

Mitteilungen
des
Deutschen Wetterdienstes

Nr. 15
(Band 3)

DK 551.573

**Berechnung monatlicher Mittelwerte der Gebiets-
verdunstung nach einer Methode von Kalweit**

von

Siegfried Uhlig

(mit 7 Abbildungen und 15 Tabellen im Text)

Bad Kissingen 1956

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	3
1. Einleitung	3
2. Verdunstungsgrößen	3
2. 1. Latente Verdunstung	3
2. 2. Potentielle Verdunstung	4
2. 3. Aktuelle Verdunstung	4
3. Kalweits Gleichungen zur Berechnung monatlicher Mittelwerte der aktuellen Gebietsverdunstung	5
4. Kritische Betrachtung der Gleichungen Kalweits und deren Anwendung	6
4. 1. Vorbemerkungen	6
4. 2. Sättigungsdefizit	7
4. 3. Anwendung der Gleichungen auf Klimagebiete anstelle von Einzugsgebieten	9
4. 4. Niederschlag	9
4. 5. Abfluß und Unterschiedsgröße	9
4. 6. Monatsmittel des nutzbaren Bodenwasservorrates	13
4. 7. Anwendung der Variablen x und y	16
4. 8. Abzugsglied z	17
4. 9. Geltungsbereich für V_w und V_s	19
4. 10. Berechnung des Sättigungsdampfdrucks	21
4. 11. Berechnung des Abzugsgliedes	22
5. Ergebnisse der Berechnung monatlicher Mittelwerte der Gebietsverdunstung mit Hilfe von Kalweits Gleichungen	23
5. 1. Potentielle Verdunstung	23
5. 2. Aktuelle Verdunstung	23
5. 3. Diskussion der Ergebnisse	25
6. Möglichkeiten einer Verbesserung der Methoden zur Berechnung monatlicher Mittelwerte der Gebietsverdunstung	28
Literatur	29

Anschrift des Verfassers:

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

Zusammenfassung

Die Gleichungen Kalweits zur Berechnung monatlicher Mittelwerte der Gebietsverdunstung werden — nach einer kritischen Betrachtung ihrer einzelnen Faktoren — auf norddeutsche Klimagebiete angewandt. Die Bodenfeuchte-Messungen des Deutschen Wetterdienstes gestatten es dabei, die zur Anwendung der Kalweit'schen Gleichungen notwendigen Schätzungen des Bodenwassergehalts in den einzelnen Monaten durch verbürgte Zahlenwerte zu ersetzen. Die Ergebnisse der Verdunstungsberechnungen können nicht befriedigen. Vor allem hängt das „Abzugsglied“, mit dessen Hilfe man die potentielle Verdunstung auf Werte für die aktuelle Verdunstung reduziert, in überragendem Maße nur von einem Element ab, nämlich vom mittleren Jahresniederschlag, so daß man eine Berechtigung für die Berücksichtigung so schwer zu bestimmender Größen wie des Abflusses und des Bodenwasservorrates in dem Formelausdruck für das Abzugsglied nicht sehen kann.

Die von Kalweit angedeutete Zweiteilung der Verdunstungsberechnung sollte man bei weiteren Untersuchungen beibehalten. Danach wäre zunächst die potentielle Verdunstung zu berechnen, die in der Hauptsache von meteorologischen Faktoren abhängt. Die Eignung der Methode Penman's hierfür ist eingehend zu prüfen, vor allem mit Hilfe von Evapotranspirometer-Messungen. Die Werte der potentiellen Verdunstung sind dann durch Anbringen von Abzugsgliedern auf Werte der aktuellen Verdunstung zu reduzieren.

Ein Wort des Dankes gebührt Herrn E. Stiaßny für die umfangreichen Rechenarbeiten dieser Untersuchung.

1. Einleitung

Das Wasser steigt in seiner Bedeutung als Wirtschaftsfaktor von Jahr zu Jahr. Dabei stellt vor allem die Landwirtschaft ständig höhere Forderungen an den Wasservorrat. Insbesondere ist mit der Ausdehnung der künstlichen Bewässerung und Beregnung eine ständige Steigerung der Verdunstung und eine Verminderung des Abflusses verbunden. Um ihren Eigenbedarf zu sichern und einer Schädigung der industriellen und gemeindlichen Wassernutzer vorzubeugen, wird die Landwirtschaft künftig noch größere Anforderungen an die Speicherung des Wassers in Überschußperioden stellen. Angesichts dieser Forderungen muß die Wasserwirtschaft in ihren Bau- und Betriebsmaßnahmen von den seitherigen, meist örtlichen Regelungen zu einem übergebietlichen Wasserausgleich übergehen. Sie bedarf dabei einer Kenntnis des Gesamtverhaltens des natürlichen Wasserhaushaltes.

Der Ausgabeposten des Wasserhaushaltes, dessen Bestimmung die meisten Schwierigkeiten bereitet, ist die Verdunstung. Auch der Deutsche Wetterdienst bemüht sich seit Jahren darum, diesen Posten genauer zu erfassen, und hat mit der Untersuchung, über die nachstehend berichtet wird, einen weiteren Beitrag zu diesem Thema leisten wollen. Diese Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, durch die Bezahlung einer Rechenkraft für die Dauer von 6 Monaten unterstützt. Hierfür gebührt dem Bundesministerium der Dank des Deutschen Wetterdienstes.

2. Verdunstungsgrößen

2. 1. Latente Verdunstung

Der Begriff der latenten Verdunstung wurde von Robertson (1) geprägt, der diese Größe definiert als die maximal mögliche Evaporation einer nassen, ebenen, horizontalen, schwarzen Oberfläche, die den meteorologischen Bedingungen (Sonnen-

und Himmelsstrahlung, Wind, Lufttemperatur und Dampfdruck) eines Standortes frei ausgesetzt ist. Diese Definition der latenten Evaporation (oder — wie man bisher sagte — des Verdunstungsanspruches) ist jedoch nicht vollständig, denn es müssen auch die Abmessungen der verdunstenden Oberfläche und des Wasserreservoirs festgelegt werden, da diese für die Auswirkung der meteorologischen Elemente auf die Wasserabgabe des Meßgerätes mitbestimmend sind. An anderer Stelle wurde der Verdunstungsanspruch als die pro Zeiteinheit von einem Piche-Evaporimeter mit festgelegten Abmessungen und mit einheitlich freier Aufhängung in 2 m Höhe abgegebene Wassermenge definiert (2). Messungen mit diesen Piche-Evaporimetern in einem Sondermeßnetz des Deutschen Wetterdienstes haben gezeigt, daß der Wind und die Strahlung die Wasserabgabe einer verdunstenden Fläche in starkem Maße beeinflussen und daß somit der Verdunstungsanspruch der Luft von einem Meßkörper, der frei exponiert ist, am getreuesten wiedergegeben wird.

Nach Vorliegen hinreichenden Beobachtungsmaterials wird es möglich sein, Formeln aufzustellen, die eine Berechnung des Verdunstungsanspruches aus klimatologischen Daten ermöglichen. Versuche, eine solche Formel zu entwickeln, wurden bereits im Deutschen Wetterdienst angestellt (2). Kommen wir so zur Bestimmung dieses Verdunstungsanspruches bzw. der latenten Verdunstung, so besitzen wir eine Bezugsgröße für die potentielle und die aktuelle Verdunstung.

2. 2. Potentielle Verdunstung

Eine potentielle Verdunstung vom bewachsenen Erdboden aus soll dann stattfinden, wenn dieser genügend Wasser enthält, das entsprechend dem Verdunstungsanspruch der Luft vom Boden und den Pflanzen verdunstet werden kann. Es wurde schon an anderer Stelle (3) darauf hingewiesen, daß es durchaus nicht klar ist, wann „genügend Wasser“ im Boden vorhanden ist. Man ist also hier auf Annahmen angewiesen, wenn man die Zeiten festlegen will, zu denen eine potentielle Verdunstung stattfindet. Es besteht aber große Aussicht darauf, daß wir die potentielle Verdunstung als Näherungswert für den Höchstbetrag der Gebietsverdunstung bei gut durchfeuchtetem Boden in unserem Klimagebiet bald mit hinreichender Genauigkeit bestimmen können. Die Aktivität hierzu geht von verschiedenen Seiten aus.

Die bekanntesten Methoden sind die von Penman und Thornthwaite, die schon an anderer Stelle beschrieben wurden. (4). Während Penman in seiner Gleichung alle meteorologischen Elemente berücksichtigt, die einen Einfluß auf die Verdunstung haben, benutzt Thornthwaite allein die Temperatur zur Berechnung der potentiellen Verdunstung und bringt Korrekturen für die variierende Tageslänge in verschiedenen geographischen Breiten an. Ähnlich einfache Methoden wurden in Deutschland bereits angewandt, z. B. von Haude (5), der das Sättigungsdefizit von 14 Uhr mit bestimmten variablen Faktoren multiplizierte, um die gesuchte Größe zu erlangen. Zwischen der latenten und der potentiellen Verdunstung besteht ein enger Zusammenhang.

2. 3. Aktuelle Verdunstung

Unter der aktuellen Verdunstung verstehen wir die tatsächliche Wasserabgabe eines Bodens bei jedem beliebigen Feuchtegrad dieses Bodens. Ist der Boden wassergesättigt, so ist die aktuelle Verdunstung gleich der potentiellen. Beide Größen weichen aber um so stärker voneinander ab, je trockener der Boden wird. Es ist daher einleuchtend, daß man die Berechnung der aktuellen Verdunstung nicht mehr — wie im Falle der potentiellen Verdunstung — nur auf Grund klimatologischer Daten durchführen kann, sondern daß sie eine Berücksichtigung der Bodenwasserhältnisse unbedingt erfordert.

Albrecht hat versucht, dieser Tatsache mit einer Kalkulationsmethode Rechnung zu tragen, die sich lediglich auf Messungen des Niederschlages und des Sättigungsdefizits sowie auf Annahmen über den Bodenwassergehalt stützt (4). Dabei wird das Verhältnis der aktuellen Verdunstung zu dem vom Boden aufgenommenen Wasser mit der latenten Verdunstung und der Aufnahmefähigkeit des Bodens für flüssi-

ges Wasser in Zusammenhang gebracht. Ein Ausbau dieser Methode durch Berücksichtigung der Bodenfeuchtemessungen und des Abflusses wurde in Bad Kissingen versucht (4). In jüngster Zeit hat sich Kalweit (6) darum bemüht, Gleichungen für die Berechnung monatlicher Werte der Gebietsverdunstung zu entwickeln. Mit Hilfe dieser Gleichungen kam Kalweit zu plausiblen Ergebnissen für die mitteldeutschen Landschaften. Er wies aber ausdrücklich darauf hin, daß seine Gleichungen auch außerhalb Mitteldeutschlands gelten sollen. Aus diesem Grunde wurden die Kalweit'schen Gleichungen einer kritischen Betrachtung unterzogen und versuchsweise auf Gebiete der Bundesrepublik angewandt. Die Ergebnisse dieser vom Deutschen Wetterdienst, Zentralstelle, Abteilung Agrarmeteorologie, durchgeführten Untersuchungen werden nachstehend veröffentlicht.

3. Kalweits Gleichungen zur Berechnung monatlicher Mittelwerte der aktuellen Gebietsverdunstung

Die Gleichungen Kalweits zur Berechnung monatlicher Mittelwerte der Gebietsverdunstung im Winter V_w (Okt. — März) und Sommer V_s (April — Sept.) auf Grund meteorologischer und hydrologischer Beobachtungen haben folgende Form (6):

$$V_w = (-1,3 + 5 S) x$$

$$V_s = 57 + 14 S + (2,4 + 0,01 z_0^2) y$$

$$z = \frac{1000 S}{U + W_n} \text{ („Abzugsglied“)}$$

Die einzelnen Glieder der Gleichungen haben folgende Bedeutung:

- V: Monatssumme der Verdunstung (mm), umfaßt alle Verlustgrößen, welche summiert die Gebietsverdunstung ergeben, einschließlich des genutzten Wassers und derjenigen unterirdischen Abflüsse, die der Beobachtung und Messung und damit der Zurechnung zum Abfluß entgangen sind.
- S: Monatsmittel des Sättigungsdefizits (mm Hg) = $E - e$
 E = Monatsmittel des Sättigungsdampfdrucks, abgeleitet vom Monatsmittel der Temperatur T (mit Hilfe der Psychrometertafel)
 e = Monatsmittel des Dampfdrucks
 T und e können zur Berechnung des langjährigen Mittels der Gebietsverdunstung der „Klimakunde“ (7) entnommen werden, und zwar den Tabellen 1 und 30.
- U: Unterschiedsgröße = $N - A$
- N: Monatssummen des Niederschlags (mm), gemessen in 1 m Höhe mit dem Hellmann'schen Regenmesser. Die Differenz zwischen den Niederschlagsmengen in 1 m Höhe und am Boden sowie die „indirekten“ Niederschläge (Nebel, Tau, Reif) werden nicht berücksichtigt. Die mittleren Monatssummen des Niederschlags findet man in Tabelle 40 der „Klimakunde“ (7).
- A: Monatssummen des Abflusses (mm), oberflächlich und unterirdisch.
Mittlere Monatssummen des Abflusses findet man verstreut in der hydrologischen Literatur, vor allem aber in den „Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern“ der verschiedenen Flußgebiete.
- W_n : Monatsmittel des nutzbaren Bodenwasservorrats (mm), der etwa gleich dem Gesamtwasservorrat in der pflanzendurchwurzelten Bodenschicht, abzüglich der zweifachen Hygroskopizität (nach Mitscherlich) sein soll. Kalweit nimmt an, daß man W_0 (nutzbarer Bodenwasservorrat bei Wassersättigung) aus der Wasserkapazität einer Bodensäule von im Mittel 1,5 m Tiefe ableiten kann. W_0 soll dann jeweils am 1. April im Boden vorhanden sein und der nutzbare Bodenwasservorrat im Monat m soll zu errechnen sein nach der Gleichung

$$W_{nm} = W_{nm-1} + \frac{B_{m-1} + B_m}{2},$$

worin B die monatliche Bodenspeicherung bedeutet. Im April soll sein:

$$W_{nIV} = W_0 + \frac{B_{IV}}{2}$$

Im nord- und mitteldeutschen Raum schätzt Kalweit eine Größe W_0 von 200 mm auf Böden ohne hochstehendes Grundwasser. Beim Vorhandensein von Grundwasser im Wurzelraum der Pflanzen sind je nach den örtlichen Verhältnissen Zuschläge entsprechend der von der Verdunstung beanspruchten Grundwassermenge zu machen. Kalweit betont ausdrücklich, daß diese grobe Betrachtung der zu schätzenden Größe W_0 alle örtlichen Besonderheiten umgeht; sie soll lediglich dazu dienen, eine in der Größenordnung zutreffende Angabe über den zur Verdunstung am Beginn des Sommers verfügbaren Bodenwassergehalt zu gewinnen.

x, y : Variable, die von der Topographie abhängen

x und y können als Funktionen des mittleren Jahresniederschlages \bar{N} (mm) aufgefaßt werden, die folgenden Gleichungen gehorchen:

$$y = -57 + 0,1 \bar{N} - 4 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{N}^2$$

$$x = -20 + 0,06 \bar{N} - 3,4 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{N}^2$$

\bar{N} ist einem Kartenwerk von Schirmer (8) zu entnehmen.

x und y können aber nach Kalweits Angaben auch als Parameter aufgefaßt werden, die mit den topographischen Verhältnissen wechseln:

$x = \varepsilon = 7,$	$y = \xi = -1$	für Gebirge
5,	-10	für mittleres Hügelland
3,	-15	für Flachland

z_0^2 : Quadrate der auf ihren Schwerpunkt bezogenen Werte des Abzugsgliedes

Wie die Berechnung der z_0^2 -Werte zu verstehen ist, zeigt Tafel 77 des Buches von Kalweit (6). Es werden bei der Berechnung der Monatswerte von z_0 für einzelne Jahre zunächst die z -Werte für jeden einzelnen Monat ermittelt. Danach bildet man über alle Jahre und die Monate April bis September einen mittleren Monatswert von z ($= z_m$). Dann werden für die Einzelmonate die Abweichungen der z -Werte von dem mittleren Monatswert z_m berechnet und quadriert. Das ergibt dann die Werte z_0^2 .

Zur Bestimmung der langjährigen Mittelwerte von z_0 für ein Klimagebiet genügt es — nach einer brieflichen Mitteilung von Kalweit —, die mittleren z -Werte der sechs Sommermonate zu ermitteln und ihre Abweichungen vom gemeinsamen Mittelwert (IV—IX) zu berechnen. Auf diese Weise soll man Näherungswerte für z_0 erhalten, die „in Anbetracht der mit diesem Untersuchungsverfahren erzielbaren Genauigkeit genügen dürften“.

4. Kritische Betrachtung der Gleichungen Kalweits und deren Anwendung

4. 1. Vorbemerkungen

Die Gleichungen Kalweits zur Berechnung der monatlichen Mittelwerte der aktuellen Gebietsverdunstung wurden von uns einer kritischen Betrachtung unterzogen, aus der sich bestimmte Änderungswünsche ergaben. Soweit derartige Veränderungen eine Verbesserung der Anwendbarkeit der Kalweit'schen Gleichungen versprachen, ohne daß sich die Größenordnung der einzelnen Faktoren dadurch veränderte, führten wir sie in diesem Abschnitt durch. Die Verdunstungsgrößen, die bei diesem weitgehenden Festhalten an der Methode Kalweits berechnet wurden, sind in Abschnitt 5, Tabellen 14 und 15, zusammengefaßt.

Die Abschnitte 4. 9. bis 4. 11. enthalten kritische Betrachtungen, deren Berücksichtigung aber einen größeren Eingriff in die Methode Kalweits darstellen würde. Eine Berechnung der monatlichen Mittelwerte der aktuellen Gebietsverdunstung mit einer so stark veränderten Form der Kalweit'schen Gleichungen wäre aber nicht möglich. Es müßten dann ganz neue Gleichungen aufgestellt werden, in denen vor allem andere Konstanten zu wählen wären. Auf Grund der Bemerkungen unter 4. 9. bis 4. 11. wurden daher keine Veränderungen der Kalweit'schen Methode durchgeführt.

Als Untersuchungsgebiet wurde das nordwestdeutsche Flachland ausgewählt. In der Übersichtskarte der Abb. 1 sind die meteorologischen Stationen, deren Werte bei

der Untersuchung verwendet wurden; durch Kreise markiert, die beigefügten Zahlen erlauben ein Aufsuchen des Ortsnamens in Tabelle 1. Die Pegelstationen, an denen die Abflüsse gemessen wurden, sind in der gleichen Karte durch Dreiecke dargestellt, die Namen der Stationen ermittelt man durch Aufsuchen der den Dreiecken beigefügten Zahlen in Tabelle 2.

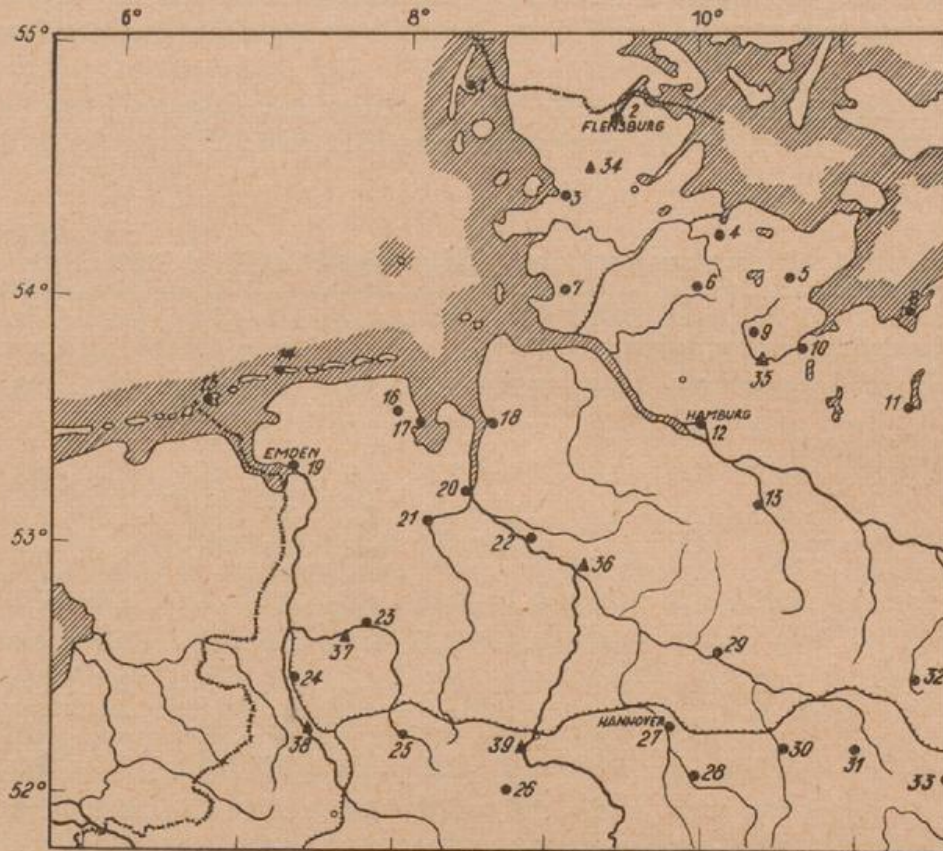


Abb. 1
 Stationskarte des Untersuchungsgebietes
 ● Klimastation
 ▲ Pegelstation

4. 2. Sättigungsdefizit

Kalweit geht davon aus, daß eine starke Abhängigkeit der Verdunstung vom Sättigungsdefizit besteht. Deshalb ist die Größe S auch das beherrschende meteorologische Element in den Gleichungen. Die Windwirkung wird dagegen vernachlässigt, da die Verdunstungswerte bei Messungen an der Lysimeteranlage in Eberswalde keine sichere Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit aufwiesen. Bei einer bereits zitierten Untersuchung (2) hatte es sich gezeigt, daß die Verdunstung eines Piche-Rohres in starkem Maße vom Wind abhing; aber die Korrelation zwischen der Verdunstung und einzelnen meteorologischen Größen wird sich gewiß mit der Größe und der Beschaffenheit der verdunstenden Fläche ändern. So hält auch Haude (5) die Wasserabgabe eines Piche-Rohres für windanfälliger als die eines feuchten Ackerbodens. Aber Haude verwendet dennoch einen mittleren Windfaktor zur Berechnung der potentiellen Verdunstung, und man möchte doch wenigstens bei weiteren Untersuchungen, vor allem bei den hoffentlich bald anlaufenden Messungen mit Evapotranspirometern, dieser Frage besondere Bedeutung beimessen, ob die für wasser- und landwirtschaftliche Zwecke ermittelten Verdunstungswerte auch ohne Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit hinreichend genau ausfallen.

Die Globalstrahlung, der Kalweit einen großen Einfluß auf die Verdunstung zuschreibt, hat enge Beziehungen zum Sättigungsdefizit, wird also von diesem mitberücksichtigt.

In den Formeln kommt weiter zum Ausdruck, daß das Sättigungsdefizit in den Wintermonaten allein von entscheidendem Einfluß auf die Monatsverdunstung ist;

es wird also angenommen, daß im Winter immer eine potentielle Verdunstung stattfindet. Die Beeinträchtigung der Monatsverdunstung im Sommer durch zeitweilig ungenügenden Wassernachschub zu den verdunstenden Oberflächen macht es aber notwendig, zur Beurteilung der aktuellen Verdunstung neben dem Sättigungsdefizit das jeweilige Wasserdargebot in den Verdunstungsformeln zu berücksichtigen. Die Sommerverdunstung im Bereich mittlerer und hoher S ist um so stärker, je größer das Verdunstungsvermögen ($U + W_n$) im Verhältnis zum Verdunstungsanspruch der Luft (S) ist.

Das Sättigungsdefizit wurde auf die im Abschnitt 3 angegebene Weise berechnet; die Monatsmittelwerte für alle Stationen des Untersuchungsgebietes sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tab. 1 Monatsmittel des Sättigungsdefizits S (mm Hg)

Nr. *) Klimastation	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
1 Keitum	0.2	0.2	0.4	0.9	1.5	2.1	2.2	2.1	1.4	0.8	0.5	0.3
2 Flensburg	0.3	0.4	0.7	1.5	2.5	3.2	3.1	2.4	1.6	0.9	0.5	0.3
3 Husum	0.2	0.3	0.7	1.4	2.3	2.9	2.9	2.4	1.7	0.8	0.4	0.2
4 Kiel	0.2	0.3	0.6	1.1	1.7	2.3	2.3	1.7	1.3	0.6	0.4	0.2
5 Eutin	0.1	0.1	0.5	1.4	2.2	3.0	2.8	2.5	1.4	0.8	0.3	0.1
6 Neumünster	0.2	0.3	0.6	1.5	2.7	3.2	3.2	2.4	1.6	0.8	0.3	0.1
7 Meldorf	0.2	0.3	0.7	1.4	2.4	2.8	2.8	2.3	1.6	0.8	0.4	0.2
8 Kirchdorf/Poel	0.3	0.4	0.7	1.4	2.1	2.5	2.6	2.4	1.8	0.9	0.4	0.4
9 Segeberg	0.2	0.4	0.7	1.6	2.5	3.1	3.2	2.5	1.7	0.9	0.4	0.3
10 Lübeck	0.2	0.3	0.6	1.4	2.2	2.9	2.7	2.2	1.5	0.8	0.4	0.3
11 Schwerin	0.3	0.5	0.8	1.8	3.0	3.8	3.8	3.2	2.4	1.0	0.5	0.3
12 Hamburg	0.3	0.4	0.9	2.0	2.9	3.5	3.5	2.9	2.2	1.0	0.5	0.3
13 Lüneburg	0.3	0.5	0.9	1.9	3.1	4.0	3.9	3.2	2.2	1.0	0.5	0.3
14 Norderney	0.4	0.5	0.6	1.1	1.6	2.0	2.0	2.1	1.9	1.3	0.7	0.4
15 Borkum	0.1	0.1	0.5	1.0	1.6	2.0	2.4	2.3	1.9	1.0	0.4	0.4
16 Jever	0.2	0.2	0.6	1.3	1.9	2.2	2.3	1.9	1.5	0.7	0.4	0.2
17 Wilhelmshaven	0.3	0.3	0.8	1.4	2.1	2.5	2.5	2.2	1.7	0.9	0.4	0.3
18 Bremerhaven	0.4	0.4	0.8	1.6	2.7	3.2	3.2	3.1	2.2	1.2	0.6	0.3
19 Emden	0.3	0.5	0.9	1.7	2.5	3.0	3.0	2.7	1.9	1.0	0.5	0.3
20 Elsfleth	0.3	0.5	0.9	1.7	2.6	3.0	3.1	2.6	1.8	1.0	0.5	0.3
21 Oldenburg	0.2	0.5	0.9	1.7	2.7	3.1	3.2	2.5	1.8	0.8	0.5	0.4
22 Bremen	0.4	0.6	1.1	1.9	3.1	3.7	3.6	3.2	2.3	1.2	0.6	0.4
23 Lönigen	0.3	0.5	0.9	1.7	2.8	3.3	3.1	2.5	1.7	0.9	0.5	0.4
24 Lingen	0.3	0.6	1.0	2.1	3.2	3.6	3.6	3.0	2.1	1.0	0.6	0.5
25 Osnabrück	0.4	0.6	1.0	1.7	3.0	3.1	3.2	2.6	1.9	1.1	0.6	0.4
26 Herford	0.5	0.5	1.0	1.9	2.8	3.3	3.1	2.8	2.1	1.2	0.7	0.4
27 Hannover	0.4	0.5	0.8	2.1	3.0	3.7	3.9	3.4	2.5	1.2	0.7	0.5
28 Hildesheim	0.5	0.7	1.2	2.1	3.3	4.0	4.0	3.9	2.7	1.4	0.9	0.6
29 Celle	0.4	0.5	1.1	2.0	3.1	3.8	3.5	2.9	1.9	1.0	0.7	0.3
30 Braunschweig	0.5	0.7	1.2	2.3	3.7	4.2	4.3	3.7	2.6	1.4	0.8	0.5
31 Helmstedt	0.3	0.5	1.1	2.2	3.5	4.0	4.0	3.4	2.6	1.3	0.6	0.5
32 Gardelegen	0.3	0.4	0.9	1.9	3.1	3.8	3.9	3.3	2.3	1.0	0.5	0.3
33 Magdeburg	0.4	0.6	1.4	2.5	4.1	5.0	5.1	4.5	3.1	1.5	0.7	0.5

*) Die Nummern beziehen sich auf die Stationen in der Karte der Abb. 1.

4. 3. Anwendung der Gleichungen auf Klimagebiete anstelle von Einzugsgebieten

Kalweit betrachtet als Hydrologe immer die Einzugsgebiete der Flüsse als räumliche Einheit, in denen sehr verschiedenartige Klimagebiete enthalten sein können. Der Meteorologe trachtet mehr danach, Werte für bestimmte Klimagebiete zu erhalten, für die jeweils eine meteorologische Station repräsentativ ist. Er kann dann auch eher Linien gleicher Verdunstung (unter Berücksichtigung der sich ändernden Klimaverhältnisse) zeichnen. So wurden auch im vorliegenden Falle mit Hilfe der Kalweit'schen Gleichungen V_w und V_s für bestimmte Klimagebiete berechnet, praktisch also für die Orte, an denen die meteorologischen Stationen liegen, deren Klimadaten (S und N) wir verwendeten. An der Größenordnung der V-Werte dürfte sich dadurch nichts ändern.

4. 4. Niederschlag

Kalweit berechnet für die einzelnen Einzugsgebiete aus den Niederschlagswerten der in diesen Gebieten gelegenen meteorologischen Stationen einen „Gebietsniederschlag“. Bei unserer Anwendung der Gleichungen auf bestimmte Klimagebiete können wir die an der repräsentativen Klimastation gemessenen Niederschlagswerte direkt verwenden.

4. 5. Abfluß und Unterschiedsgröße

Wenn wir V für ein bestimmtes Klimagebiet ermitteln wollen, so stoßen wir bei der Bestimmung der im Abzugsglied enthaltenen Größe A für dieses Klimagebiet auf Schwierigkeiten. Die Abflußmenge wird doch an einer bestimmten Pegelstation immer für ein größeres Einzugsgebiet bestimmt; wir haben also im Gegensatz zum Niederschlag einen Summenwert vor uns, der auf das ganze Einzugsgebiet bezogen ist und den wir nun gewissermaßen auf die einzelnen Klimagebiete dieses Einzugsgebietes, für die wir V berechnen wollen, aufspalten müssen. Dort, wo wir innerhalb des Einzugsgebietes den größten Niederschlag haben, müssen wir auch die größten Abflußmengen erwarten, besonders also in höheren Geländelagen. Da sich unsere Untersuchung jedoch nur auf das norddeutsche Flachland erstreckt, können wir auf verhältnismäßig einfache Weise zu Näherungswerten für den „Abfluß am Ort“ kommen. Wir verwenden für diese Berechnungen die Abflußmengen der in Tabelle 2 aufgeführten Pegelstationen. Dieses Material ist etwas spärlich; aber Mittelwerte des Abflusses für weitere Pegelstationen in dem Untersuchungsgebiet konnten wir nicht erreichen.

Tab. 2 Pegelstationen, deren mittlere Abflußmengen bei der vorliegenden Untersuchung verwandt wurden

Nr. Station	Nr. Station	Nr. Station
34 Treia	36 Intschede	38 Rheine
35 Oldesloe	37 Herzlake	39 Porta

Aus Abb. 2 geht hervor, daß in Schleswig-Holstein zwischen den zwei Pegelstationen, von denen Mittelwerte des Abflusses erreichbar sind, große Unterschiede im Abfluß auftreten. So hat das in der nördlicheren Hälfte des Landes gelegene Treia im Sommer einen wesentlich geringeren Abfluß als das im Südosten gelegene Oldesloe, obwohl die Niederschläge vom Monat Juli an in Segeberg und Eutin wesentlich unter den Werten für die nördlicheren Stationen Flensburg und Husum bleiben. Man wird Unterschiede in den Bodenverhältnissen der Einzugsgebiete als Ursache dieser Abfluß-Differenzen annehmen müssen. Schon an diesem Beispiel wird deutlich, wie schwierig die Berechnung des Abzugsgliedes ist, vor allem dann, wenn man sich von den Flußgebieten löst. Die Niederschläge variieren mit dem Klimaraum, die Übergänge sind ausgeglichen. Der Abfluß aber variiert in Schleswig-Holstein vor allem mit den Bodenverhältnissen; der Anteil des Niederschlags, der abfließt, kann sich auf kurze Entfernung sehr stark ändern.

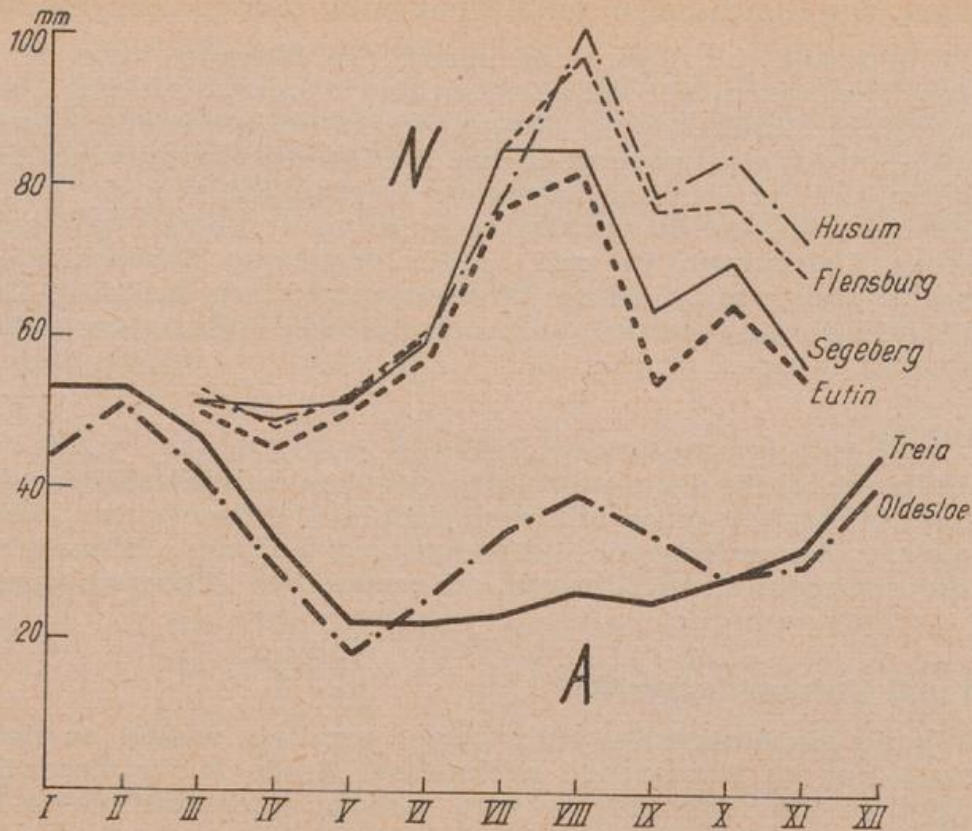


Abb. 2

Niederschlag (N) und Abfluß (A) in Schleswig-Holstein (langjährige Mittelwerte)

Wir verfahren nun so, daß wir die Abflußmengen der wenigen Pegelstationen im Untersuchungsgebiet zu den Niederschlagsmengen der (möglichst oberhalb der Pegelstation) nächstgelegenen meteorologischen Stationen in Beziehung setzten und dann einen Abflußwert ermittelten, mit dem man die Niederschlagssummen multiplizieren muß, um denjenigen Anteil am Gesamtniederschlag zu erhalten, der nicht durch Abfluß verlorenggeht. Zum Beispiel stehen sich in Tabelle 3 der Niederschlag von Segeberg und der Abfluß in Oldesloe gegenüber. Der Abflußwert f ist dann gleich $(N - A) : N$ und U wird zu $f \cdot N = U'$.

Tab. 3 Ermittlung des Abflußwertes f für den Raum Segeberg — Oldesloe

	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
N Segeberg (mm)	51	50	51	59	85	85	64	70	56
A Oldesloe (mm)	42	29	18	25	34	39	34	28	26
$N - A$	9	21	33	34	51	46	30	42	30
$f = N - A/N$	0.18	0.42	0.65	0.58	0.60	0.54	0.47	0.60	0.54

Auf diese Weise wurden die Abflußwerte f für 6 Stellen des Untersuchungsgebietes und außerdem für das Gebiet von Magdeburg errechnet; wir finden sie in Tabelle 4 jeweils zwischen den Namen einer Klima- und einer Pegelstation. Für die anderen Klimagebiete wurden die f -Werte interpoliert und ebenfalls in Tabelle 4 eingetragen.

Die Niederschlagswerte der Klimastationen wurden dann mit den f -Werten der Tabelle 4 multipliziert, und die sich daraus ergebenden Werte für die Unterschiedsgröße U' findet man in Tabelle 5. Diese Werte für U' wurden an Stelle von U zur Berechnung des Abzugsgliedes herangezogen.

Tab. 4 Abflußwerte f

Klimastation	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Pegelstation
Keitum	0.12	0	0.11	0.31	0.58	0.64	0.73	0.73	0.68	0.64	0.54	0.41	
Flensburg	0.12	0	0.11	0.31	0.58	0.64	0.73	0.73	0.68	0.64	0.54	0.41	Treia
Husum	0.12	0	0.11	0.31	0.58	0.64	0.73	0.73	0.68	0.64	0.54	0.41	
Kiel	0.27	0	0.20	0.40	0.65	0.60	0.60	0.55	0.50	0.60	0.55	0.40	
Eutin	0.27	0	0.20	0.40	0.65	0.60	0.60	0.55	0.50	0.60	0.55	0.40	
Neumünster	0.27	0	0.20	0.40	0.65	0.60	0.60	0.55	0.50	0.60	0.55	0.40	
Meldorf	0.20	0	0.20	0.35	0.60	0.60	0.65	0.65	0.60	0.60	0.55	0.40	
Kirchdorf/Poel	0.25	0	0.20	0.40	0.65	0.60	0.60	0.55	0.50	0.60	0.55	0.40	
Segeberg	0.27	0	0.18	0.42	0.65	0.58	0.60	0.54	0.47	0.60	0.54	0.41	Oldesloe
Lübeck	0.27	0	0.20	0.40	0.65	0.60	0.60	0.55	0.50	0.60	0.55	0.40	
Schwerin	0.30	0	0.20	0.40	0.70	0.80	0.85	0.80	0.80	0.70	0.50	0.45	
Hamburg	0.25	0	0.15	0.40	0.70	0.80	0.85	0.80	0.80	0.70	0.45	0.40	
Lüneburg	0.30	0	0.20	0.40	0.70	0.80	0.85	0.80	0.80	0.70	0.50	0.45	
Norderney	0.15	0	0.15	0.35	0.60	0.65	0.75	0.75	0.70	0.65	0.55	0.45	
Borkum	0.15	0	0.15	0.35	0.60	0.65	0.75	0.75	0.70	0.65	0.55	0.45	
Jever	0.20	0	0.20	0.40	0.65	0.70	0.80	0.80	0.75	0.70	0.50	0.40	
Wilhelmshaven	0.20	0	0.20	0.40	0.65	0.70	0.80	0.80	0.75	0.70	0.50	0.40	
Bremerhaven	0.20	0	0.20	0.40	0.65	0.70	0.80	0.80	0.75	0.70	0.50	0.40	
Emden	0.20	0	0.20	0.40	0.65	0.70	0.80	0.80	0.75	0.70	0.50	0.40	
Elsfleth	0.20	0	0.20	0.40	0.65	0.70	0.80	0.80	0.75	0.70	0.50	0.40	
Oldenburg	0.25	0	0.15	0.40	0.70	0.80	0.85	0.80	0.80	0.70	0.45	0.40	
Bremen	0.25	0	0.15	0.40	0.70	0.80	0.85	0.80	0.80	0.70	0.45	0.40	
Lönningen	0.24	0	0.06	0.45	0.78	0.90	0.89	0.85	0.84	0.75	0.45	0.38	Herzlake
Lingen	0.20	0	0.10	0.36	0.72	0.88	0.89	0.86	0.85	0.77	0.42	0.38	Rheine
Osnabrück	0.25	0	0.15	0.35	0.70	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.50	0.40	
Herford	0.48	0	0.16	0.40	0.67	0.75	0.81	0.83	0.79	0.77	0.57	0.52	Porta
Hannover	0.50	0.10	0.30	0.45	0.70	0.75	0.80	0.80	0.80	0.80	0.60	0.60	
Hildesheim	0.50	0.15	0.30	0.45	0.70	0.75	0.80	0.80	0.80	0.80	0.60	0.60	
Celle	0.51	0.17	0.27	0.43	0.70	0.76	0.84	0.83	0.80	0.76	0.57	0.60	Intschede
Braunschweig	0.50	0.20	0.30	0.45	0.70	0.75	0.80	0.80	0.80	0.80	0.60	0.60	
Helmstedt	0.50	0.30	0.30	0.45	0.70	0.75	0.80	0.80	0.80	0.80	0.60	0.60	
Gardelegen	0.60	0.30	0.35	0.55	0.65	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	0.60	
Magdeburg	0.60	0.30	0.40	0.60	0.70	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.85	0.69	Barby-Wittenberge

an der Wasserführung des Rheins. Dieser Höcker wird am Rhein unterhalb des Bodensees zum Monatswechsel Juni/Juli beobachtet.

Um ein Bild zu bekommen, welchen Anteil die Schmelzwassermengen der winterlichen Schneerücklage am Jahresgang eines alpinen Flusses etwa haben können, möge erwähnt sein, daß nach S t r e c k (9) der oberirdisch und aus dem Grundwasser infolge der Schneeschmelze zufließende Zuschuß bei der Saalach (Pegel Jettenberg)

im März	25 %,
im April	38 %,
im Mai	50 % und
im Juni	5 %

des gesamten vom Fluß geführten Wassers ausmacht. Dabei fällt das Maximum der Abflußkurve auf den Mai. Man wird sich also möglichst an Nebenflüssen mittlerer Größe orientieren müssen, wenn man den vom Niederschlag in einer begrenzten Landschaft abfließenden Teil ermitteln möchte.

4. 6. Monatsmittel des nutzbaren Bodenwasservorrats

Der Deutsche Wetterdienst hat nach dem Krieg mit regelmäßigen Bodenfeuchtemessungen begonnen. Bis 1955 wuchs das Sondernetz auf 14 Stationen an, die zweimal wöchentlich auf unbewachsenen Parzellen, in einigen Fällen zusätzlich auch auf bewachsenen, die Bodenfeuchte bestimmen und — in Gewichtsprozenten ausgedrückt — an die Zentralstelle des Deutschen Wetterdienstes melden. Für diejenigen dieser Stationen, die bereits sechs und mehr Jahre an diesem Beobachtungsprogramm beteiligt sind, wurden nunmehr die Volumengewichte der Testparzellen-Böden bestimmt und die Gewichtsprozentangaben in Volumenprozentangaben umgerechnet. Umfangreiche Rechenarbeiten, die nur mit Hilfe der vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten bezahlten Rechenkraft möglich waren, schufen die Unterlagen für die Ermittlung des mittleren Jahresgangs des ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts. Wenn auch auf Grund sechsjähriger Reihen noch nicht von endgültigen „Mittelwerten“ gesprochen werden kann, so können nunmehr doch die von K a l w e i t angenommene Näherungsgröße von 200 mm für den maximal nutzbaren Bodenwasservorrat sowie die zu berechnenden monatlichen Vorräte an nutzbarem Bodenwasser durch konkrete Zahlen ersetzt werden (10). Der nutzbare Bodenwasservorrat W_n entspricht etwa dem ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalt, und der nutzbare Bodenwasservorrat bei Wassersättigung W_0 im Frühjahr dem maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalt. Die beiden letztgenannten Ausdrücke sind im Deutschen Wetterdienst gebräuchlich (11) und sollen deshalb nachstehend für W_n und W_0 verwandt werden. Da eine exakte Übereinstimmung in der Definition nicht gegeben ist, werden wir die beiden Größen mit einem Strich versehen, also von W_n' und W_0' sprechen. Der maximal ausschöpfbare Bodenfeuchtegehalt W_0' ist dann die Differenz zwischen dem im Winter vielfach gemessenen höchsten und dem in trockenen Sommern festgestellten tiefsten Bodenfeuchtwert einer Testparzelle. Der aktuelle ausschöpfbare Bodenfeuchtegehalt W_n' ist dagegen die Differenz zwischen der zu jeder beliebigen Jahreszeit gemessenen Bodenfeuchte und dem in trockenen Sommern festgestellten tiefsten Bodenfeuchtwert (10).

An anderer Stelle (10) wurden diese Größen W_0' und W_n' für Böden verschiedener Art und mit unterschiedlichem Bewuchs miteinander verglichen und für jede der zum Vergleich herangezogenen Parzellen ein mittlerer Jahresgang des ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts berechnet. Die Monatsmittel des Bodenfeuchtegehalts wurden jeweils in Millimetern und in Prozenten des (gleich 100 % gesetzten) maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts angegeben (% m. a. B.). Mit Hilfe dieser (in % m. a. B. ausgedrückten) relativen Zahlenwerte kann man gegebenenfalls den mittleren Jahresgang des ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts für andere Flächen mit bekanntem W_0' berechnen.

Es ist aber für eine großräumige Berechnung von monatlichen Mittelwerten der Gebietsverdunstung nahezu unmöglich, alle Einzelheiten der Boden- und Anbauverhältnisse bei der Bestimmung der nutzbaren Bodenfeuchte zu berücksichtigen. Es wurde vielmehr in grober Annäherung davon ausgegangen, daß das in Kultur ste-

hende Land überall zu 30 % mit Spätkartoffeln und zu 70 % mit Winterroggen bebaut ist. Dabei wurde angenommen, daß dieses idealisierte „bewachsene Land“ etwa denselben Wasserverzehr hat, wie das natürliche Land mit seiner gesamten Vegetation unter Einschluß von Weiden, Gartenbauparzellen, Wald und Brachland.

Nunmehr wurden aus der bereits zitierten Arbeit (10) die Prozentwerte für Winterroggen und Spätkartoffeln ausgezogen und — unter Beachtung des Verhältnisses 70:30 — zur Berechnung von mittleren Prozentzahlen (% m. a. B.) für „bewachsenes Land“ verwandt. Es ergaben sich die Zahlenwerte der Tab. 6.

Tab. 6 **Mittlerer ausschöpfbarer Bodenfeuchtegehalt „bewachsenen Landes“ für die einzelnen Monate in % m. a. B. für eine Schicht von 0—160 cm Tiefe**

Monat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
% m. a. B.	100	99	88	72	58	46	38	36	45	54	71	91

Diese die Ausnutzung der vorhandenen Bodenfeuchte durch die Kulturen charakterisierenden Zahlen müssen nun auf die unterschiedlichen Bodenverhältnisse angewandt werden. K r i s c h e (12) teilte die landwirtschaftlichen Hauptbodenarten vereinfachend in leichte, mittlere, schwere und Moorböden. Für diese Kategorien von Böden nehmen wir nach unseren Bodenfeuchtemessungen sowie nach den Angaben anderer Autoren in der Literatur die in Tab. 7 aufgeführten Werte des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts an:

Tab. 7 **Maximal ausschöpfbarer Bodenfeuchtegehalt auf verschiedenen Böden**

	leichter	mittlerer	schwerer	Moor-Boden
unbewachsen	80	150	180	200
Spätkartoffeln	120	185	210	230
Winterroggen	140	230	250	260
„bewachsenes Land“	135	215	240	250

Die Tabellen 6 und 7 wurden nun zur Anwendung der Kalweit'schen Gleichungen auf folgende Weise benutzt:

In die Kartendarstellungen von K r i s c h e (12) trugen wir die 33 Klimastationen unseres Untersuchungsgebietes ein und schlugen um dieselben Kreise mit einem Radius der in der Natur 15 km entsprechen würde. Für die so entstandenen Kreisflächen bestimmten wir den Anteil der vier verschiedenen Bodenarten und trugen diese Prozentwerte in Tabelle 8 ein. Für die Küstenstationen wurde die im Kreis enthaltene Landfläche gleich 100% gesetzt; für Inselstationen rückten wir den Mittelpunkt der um sie geschlagenen Kreise an den nächstgelegenen Küstensaum und behandelten somit diese Inselstationen wie Küstenstationen. Dann multiplizierten wir die Prozentwerte der vier Bodenartenspalten mit den zugehörigen W'_0 -Werten für „bewachsenes Land“, die uns Tabelle 7 lieferte, summierten die so gewonnenen Produkte jeder Station und dividierten diese durch 100. Auf diese Weise erhielten wir für die um die Klimastationen geschlagenen Kreisflächen Mittelwerte des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts W'_0 .

Von diesen W'_0 -Werten ausgehend wurden unter Verwendung der Prozentzahlen der Tabelle 6 die in Tabelle 9 enthaltenen Werte der mittleren ausschöpfbaren Bodenfeuchte W'_n des „bewachsenen Landes“ für die einzelnen Monate berechnet.

Tab. 8 Anteil der Bodenarten (in %) an einer Gesamtfläche von 700 km² um die einzelnen Klimastationen sowie Angaben über den maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalt W'_0 dieser Flächen

Klimastation	Bodenart				W'_0 (mm)
	leicht	mittel	schwer	Moor	
Keitum	—	—	100	—	240
Flensburg	35	—	55	10	204
Husum	45	—	50	5	193
Kiel	—	—	100	—	240
Eutin	—	—	100	—	240
Neumünster	45	—	50	5	193
Meldorf	20	—	50	30	222
Kirchdorf/Poel	—	45	50	5	230
Segeberg	30	—	65	5	209
Lübeck	—	—	100	—	240
Schwerin	30	20	45	5	204
Hamburg	5	35	55	5	227
Lüneburg	65	35	—	—	163
Norderney	—	—	100	—	240
Borkum	—	—	100	—	240
Jever	30	—	70	—	209
Wilhelmshaven	10	—	80	—	206
Bremerhaven	30	—	50	20	211
Emden	15	—	55	30	227
Elsfleth	15	—	70	15	226
Oldenburg	60	—	15	25	180
Bremen	—	—	90	10	241
Löningen	75	—	—	25	164
Lingen	50	—	—	50	193
Osnabrück	40	10	50	—	196
Herford	—	15	85	—	236
Hannover	35	—	55	10	204
Hildesheim	15	5	80	—	223
Celle	15	—	80	5	225
Braunschweig	75	—	25	—	161
Helmstedt	—	—	100	—	240
Gardelegen	75	—	15	20	187
Magdeburg	5	15	75	5	232

Tab. 9 Mittlerer ausschöpfbarer Bodenfeuchtegehalt in verschiedenen Klimagebieten (W_n)

Klimastation	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Keitum	240	238	211	173	139	110	91	86	108	130	170	218
Flensburg	204	202	180	147	118	94	78	73	92	110	145	185
Husum	193	191	170	139	112	89	73	69	87	104	137	175
Kiel	240	238	211	173	139	110	91	86	108	130	170	218
Eutin	240	238	211	173	139	110	91	86	108	130	170	218
Neumünster	193	191	170	139	112	89	73	69	87	104	137	175
Meldorf	222	220	195	160	129	102	84	80	100	120	157	202
Kirchdorf/Poel	230	228	202	165	133	106	87	83	104	124	163	209
Segeberg	209	207	184	149	121	96	79	75	94	113	148	190
Lübeck	240	238	211	173	139	110	91	86	108	130	170	218
Schwerin	204	202	180	147	118	94	78	73	92	110	145	185
Hamburg	227	225	200	163	132	104	86	82	102	123	161	206
Lüneburg	163	161	143	117	94	75	62	59	73	88	116	148

Klimastation	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Norderney	240	238	211	173	139	110	91	86	108	130	170	218
Borkum	240	238	211	173	139	110	91	86	108	130	170	218
Jever	209	207	184	149	121	96	79	75	94	113	148	190
Wilhelmshaven	206	204	181	148	119	95	78	74	93	111	146	187
Bremerhaven	211	209	186	152	122	97	80	76	95	114	150	192
Emden	227	225	200	163	132	104	86	82	102	123	161	206
Elsfleth	226	224	199	163	131	104	86	81	102	122	160	205
Oldenburg	180	178	158	130	104	83	68	65	81	97	128	164
Bremen	241	239	212	174	140	111	92	87	109	130	171	219
Löningen	164	162	144	118	95	75	62	59	74	89	116	149
Lingen	193	191	170	139	112	89	73	69	87	104	137	175
Osnabrück	196	194	172	141	114	90	74	71	88	106	139	178
Herford	236	234	208	170	137	108	90	85	106	127	167	215
Hannover	204	202	180	147	118	94	78	73	92	110	145	185
Hildesheim	223	221	196	160	129	102	85	80	101	120	158	202
Celle	225	223	198	162	130	103	86	81	101	121	160	204
Braunschweig	161	159	142	116	93	74	61	58	73	87	114	146
Helmstedt	240	238	211	173	139	110	91	86	108	130	170	218
Gardelegen	187	185	164	135	108	86	71	67	84	101	133	170
Magdeburg	232	230	204	167	134	107	88	84	105	125	165	211

4. 7. Anwendung der Variablen x und y

Kalweit verwendet x und y in zwei verschiedenen Formen. Einmal repräsentieren sie die im Abschnitt 3 angegebenen Gleichungen, die ausdrücken sollen, daß die Gebietsverdunstung von den regionalen Niederschlagsverhältnissen (\bar{N}) beeinflußt wird, und zum anderen werden sie durch die Größen ε und ξ ersetzt, welche je nach der Landschaftsform verschiedene Werte annehmen. Auch diese Größen ε und ξ sollen einer Beziehung zwischen dem Niederschlag, der im allgemeinen mit der Seehöhe zunimmt, und der Verdunstung Rechnung tragen. Diese beiden Formen von x und y lassen sich aber nicht wechselweise ersetzen; sie führen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen.

Betrachten wir beispielsweise das Gebiet von Schleswig-Holstein, dann erhalten wir bei Verwendung der Konstanten ε und ξ folgende Werte für x und y:

$$x = \varepsilon = 3 \qquad y = \xi = -15.$$

Bei Berechnung von x und y aus den Niederschlagsgleichungen gibt es aber schon in Schleswig-Holstein einen sehr breiten Schwankungsbereich ($\bar{N} = 600 - 875$ mm) für x und y, nämlich

$$x = 3.8 \text{ bis } 6.5 \\ y = -11.4 \text{ bis } 0.$$

Diese großen Unterschiede verlangen, daß man genau festlegt, in welcher Form man x und y verwenden will.

Vor allem verträgt sich bei der Berechnung der Winterverdunstung V_w die Wahl verschiedener Faktoren für ε je nach den topographischen Verhältnissen nicht mit der Definition der potentiellen Verdunstung. Wenn wir als Voraussetzung für das Zustandekommen einer potentiellen Verdunstung annehmen, daß die Böden überall feuchtegesättigt sind, dann sind die Niederschlagsverhältnisse bedeutungslos, und die Verdunstung hängt nur noch von der Wasseraufnahmefähigkeit der Luft ab, die durch das Sättigungsdefizit näherungsweise bestimmt wird. Für die Wintermonate kann man also auf die Berücksichtigung der Topographie verzichten und einen einheitlichen Wert für x verwenden. Bei unserer Untersuchung verwendeten wir für alle Stationen $x = \varepsilon = 3$.

Im Sommer spielen die hydrologischen Verhältnisse unterschiedlicher Gebiete dagegen eine große Rolle, was durch die Einführung des Abzugsgliedes z schon berück-

sichtigt wird. z ist vom Niederschlag und dem Abfluß sowie von den Bodenfeuchteverhältnissen abhängig. Wenn *Kalweit* darüber hinaus noch durch y den Abzugsgliedern ein besonderes hydrologisches Gewicht geben will, so soll dies akzeptiert werden. Jedoch ist es nicht möglich, die quadratische Gleichung für y in dem ganzen Bereich des \bar{N} anzuwenden. Es war zweifellos *Kalweits* Wille, das y von -15 bei kleinen Werten auf -1 bei großen Werten von \bar{N} ansteigen zu lassen. Dies ist der Fall im Bereich von $\bar{N} = 525$ mm bis $\bar{N} = 850$ mm. Bei noch höheren jährlichen Niederschlagsmengen \bar{N} nimmt y erst positive und dann auf dem zweiten Parabelast wieder negative Werte an. Wir folgen *Kalweits* Überlegungen sicher besser, wenn wir bei Niederschlägen $\bar{N} \leq 525$ mm immer $y = -15$ und bei $\bar{N} \geq 850$ mm immer $y = -1$ annehmen und nur im Zwischenbereich y nach der angegebenen Gleichung berechnen. In Tabelle 10 sind für die Stationen des Untersuchungsgebietes die Werte für y angegeben, mit denen wir in die *Kalweit*'sche Gleichung für V_s eingingen.

Tab. 10 Werte für y der Gleichung zur Berechnung von V_s

Klimastation	y	Klimastation	y	Klimastation	y
Keitum	-2.5	Hamburg	-4.5	Löningen	-5.5
Flensburg	-2.5	Lüneburg	-10.0	Lingen	-5.5
Husum	-2.5	Norderney	-7.5	Osnabrück	-2.5
Kiel	-6.5	Borkum	-6.5	Herford	-5.5
Eutin	-6.5	Jever	-3.5	Hannover	-9.0
Neumünster	-3.5	Wilhelmshaven	-6.5	Hildesheim	-10.0
Meldorf	-2.5	Bremerhaven	-9.0	Celle	-6.5
Kirchdorf/Poel	-15.0	Emden	-5.5	Braunschweig	-9.0
Segeberg	-4.5	Elsfleth	-6.5	Helmstedt	-10.0
Lübeck	-9.0	Oldenburg	-6.5	Gardelegen	-12.5
Schwerin	-10.0	Bremen	-9.0	Magdeburg	-15.0

4. 8. Abzugsglied z

Nunmehr sind alle Größen bekannt, die wir zur Berechnung der monatlichen Mittelwerte der aktuellen Verdunstung in den 33 Klimagebieten des Untersuchungsraumes brauchen. Wir berechnen zunächst das Abzugsglied

$$z = \frac{1000 S}{U' + Wn'}$$

mit Hilfe der Tabellen 1, 5 und 9. Die Werte für z sind in der Tabelle 11 festgehalten. Wir erkennen an den Werten der Einzelstationen und an den Mittelwerten eine Zunahme von z zum Sommer hin und ein Abfallen dieser Größe im Herbst. In diesem Gang sehen wir einen meteorologischen Sinn, denn die potentielle Verdunstung wird im Sommer, wenn die Bodenfeuchte geringer ist, sicher eine größere Differenz gegenüber der aktuellen Verdunstung aufweisen als im Frühjahr und Herbst, und das Abzugsglied soll doch diese Differenz charakterisieren.

Nun soll aber — wie im Abschnitt 3 beschrieben — mit einem Wert z_0^2 , also mit dem Quadrat der Abweichungen der einzelnen z -Werte von ihrem Mittelwert, weitergerechnet werden. Tabelle 11 zeigt an den Werten für z_0^2 , daß durch diese Rechenoperation dem Abzugsglied der meteorologische Sinn, den wir ihm geben möchten, genommen wird. Wir erhalten keinen ausgeglichenen Gang des Abzugsgliedes, sondern im Mittel eine Doppelwelle über das Halbjahr hinweg, wobei der April die höchsten Werte für z_0^2 aufweist. Trotz unserer Bedenken gegen die Verwendung dieser z_0^2 -Werte haben wir aber den gesamten Ausdruck der *Kalweit*'schen Gleichung, der das Abzugsglied enthält, nämlich

$$A = (2.4 + 0.01 z_0^2) y$$

zunächst einmal berechnet und in Tabelle 12 die so gewonnenen Werte festgehalten.

Um nun aber den meteorologischen Sinn des Abzugsgliedes zu erhalten, versuchten wir eine Änderung der *Kalweit*'schen Gleichungen. Und zwar gingen wir von der Rechenoperation des Quadrierens der Abweichungen der z -Werte von ihren Halbjahresmitteln ab und verwendeten in der Gleichung für V_s das Abzugsglied z selbst.

Tab. 11 Abzugsglied z und abgewandelte Größen

	z										z_0^2										z'															
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV	V	VI	VII	VIII	IX						
Keitum	4.9	9.3	15.1	16.5	14.3	8.8	43.5	4.8	13.0	25.0	7.8	7.3	6.9	13.0	21.1	23.1	20.0	12.3	4.9	9.3	15.1	16.5	14.3	8.8	43.5	4.8	13.0	25.0	7.8	7.3	6.9	13.0	21.1	23.1	20.0	12.3
Flensburg	9.3	16.9	24.0	22.2	16.7	11.1	54.8	0.0	53.3	30.3	0.0	31.4	13.0	23.7	33.6	31.1	23.4	15.5	9.3	16.9	24.0	22.2	16.7	11.1	54.8	0.0	53.3	30.3	0.0	31.4	13.0	23.7	33.6	31.1	23.4	15.5
Husum	9.1	16.2	22.9	22.2	16.8	12.0	54.8	0.1	41.0	32.5	0.1	20.3	12.7	22.7	32.0	31.1	23.5	16.8	9.1	16.2	22.9	22.2	16.8	12.0	54.8	0.1	41.0	32.5	0.1	20.3	12.7	22.7	32.0	31.1	23.5	16.8
Kiel	5.7	10.1	16.1	17.0	12.8	9.3	37.2	2.9	18.5	27.0	1.0	6.3	8.0	14.1	22.5	23.8	17.9	13.0	5.7	10.1	16.1	17.0	12.8	9.3	37.2	2.9	18.5	27.0	1.0	6.3	8.0	14.1	22.5	23.8	17.9	13.0
Eutin	7.3	12.8	20.8	20.4	19.1	10.4	60.8	5.3	32.5	28.1	16.0	22.1	10.2	17.9	29.1	28.6	26.7	14.6	7.3	12.8	20.8	20.4	19.1	10.4	60.8	5.3	32.5	28.1	16.0	22.1	10.2	17.9	29.1	28.6	26.7	14.6
Neumünster	9.4	18.6	25.2	25.8	20.0	13.1	86.5	0.0	42.3	50.4	1.7	31.4	13.2	26.1	35.3	36.1	28.0	18.3	9.4	18.6	25.2	25.8	20.0	13.1	86.5	0.0	42.3	50.4	1.7	31.4	13.2	26.1	35.3	36.1	28.0	18.3
Meldorf	8.0	15.0	20.0	20.0	15.3	11.0	47.6	0.0	26.0	26.0	0.2	15.2	11.2	21.0	28.0	28.0	21.4	15.4	8.0	15.0	20.0	20.0	15.3	11.0	47.6	0.0	26.0	26.0	0.2	15.2	11.2	21.0	28.0	28.0	21.4	15.4
Kirchdorf/Poel	7.8	13.1	18.5	20.2	20.5	14.2	62.4	6.8	7.8	20.3	23.0	2.3	10.9	18.3	25.9	28.3	28.7	19.9	7.8	13.1	18.5	20.2	20.5	14.2	62.4	6.8	7.8	20.3	23.0	2.3	10.9	18.3	25.9	28.3	28.7	19.9
Segeberg	9.4	16.2	23.8	24.6	20.7	13.7	75.7	3.6	32.5	42.3	6.8	19.4	13.2	22.7	33.3	34.5	29.0	19.2	9.4	16.2	23.8	24.6	20.7	13.7	75.7	3.6	32.5	42.3	6.8	19.4	13.2	22.7	33.3	34.5	29.0	19.2
Lübeck	7.4	12.9	20.4	19.7	17.0	11.3	54.8	3.6	31.4	24.0	4.8	12.3	10.4	18.1	28.6	27.6	23.8	15.8	7.4	12.9	20.4	19.7	17.0	11.3	54.8	3.6	31.4	24.0	4.8	12.3	10.4	18.1	28.6	27.6	23.8	15.8
Schwerin	11.0	20.1	28.0	27.2	25.0	18.3	112.4	2.3	41.0	31.4	11.6	10.9	15.4	28.1	39.2	38.1	35.0	25.6	11.0	20.1	28.0	27.2	25.0	18.3	112.4	2.3	41.0	31.4	11.6	10.9	15.4	28.1	39.2	38.1	35.0	25.6
Hamburg	10.9	17.0	22.3	22.2	19.1	14.6	46.2	0.5	21.2	20.3	2.0	9.6	15.3	23.8	31.2	31.0	26.7	20.5	10.9	17.0	22.3	22.2	19.1	14.6	46.2	0.5	21.2	20.3	2.0	9.6	15.3	23.8	31.2	31.0	26.7	20.5
Lüneburg	14.2	24.6	33.1	30.4	27.8	19.3	114.5	0.1	67.2	30.3	8.4	31.4	19.9	34.5	46.3	42.5	38.9	27.0	14.2	24.6	33.1	30.4	27.8	19.3	114.5	0.1	67.2	30.3	8.4	31.4	19.9	34.5	46.3	42.5	38.9	27.0
Norderney	5.9	9.8	13.6	13.9	13.4	12.5	31.4	2.9	4.4	5.8	3.6	1.0	8.3	13.7	19.0	19.5	18.8	17.5	5.9	9.8	13.6	13.9	13.4	12.5	31.4	2.9	4.4	5.8	3.6	1.0	8.3	13.7	19.0	19.5	18.8	17.5
Borkum	5.4	9.7	13.1	16.9	14.9	12.5	44.9	5.8	1.0	23.0	7.8	0.2	7.6	13.6	18.3	23.7	20.9	17.5	5.4	9.7	13.1	16.9	14.9	12.5	44.9	5.8	1.0	23.0	7.8	0.2	7.6	13.6	18.3	23.7	20.9	17.5
Jever	7.7	12.1	15.5	15.8	12.5	10.1	21.2	0.0	10.2	12.3	0.0	4.8	10.8	16.9	21.7	22.1	17.5	14.1	7.7	12.1	15.5	15.8	12.5	10.1	21.2	0.0	10.2	12.3	0.0	4.8	10.8	16.9	21.7	22.1	17.5	14.1
Wilhelmshaven	8.5	13.7	18.2	17.6	15.3	12.1	32.5	0.3	16.0	11.6	1.2	4.4	12.0	19.2	25.5	24.6	21.4	16.9	8.5	13.7	18.2	17.6	15.3	12.1	32.5	0.3	16.0	11.6	1.2	4.4	12.0	19.2	25.5	24.6	21.4	16.9
Bremerhaven	9.6	17.1	23.2	23.2	20.6	15.8	75.7	1.4	24.0	24.0	5.3	6.3	13.5	23.9	32.5	32.5	28.8	22.1	9.6	17.1	23.2	23.2	20.6	15.8	75.7	1.4	24.0	24.0	5.3	6.3	13.5	23.9	32.5	32.5	28.8	22.1
Emden	9.4	15.2	19.9	20.3	17.7	12.8	42.3	0.5	16.0	19.4	3.2	9.6	13.2	21.3	27.9	28.4	24.8	17.9	9.4	15.2	19.9	20.3	17.7	12.8	42.3	0.5	16.0	19.4	3.2	9.6	13.2	21.3	27.9	28.4	24.8	17.9
Elsfleth	9.3	15.5	20.3	20.6	17.8	12.2	44.9	0.3	18.5	21.2	3.2	14.4	13.0	21.7	28.4	28.8	24.9	17.1	9.3	15.5	20.3	20.6	17.8	12.2	44.9	0.3	18.5	21.2	3.2	14.4	13.0	21.7	28.4	28.8	24.9	17.1
Oldenburg	11.3	19.3	23.5	23.5	19.4	12.3	47.6	1.2	28.1	28.1	1.4	34.8	15.8	27.0	32.9	32.9	27.2	17.2	11.3	19.3	23.5	23.5	19.4	12.3	47.6	1.2	28.1	28.1	1.4	34.8	15.8	27.0	32.9	32.9	27.2	17.2
Bremen	10.0	17.5	23.4	22.8	22.2	15.0	72.3	1.0	24.0	18.5	13.7	12.3	14.0	24.5	32.8	31.9	31.1	21.0	10.0	17.5	23.4	22.8	22.2	15.0	72.3	1.0	24.0	18.5	13.7	12.3	14.0	24.5	32.8	31.9	31.1	21.0
Lönningen	12.2	20.5	24.4	23.7	19.6	14.2	47.6	2.0	28.1	21.2	0.3	24.0	17.1	28.7	34.2	33.2	27.4	19.9	12.2	20.5	24.4	23.7	19.6	14.2	47.6	2.0	28.1	21.2	0.3	24.0	17.1	28.7	34.2	33.2	27.4	19.9
Lingen	13.4	21.3	24.2	25.9	21.7	15.4	47.6	1.0	15.2	31.4	2.0	24.0	18.8	29.8	33.9	36.2	30.4	21.6	13.4	21.3	24.2	25.9	21.7	15.4	47.6	1.0	15.2	31.4	2.0	24.0	18.8	29.8	33.9	36.2	30.4	21.6
Osnabrück	10.6	19.6	22.2	23.0	18.4	13.7	53.3	2.9	18.5	26.0	0.3	17.6	14.8	27.4	31.1	32.2	25.8	19.2	10.6	19.6	22.2	23.0	18.4	13.7	53.3	2.9	18.5	26.0	0.3	17.6	14.8	27.4	31.1	32.2	25.8	19.2
Herford	10.1	16.1	21.3	20.0	19.0	13.9	43.6	0.4	21.2	10.9	5.3	7.8	14.1	22.5	29.8	28.0	26.6	19.5	10.1	16.1	21.3	20.0	19.0	13.9	43.6	0.4	21.2	10.9	5.3	7.8	14.1	22.5	29.8	28.0	26.6	19.5
Hannover	12.6	19.5	26.4	27.9	26.0	19.2	86.5	5.8	20.3	36.0	16.8	7.3	17.6	27.3	37.0	39.0	36.4	26.9	12.6	19.5	26.4	27.9	26.0	19.2	86.5	5.8	20.3	36.0	16.8	7.3	17.6	27.3	37.0	39.0	36.4	26.9
Hildesheim	11.7	19.6	27.4	26.5	28.5	19.0	108.2	6.3	28.1	19.4	41.0	9.6	16.4	27.4	38.3	37.1	39.9	26.6	11.7	19.6	27.4	26.5	28.5	19.0	108.2	6.3	28.1	19.4	41.0	9.6	16.4	27.4	38.3	37.1	39.9	26.6
Celle	11.0	18.4	25.3	22.8	19.9	13.2	54.8	0.0	47.6	19.4	2.3	27.0	15.4	25.8	35.4	31.9	27.9	18.5	11.0	18.4	25.3	22.8	19.9	13.2	54.8	0.0	47.6	19.4	2.3	27.0	15.4	25.8	35.4	31.9	27.9	18.5
Braunschweig	16.7	28.0	35.3	33.4	31.6	22.2	125.4	0.0	54.8	30.3	13.7	32.5	23.4	39.2	49.3	46.7	44.2	31.1	16.7	28.0	35.3	33.4	31.6	22.2	125.4	0.0	54.8	30.3	13.7	32.5	23.4	39.2	49.3	46.7	44.2	31.1
Helmstedt	11.5	20.2	26.5	26.2	24.3	17.4	90.3	0.6	30.3	27.0	10.9	13.0	16.1	28.3	37.1	36.7	34.0	24.4	11.5	20.2	26.5	26.2	24.3	17.4	90.3	0.6	30.3	27.0	10.9	13.0	16.1	28.3	37.1	36.7	34.0	24.4
Gardelegen	12.2	22.3	29.5	29.1	27.1	18.3	118.8	0.6	41.0	36.0	16.0	23.0	17.1	31.2	41.3	40.7	38.0	25.6	12.2	22.3	29.5	29.1	27.1	18.3	118.8	0.6	41.0	36.0	16.0	23.0	17.1	31.2	41.3	40.7	38.0	25.6
Magdeburg	13.2	25.1	33.6	34.2	33.6	21.5	187.7	3.2	44.9	53.3	44.9	29.2	18.5	35.1	47.0	47.8	47.0	30.1	13.2	25.1	33.6	34.2	33.6	21.5	187.7	3.2	44.9	53.3	44.9	29.2	18.5	35.1	47.0	47.8	47.0	30.1
Mittel	9.9	17.1	22.9	22.9	20.3	14.3	67.5	2.0	27.9	26.1	8.4	15.8	14.0	24.0	32.1	32.1	28.4	20.0	9.9	17.1	22.9	22.9	20.3	14.3	67.5	2.0	27.9	26.1	8.4	15.8	14.0	24.0	32.1	32.1	28.4	20.0

In der Tabelle 12 stehen weiter Zahlenwerte für den Ausdruck

$$B = (2.4 + 0.01 z') y$$

Zur Berechnung von B wurden die Werte z' der Tabelle 11 herangezogen, die aus der Multiplikation der Werte z mit dem Faktor 1.4 entstanden sind. Diese Multiplikation sollte den z -Werten eine andere Größenordnung geben, so daß wenigstens in den Halbjahressummen ähnliche Werte für die Verdunstung herauskommen, wie wir sie unter strenger Anwendung der *Kalweit'schen* Gleichungen erhalten hätten. Oder anders ausgedrückt: die Halbjahressumme der Werte für A ist die gleiche wie die der Werte für B; nur die Verteilung dieser Summen auf die einzelnen Monate ist eine andere, wenn man mit den Werten z' an Stelle von z_0^2 rechnet. Ein Vergleich der Werte für A und B in der Tabelle 12 zeigt aber keine sehr großen Unterschiede, wenn man dieselbe Station und denselben Monat betrachtet, und vor allem sind die Unterschiede von A oder von B an einer Station von Monat zu Monat sehr gering. Dieses Ergebnis ist unbefriedigend, da wir doch erwarten, daß in den einzelnen Monaten des Sommerhalbjahres sehr unterschiedliche Beträge von der potentiellen Verdunstung abzuziehen sind; es rechtfertigt nicht die Beachtung so schwer zu bestimmender Größen wie den Bodenwasservorrat und die Unterschiedsgröße in den *Kalweit'schen* Gleichungen. Dem Abzugsglied muß bei der Berechnung von Monatswerten der aktuellen Verdunstung eine größere Bedeutung zukommen als in den Gleichungen *Kalweits*.

Eine Berechnung des Ausdrucks A bzw. B mit den Stufenwerten für die Variable y , nämlich

$$\begin{aligned} y &= -10 \text{ für mittleres Hügelland} \\ y &= -15 \text{ für Flachland} \end{aligned}$$

würde zu einer anderen regionalen Verteilung der Verdunstung führen. Dieses Verfahren würde aber dem Sinn der Variablen y zuwiderlaufen. Diese Größe soll den Niederschlagverhältnissen eines Gebietes besonderes Gewicht verleihen, so daß wir schon die Übergänge von einer Niederschlagsregion in eine andere — auch wenn wir dabei immer im Flachland bleiben — berücksichtigen müssen.

4. 9. Geltungsbereich für V_w und V_s *)

Bei der Berechnung der winterlichen Verdunstung bewachsenen Bodens mit Hilfe der *Kalweit'schen* Gleichung für V_w wird vorausgesetzt, daß der Boden genügend Wasser enthält, das entsprechend dem Verdunstungsanspruch der Luft vom Boden und von den Pflanzen verdunstet werden kann. Daß V_w somit zur Ermittlung der potentiellen Verdunstung im Winter bestimmt ist, geht daraus hervor, daß der Bodenwassergehalt in der Gleichung für V_w nicht berücksichtigt wird. Aus den Tabellen des Abschnitts 4. 6. und aus der dort zitierten Arbeit (10) geht aber hervor, daß eine solche potentielle Verdunstung nicht unbedingt im gesamten Winterhalbjahr möglich sein muß. Nur in den Monaten Dezember, Januar und Februar liegt in der Regel der Wassergehalt des Bodens genügend lange über 90% des maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts (Erklärung unter 4. 6.), was wir als Voraussetzung für eine potentielle Verdunstung ansehen. Es ist daher unserer Meinung nach unzulässig, die Wasserabgabe des Bodens während eines 6 Monate dauernden „Winterhalbjahres“ generell nach Formeln für die potentielle Verdunstung zu berechnen. Vielmehr muß der Bodenwassergehalt W_n' (Erklärung unter 4. 6.) mindestens bei der Betrachtung von Einzeljahren, wahrscheinlich aber auch schon bei der Berechnung von Mittelwerten der Gebietsverdunstung für die Monate März und Oktober/November mitberücksichtigt werden. Ob diese grundsätzliche Forderung praktisch von Bedeutung ist, ist eine andere Frage; möglicherweise ergeben sich bei Berücksichtigung der Bodenwasserverhältnisse zur Berechnung einer aktuellen Verdunstung nur geringe Unterschiede gegenüber den Werten der potentiellen Verdunstung.

*) Es sei nochmals erwähnt, daß in dieser Untersuchung noch keine Änderung der *Kalweit'schen* Methode auf Grund der Bemerkungen unter 4.9 bis 4.11 durchgeführt wurde.

Tab. 12 Ausdrücke A und B, in denen verschiedenartig abgewandelte Größen des Abzugsgliedes z enthalten sind

	A									B								
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Keitum	-7.1	-6.1	-6.3	-6.6	-6.2	-6.2	-6.2	-6.3	-6.5	-6.6	-6.5	-6.3	-6.2	-6.3	-6.5	-6.6	-6.5	-6.3
Flensburg	-7.4	-6.0	-7.3	-6.8	-6.0	-6.8	-6.3	-6.6	-6.9	-6.8	-6.9	-6.3	-6.8	-6.6	-6.9	-6.8	-6.6	-6.4
Husum	-7.4	-6.0	-7.0	-6.8	-6.0	-6.5	-6.3	-6.6	-6.8	-6.8	-6.8	-6.3	-6.5	-6.6	-6.8	-6.8	-6.6	-6.4
Kiel	-18.0	-15.8	-16.8	-17.4	-15.7	-16.0	-16.1	-16.5	-17.1	-17.2	-17.1	-16.1	-16.0	-16.5	-17.1	-17.2	-16.8	-16.4
Eutin	-19.6	-15.8	-17.7	-17.4	-16.6	-17.0	-16.3	-16.8	-17.5	-17.5	-17.5	-16.3	-17.0	-16.8	-17.5	-17.5	-17.4	-16.6
Neumünster	-11.4	-8.4	-9.9	-10.2	-8.5	-9.5	-8.9	-9.3	-9.6	-9.7	-9.6	-8.9	-9.5	-9.3	-9.6	-9.7	-9.4	-9.0
Meldorf	-7.2	-8.0	-6.7	-6.7	-6.0	-6.4	-6.3	-6.5	-6.7	-6.7	-6.7	-6.3	-6.4	-6.5	-6.7	-6.7	-6.5	-6.4
Kirchdorf/Poel	-45.3	-37.1	-37.2	-39.0	-39.5	-36.3	-37.7	-38.7	-39.9	-40.2	-40.4	-37.7	-36.3	-38.7	-39.9	-40.2	-40.4	-39.0
Segeberg	-14.2	-11.0	-12.3	-12.7	-11.1	-11.7	-11.4	-11.8	-12.3	-12.4	-12.1	-11.4	-11.7	-11.8	-12.3	-12.4	-12.1	-11.7
Lübeck	-26.6	-22.0	-24.4	-23.8	-22.1	-22.7	-22.5	-23.2	-24.2	-24.1	-23.8	-22.5	-22.7	-23.2	-24.2	-24.1	-23.8	-23.0
Schwerin	-25.2	-24.2	-28.1	-27.1	-25.2	-25.1	-25.5	-26.8	-27.9	-27.8	-27.5	-25.5	-25.1	-26.8	-27.9	-27.8	-27.5	-26.6
Hamburg	-12.9	-10.8	-11.7	-11.7	-10.9	-11.3	-11.5	-11.9	-12.2	-12.2	-12.0	-11.5	-11.3	-11.9	-12.2	-12.2	-12.0	-11.7
Lüneburg	-35.5	-24.0	-30.7	-27.0	-24.8	-27.1	-25.0	-27.5	-28.6	-28.3	-28.6	-25.0	-27.1	-27.5	-28.6	-28.3	-27.9	-26.7
Norderney	-20.3	-18.2	-18.3	-18.5	-18.3	-18.1	-18.6	-19.1	-19.4	-19.5	-19.4	-18.6	-18.1	-19.1	-19.4	-19.5	-19.4	-19.4
Borkum	-18.5	-16.0	-15.7	-17.1	-16.1	-15.6	-16.1	-16.5	-16.8	-17.2	-17.0	-16.1	-15.6	-16.5	-16.8	-17.2	-17.0	-16.8
Jever	-9.1	-8.4	-8.8	-8.8	-8.4	-8.6	-8.8	-9.0	-9.2	-9.2	-9.0	-8.8	-8.6	-9.0	-9.2	-9.2	-9.0	-8.9
Wilhelmshaven	-17.7	-15.6	-16.6	-16.4	-15.7	-15.9	-16.4	-16.8	-17.3	-17.2	-17.0	-16.4	-15.9	-16.8	-17.3	-17.2	-17.0	-16.7
Bremerhaven	-28.4	-21.7	-23.8	-23.8	-22.1	-22.1	-22.9	-23.8	-24.6	-24.6	-24.2	-22.9	-22.1	-23.8	-24.6	-24.6	-24.2	-23.6
Emden	-15.5	-13.3	-14.1	-14.2	-13.4	-13.8	-13.9	-14.4	-14.7	-14.7	-14.6	-13.9	-13.4	-14.4	-14.7	-14.7	-14.6	-14.2
Elsfleth	-18.5	-15.6	-16.8	-17.0	-15.8	-16.5	-16.4	-17.0	-17.4	-17.5	-17.2	-16.4	-15.8	-17.0	-17.4	-17.5	-17.2	-16.7
Oldenburg	-18.7	-15.7	-17.4	-17.4	-15.7	-17.9	-16.6	-17.4	-17.7	-17.7	-17.4	-16.6	-15.7	-17.4	-17.7	-17.7	-17.4	-16.7
Bremen	-28.1	-21.7	-23.8	-23.3	-22.9	-22.7	-22.9	-23.9	-24.6	-24.5	-24.4	-22.9	-22.7	-23.9	-24.6	-24.5	-24.4	-23.5
Lönningen	-15.8	-13.3	-14.7	-14.4	-13.2	-14.5	-14.1	-14.8	-15.1	-15.0	-14.7	-14.1	-14.5	-14.8	-15.1	-15.0	-14.7	-14.3
Lingen	-15.8	-13.3	-14.0	-14.9	-13.3	-14.5	-14.2	-14.9	-15.1	-15.2	-14.9	-14.2	-14.5	-14.9	-15.1	-15.2	-14.9	-14.4
Osnabrück	-7.3	-6.1	-6.5	-6.7	-6.0	-6.5	-6.4	-6.7	-6.8	-6.8	-6.7	-6.4	-6.5	-6.7	-6.8	-6.8	-6.7	-6.5
Herford	-15.6	-13.2	-14.4	-13.8	-13.5	-13.6	-14.0	-14.5	-14.9	-14.7	-14.7	-14.0	-13.6	-14.5	-14.9	-14.7	-14.7	-14.3
Hannover	-29.4	-22.1	-23.4	-24.8	-23.1	-22.2	-23.2	-24.0	-24.9	-25.1	-24.8	-23.2	-22.2	-24.0	-24.9	-25.1	-24.8	-24.0
Hildesheim	-34.8	-24.6	-26.8	-25.9	-28.1	-25.0	-25.6	-26.7	-27.8	-27.7	-28.0	-25.6	-25.0	-26.7	-27.8	-27.7	-28.0	-26.7
Celle	-19.2	-15.6	-18.7	-16.8	-15.7	-17.4	-16.6	-17.3	-17.9	-17.7	-17.4	-16.6	-17.4	-17.3	-17.9	-17.7	-17.4	-16.8
Braunschweig	-32.9	-21.6	-26.6	-24.3	-22.9	-24.6	-23.7	-25.1	-26.0	-25.8	-25.6	-23.7	-24.6	-25.1	-26.0	-25.8	-25.6	-24.4
Helmstedt	-33.0	-24.1	-27.0	-26.7	-25.1	-25.3	-25.6	-26.8	-27.7	-27.7	-27.4	-25.6	-25.3	-26.8	-27.7	-27.7	-27.4	-26.4
Gardelegen	-44.9	-30.1	-35.1	-34.5	-32.0	-32.9	-32.1	-33.9	-35.1	-35.1	-34.8	-32.1	-32.9	-33.9	-35.1	-35.1	-34.8	-33.3
Magdeburg	-64.2	-36.5	-42.8	-44.0	-42.8	-40.4	-38.9	-41.3	-43.1	-43.2	-43.1	-38.9	-40.4	-41.3	-43.1	-43.2	-43.1	-40.5
Mittel	-22.0	-17.0	-18.8	-18.7	-17.7	-17.9	-17.8	-18.6	-19.2	-19.2	-19.0	-17.8	-17.9	-18.6	-19.2	-19.2	-19.0	-18.3

4. 10. Berechnung des Sättigungsdampfdrucks

Es ist üblich, bei der Anwendung verschiedener Verdunstungsformeln das Tagesmittel des Sättigungsdampfdrucks E , das man zur Berechnung des Sättigungsdefizits ($E-e$) benötigt, aus der Tagesmitteltemperatur T abzuleiten. Auch Kalweit verfährt in dieser Weise, und man wird in den meisten Fällen gar nicht anders verfahren können, da in der Klimakunde (7), die das Material zu klimatologischen Untersuchungen liefert, die Tagesmitteltemperatur T die eine und der mittlere tägliche Dampfdruck e die andere Größe ist, die man zur Berechnung von ($E-e$) zur Verfügung hat. Da die Formeln Kalweits, besonders bei der Wahl der Konstanten, auf diese Bestimmung von ($E-e$) abgestellt wurden, macht man wahrscheinlich auch keinen großen Fehler, wenn man bei der Anwendung dieser Formeln in der angegebenen Weise verfährt. Man soll sich aber darüber im klaren sein, daß zwischen T und E kein linearer Zusammenhang besteht und die Berechnung des Tagesmittels von E nur dann einwandfrei und mit dem Tagesmittel von e vergleichbar ist, wenn man E für jeden einzelnen Termin bestimmt und das Tagesmittel dann aus diesen Terminwerten von E bildet. Ein straffer Zusammenhang besteht zwischen dem von der Tagesmitteltemperatur T hergeleiteten E und dem aus drei Terminwerten berechneten offenbar nicht. Aber einen gewissen Ausgleich zwischen beiden Größen könnte man künftig bei Betrachtung der Monatsmittelwerte vielleicht erreichen, indem man die von T abgeleiteten E -Werte mit einem Faktor F multipliziert, dessen Größe man aus der nachstehenden Untersuchung abschätzen kann.

Zunächst wurden für Emden für die Jahre 1950—1955 die Quotienten F aus dem mit Hilfe der drei Terminwerte von E berechneten Tagesmittelwerten des Sättigungsdampfdruckes (E_E) und den vom Tagesmittel der Temperatur abgeleiteten (E_T) gebildet, und es ergaben sich folgende Mittelwerte für $F = \frac{E_E}{E_T}$:

Tab. 13 Mittelwerte von $F = \frac{E_E}{E_T}$ für Emden (1950—1955)

Monat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
F	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01

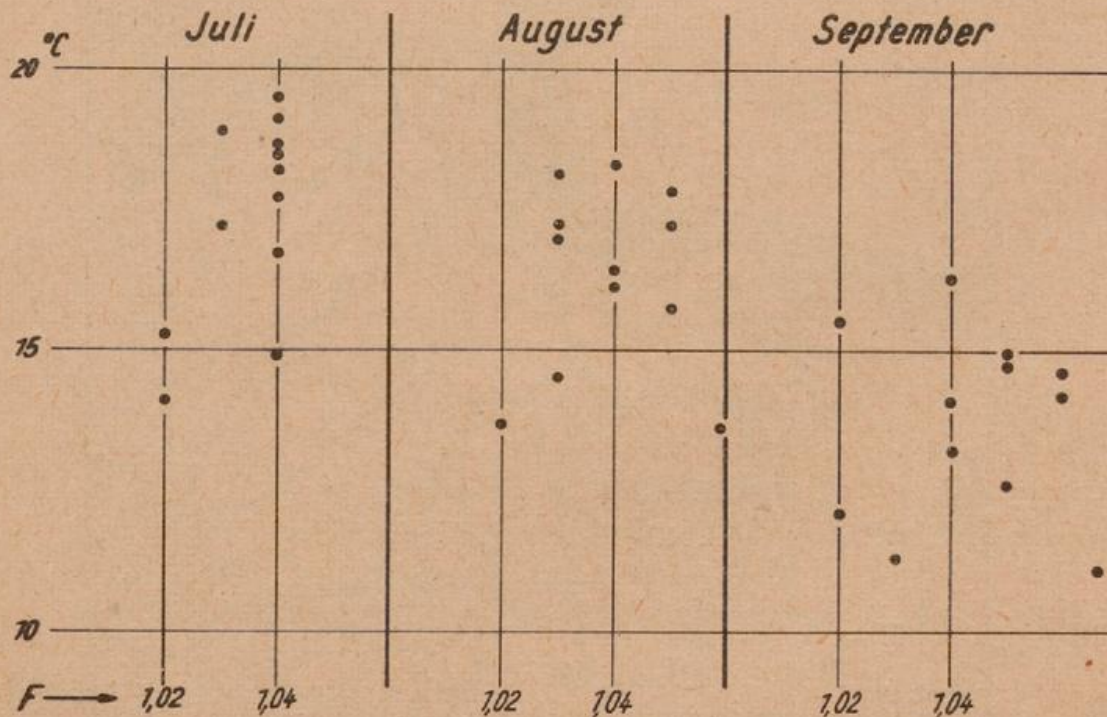


Abb. 3

Beziehung zwischen den F -Werten für 12 Stationen der Bundesrepublik und den Monatsmitteln der Temperatur

Es ist also ein Jahresgang unverkennbar vorhanden, und wir müßten den Sättigungsdampfdruck E_T mit den Faktoren F multiplizieren, um Werte für das Tagesmittel des Sättigungsdampfdrucks zu erhalten, die größenordnungsmäßig denen entsprechen, die man aus den Terminwerten von E ermitteln würde.

Auf gleiche Weise wurden die F -Werte für 12 Stationen der Bundesrepublik und für die Monate Juli, August und September 1955 ermittelt; man sieht in Abb. 3 diese F -Werte monatsweise in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Die Streuung wird offenbar mit sinkendem Temperaturniveau größer; sonst aber errechnete sich für alle drei Monate ein mittleres $F = 1.04$. Nun traten in der fünfjährigen Reihe von Emden die höchsten monatlichen Einzelwerte von F ausgerechnet in den Monaten Juli und August 1955 auf, so daß wir vielleicht mit dem Beispiel der Abb. 3 zu hohe F -Werte erhalten. Wir möchten deshalb die Werte der Tabelle 13 für Emden als allgemein gültig für den norddeutschen Untersuchungsraum ansehen.

4. 11. Berechnung des Abzugsgliedes

Bei der Berechnung des Abzugsgliedes für einen Monat steht der Verdunstungsanspruch dieses Monats, charakterisiert durch S , dem Wasserdargebot $U' + W_n'$ gegenüber. Das Wasserdargebot besteht also aus dem effektiven Niederschlag des ganzen Monats, d. h. aus der niedergegangenen Wassermenge abzüglich der durch den Abfluß verlorengegangenen Menge. Zu diesem effektiven Niederschlag soll der im Boden bereitstehende Wasservorrat hinzugezählt werden. Hier müßte aber nicht der mittlere nutzbare Bodenwasservorrat eines Monats herangezogen werden, sondern der Wasserbetrag, der am Monatsanfang bereits im Boden war. Der mittlere Bodenwasservorrat eines Monats hängt vom effektiven Niederschlag dieses Monats ab. Nur im Anfangswert des Bodenwasservorrats für einen Monat haben wir eine vom effektiven Niederschlag des betreffenden Monats unbeeinflusste Größe vor uns.



Abb. 4

Potentielle Verdunstung (mm) im Winterhalbjahr (nach Kalweit)

5. Ergebnisse der Berechnung monatlicher Mittelwerte der Gebietsverdunstung mit Hilfe von Kalweit's Gleichungen

5. 1. Potentielle Verdunstung

Mit Hilfe der im Abschnitt 3 beschriebenen Gleichung für V_w wurde unter Verwendung der S-Werte aus Tabelle 1 und eines einheitlichen x-Wertes ($x = 3$) entsprechend den Ausführungen im Abschnitt 4. 7. die „potentielle Verdunstung für die Wintermonate Oktober — März“ für die Klimagebiete berechnet und in Tabelle 14 zusammengestellt. Abb. 4 zeigt die Verteilung der Summe der potentiellen Verdunstung für das Winterhalbjahr. Die Linien gleicher potentieller Verdunstung wurden dabei unter strenger Beachtung der Meßwerte gezogen. Die meteorologischen Stationen sind aber teilweise in ihren Messungen stark örtlichen Einflüssen unterworfen, so daß man den Zahlenwerten getrost 1—2 mm zuzählen oder abziehen könnte, um ausgeglichener Isolinien zu erreichen. Aber auch so zeigt sich in klarer Abhängigkeit vom Sättigungsdefizit eine Zunahme der winterlichen Verdunstung von der Küste zum Binnenlande hin.

Deutet man den ersten Teil der ebenfalls im Abschnitt 3 beschriebenen Gleichung für V_s , nämlich den Ausdruck

$$V_s (\text{pot}) = 57 + 14 S$$

(ohne „Abzugsglied“), als Maß für die potentielle Verdunstung in den Sommermonaten, so kann man — wie dies in Tabelle 14 geschah — für den Zeitraum April — September monatliche Werte der potentiellen Verdunstung angeben. Die Abb. 5 zeigt Halbjahressummen der potentiellen Verdunstung für das Sommerhalbjahr; die Summenwerte schwanken im Untersuchungsgebiet zwischen 500 und 650 mm.



Abb. 5

Potentielle Verdunstung (mm) im Sommerhalbjahr (nach Kalweit)

5. 2. Aktuelle Verdunstung

Von den in Tabelle 14 enthaltenen Monatswerten der potentiellen Verdunstung wurden nun die Ausdrücke A und B der Tabelle 12 abgezogen, die einmal das Abzugsglied in der Kalweit'schen Form z_0^2 und zum anderen in der Form z' enthalten.

Tab. 14 **Monatliche Mittelwerte der potentiellen Gebietsverdunstung (mm)**
(berechnet mit Hilfe der Kalweit'schen Gleichungen)

Klimastation	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Wi	So	Jahr
Keitum	8	4	1	1	1	2	70	78	86	88	86	77	17	485	502
Flensburg	10	4	1	1	2	7	78	92	102	100	91	79	25	542	567
Husum	8	2	1	1	1	7	77	89	98	98	91	81	20	534	554
Kiel	5	2	1	1	1	5	72	81	89	89	81	75	15	487	502
Eutin	8	1	1	1	1	4	77	88	99	96	92	77	16	529	545
Neumünster	8	1	1	1	1	5	78	95	102	102	91	79	17	547	564
Meldorf	8	2	1	1	1	7	77	91	96	96	89	79	20	528	548
Kirchdorf/Poel	10	2	2	1	2	7	77	86	92	93	91	82	24	521	545
Segeberg	10	2	1	1	2	7	79	92	100	102	92	81	23	546	569
Lübeck	8	2	1	1	1	5	77	88	98	95	88	78	18	524	542
Schwerin	11	4	1	1	4	8	82	99	110	110	102	91	29	594	623
Hamburg	11	4	1	1	2	10	85	98	106	106	98	88	29	581	610
Lüneburg	11	4	1	1	4	10	84	100	113	112	102	88	31	599	630
Norderney	16	7	2	2	4	5	72	79	85	85	86	84	36	491	527
Borkum	11	2	2	1	1	5	71	79	85	91	89	84	22	499	521
Jever	7	2	1	1	1	5	75	84	88	89	84	78	17	498	515
Wilhelmshaven	10	2	1	1	1	8	77	86	92	92	88	81	23	516	539
Bremerhaven	14	5	1	2	2	8	79	95	102	102	100	88	32	566	598
Emden	11	4	1	1	4	10	81	92	99	99	95	84	31	550	581
Elsfleth	11	4	1	1	4	10	81	93	99	100	93	82	31	548	579
Oldenburg	8	4	2	1	4	10	81	95	100	102	92	82	29	552	581
Bremen	14	5	2	2	5	13	84	100	109	107	102	89	41	591	632
Löningen	10	4	2	1	4	10	81	96	103	100	92	81	31	553	584
Lingen	11	5	4	1	5	11	86	102	107	107	99	86	37	587	624
Osnabrück	13	5	2	2	5	11	81	99	100	102	93	84	38	559	597
Herford	14	7	2	4	4	11	84	96	103	100	96	86	42	565	607
Hannover	14	7	4	2	4	8	86	99	109	112	105	92	39	603	642
Hildesheim	17	10	5	4	7	14	86	103	113	113	112	95	57	622	679
Celle	11	7	1	2	4	13	85	100	110	106	98	84	38	583	621
Braunschweig	17	8	4	4	7	14	89	109	116	117	109	93	54	633	687
Helmstedt	16	5	4	1	4	13	88	106	113	113	105	93	43	618	661
Gardelegen	11	4	1	1	2	10	84	100	110	112	103	89	29	598	627
Magdeburg	19	7	4	2	5	17	92	114	127	128	120	100	54	681	735

Auf diese Weise kamen wir in Tabelle 15 zu Monatswerten der aktuellen Verdunstung V_s , die sich trotz der verschiedenartigen Behandlung des Abzugsgliedes z kaum voneinander unterscheiden. Die Halbjahressummen dieser aktuellen Verdunstung wurden in Abb. 6 eingetragen. Wir erkennen relativ hohe Werte der aktuellen Verdunstung in einem schmalen Landstrich, der sich über Schleswig-Holstein hinwegzieht. Es ist dies ein Gebiet mit hohen Niederschlagsmengen. Nach Osten und Süden hin nehmen die Werte der aktuellen Verdunstung mit den Niederschlagsmengen ab. Diese enge Beziehung zwischen der aktuellen Verdunstung und den Niederschlagsverhältnissen ist auffallend.

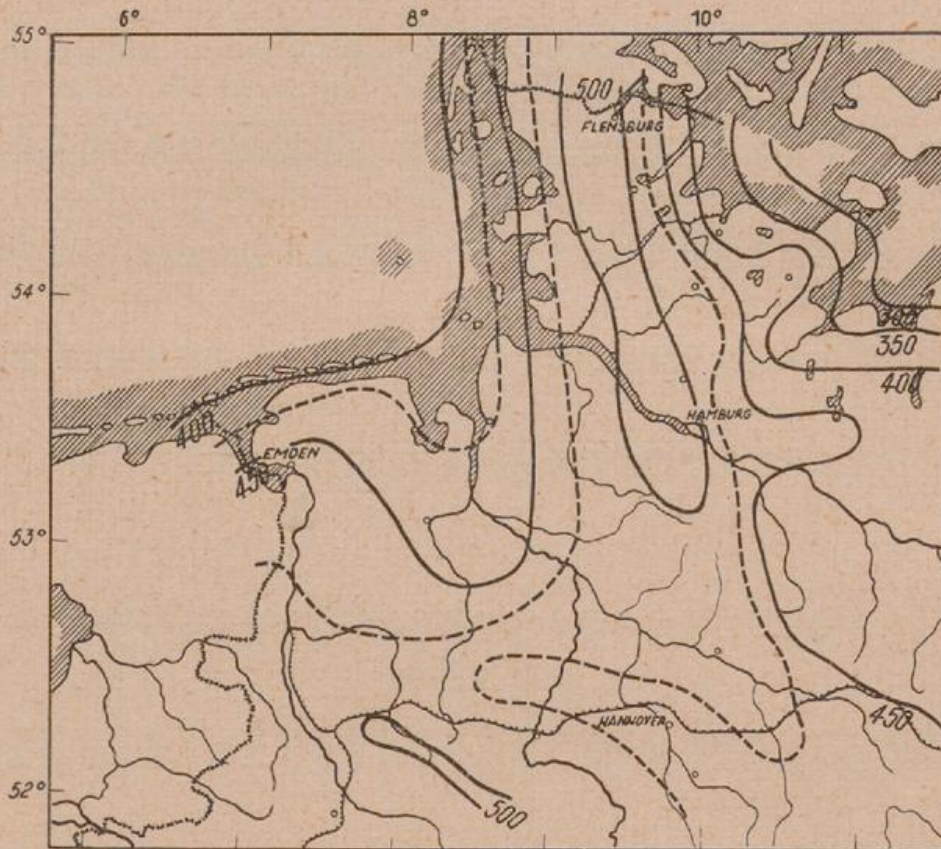


Abb. 6
Aktuelle Verdunstung (mm) im Sommerhalbjahr (nach Kalweit)

5. 3. Diskussion der Ergebnisse

Die Werte der potentiellen Verdunstung in Tab. 14 erschienen etwas zu hoch. Die Verteilungskarten der Abb. 4 und 5 ähneln — wie bei der Verwendung des Sättigungsdefizits als einziger meteorologischer Größe nicht anders zu erwarten war — in der Führung der Isolinien der Karte des mittleren Sättigungsdefizits in Nordwest-Deutschland von D a m m a n n (13).

Karten der aktuellen Verdunstung — wie wir sie in der Abb. 6 vor uns haben — zu zeichnen, ist eigentlich nicht sinnvoll, wenn bei der Bestimmung der Verdunstungswerte die Bodenfeuchte mit berücksichtigt wird. Denn dann muß man eben die Bodenverhältnisse mit berücksichtigen und wird in der Grenzlinie zwischen zwei verschiedenen Bodenarten auch eine Grenzlinie zwischen zwei Gebieten mit einer unterschiedlichen aktuellen Verdunstung sehen müssen. In unserer Abb. 6 brauchten wir diese Bedenken aber nicht zu haben, weil sich in dieser Karte der aktuellen Verdunstung praktisch nur der Einfluß von zwei meteorologischen Größen widerspiegelt, nämlich vom Sättigungsdefizit und vom mittleren Jahresniederschlag. Die Größe der Ausdrücke A und B , in denen das Abzugsglied enthalten ist, wird entscheidend nur von der Variablen y bestimmt, während die Unterschiedsgröße und die Bodenfeuchte kaum ins Gewicht fallen. Zwischen dem Abzugsglied und der Variablen y ergab sich ein sehr enger Zusammenhang, was zum Zeichnen des Diagramms der Abb. 7 berech-

Tab. 15 Monatliche Mittelwerte der aktuellen Gebietsverdunstung (mm)

Klimastation	berechnet mit z_0^2												So	Jahr*)		
	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	So	Jahr*)	April	Mai	Juni	Juli			Aug.	Sept.
Keitum	63	72	80	81	80	71	447	464	64	72	79	81	79	71	446	463
Flensburg	71	86	95	93	85	72	502	527	72	85	95	93	84	73	502	527
Husum	70	83	91	91	85	74	494	514	71	82	91	91	84	75	494	514
Kiel	54	65	72	72	65	59	387	402	56	64	72	72	64	59	387	402
Eutin	57	72	81	79	75	60	424	440	61	71	81	78	75	60	426	442
Neumünster	67	87	92	92	82	69	489	506	69	86	92	92	82	70	491	508
Meldorf	70	85	89	89	83	73	489	509	71	84	89	89	82	73	488	508
Kirchdorf/Poel	32	49	55	54	51	46	287	311	39	47	52	53	51	43	285	309
Segeberg	65	81	88	89	81	69	473	496	68	80	88	90	80	69	475	498
Lübeck	50	66	74	71	66	55	382	400	54	65	74	71	64	55	383	401
Schwerin	57	75	82	83	77	66	440	469	56	72	82	82	74	64	430	459
Hamburg	72	87	94	94	87	77	511	540	73	86	94	94	86	76	509	538
Lüneburg	48	76	82	85	77	61	429	460	59	72	84	84	74	61	434	465
Norderney	52	61	67	66	68	66	380	416	53	60	66	65	67	65	376	412
Borkum	52	63	69	74	73	68	399	421	55	62	68	74	72	67	398	420
Jever	66	76	79	80	76	69	446	463	66	75	79	80	75	69	444	461
Wilhelmshaven	59	70	75	76	72	65	417	440	61	69	75	75	71	64	415	438
Bremerhaven	51	73	78	78	78	66	424	456	56	71	77	77	76	64	421	453
Emden	65	79	85	85	82	70	466	497	67	78	84	84	80	70	463	494
Elsfleth	62	77	82	83	77	65	446	477	65	76	82	82	76	65	446	477
Oldenburg	62	79	83	85	76	64	449	478	64	78	82	84	75	65	448	477
Bremen	56	78	85	84	79	66	448	489	61	76	84	82	78	65	446	487
Lönningen	65	83	88	86	79	66	467	498	67	81	88	85	77	67	465	496
Lingen	70	89	93	92	86	71	501	538	72	87	92	92	84	72	499	536
Osnabrück	74	93	93	95	87	77	519	557	75	92	93	95	86	77	518	556
Herford	68	83	89	86	82	72	480	522	70	81	88	85	81	72	477	519
Hannover	57	77	86	87	82	70	459	498	63	75	84	87	80	68	457	496
Hildesheim	51	78	86	87	84	70	456	513	60	76	85	85	84	68	458	515
Celle	66	84	91	89	82	67	479	517	68	83	92	88	81	67	479	517
Braunschweig	56	87	89	93	86	68	479	533	65	84	90	91	83	69	482	536
Helmstedt	55	82	86	86	80	68	457	500	62	79	85	85	78	67	456	499
Gardelegen	39	70	75	77	71	56	388	417	52	66	75	77	68	56	394	423
Magdeburg	28	77	84	84	77	60	410	464	53	73	84	85	77	59	431	485

*) unter Verwendung von Vw der Tabelle 14 berechnet

tigte. In dieser Abb. 7 zeigen die Einzelwerte und die Regressionsgerade den Zusammenhang zwischen der Halbjahressumme des Ausdruckes B, der das Abzugsglied enthält, und dem mittleren Jahresniederschlag \bar{N} an. Man kann also diese Halbjahressumme von B mit Hilfe des Diagrammes der Abb. 7 leicht bestimmen, ohne die umständliche Berechnung des Abzugsgliedes aus S, N, A und W_n durchführen zu müssen, wenn man nur den mittleren Jahresniederschlag \bar{N} kennt. Die Halbjahressumme teilt man dann nach folgenden Prozentzahlen auf die einzelnen Monate auf:

April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.
16	17	17	17	17	16 ‰

Auf diese Weise erhält man fast die gleichen Monatswerte von B und gleiche Mittelwerte der monatlichen Gebietsverdunstung, wie man sie unter Verwendung von z' in K a l w e i t s Gleichungen berechnet hätte. Diese Feststellung berechtigt zu einer Ablehnung des K a l w e i t 'schen Verfahrens, ein Abzugsglied unter Berücksichtigung schwer zu bestimmender Größen zu berechnen, da dieses gegenüber einfacheren Verfahren (z. B. der Berechnung der halbjährlich von der potentiellen Verdunstung abzuziehenden Beträge nach Abb. 7 und prozentuale Aufteilung auf die Monate) keine genaueren Ergebnisse liefert.

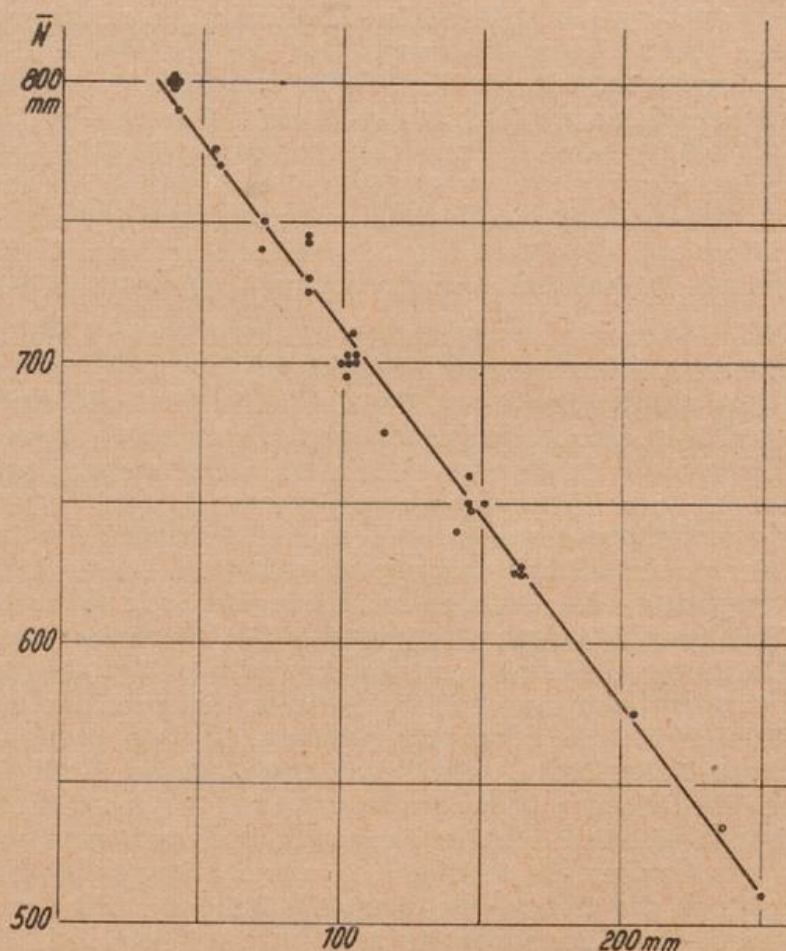


Abb. 7

Beziehung zwischen dem mittleren Jahresniederschlag \bar{N} und der Halbjahressumme des Ausdruckes B, der das Abzugsglied enthält (Erklärung S. 19)

In der Größenordnung liegen die ermittelten Halbjahres-Werte der aktuellen Verdunstung etwas höher als die Zahlenangaben der Wasserwirtschaftler, die diese auf Grund anderer Berechnungen fanden. In den Monatswerten ist der Gang der Verdunstung über das Sommerhalbjahr hinweg bei K a l w e i t s Ergebnissen schwächer ausgeprägt als bei anderen Berechnungen. Oder anders ausgedrückt: die Unterschiede in der aktuellen Verdunstung zwischen den Frühjahrs- und Herbstmonaten einerseits

und den Sommermonaten andererseits sind bei K a l w e i t geringer als bei anderen Autoren.

Wir müssen feststellen, daß die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung nicht befriedigen können, wenn auch in der Methode K a l w e i t s ein wertvoller Beitrag zur Weiterentwicklung der Verfahren zur Berechnung der aktuellen Gebietsverdunstung zu sehen ist.

6. Möglichkeiten einer Verbesserung der Methoden zur Berechnung monatlicher Mittelwerte der Gebietsverdunstung

Nachdem uns die Ergebnisse der Berechnungen mit Hilfe von K a l w e i t s Gleichungen nicht befriedigten, müssen wir uns überlegen, wie wir zu besser brauchbaren Methoden kommen können.

Als bester Weg, die Gebietsverdunstung zu berechnen, wird eine Zweiteilung des Verfahrens angesehen, nämlich als erster Schritt die Bestimmung der potentiellen Verdunstung und als zweiter Schritt die Reduktion dieser Werte auf aktuelle Verdunstungsmengen durch Anbringen eines Abzugsgliedes. Dieses Vorgehen hatte offensichtlich auch K a l w e i t im Auge.

Die potentielle Verdunstung hängt in erster Linie von den makrometeorologischen Bedingungen ab; diese Größe kann daher aus den Beobachtungsunterlagen, welche uns das Klimanetz liefert, ermittelt werden. Es ist möglich, Karten der potentiellen Verdunstung in ähnlicher Weise zu zeichnen, wie etwa Karten der Temperatur oder des Niederschlages. Allerdings wird die von K a l w e i t geübte Methode, lediglich das Sättigungsdefizit zur Berechnung der potentiellen Verdunstung heranzuziehen, wohl nicht ausreichen, und man wird daran denken müssen, auch andere meteorologische Faktoren, wie den Wind und die Strahlung, direkt mit zu berücksichtigen, wie das beispielsweise P e n m a n (14) mit seiner sehr bekannt gewordenen Methode tut.

Die P e n m a n 'sche Gleichung ist zweifellos ein physikalisch gut fundiertes und praktisch gut brauchbares Hilfsmittel zur Berechnung der potentiellen Verdunstung. Man hat in England (15) auf der Basis von P e n m a n 's Methode einen Berechnungs-Beratungsdienst eingerichtet, der gut arbeitet, und wir könnten diese Methode vielleicht auch bei uns für praktische Zwecke einführen, wenn sie uns für Perioden von einer Woche oder länger gute Näherungswerte lieferte. Es fehlt aber noch an einer ausreichenden Zahl von Untersuchungen, die einen Vergleich der berechneten mit gemessenen Werten der potentiellen Verdunstung gestatten. Dieser Mangel macht sich vor allem bei der Anwendung der P e n m a n 'schen Methode im mitteleuropäischen Raum bemerkbar. Bei Berechnungen der potentiellen Verdunstung mit Hilfe der P e n m a n 'schen Gleichung in Mittel- und Süddeutschland (3), also in kontinentaleren Klimagebieten, ergaben sich nur relativ geringe Unterschiede zu den Verdunstungsmengen des Küstengebietes, was eine gewisse Skepsis gegenüber der P e n m a n 'schen Methode zur Folge hatte, zumal man mit anderen Methoden zur Berechnung der potentiellen Verdunstung (T h o r n t h w a i t e, H a u d e) zu wesentlich stärkeren Gradienten der potentiellen Verdunstung von den maritimen zu den kontinentalen Klimagebieten hin kommt. Es erscheint dringend notwendig, durch Messungen mit Evapotranspirometern die Frage der Brauchbarkeit der P e n m a n 'schen Methode in verschiedenartigen Klimagebieten zu klären und sie auf Grund der Meßergebnisse gegebenenfalls zu verändern.

Die aktuelle Verdunstung muß man dann durch Verminderung der potentiellen Verdunstung um ein Abzugsglied ermitteln. Die Bestimmung dieses Abzugsgliedes, dessen Größe von dem für die Verdunstung zur Verfügung stehenden Wasser abhängt, ist eine schwierige Aufgabe, da der effektive Niederschlag, also die um Sickerwasser und Abfluß verminderte Niederschlagsmenge, schwer zu bestimmen ist, und da ferner der Bodenwasservorrat von der Bodenart und von den Grundwasserverhältnissen abhängt. Während man die potentielle Verdunstung als eine über große Gebiete hinweg einheitliche Größe ansehen kann, die sich auf größere Entfernungen nur allmählich ändert, ist beim Abzugsglied auf kurze Entfernung — etwa beim Übergang vom kultivierten Moor auf das unkultivierte — mit starken Schwankungen zu rechnen, und man

müßte eigentlich für jeden Standort ein anderes Abzugsglied errechnen. Für ein größeres Gebiet muß man dann aus den Einzelwerten für verschiedenartige Flächen ein mittleres Abzugsglied ermitteln. Hand in Hand mit einer Verbesserung der Methode zur Berechnung der potentiellen Verdunstung wird daher versucht werden müssen, auch zu einer besseren Bestimmung des Abzugsgliedes zu kommen.

Literatur

- (1) Robertson, G. W.: The standardization of the measurement of evaporation as a climatic factor. WMO Techn. Note No. 11 (1955)
- (2) Uhlig, S.: Bestimmung des Verdunstungsanspruchs der Luft mit Hilfe von Piche-Evaporimetern. Mitt. Dt. Wetterd. Nr. 13 (1955)
- (3) Uhlig, S.: Zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung bewachsenen Bodens. Wasserwirtschaft 44, 309 (1954)
- (4) Uhlig, S.: Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten. Mitt. Dt. Wetterd. Nr. 6 (1954)
- (5) Haude, W.: Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. Dt. Wetterd. Nr. 11 (1955)
- (6) Kalweit, H.: Der Wasserhaushalt. Berlin 1953.
- (7) Klimakunde des Deutschen Reiches, Bd. II. Berlin 1939.
- (8) Schirmer, H.: Mittlere Jahressummen des Niederschlags (mm) für das Gebiet der Bundesrepublik. Bad Kissingen 1955.
- (9) Streck, O.: Wasserwirtschaft und Gewässerkunde. Berlin — Göttingen — Heidelberg 1953.
- (10) Uhlig, S.: Der mittlere Jahresgang des ausschöpfbaren Bodenfeuchtegehalts. Wasserwirtschaft 46, 121 (1956)
- (11) Uhlig, S.: Die Charakterisierung der Bodenfeuchteverhältnisse mit Hilfe relativer Zahlenwerte. Z. Acker- u. Pflanzenbau 98, 313 (1954)
- (12) Krische, P.: Die Verteilung der landwirtschaftlichen Hauptbodenarten im Deutschen Reiche. Berlin 1921.
- (13) Dammann, W.: Zur Klimatologie des Sättigungsdefizits. Ann. Meteor. 6, 271 (1953/54)
- (14) Penman, H. L.: A general survey of meteorology in agriculture and an account of the physics of irrigation control. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 75, 293 (1949)
- (15) Anonym: The Calculation of Irrigation Need—Min. Agr. Fish., Techn. Bull. No. 1, London (1954)

