai bis August 1955.

die bei einem gegebenen Sättigungsdefizit stattfindende Wasserabgabe der Kugel erheblich steigert. Mit dem Strahlungseinfluß geht für kleinere Geschwindigkeiten auch der Windeinfluß stärker ein, wie der viel flachere Verlauf der Isolinie in der Gruppe der heiteren Tage

erkennen läßt. Damit bestätigt sich die aus den Vergleichsmessungen Leistner/Piche gezogene Folgerung (s. S. 6), daß bei unbehinderter Sonnenstrahlung die dabei erhöhte bodennahe Turbulenz die Verdunstung steigert. Die Streuung der Einzelwerte aller drei Grup-

Tab. 6
Abhängigkeit der Verdunstung von relativer Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Bewölkungsgraden.
Mittlere Abweichung der Stundenwerte 9—15 Uhr von den graphisch errechneten Sollwerten.
Hohenpeißenberg, Mai bis August 1955.

Stündliche Wasserabgabe in g						
	0—0.5	0.6—1.5	1.6—2.5	2.6—3.5	3.6—4.5	4.6—5.5
Heitere Tage						
Abw. absolut		0.5	0.5	1.0	0.9	0.5
Abw. in ‰ v. Sollwert		51	27	32	21	10
Berechn.-Mess.		0.2	-0.1	-0.6	-0.5	0.4
Bewölkte Tage						
Abw. absolut	(0.0)	0.6	0.5	0.6	0.7	
Abw. in ‰ v. Sollwert		56	28	19	19	
Berechn.-Mess.	(0.0)	0.3	0.2	0.3	0.5	
Trübe Tage						
Abw. absolut	0.4	0.4	0.8	(0.6)		
Abw. in ‰ v. Sollwert	161	43	39	(20)		
Berechn.-Mess.	0.1	0.2	0.4	(0.3)		

Tab. 7
Steigerung der Wasserabgabe einer Leistner-Kugel durch den Einfluß direkter Sonnenbestrahlung.
Hohenpeißenberg, 0.5 m. Mai—August 1955. Stundenmittel 9—15 Uhr.
Randwerte ausgeglichen.

W	Wind in m/sec (6 m)	Relative Feuchtigkeit in ‰					
		80	70	60	50	40	
Bewölk	2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	g
		26	22	17	13	10	‰
	3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	g
		28	24	21	18	14	‰
	4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.9	g
		29	25	22	20	17	‰
Heiter	2	0.5	0.7	0.8	0.9	1.1	g
		45	42	35	29	25	‰
	3	0.8	1.2	1.4	1.7	2.1	g
		70	65	58	52	47	‰
	4	0.9	1.3	1.6	1.9	2.3	g
		75	72	64	58	53	‰

pen (Tab. 6) liegt erwartungsgemäß höher als die der Tages- oder gar der Dekadensummen, gleicht sich aber im Mittelwert, wie die Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Werten belegen, völlig aus.

Die durch Bestrahlung hervorgerufene Steigerung der Wasserabgabe kann aus einem Vergleich der Bezugslinien bei den drei Witterungsgruppen abgeleitet werden (Tab. 7). Errechnet man für die einzelnen Wind- und Feuchtigkeitsstufen die Differenzen der Verdunstungswerte für die Gruppen „bewölkt“ und „heiter“ zu den entsprechenden Werten „trüber“ Tage, so erhöht sich die stündliche Wasserabgabe an bewölkten Tagen bis zu 1 g, an Tagen mit ungehinderter Sonnenstrahlung bis über 2 g. Prozentual ausgedrückt machen diese Steigerungen bei wechselnder Bewölkung bis zu einem Drittel, bei heiterem Wetter bis zu 75% der Verdunstung an trüben Tagen aus. Der zusätzliche Windeinfluß wird in den höheren Geschwindigkeitsstufen geringer.

Ein anderes Verfahren zur Ermittlung des Strahlungsanteils führte zu gleichwertigen Ergebnissen. In einem Windkanal wurde die Wasserabgabe bei verschiedenen Stufen der relativen Feuchtigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit gemessen und in Isolethen dargestellt. Diesen Werten wurden die im Freiland gewonnenen Verdunstungswerte aus den Tagesstunden 8 bis 20 Uhr, für die als Bezugsgrößen Meßergebnisse eines Handanemometers, neben der Kugel in 0.5 m Höhe aufgestellt, und die Feuchtigkeitswerte aus Stundenmitteln der Hygrographenregistrierung in der Thermometerhütte benutzt wurden, gegenübergestellt. Alle Werte wurden über die Zeit 8 bis 20 Uhr gemittelt, die Differenzen zwischen den Tageswerten (mit Strahlung) und den Windkanalwerten (ohne Strahlung) absolut und in Prozenten der letzteren gebildet und nach Stufen der Strahlungssummen geordnet. Die durch die Globalstrahlung bewirkte Erhöhung der Verdunstungswerte (Tab. 8) liegt in der gleichen Größenordnung, wie sie aus einem Vergleich der Wasserabgabe bei verschiedener Bewölkung abgeleitet wurde (siehe Tab. 7). Der Strahlungszuschlag erreicht unter günstigsten Bedingungen 80%. Stärkere Einstrahlung und zunehmende

Tab. 8
Prozentuale Steigerung der Wasserabgabe einer Leistner-Kugel durch die Globalstrahlung, abgeleitet aus Vergleichsmessungen im Windkanal.

Hohenpeißenberg, 0.5 m.

Rel. Feucht.	Wind a. d. Kugel	Globalstrahlung Mittl. Stundensummen (08—20 h) in gcal/cm ² h			
		41—45	46—50	51—55	56—60
40	1	22	40	55	65
	2	41	56	70	80
	3	45	60	73	83
50	1	18	35	51	62
	2	37	53	67	77
	3	42	57	70	80
60	1	10	27	45	57
	2	31	47	61	72
	3	36	52	65	76
70	1	5	15	32	42
	2	20	35	49	60
	3	26	40	53	64

Windgeschwindigkeit erhöhen den Austausch an der Kugeloberfläche und steigern dadurch den Zuschlag. Auch hier wird bei stärkerer Windgeschwindigkeit die „Strahlungsverdunstung“ nur noch wenig erhöht.

Ähnlich wurde in Wyk verfahren. Es wurde zunächst für die Nachtstunden, in denen die Einstrahlung entfällt, ein Isolethendiagramm entworfen, das die Abhängigkeit der Kugelverdunstung von Wind und relativer Feuchtigkeit angibt. Von den nach einzelnen Monaten getrennten Darstellungen sei hier diejenige für Juni und Juli wiedergegeben (Abb. 5). Für den Strahlungstag

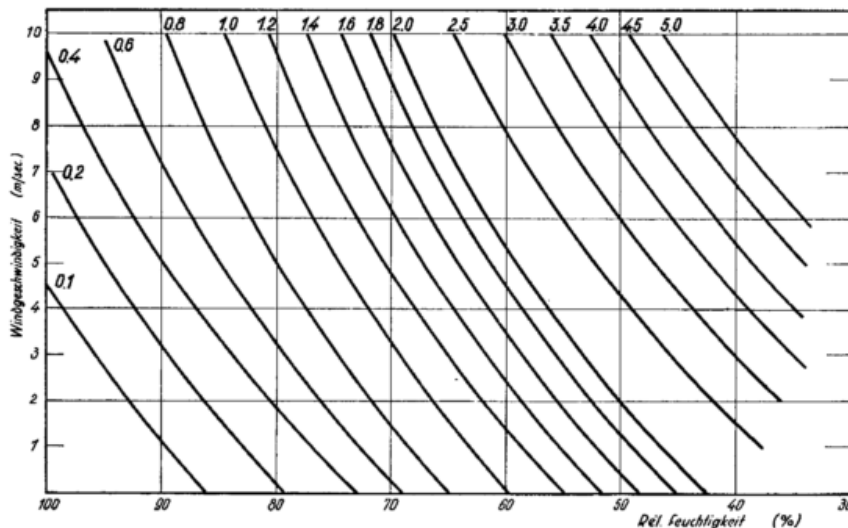


Abb. 5
Abhängigkeit der Wasserverdunstung einer Leistner-Kugel in 1.0 m Höhe von der relativen Feuchtigkeit und von der Windgeschwindigkeit während der Nacht. Wyk. Mittlere Stundenwerte. Juni und Juli 1955.

(Sonnenauf- bis -untergang) wurden dann Mittelwerte für Verdunstung, Wind und relative Feuchtigkeit berechnet. Wenn jetzt mit den entsprechenden Tagwerten des Windes und der relativen Feuchtigkeit in das Iso-

lethendiagramm (Nacht) eingegangen wird, dann kann der Wert entnommen werden, der sich in Abhängigkeit von beiden Bezugsgrößen ohne Strahlung ergibt. Die Differenz beider Werte (Strahlungstag minus Nacht)

entspricht dann dem auf die Strahlung entfallenden Anteil.

Die daraus abgeleitete Beziehung der Wasserabgabe zur zugestrahlten Wärmemenge (Abb. 6), die auch die

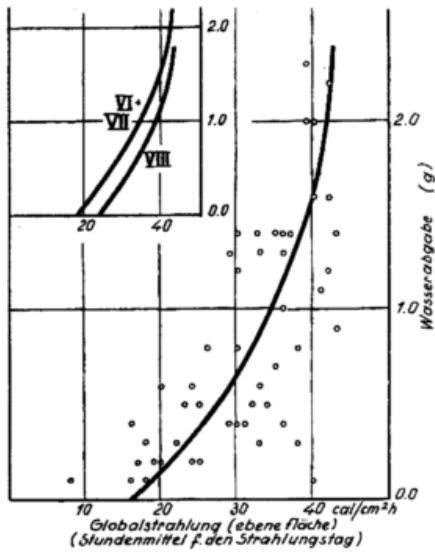


Abb. 6

Abhängigkeit der Wasserverdunstung einer Leistner-Kugel in 1.0 m Höhe von der zugestrahlten Wärmemenge. Wyk. Verdunstungs-Strahlungsanteil, Juni und Juli 1955. Links oben die gleiche Kurve im kleineren Maßstab und die Kurve für August 1955.

Links oben die gleiche Kurve im kleineren Maßstab und die Kurve für August 1955.

diffuse Himmelsstrahlung einschließt, ist eindeutig, jedoch streuen die Punkte stark. Einwandfreiere Ausgangswerte würden vorliegen, wenn für die Aufstellung des Isoplethendiagramms (Nacht) nur stark bewölkte Nächte zur Verfügung stünden, wo die Ausstrahlungseffekte an der Kugeloberfläche nur gering blieben. Die Streuung ist aber auch auf den Unterschied der Strahlungsempfänger — Kugel und ebene Fläche (Aktinograph Robitzsch) als Bezugswert — zurückzuführen. Die Kugel empfängt schon bei niedriger Sonnenhöhe die volle Strahlungsintensität, während die horizontale Empfangsfläche des Bezugswertes noch einen gemäß dem Cosinus-Gesetz viel geringeren Strahlungswert anzeigt. In die Abb. 6 sind links oben die beiden Kurven vom Juni/Juli und vom August in verkleinertem Maßstab eingezeichnet. Die Augustkurve ist etwas nach rechts verschoben, weil im August infolge des allgemein niedrigeren Sonnenstandes eine größere Wärmemenge — bezogen auf die ebene Fläche — erforderlich ist, um die gleiche Menge Wasser auf der Kugel zu verdunsten. Die für einen bestimmten Zeitraum ermittelten Beziehungen können daher nicht verallgemeinert werden.

Um diesen störenden Einfluß des jahreszeitlichen Ganges der Sonnenhöhe auszuschalten, wurde der Strahlungsanteil der Verdunstung auf Relativwerte der Globalstrahlung bezogen, wie sie Collmann (16) definierte. Die gemessenen Werte der Globalstrahlung hängen einerseits von den astronomischen Daten des Sonnenstandes (Deklination, geographische Breite des Beobachtungsortes) und andererseits von den mannigfaltigen Witterungserscheinungen, insbesondere vom Bewölkungsgrad und vom Trübungsgrad der Atmosphäre ab. Collmann geht von Idealwerten aus, die sich auf eine wasserdampf- und staubfreie Atmosphäre, die sog. „Rayleigh-Atmosphäre“, beziehen, in der nur noch die Streuung an den Luftmolekülen herrscht. Die Meßwerte der Strahlung werden in Prozenten dieser Idealstrahlung ausgedrückt und die Prozentzahlen als „Relativwerte der Globalstrahlung“ bezeichnet. Diese

Relativwerte haben sich als geeignete Grundwerte für die Deutung mancher physikalischer Fragen erwiesen. Sie wurden nach den Angaben von Collmann auch für Wyk berechnet und hier verwendet.

Den nach Stufen von 10 zu 100% unterteilten täglichen Relativwerten (Juni — August 1955) wurden die nach den Nachtwerten berechneten Strahlungsverdunstungsanteile für den entsprechenden Tag zugeordnet. Die Mittelwerte der einzelnen Intervalle ergeben eine Abhängigkeit nach Abb. 7, Kurve I. Eine Ordnung nach

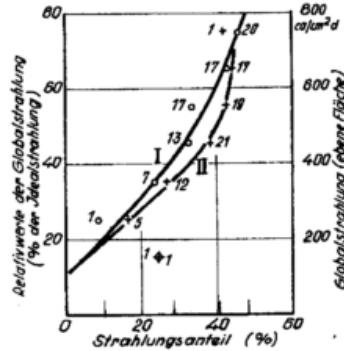


Abb. 7

Prozentualer Anteil der durch Strahlung verdunsteten Wassermenge in Abhängigkeit von den Relativwerten der Globalstrahlung und der Strahlungsintensität. Wyk. Juni bis August 1955. Zahlen: Anzahl der Fälle.

der gemessenen Strahlungsintensität in Stufen von 100 zu 100 cal $\text{cm}^{-2}\text{d}^{-1}$ führt zur Kurve II. Die Kurve I zeigt einen mehr geradlinigen Verlauf als die Kurve II und eine bessere Verteilung der Einzelwerte (Anzahl der Einzelwerte an den Kurvenpunkten). Mit größer werdenden Relativwerten wächst — im Verhältnis zur Gesamtverdunstung — der durch die Strahlung bewirkte Anteil. Bei 40% der Idealstrahlung beträgt der Strahlungsverdunstungsanteil 29% und bei 80% Idealstrahlung 48%. Ähnliche Beziehungen können auch der Kurve II für die Strahlungsintensität entnommen werden, jedoch ist die Zunahme bei höheren Strahlungsintensitäten nicht mehr so deutlich. Beide Kurven nach einem Strahlungsanteil von Null hin extrapoliert, ergeben einen Relativwert von 10% bzw. eine Strahlungsintensität von 10 cal $\text{cm}^{-2}\text{d}^{-1}$. Diese Wärmestrahlung muß erst auf die Kugel wirken, bis die zusätzliche Verdunstung einsetzt. Der feuchte Körper wird durch die Verdunstung auf einer unter der Lufttemperatur (im Extremfall auf der Temperatur des feuchten Thermometers) liegenden Oberflächentemperatur gehalten. Eine zusätzliche Wasserabgabe erfolgt erst, wenn die Oberfläche des Körpers etwas aufgeheizt ist. Dieser Befund ist physiologisch für alle feuchten Körper (Pflanzen, menschlicher Organismus) von Bedeutung.

Eine ähnliche Betrachtung wie für die Strahlungsintensität wurde auch für die Sonnenscheindauer durchgeführt. Ordnet man den auf die Strahlung zurückgeführten Verdunstungsanteil nach Stufen von 10 zu 100% der relativen und nach Stundenintervallen der effektiven Sonnenscheindauer zu, so ergeben sich Mittelwerte nach Abb. 8. Die Kurven zeigen eine Unstetigkeit im Bereich von 55 bis 75% bzw. von 7 bis 11 Stunden. Einen ähnlichen Verlauf hat Heigel (17) bei der Bearbeitung des Verhältnisses Piche-Verdunstung und Sonnenscheindauer gefunden und ihn aus der Beziehung der Sonnenscheindauer zur Strahlungsintensität, gemessen mit einem Kugelpyranometer Bellani, im Zusammenhang mit dem Trübungsgrad der Luft und der Sonnenhöhe erklärt. Die beiden Kurven, im unteren Teil nach dem Wert von 0% bzw. 0 Stunden hin verlängert, schneiden die Abszisse ungefähr bei 12% eines Strahlungsanteils, die auf die diffuse Himmelsstrahlung ent-

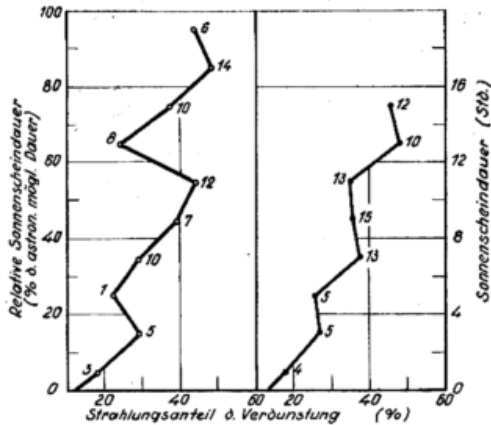


Abb. 8
Abhängigkeit des Verdunstungs-Strahlungsanteiles von den Prozenten der relativen Sonnenscheindauer und den Sonnenscheinstunden. Wyk. Juni bis August 1955. Zahlen: Anzahl der Fälle.

fallen.. Dieser Anteil ist auch an sonnenscheinlosen Tagen wirksam und wird durch die Registrierungen des Sonnenscheinautographen nicht erfaßt. Tageswerte der Sonnenscheindauer sind daher für die Ableitung des Strahlungsfaktors weniger geeignet als Relativ- oder Absolutwerte der Globalstrahlung. Mittelwerte der Sonnenscheindauer für längere Intervalle erweisen sich

jedoch für die rechnerische Ableitung von Mittelwerten der Verdunstung als brauchbar (s. S. 16).

Alle eingeschlagenen Verfahren zur Eliminierung des Strahlungsanteils bestätigen übereinstimmend dessen überragende Bedeutung, er kann während der Sommermonate an der Wasserabgabe zu weit mehr als der Hälfte beteiligt sein. Dem Botaniker ist diese Bedeutung aus den Unterschieden der Verdunstungskraft an Sonnen- und Schattenstandorten bekannt (11). Beziehungen zur Errechnung der Verdunstung (s. S. 8), die den Strahlungsfaktor nicht berücksichtigen, können auf Grund der hier abgeleiteten Größenordnung des Strahlungszuschlages nicht als ausreichend angesehen werden.

3.4. Sättigungsdefizit und Globalstrahlung

Es drängt sich im Hinblick auf den dominierenden Strahlungseinfluß die Frage auf, ob das Sättigungsdefizit ($E - e$) so eng mit den Strahlungsverhältnissen gekoppelt ist, daß die Verdunstungswerte schon aus Integralwerten der Globalstrahlung ohne Berücksichtigung des Ventilations-Feuchte-Anteils abgeleitet werden können. Eine solche Korrelation erscheint naheliegend, weil Tage mit hohem Sättigungsdefizit zugleich Strahlungstage sein werden und mit dem jahreszeitlichen Gang der Dauer eines Strahlungstages zugleich auch das Temperaturniveau und damit der absolute Betrag des Sättigungsdefizits schwankt. Die Beziehung Verdunstung/Globalstrahlung (Abb. 9) ist jedoch nicht

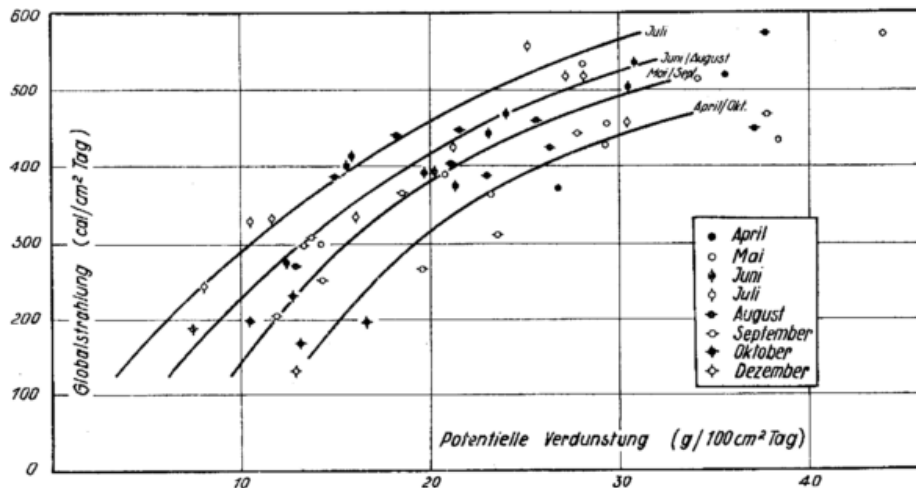


Abb. 9
Beziehung zwischen der Wasserabgabe einer Leistner-Kugel in 0.5 m Höhe und der Globalstrahlung. Hohenpeißenberg. Dekadenmitteln der Tagessummen, 1952 bis 1955.

eindeutig. Bei gleicher Strahlungsintensität ergeben sich in den Übergangsmonaten höhere Verdunstungsbeträge als in den Sommermonaten. Dieses dem Jahresgang der Temperatur entgegenstehende Verhalten kann strahlungsklimatisch erklärt werden: Der in den Übergangsmonaten geringeren atmosphärischen Trübung entspricht während dieser Zeit bei gleicher Strahlungsintensität ein höherer Anteil der direkten Sonnenstrahlung, der die verdunstende Kugeloberfläche stärker aufheizt. Eine gleiche Strahlungssumme, die bei tieferem Sonnenstand die Witterung eines heiteren Tages kennzeichnet, wird im Sommer schon bei stärkerer Bewölkung erreicht. Damit ist als zweites ordnendes Element die Luftfeuchtigkeit angedeutet.

Die aus Dekadenmittel abgeleitete Beziehung Sättigungsdefizit/Globalstrahlung (Abb. 10a) ergibt ein mächtig streuendes Band mit nur wenigen Ausreißern. Trägt

man zu den einzelnen Punkten die zugehörigen Verdunstungswerte an und konstruiert wiederum Linien gleicher Wasserabgabe, so bleibt jetzt die mittlere Abweichung der Differenzen der Mittelwerte von den Sollwerten der Isoplethen (Tab. 9a) gerade in den Bereichen geringer Verdunstung wesentlich kleiner als die aus Feuchte und Wind abgeleitete (Tab. 4 und 5). Die Zunahme der Verdunstung wird mit höheren Strahlungswerten geringer, wie es auch schon Tab. 8 erkennen ließ. Einzelne streuende Werte sind übereinstimmend auf Fälle hoher Nachtverdunstung bei föhnigen Wetterlagen zurückzuführen. Die Kopplung Globalstrahlung/Sättigungsdefizit ist auch der Beziehung Globalstrahlung/Wind (Tab. 5b) überlegen. Der Windeinfluß als zweite ordnende Größe ist bei der in 0.5 m Höhe exponierten Kugel ohnehin nicht repräsentativ, weil die wechselnde Höhe des Vegetationsbestandes die Ventilation zeitweilig stärker dämpft.

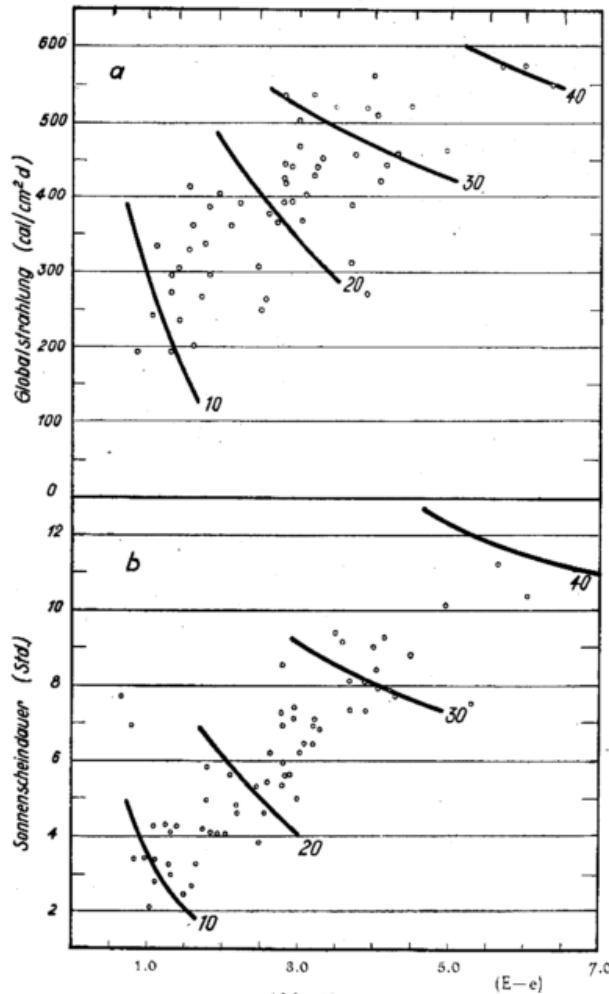


Abb. 10
 Abhängigkeit des Sättigungsdefizits
 a) von der Globalstrahlung,
 b) von der Sonnenscheindauer.
 Dekadenmittel der Tagessummen Mai bis September 1952 bis 1955
 Hohenpeißenberg.

Tab. 9

Mittlere Abweichung bei Errechnung der potentiellen Verdunstung
 bei einer mittl. täglichen Wasserabgabe von

	2—6	7—12	13—17	18—22	23—27	28—32	33—37	38—42	g
a) aus Dekadenmitteln des Sättigungsdefizits und der Globalstrahlung									(Hohenpeißenberg)
abs.	1.5	1.9	3.3	4.9	2.9	1.3	4.8		(1952 — 1957)
in % d. Sollw.	15	12	16	19	10	37	12		
b) aus Dekadenmitteln des Sättigungsdefizits und der Sonnenscheindauer									(Hohenpeißenberg)
abs.	2.0	2.5	4.1	3.9	3.7	7.1	4.5		
in % d. Sollw.	20	16	21	15	12	20	11		
c) aus Monatsmitteln des Sättigungsdefizits und der Globalstrahlung									(Hohenpeißenberg)
abs.	2.1	2.8	4.6	5.5	1.0				
in % d. Sollw.	14	14	18	18	3				
d) aus Monatsmitteln des Sättigungsdefizits und der Sonnenscheindauer									(Hohenpeißenberg)
abs.	1.8	3.8	3.6	5.7	3.5				
in % d. Sollw.	12	19	14	19	10				
e) aus Monatsmitteln der relativen Feuchte und der Globalstrahlung									(Hohenpeißenberg)
abs.	1.5	2.5	3.0	3.3	4.0				
in % d. Sollw.	15	17	15	13	13				
f) aus Monatsmitteln der relativen Feuchte und der Globalstrahlung									(Wyk, 1951 — 1957)
abs.	2.6	3.2	6.2	5.4	4.0	3.8	4.2	3.3	
in % d. Sollw.	65	32	41	27	16	13	12	8	

Vielfach liegen als Maß für die Strahlung nur Aufzeichnungen der Sonnenscheindauer vor, deren Beziehung zum Sättigungsdefizit nach Dekadenmitteln (Abb. 10b) noch straffer gebündelt ist als die Globalstrahlung. Die zugehörigen Verdunstungswerte zeigen von den graphisch ermittelten Sollwerten eine mittlere Abweichung, die sich kaum von der aus der Beziehung zur Globalstrahlung abgeleiteten unterscheidet (Tab. 9c). So kann auch die Sonnenscheindauer als Maß für den Strahlungsanteil verwendet werden, wenn nur ein Feuchtegrad als zweites ordnendes Element hinzugezogen wird.

Für diese zweite Bezugsgröße kann sowohl das Sättigungsdefizit ($E - e$) als auch die relative Feuchtigkeit verwendet werden, je nachdem, welche Werte aus gleichzeitigen Klimabeobachtungen verfügbar sind. Die mittlere Abweichung unterscheidet sich für beide Größen kaum voneinander (vergl. Tab. 9c und 9e). Beim Übergang zu Monatsmitteln liegen die mittleren Abweichungen in allen Verdunstungsstufen nur noch zwischen 10 und 20% (Tab. 9, c, d, e, f). Fehler dieser Größenordnung können schon durch geringfügige Änderungen der Meßbedingungen hervorgerufen werden und bleiben daher im Bereich der Meßgenauigkeit. Die aus Monatswerten der relativen Feuchte und der Globalstrahlung abgeleiteten Mittelwerte der potentiellen Verdunstung für Wyk (1 m) und für Hohenpeißenberg (0.5 m) sind abschließend in Abb. 11 gegenübergestellt.

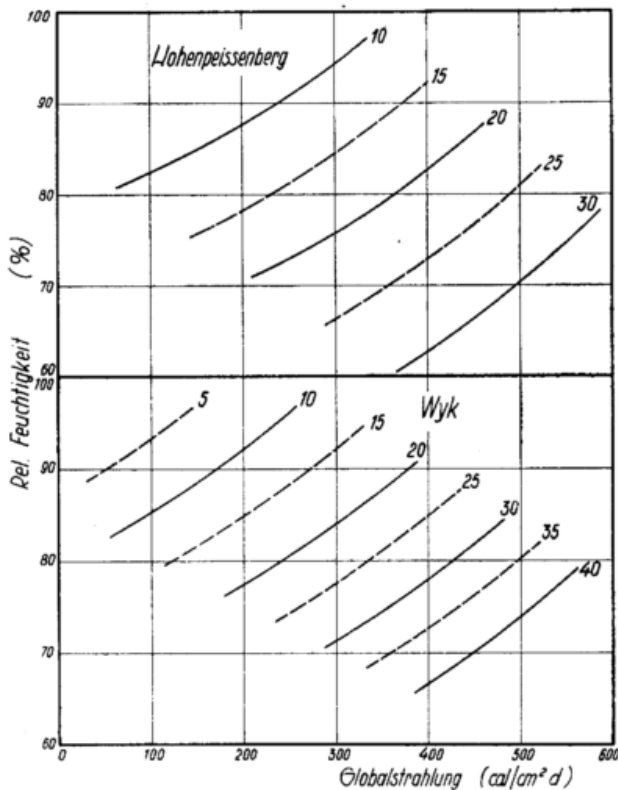


Abb. 11

Abhängigkeit der Verdunstung von der relativen Feuchtigkeit und der Globalstrahlung.

Oben: Hohenpeißenberg. Monatsmittel 1952 bis 1957.
Unten: Wyk. Monatsmittel 1951 bis 1957.

Die aus dieser Darstellung errechneten mittleren Abweichungen sind in der Tab. 9 unter e und f enthalten. Die bei Wyk in den unteren Verdunstungsstufen etwas höhere Streuung weist auf den in 1-m-Aufstellungshöhe in der Küste stärker wirksamen Ventilationseinfluß hin, der hier unberücksichtigt bleibt, aber die für beide Standorte aus Abb. 11 zu entnehmenden Unter-

schiede in den Verdunstungswerten erklärt. Für die Zeit von März bis Oktober des Untersuchungszeitraumes ergibt sich eine mittlere Windgeschwindigkeit für Wyk von 5.9 m/sec, für Hohenpeißenberg von 4.6 m/sec. Nach Abb. 3c steigert sich für diesen Geschwindigkeitsunterschied die Verdunstung bei sonst gleichen Voraussetzungen um 20 bis 10%. Erhöht man die Hohenpeißenberger Verdunstungswerte aus Globalstrahlung und relativer Feuchte (Abb. 11a) um diesen Betrag, so kommen sie den Werten von Wyk schon nahe. Sie stimmen annähernd überein, wenn man für Hohenpeißenberg die Umrechnung von 0.5 auf 1.0 m Aufstellungshöhe der Kugel vornimmt (s. S. 21).

Zusammenfassend läßt sich über die Beziehungen der Verdunstung zu den einwirkenden meteorologischen Faktoren auf Grund der in Wyk und Hohenpeißenberg durchgeführten Messungen folgende Aussage machen: Als wichtigste Bezugsgrößen sind die Sonnenstrahlung und der Sättigungszustand der Luft anzusehen. Der Strahlungsanteil, der nahezu die Hälfte der Wasserabgabe bewirkt, kann sowohl durch die Globalstrahlung als auch durch die Sonnenscheindauer, der Feuchteanteil durch das Sättigungsdefizit ($E - e$) oder durch die relative Feuchte ausgedrückt werden. Ein zusätzlicher Windeinfluß tritt nur bis zu Geschwindigkeiten von 5 m/sec nennenswert in Erscheinung. Verfahren zur Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Größen sollten unbedingt den Strahlungseinfluß berücksichtigen.

4. Verdunstungsklimatologie Wyk/Hohenpeißenberg

4.1. Der Tagesgang des Verdunstungsanspruchs

Die in Wyk und in Hohenpeißenberg durchgeführten Registrierungen mit der Leistnerkugel wurden laufend nach Stundenwerten der Wasserabgabe ausgewertet und stundenweise zu Dekaden- und Monatssummen zusammengefaßt. Aus den Monatsmitteln der stündlichen Wasserabgabe aller vorliegenden Jahresreihen wurde für jeden Monat ein mittlerer Tagesgang abgeleitet. Eine Isoplethendarstellung dieser Mittelwerte der ganzen Meßreihe vermittelt ein anschauliches Bild über den Tagesgang der potentiellen Verdunstung.

Im Tagesgang der Stundenwerte aus vier Untersuchungsjahren (Wyk: 1951, 1953—55; Hohenpeißenberg: 1952—55) (Abb. 12) fallen zunächst einige Unstetigkeiten auf, die sich in allen Jahren wiederfinden. Sie haben meßmethodische Ursachen. So zeigen z. B. alle Monatsgänge von Hohenpeißenberg eine Delle um 8 Uhr. Würde diese Unterbrechung des Tagesanstiegs periodisch bedingt sein, so müßte sie sich mit der Tageslänge verschieben und in den Sommermonaten auf einen früheren Zeitpunkt fallen. Hier wirkt sich die täglich zwischen 7⁴⁵ und 8⁰⁰ erfolgte Unterbrechung des aufgezeichneten Tagesganges bei Streifenwechsel und Neufüllung des Rohres aus. Die Interpolation der Stundenwerte 7—8 Uhr berücksichtigt offenbar zu wenig den um diese Zeit schon stärker wirksamen Anstieg der Ganglinie. Eine in Wyk vielfach um 8 Uhr, vereinzelt um 14 Uhr auftretende Delle dürfte mit der zu dieser Zeit angebrachten Zeitmarke in Verbindung stehen. Der Einbau eines Vibrators könnte diesen Fehler beheben.

Im Vergleich der Einzeljahre in Abb. 12 stimmt deren Charakteristik, unabhängig von der sehr unterschiedlichen Witterung, weitgehend überein. Mit dem Witterungscharakter des einzelnen Jahres ändert sich nur der absolute Betrag der Wasserabgabe, sonst dominiert die Tagesperiode der bestimmenden Elemente. Eine Ausnahme hiervon machen lediglich die Übergangsmomente, soweit deren Werte aus einer beschränkten Auswahl frostfreier Tage abgeleitet wurden.

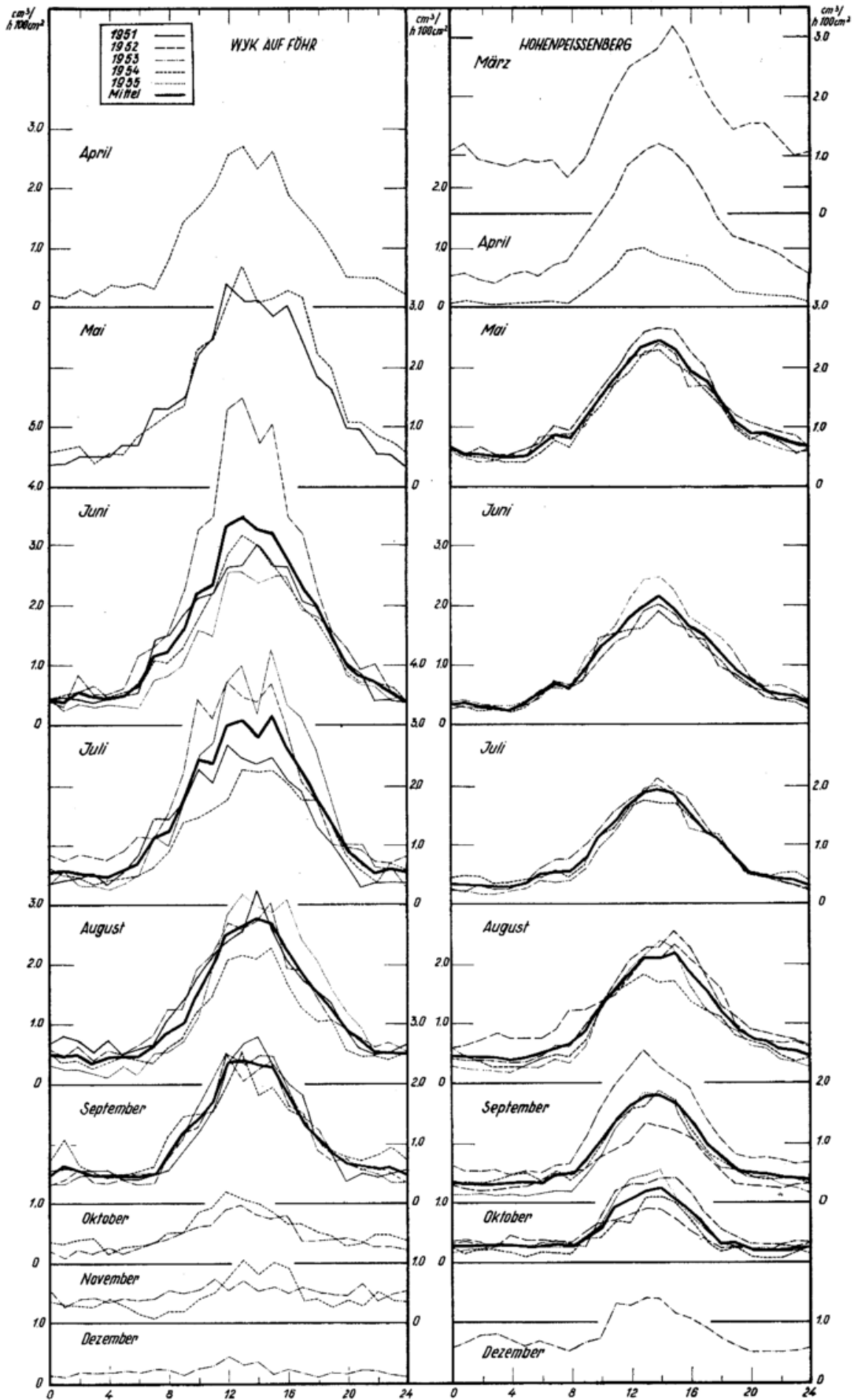


Abb. 12
 Tagesgang der Stundenwerte der Verdunstung von einer
 Leistner-Kugel.
 a) Wyk, 1.0 m. 1951, 1953 bis 1955.
 b) Hohenpeißenberg, 0.5 m. 1952 bis 1956.

In Hohenpeißenberg fallen mit dem Tagesgang der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit die Maxima in die Zeit von 13—14 Uhr. Die Werte des absteigenden Astes bis 24 Uhr liegen kaum höher als die des Anstiegs ab 4 Uhr. Die Zeiten geringster Wasserabgabe, im Sommer um 4 Uhr, verschieben sich mit der Abnahme der Tageslänge auf 8 Uhr. Eine auch im Tagesgang des Windes, der Temperatur und des Dampfdruckes auftretende Unstetigkeit findet sich als flaches

sekundäres Maximum in der ersten Nachthälfte wieder. Sie ist auf einen bei Hochdrucklagen in den Abendstunden einsetzenden Schönwetterwind, eine tagesperiodische Ausgleichsströmung mit dem Gebirge, zurückzuführen. Wo, wie im März, die Werte nur aus einer kleinen Schönwetterauswahl verwendet werden konnten, ist dieses aufgesetzte Maximum besonders gut ausgeprägt. In den Hochsommermonaten klingt es erst nach Mitternacht aus.

Tab. 10
Mittlere, halbtägig von einer Leistner-Kugel verdunstete Wassermengen.
Vergleich der ersten (a. m.) und der zweiten (p. m) Tageshälfte.
Hohenpeißenberg (0.5 m) und Wyk (1.0 m).

Monat	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
Hohenpeißenberg	a. m.	(14.0)	7.4	11.5	8.7	7.8	9.1	7.5	4.8		(9.4)	g/100 cm ²
	p. m.	(23.0)	12.6	17.3	13.7	12.2	14.7	10.9	6.4		(9.8)	
	a. m.	38	37	40	39	39	38	41	43		49	% der Tagessumme
	p. m.	62	63	60	61	61	62	59	57		51	
Wyk	a. m.	.	(10.4)	(15.5)	15.0	15.1	11.0	10.9	(5.4)	(4.7)	(2.7)	g/100 cm ²
	p. m.	.	(15.4)	(23.6)	22.3	20.2	18.1	15.1	(6.3)	(6.6)	(2.3)	
	a. m.	.	40	40	40	43	38	42	46	42	54	% der Tagessumme
	p. m.	.	60	60	60	57	62	58	54	58	46	

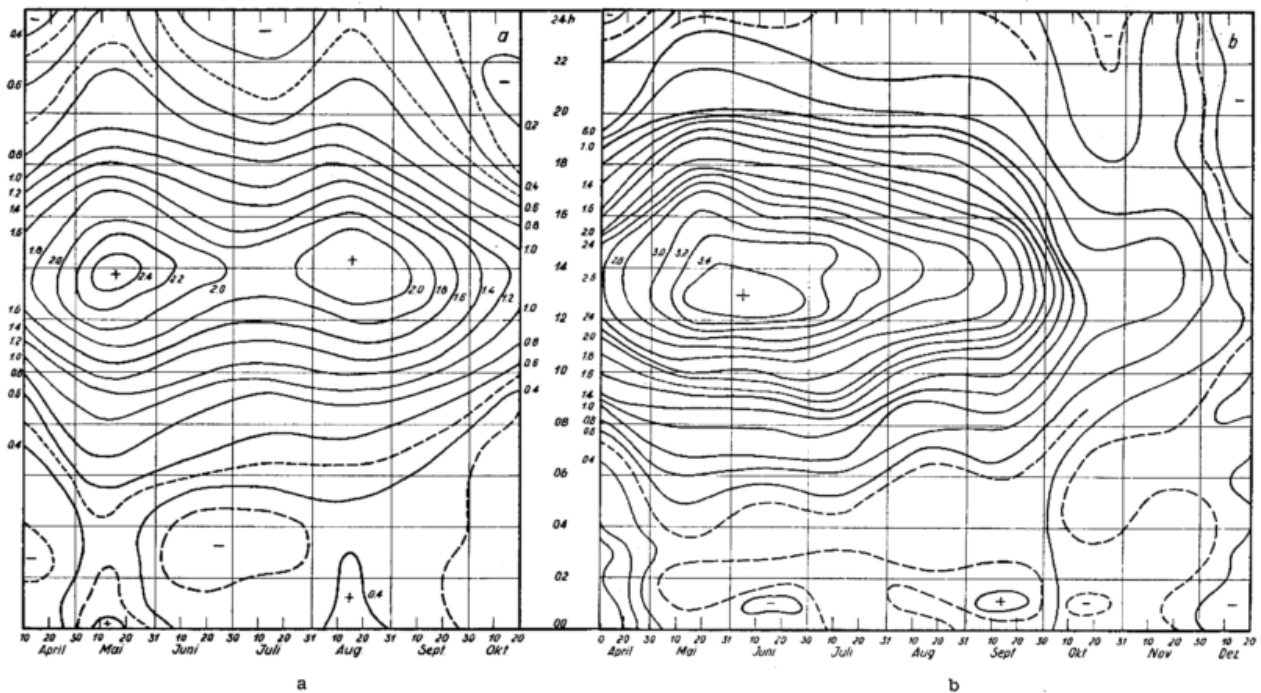


Abb. 13
Jahresgang der Tagesschwankung der Verdunstung von einer Leistner-Kugel in Isoplethendarstellung, Linien gleicher stündlicher Wasserabgabe.
a) Hohenpeißenberg, 0.5 m. 1951, 1953 bis 1955.
b) Wyk, 1.0 m. 1952 bis 1955.

Ablesungen zum Abendtermin als nach Morgenbeobachtungen (7 Uhr) zusammengefaßt werden, sofern nicht eine Registrierung die Ermittlung für die Zeit von 0 bis 24 Uhr zuläßt.

Für praktische Anwendungen in der Agrikultur interessiert noch ein Vergleich der hellen Tagesstunden mit den Nachtstunden. Nach einer durch die Zeiten des Sonnenauf- und -untergangs über den Jahreslauf gleitenden Begrenzung wurde die Wasserabgabe während der Vormittags- und Nachmittagsstunden des Strahlungstages ermittelt und die prozentualen Anteile dieser Tagesabschnitte an der Gesamtverdunstung eines Tages errechnet (Tab. 11). Die Nachtwerte wurden, analog den Tageswerten, noch in die Hälften vor und nach Mitternacht aufgeteilt. Unmittelbar vergleichbar sind die prozentualen Anteile, die für beide Standorte annähernd gleich sind. Die Morgenhälfte des Strahlungstages beansprucht im Sommer etwa 35%, in den Übergangsmonaten 25 bis 30% der Wasserabgabe eines Tages. In der Abendhälfte ist die Verdunstung wesentlich größer

und ein Jahrgang besser ausgebildet. Dieser Tagesabschnitt macht im Sommer etwa 55%, in der Übergangszeit etwa 45% der Tagessumme aus. Dementsprechend erhöht sich der Anteil der Nachtstunden von etwa 10% während des Hochsommers auf 30 — 35% in den Übergangsmonaten und auf schätzungsweise 45 — 50% während des Winters. Die zweite Nachthälfte liegt während der Übergangsmonate mit ihren Werten deutlich über denen der ersten Nachthälfte, wohl als Folge der Tagesperiode des Windes. Makroklimatisch bedingt, fallen die Nachanteile im Sommer in Hohenpeißenberg geringfügig höher aus als in Wyk, während sie dort in den Herbst- und Wintermonaten mit dem unruhigen Wetter an der Küste um etwa 5% über denen von Hohenpeißenberg liegen.

4.2. Der Jahrgang des Verdunstungsanspruches

Das Ausgangsmaterial für die Ableitung des Jahrganges bilden die Monatssummen der potentiellen Verdunstung (Tab. 12). Um eine bessere Vergleichbarkeit

Tab. 12
Monatssummen der potentiellen Verdunstung (g)

a) Leistner-Kugel										
Jahr	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Hohenpeißenberg, 0.5 m										
1952	341	629	650	870	1179	(991)	405	310	270	186
1953	(805)	(840)	996	620	667	823	805	438	540	(496)
1954	558	(330)	824	613	626	616	543	628	450	217
1955	372	300	858	780	563	648	458	(369)	330	310
1956	(552)	(501)	798	437	622	577	575	373	210	124
1957	(859)	(550)	(522)	773	766	603	457	(460)	(270)	372
Wyk, 1.0 m										
1951	558	(816)	1197	1179	986	1043	703	741	(108)	186
1952	704	690	1054	902	1075	798	512	230	(96)	93
1953	496	870	992	1209	1238	934	648	290	286	123
1954	(288)	720	1330	1082	832	816	918	368	(369)	155
1955	558	540	987	1008	1347	1009	786	496	240	155
1956	620	990	1097	1098	1242	810	770	531	(159)	124
1957	496	801	958	1261	1102	888	548	403	390	124
b) Piche-Evaporimeter 2.0 m										
Hohenpeißenberg										
1954						119	106			
1955			156	140	97	126	86	(75)		
1956			(137)	84	163	117	141			
1957			(86)	140	160	121	98			
Wyk										
1954					(136)	164	186	102		
1955					254	198	161			
1956				205	268	184				

Kursiv: Monatssummen extrapoliert
() Einzelne Tagessummen extrapoliert

der vorliegenden Ergebnisse mit den an anderen Orten mit Piche-Evaporimetern abgeleiteten Verdunstungswerten zu ermöglichen, sind auch die mit diesem Gerät ermittelten Monatssummen beigefügt.

Die Zusammenfassung der mittleren Tagessummen jeden Monats über die gesamten Untersuchungszeiträume zu 6- bzw. 7jährigen Durchschnittswerten (Wyk: 1951 — 1957, Hohenpeißenberg: 1952 — 1957) läßt schon

einen für beide Standorte charakteristischen Jahrgang erwarten. Diese Mittelwerte umfassen den Zeitraum von März bis Dezember (Abb. 14). Soweit für die Übergangsmonate keine vollständigen Beobachtungen vorlagen, wurden diese nach den anfangs diskutierten, auf Monatswerten basierenden Beziehungen $(E - e) / v$ bzw. rel. F./Globalstrahlung extrapoliert. Die Abbildung enthält ferner die mittleren monatlichen Maxima

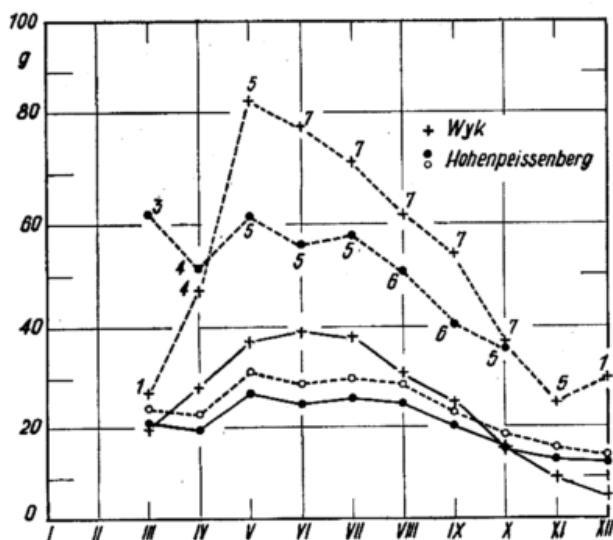


Abb. 14

Jahresgang der Wasserverdunstung von einer Leistner-Kugel nach Monatsmitteln.

Ausgezogen: Monatsmittel der Tagessummen.
 Gestrichelt: Mittlere monatliche Maxima der Tagessummen.
 Kreuz: Wyk, 1.0 m. 1951 bis 1957.
 Punkt: Hohenpeißenberg, 0.5 m. 1952 bis 1957.
 Kreis: Hohenpeißenberg, auf 1.0 m in freiem Gelände reduziert.

Zahlen: Anzahl der Fälle.

der potentiellen Verdunstung. Für beide Standorte ergeben sich im Verlauf beider Kurven charakteristische Unterschiede.

Die Monatsmittel der Tagessummen zeigen für Wyk einen ausgeglichenen Gang. Die Werte steigen während des Frühjahrs gleichmäßig zu dem wenig ausgeprägten Höhepunkt im Juni an. Der Hochsommer bringt an der Küste keine Steigerung mehr, im August setzt dort, mit stärkerer Bewölkung, schon der Abfall zum Herbst ein. In Hohenpeißenberg liegen, nachdem bereits der März analog den Sonnenscheinverhältnissen begünstigt ist, die Höchstwerte schon im Mai. Das Monsunwetter des Juni bewirkt wieder einen leichten Abfall. Dann lassen die spätsommerlichen Schönwetterlagen im Alpengebiet die Verdunstungswerte nochmals zu einem sekundären Maximum vom Juli bis August ansteigen. Im September läßt auch dort der Wasserverbrauch nach. Im Oktober liegen die Werte an beiden Orten schon sehr tief, etwa 20—30% unter denen des März. In den Wintermonaten ist die Verdunstung von einer wassergesättigten Oberfläche nur noch von geringer Bedeutung.

Die Kurven der mittleren Maxima zeigen gegenüber den Tagesmitteln beträchtliche Überhöhungen. In Wyk gipfeln sie schon im Mai in einer steilen Spitze, um dann bis zum November stetig abzufallen. Aus den Monaten März und Dezember liegt nur je ein maximaler Wert vor. Der verhältnismäßig hohe Wert im Dezember wurde am 1. XII. 1953 beobachtet. In Hohenpeißenberg verlaufen die Spitzen parallel zu den Tagesmitteln. Der Höchstwert des Mai wird im März sogar noch etwas überschritten, während das sekundäre Maximum des Juli die Höchstwerte der ersten Jahreshälfte nicht mehr erreicht. Wieder hebt sich der Dezember mit einem relativ hohen Wert vom 5. XII. 1953 hervor.

Die absoluten Maxima des gesamten Untersuchungszeitraumes (Tab. 13) zeigen für Wyk im Mai und Juli Spitzenwerte bis zu 100 g/Tag, für Hohenpeißenberg im Juli bis zu 85 g/Tag. Unter 50 g bleiben die absoluten Tages-Maxima in Wyk in der Zeit von November bis März, in Hohenpeißenberg von September bis November und im Januar und Februar. Bemerkenswert ist eine Tagessumme von 51 g im Dezember in Hohenpeißenberg.

Die Höchstwerte sind an wenige typische Wetterlagen gebunden, die durch absinkende Luftbewegung im Bereich von Hochdruckgebieten und bei Föhn, also Strahlungswetter mit trockener, überhitzter oder föhnig erwärmter Luft gekennzeichnet sind. Für den Standort Hohenpeißenberg sind diese Voraussetzungen gegeben bei präfrontalem Föhn, wenn auf der Vorderseite eines kräftigen Tiefdruckgebietes im NW ein Absaugen der Luftmassen über das Gebirge einsetzt. Hoher Druck über NE- oder E-Europa sind weitere Kennzeichen dieser Wetterlage. Auch ein nach Osten abziehendes Hochdruckgebiet, das eine östliche Luftströmung nach Süddeutschland bedingt und bei flacher Luftdruckverteilung noch einen Keil in das Gebiet der Ostalpen entsendet, bringt die gleichen Voraussetzungen mit sich, wobei das Sättigungsdefizit innerhalb der überwärmten und zur Ruhe gekommenen Luftmassen noch durch zeitweiligen Föhneinschlag verstärkt wird. Der Berg mit den Meßfeldern liegt dann zumeist über der Inversion, wobei die Strahlungsintensität besonders hoch ist.

In Wyk sind die Höchstwerte des Mai ausschließlich an Ostwindwetterlagen gekoppelt, bei denen ein kontinentales Hoch mit kräftigen Absinkbewegungen für das Gebiet der Nordfriesischen Inseln wetterbestimmend ist. Durch das vom Kontinent zum Meere gerichtete Luftdruckgefälle strömen trockene kontinentale Luftmassen über das Küstengebiet und die Inseln. Hierbei werden Windgeschwindigkeiten von 4 bis 6 Bf und Maximalwerte der Sonnenscheindauer von 14 bis 15 Stunden bei einer relativen Feuchtigkeit von 30 bis 40% erreicht. Innerhalb weniger Stunden stellen sich für die Agrikultur Dürreschäden ein. Die oberste Ackerkrume trocknet vollständig aus, und es ist wichtig, bei der Bodenbearbeitung wassersparende Bearbeitungsmaßnahmen anzuwenden. Bei diesen Wetterlagen würde sich eine Beregnung im Nordseeklima am vorteilhaftesten auswirken. Die mit der großen Lufttrockenheit einhergehende starke Luftbewegung weist zugleich auf die Bedeutung des Windschutzes hin. Auch im Juni stellen sich die Höchstwerte der Verdunstung meistens bei diesen kontinentalen Wetterlagen ein. Jedoch sinkt die relative Feuchtigkeit nicht mehr so tief ab und die Sonnenscheindauer bleibt etwas geringer, so daß Rekordwerte nicht mehr erreicht werden. Im Juli kommen maximale Verdunstungswerte auch bei West- und Nordwestlagen vor. Im August bleiben reine Ostlagen aus. Die höchsten Verdunstungswerte werden vereinzelt bei Südostlagen, sonst bei Süd- bis Westlagen erreicht. Die relative Feuchtigkeit liegt dann meist bei 50 bis 70%, die Sonnenscheindauer bei stark wechselnder, tiefer Schichtbewölkung, die in den feuchten Meeresluftmassen mitwandert, zwischen 6 und 12 Stunden. Ausschlaggebend für den großen Wasserentzug sind dann die hohen Windgeschwindigkeiten, die 5 bis 8 Bf erreichen. Auch im September sind es ähnliche Wetterlagen mit Weststurm, die die Wasserabgabe der Kugel extrem steigern können. Im Oktober treten dann wieder Ostwindwetterlagen mehr in den Vordergrund. Bei den für die Jahreszeit verhältnismäßig niedrigen Feuchtigkeiten von 50 bis 60% und Windstärken, die gewöhnlich nur bei 3 bis 6 Bf liegen, kommt es zu den Maximalwerten der Verdunstung. Bei Westwetterlagen erhöht sich die Wasserabgabe durch die Stärke des Sturmes. Im November hat die Verdunstung nicht mehr die große praktische Bedeutung. Das Witterungsgeschehen in diesem Monat kann sehr mannigfaltig sein und die Höchstwerte können bei jeder Wetterlage auftreten.

An diesen Beispielen zeigt sich, wie extreme Wasserabgaben eines feuchten Körpers den Verdunstungsanspruch bestimmter Wetterlagen charakterisieren, und daß mit dem Anhalten des Witterungscharakters ungünstige Wirkungen auf Boden und Pflanze zu erwarten sind. Die Verdunstungsmessungen geben die Möglichkeit, jahreszeitlich gebundene Dürrewetterlagen in ihrer

Wirksamkeit richtig einzuschätzen, um dann die landwirtschaftlichen Gegenmaßnahmen rechtzeitig einleiten zu können.

4.3. Häufigkeitsverteilung von Stufenwerten der Tagesverdunstung

Die Streuung der einzelnen Tageswerte um den Mittelwert des Monats ist sehr erheblich. Eine nach Stufen-

werten von 10 zu 10 g/100 cm² ermittelte Häufigkeitsverteilung der Tagessummen (Tab. 13) erläutert die klimatischen Eigentümlichkeiten der beiden Standorte. Auf dem Hohenpeißenberg rücken die Häufigkeitsmaxima vom Mai bis Juli und im Oktober — in Abweichung vom Mittelwert — in die unterste Stufe von 0 — 9,9 g, in die auch in den übrigen Monaten 1/4 bis 1/3 und im Oktober sogar mehr als die Hälfte aller

Tab. 13
Prozentuale Häufigkeitsverteilung von Stufenwerten der Tagesverdunstung einer Leistner-Kugel.

Wasserabgabe in g	0-9.9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99	100-110	Mittel	Mittl. Max.	Abs. Max.
a) Hohenpeißenberg, 0.5 m (1952 — 1957)														
März												(18.8)	(60.3)	75.3
April	25	28	7	20	12	7	1					(17.5)	(49.6)	62.2
Mai	25	17	16	19	12	6	3	2				25.0	59.9	77.7
Juni	28	27	15	19	5	5	1					22.8	53.9	62.0
Juli	29	26	22	11	6	4		1	1			23.8	56.3	85.2
Aug.	21	27	26	15	7	3	1					22.9	48.9	67.9
Sept.	28	30	25	12	5							18.0	38.7	46.8
Okt.	(52)	(25)	(16)	(6)	(1)							(13.9)	(34.8)	45.0
Nov.														35.7
Dez.														51.1
b) Wyk, 1.0 m (1951 — 1957)														
März	(67)	(20)	(13)									(17.8)	25.0	
April	19	18	31	23	8	1						23.5	45.0	54.0
Mai	3	17	19	27	15	4	6	5	3		1	34.5	81.8	100.5
Juni	4	11	20	25	17	11	5	4	2	1		36.9	76.9	91.5
Juli	4	14	20	21	22	11	5	1	1		1	36.1	70.3	101.0
Aug.	8	16	31	25	14	4	2	0				28.9	60.2	70.0
Sept.	15	28	29	14	9	3	1	1				23.2	51.9	72.0
Okt.	39	34	19	4	3	1						13.8	34.8	56.0
Nov.	67	25	6	2								(6.1)	23.2	35.0
Dez.	(90)	(7)	(3)									(5.1)	28.0	28.0

Tagessummen fallen. Dieser Stufenwert tritt so häufig auf, weil an Tagen mit niedriger Bewölkung der Berg schon in die Wolken taucht und dann die Verdunstung kaum noch in Erscheinung tritt. In Wyk rückt dagegen das Häufigkeitsmaximum mit zunehmender jahreszeitlicher Verdunstung in höhere Stufen und liegt im Juli mit 22% bei 40 — 49 g, um dann bis zum Oktober wieder in die niedrigste Stufe zu sinken. Im Nordseeklima streuen die Werte gleichmäßiger um den Mittelwert, die häufigste Stufe schließt meistens den Mittelwert ein.

Auf dem Hohenpeißenberg treten Werte vom Doppelten des Mittelwertes noch relativ häufig auf und die stärkste Tagesverdunstung erreicht fast in jedem Monat etwa das Dreifache der mittleren Tagessummen. Die Höchstwerte erreichen vom März bis August wenigstens 60 g, überschreiten im März und Mai 75 g und bringen im Juli einen Höchstwert von 85 g. Nur im Spätherbst werden im Untersuchungszeitraum 50 g nicht erreicht. In Wyk wird das Doppelte des Mittelwertes nicht so häufig überschritten. Mittel- und Maximalwerte liegen hier höher und der Abfall zu den höheren Stufenwerten erfolgt langsamer. Im Mai und Juli ist es in den 7 Jahren je einmal vorgekommen, daß ein Stufenwert sogar übersprungen wurde und dann ein Rekordwert einmal erscheint. Gerade diese extrem hohen Tageswerte, die im Mai 100.5, im Juni 91.5, im Juli 101.0, im August 70.0 und im September 72.0 g betragen, sind aber von besonderem Interesse für alle Verdunstungsfragen.

4.4. Quantitativer Vergleich zwischen Wyk und Hohenpeißenberg

Ein unmittelbarer Vergleich der absoluten Verdunstungsbeträge zwischen Wyk und Hohenpeißenberg nach den vorliegenden Registrierungen ist noch nicht möglich, weil die Kugel an beiden Orten in verschiedener Höhe (1.0 und 0.5 m) exponiert wurde. Heigel (17) hat nun nach Messungen mit dem Piche-Evaporimeter in verschiedenen Höhen und an verschiedenen Standorten auf dem Hohenpeißenberg Umrechnungsfaktoren abgeleitet. Danach ergibt sich für den etwas geschützten und zeitweilig beschatteten Standort des Hauptfeldes zur Umrechnung von 0.5 auf 1.0 Höhe ein Faktor von 1.14. Bessere Vergleichswerte mit Wyk sind aber von den Parallelmessungen auf einer freien Wiese etwas unterhalb des Gipfels („Pröbstl-Wiese“) zu erwarten, nach denen sich ein Umrechnungsfaktor von 1.245 ableitet. Die Piche-Scheibe unterliegt aber, wie schon früher dargelegt wurde, der Windwirkung stärker als die Kugel. Vergleichsmessungen mit der Leistner-Kugel in Wyk ergaben demgegenüber für die Höhen 0.13 m : 1.0 m : 2.0 m ein Verhältnis von 0.95 : 1.00 : 1.12, in Hohenpeißenberg für die Höhen 0.5 m : 2.0 m von 1.22. Die höheren Verhältniszahlen der Hohenpeißenberger Vergleiche dürften auf den hier aus Wiesengelände mit wechselnder Grashöhe bestehenden Untergrund zurückzuführen sein, der in 0.5 m die Ventilation stärker dämpft als das Dünengelände von Wyk. Experimentell

abgeleitete Umrechnungsfaktoren für verschiedene Höhen können also nicht ohne weiteres von einem zum anderen Ort übertragen werden und setzen am selben Ort gleiches Gerät voraus.

Auch die Art der Messung bzw. der Auswertung beeinflusst die Ermittlung des Umrechnungsfaktors. Aus der Registrierkurve werden alle ansteigenden Abschnitte gezählt, auch wenn diese nach Niederschlägen zunächst einen durch aufgefangenes Regenwasser bedingten Gewichtszuwachs des Systems (in der Kurve als Abfall kenntlich) erst ausgleichen. Beim Ablesegerät wird aber nur die Gesamtdifferenz zwischen zwei Meßterminen ermittelt. Es muß an Tagen mit Niederschlag weniger anzeigt, als nach dem Registriergerät ermittelt wurde und der Faktor wird kleiner. An niederschlagsfreien Tagen verläuft jedoch die Kurve stetig nach oben und auch das Ablesegerät bleibt von Regenwasser unbeeinflusst. So betrug an niederschlagsfreien Tagen der Faktor 0.5 m : 2.0 m 1.46 und überstieg an einzelnen Tagen sogar 2.0.

Für den quantitativen Vergleich der Wasserabgabe einer Leistner-Kugel in 1.0 m Höhe zwischen Wyk und Hohenpeißenberg wird nach den hier durchgeführten Vergleichen für die Überprüfung der Hohenpeißenberger Werte von 0.5 auf 1.0 m Höhe der Faktor 1.07 und zur Übertragung auf eine wind- und strahlungsfreie Aufstellung die Multiplikation dieses Faktors mit 1.09 auf 1.17 als angemessen angesehen. Die mit diesem Faktor erhöhten Monatsmittel (Abb. 14) kommen nun denen von Wyk schon näher. Mit den aus langjährigen Reihen abgeleiteten Jahressgängen der Sonnenscheindauer stimmt es überein, daß die Werte vom März und im Herbst in Hohenpeißenberg höher liegen als die von Wyk. Die niedrigeren Werte von Hohenpeißenberg im Juni und Juli dürften auch mit den besonderen Witterungsverhältnissen der Untersuchungsjahre im Zusammenhang stehen.

4.5. Vergleich mit dem Jahressgang anderer Elemente

Den Ganglinien der Verdunstung für Wyk und Hohenpeißenberg sind in Abb. 15 noch die der anderen, den Wasserverbrauch beeinflussenden Elemente beigegeben. Von den Meßgrößen zur Kennzeichnung des Feuchteanteils zeigt die relative Feuchtigkeit die größte Ähnlichkeit auch in der Wertigkeit der beiden Gipfel im Mai und im Hochsommer, während die Übergangszeit, insbesondere das Frühjahr, sich besser in der Ganglinie des Sättigungsdefizits widerspiegelt. Deutlich treten die beiden Maxima von Hohenpeißenberg auch in den Monatsmitteln der Sonnenscheindauer hervor. Die Globalstrahlung läßt diesen sommerlichen Gang nicht erkennen, die Werte steigen vom April bis Juli stetig an. Ebenso wenig läßt sich aus den Mittelwerten der Windgeschwindigkeit ein gleichsinniger Verlauf ablesen. Den Mittelwerten aus den Jahren 1952 — 57 sind noch langjährige Durchschnittswerte für das Sättigungsdefizit (1881 — 1930, berechnet aus Monatsmittel der Temperatur und des Dampfdruckes für den gleichen Zeitraum) und der Sonnenscheindauer (1937 — 1956) gegenübergestellt, um die besondere Witterungscharakteristik der Untersuchungsjahre gegenüber dem Durchschnitt eines längeren Zeitraumes herauszustellen. Die Versetzung der Ganglinien beim Sättigungsdefizit erklärt sich aus der Berechnungsweise: Bei Berechnung aus Monatsmitteln zeigt das Sättigungsdefizit gegenüber den aus Einzelwerten ermittelten Werten immer eine Differenz um 0.5 bis 1.0 m. Die langjährigen Mittel belegen für den Zeitabschnitt (1951 bzw. 1952 — 1957) eine zu geringe Sonnenscheindauer von Juni bis September (Hohenpeißenberg) bzw. von Mai bis August (Wyk) und die Begünstigung der Monate März und Oktober bis Dezember (Hohenpeißenberg) bzw. April (Wyk). Die Vergleiche sprechen dafür, überschlägige Verdunstungs-

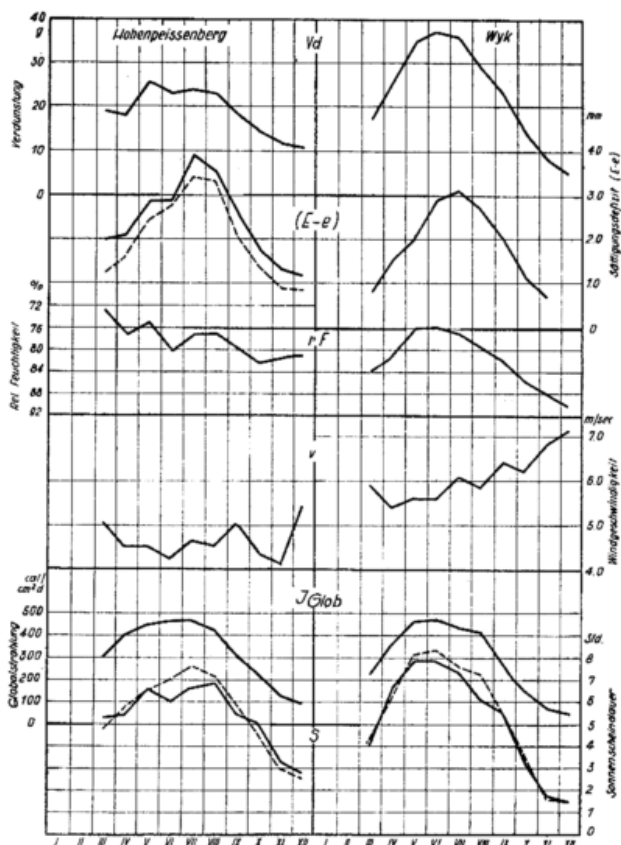


Abb. 15
Vergleich von Monatsmitteln der Verdunstung mit den die Wasserabgabe bestimmenden Faktoren.
Wyk: 1951 bis 1957. Hohenpeißenberg: 1952 bis 1957
Gestrichelt: Langjährige Mittelwerte.
(E — e): 1891 bis 1930.
Sonnenschein: 1937 bis 1956.

werte nach Mittelwerten der relativen Feuchtigkeit abzuleiten und diese mit Werten der Sonnenscheindauer als Maß für die direkte Sonnenstrahlung zu modifizieren. Sättigungsdefizit und Globalstrahlung vermögen, wenigstens für Hohenpeißenberg, nicht die gleiche Übereinstimmung zu bieten, besonders wenn man den Spitzen dieser Elemente im Juli den Maigipfel der Verdunstung gegenüberstellt. Die Wyker Kurven zeigen dies nicht so deutlich, jedoch bleibt auch hier die Übereinstimmung mit dem Gang der relativen Feuchtigkeit gegenüber dem des Sättigungsdefizits überlegen.

Literatur

- (1) Uhlig, S.: Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten. Mitt. Dt. Wetterd. 1, Nr. 6 (1954)
- (2) Baumbach, S.: Vergleichsmessungen mit verschiedenen Verdunstungsmessern unter definierten Versuchsbedingungen. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone 5, Nr. 35, 211—216 (1952)
- (3) Haude, W.: Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation und Evapotranspiration. Mitt. Dt. Wetterd. 1, Nr. 8 (1954)
- (4) Baier, W.: Neue Ergebnisse von vergleichenden Verdunstungsmessungen im Freiland. Ass. Internat. Hydrol. Publ. Nr. 38 (Ass. gén. Rome. T III), 205 bis 220 (1956)
- (5) Leistner, W.: Beziehungen zwischen Raumklima und Außenklima. Ann. Meteor. 2, 53—56 (1949)
- (6) Uhlig, S.: Bestimmung des Verdunstungsanspruchs der Luft mit Hilfe von Piche-Evaporimetern. Mitt. Dt. Wetterd. 2, Nr. 13 (1955)

- (7) Dammann, W.: Vor einer Neuordnung des Beobachtungs- und Arbeitssystems der praktischen Klimatologie? Arch. Meteor. Geophys. Biokl. B 7, 1—10 (1955)
- (8) Leistner, W.: Ergebnisse vergleichender Verdunstungsbeobachtungen. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone 5, Nr. 35, 202—210 (1952)
- (9) Robertson, G. W.: The standardization of the measurement of evaporation as a climatic factor. WMO No. 42, T. P. 16 Techn. Note No. 11. Genf 1955
- (10) Vilkner, H.: Ein Gelände - Verdunstungsmesser. Z. Meteor. 8, 247—251 (1954)
- (11) Walter, H.: Einführung in die Phytologie 3, 1. Teil. Standortslehre. Ludwigburg 1949/50
- (12) Leistner, W.: Die physikalische Analyse des Ventilationsfaktors. Diss. Berlin 1934
- (13) Robitzsch, M.: Der Wasserdampfgehalt. In: Hann-Süring, Lehrbuch der Meteorologie. 5. Aufl. (1938), 5. Teil, 1. Kap., S. 320—323: Der Verdunstungs- und Kondensationsvorgang.
- (14) Hofmann, G.: Verdunstung und Tau als Glieder des Wärmehaushalts. Planta 47, 302—322 (1956)
- (15) Frankenberger, E.: Über Strahlung und Verdunstung. Ann. Meteor. 7, 47—52 (1955)
- (16) Collmann, W.: Idealwerte der Globalstrahlung. Ann. Meteor. 6, 117—122 (1953/54)
- (17) Heigel, K.: Ergebnisse von Verdunstungsmessungen mit Piche-Evaporimetern, ihre Abhängigkeit von einigen meteorologischen Faktoren und von verschiedenen Standorten. Meteor. Rdsch. 10, 101 bis 107 (1957)
- (18) Leistner, W.: Vergleichsbeobachtungen zwischen verschiedenen Porzellan-Verdunstungskugeln nach Vilkner und einer Fließpapierkugel nach Leistner. Techn. Mitt. Instrumentenwesen Dt. Wetterd. N F, Nr. 4, 78—83 (1958)
- (19) Vinck, F.: Die Verwertbarkeit von Piche-Evaporimetern für die Bestimmung der Gebietsverdunstung. Dt. Gewässerkd. Mitt. 1, 73—76 (1957)
- (20) Albrecht, F.: Wolkenuntersuchungen und Raureifbeobachtungen auf dem Sonnblick im Sommer 1926. 35. Jber. Sonnenblickverein 1926, 25—28 (1928)
- Theoretische Untersuchungen über die Ablagerungen von Staub aus strömender Luft und ihre Anwendung auf die Theorie der Staubfilter. Phys. Z. 32, 48—56 (1931)
- (21) Boss, G.: Die Brauchbarkeit des Piche-Evaporimeters bei Verdunstungsmessungen. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone 5, Nr. 35, 194—202 (1952)
- (22) Klausning, O.: Erfahrungen mit einem neuen Piche-Atmographen. Meteor. Rdsch. 10, 158—162 (1957)