

Die Bestimmung der Verdunstung und ihrer Einwirkung auf die Wasserläufe von Finnland

Von

ALLAN SIRÉN

Das Studium des Zusammenhanges zwischen Niederschlag und Abfluss ist eine der Hauptaufgaben in der hydrologischen Forschung. Wir bewegen uns hier auf einem Gebiet, wo der Meteorologe und der Wasserbauer, die Wissenschaft und die Technik einander bei Lösung eines gemeinsamen Problems begegnen. Die hydrologische Prognose, welche für alle von der Wassermenge abhängige ökonomische Tätigkeit notwendig ist, muss auf einer Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss aufgebaut werden, und bei Bestimmung dieses Zusammenhanges er bietet die Berechnung der Verdunstung besondere Schwierigkeiten. Um dieses Problem ist schon, namentlich in Mitteleuropa, eine reiche Literatur entstanden. Auf grund unserer besonderen hydrologischen Verhältnisse können die Ergebnisse der Forschungen in anderen Ländern bei uns nur in geringem Masse angewendet werden.

Die durchschnittliche Verdunstung von einem Gebiet.

Bei einer grossen Anzahl von Wasserläufen kennen wir die Wassermenge, die das Gewässer in einer gewissen Zeit ableitet. Wir kennen auch die Grösse des Gebietes, das von jedem Stromlauf entwässert wird, diese bezeichnen wir als Niederschlagsareal F . Aus der Wassermenge und dem Niederschlagsareal können wir die Wassermenge berechnen, die je Flächeneinheit abfließt. Drücken wir diese Wassermenge als Abflusshöhe A in mm aus, so erhalten wir eine Zahl, welche direkt mit dem

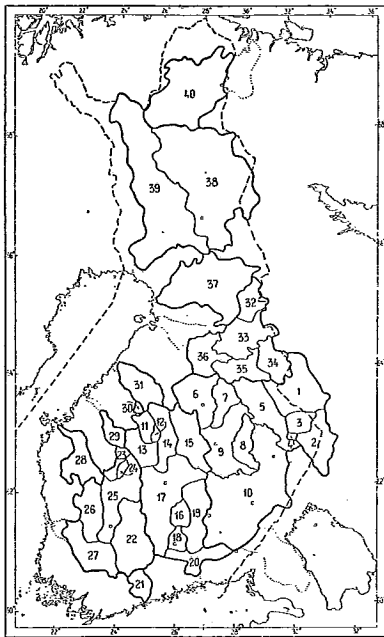
Niederschlag P über dem in Rede stehenden Gebiet vergleichbar ist. Bezeichnen wir ferner mit E den Teil des Niederschlags, welcher verdunstet und mit M den Teil, der in dem Bereich in Seen, Sümpfen oder in der Erde als Grundwasser aufgespeichert wird, so haben wir

$$(1) \quad P = E + M + A.$$

In dieser Grundgleichung lassen sich die Glieder P und A mit einiger Genauigkeit bestimmen. E und M sind vorläufig nicht der direkten Messung zugänglich, betrachten wir aber eine genügend lange Zeitspanne, so kann die Aufspeicherung vernachlässigt werden¹⁾, und die Gleichung erhält die Form:

$$(2) \quad P = E + A,$$

aus welcher die Verdunstung für die in Rede stehende Periode berechnet wird. In der folgenden Tabelle wird somit die berechnete *Landesverdunstung*



angegeben und zwar in Jahresmitteln während der Zeit von 1911—1940 für 40 Niederschlagsgebiete, über welche ziemlich sichere Niederschlags- und Abflusswerte vorhanden sind.

Die Tabelle enthält ausser dem Niederschlag P und der Verdunstung E weiter das Niederschlagsareal F , das Seenprozent L und die Mitteltemperatur für die Zeit April—Oktober t_{IV-X} . Das Material ist umfangreich genug, um einige Schlussfolgerungen zu gestatten. Von den hier angegebenen Faktoren, denen eine Einwirkung auf die Verdunstung zugeschrieben werden kann, scheint nur die Temperatur einen ausschlaggebenden Einfluss zu haben. In bezug auf die übrigen beobachten wir folgendes:

Abb. 1. Die Lage der untersuchten Niederschlagsgebiete.

1) Die Landesverdunstung ist unabhängig von

¹⁾ KARL, FICHER: Der Sinn der Gleichung Niederschlag = Abfluss + Verdunstung und Versickerung; Met. Zeitschr., Braunschweig 1924.

Tabelle 1. Jährlicher Niederschlag und Verdunstung in dem Niederschlagsareal von 40 Gewässern in Finnland durchschnittlich für die Zeit 1911—1940.

Gewässer und Ort der Abbürdung ¹⁾	F km ²	L %	IV-X C°	P mm	E mm
1 Lieksanjoki, Höpöttäjä	8,105	11.0	7.9	599	202
2 Koitajoki, Lylykoski	4,290	8.4	8.3	592	227
3 Koitereenjoki, Hiiskoski	2,115	12.5	8.1	616	248
2+ . . . +4 Koitajoki, Siikakoski	6,545	9.7	8.2	600	236
1+ . . . +5 Pielisjoki, Jakokoski	21,240	12.6	8.2	595	243
6 Iisalmi-Strasse, Vianto	5,550	7.6	8.6	549	229
7 Nilsjä-Strasse, Lastukoski	2,455	10.8	8.6	576	222
8 Juojärvi-Zufluss	2,110	21.8	8.8	581	252
6+ . . . +9 Kallavesi, Auslauf	16,285	15.3	8.7	564	224
1+					
+10 Vuoksi, Imatra	61,280	19.9	8.8	574	261
11 Kivijärvi, Auslauf	1,820	13.6	8.6	534	246
11+12 Viitasaari-Strasse, Huopanan- koski	2,275	13.7	8.6	531	235
13 Saarijärvi-Strasse	3,025	9.9	8.7	566	245
11+ . . . +14 Viitasaari+Saarijärvi-Strassen, Kapeekoski	9,515	15.3	8.9	543	260
15 Rautalampi-Strasse, Siikakoski	5,780	21.3	8.9	559	270
16 Jääsjärvi, Auslauf	1,425	26.4	9.8	591	327
11+ +17 Kyminjoki, Kalkkinen	26,475	19.5	9.2	566	301
11+ +18 Kyminjoki, Koskenniska	28,080	19.4	9.2	569	300
19 Mäntyharju-Strasse	5,495	22.5	9.6	591	324
11+ +20 Kyminjoki, Perno	36,530	19.3	9.3	573	306
21 Vandaä	1,680	2.5	10.0	645	357
22 Kuokkalankoski	8,680	14.4	9.7	566	304
23 Ähtäri-Strasse, Herraskoski	1,475	10.9	8.7	574	280
24 Pihlajavesi-Strasse, Kituis- koski	565	9.2	8.8	609	299
22+ . . . +25 Kokemäenjoki, Nokia	16,975	14.4	9.6	581	313
22+ . . . +26 Kokemäenjoki, Kiikka	21,290	13.6	9.5	584	314
22+ . . . +27 Kokemäenjoki, Harjavalta	26,025	11.8	9.6	577	311
28 Kyrönjoki, Skatila	4,805	1.0	8.9	529	259
29 Evijärvi, Auslauf	1,715	11.9	8.5	504	232
30 Lestijärvi, Auslauf	380	28.8	8.8	558	293
31 Kalajoki, Hihnalankoski	2,990	1.9	8.3	488	204
32 Kiantajärvi, Auslauf	3,520	10.5	6.9	556	171
32+33 Hyrynsalmi-Strasse, Kiehimä	8,785	7.7	7.3	565	192
34 Lammasjärvi, Auslauf	3,395	10.9	7.7	560	173
34+35 Sotkamo-Strasse, Kajaani	7,430	11.6	8.0	560	191
32+ . . . +36 Oulujoki, Vaala	19,860	12.7	6.7	565	199
37 Iijoki, Merikoski	14,315	5.5	7.4	545	181
38 Kemijärvi, Auslauf	27,285	2.4	6.1	463	132
38+39 Kemijoki, Taivalkoski	50,820	2.9	6.3	456	126
40 Patsjoki, Virtaniemi	14,395	12.4	5.1	388	62

¹⁾ Die Ziffern weisen auf die Karte (Abb 1.) hin.

der Grösse des Niederschlagsareals. Weil die Zeit, die eine gewisse Wassermenge innerhalb des Gebietes bleibt (von dem Augenblick an, da sie als Niederschlag fällt, bis zu dem Zeitpunkt, wo sie das Gebiet als Abfluss verlässt), mit dem Niederschlagsareal wächst, ergibt sich aus Obenstehendem, dass die Verdunstung auch davon unabhängig ist, wie rasch der Niederschlag abfließt. Dies wird zum Teil dadurch erklärt, dass wir im allgemeinen einen langsamen Abfluss haben, teils durch die Annahme, dass Regenwasser hauptsächlich in kurzer Zeit verdunstet, nachdem es gefallen ist, ehe es tiefer in die Erde dringt, eine Annahme, die in WÄRES¹⁾ jüngst veröffentlichten Untersuchungen Stütze findet.

2) Irgendein Zusammenhang zwischen Verdunstung und Seenprozent kann nicht aus der Tabelle gefolgert werden. Dies bedeutet, dass eine annehmbar stärkere Verdunstung von den Seeoberflächen in trockenen Zeiten von einer erhöhten Verdunstung von der Vegetation auf dem Lande während und unmittelbar nach dem Regen aufgewogen wird.

3) Die Einwirkung der Niederschlagsmenge auf die Verdunstung ist unbedeutend. Dieser Sachverhalt, der in Bezug auf die mitteleuropäischen Gebiete schon von KELLER i. J. 1914 festgestellt und später auch in vielen anderen Teilen Europas gültig befunden wurde, scheint auch bei uns zuzutreffen. Hierauf kommen wir später zurück.

Der Einfluss der Temperatur auf die Verdunstung.

Abb. 2 gibt sämtliche Temperatur- und Verdunstungswerte aus Tabelle 1 in einem (t , E)-Diagramm wieder. Obgleich die Temperaturangaben als unsicher angesehen werden müssen (die Temperaturen für mehrere Gebiete sind aus einem allzu undichten Beobachtungsnetz berechnet), fallen die Punkte sehr nahe einer geraden Linie oder einer schwach gekrümmten Kurve. Die durchschnittliche Streuung von der geraden Linie beträgt nur 17.8 mm und von der Kurve 16.4 mm. Für die Temperatur ist der Mittelwert für die Zeit April—Oktober genommen worden, während welcher Zeit die Verdunstung in der Hauptsache

¹⁾ MATTI WÄRE: Maan vesisuhteista ja viljelyskasvien sadoista Maasojan vesitaloudellisella koekentällä vuosina 1939—1944. Helsinki 1947.

stattfindet. Ähnliche Darstellungen mit der Jahrestemperatur oder der Sommertemperatur als Argument geben grössere Dispersion.

Nehmen wir an, dass innerhalb des hier betrachteten Temperaturintervalls ($5-10^{\circ}\text{C}$) eine lineare Abhängigkeit zwischen Temperatur und Verdunstung besteht, so liefert eine Korrelationsberechnung für diesen Zusammenhang die Gleichung

$$(3) \quad E = 57t - 235$$

Der Regressionsfaktor ist 0.97, er deutet eine so enge Verknüpfung an, dass die Gleichung als Kriterium für die Genauigkeit der Niederschlags- und Abflussberechnungen angewendet werden kann, aus denen die Verdunstungswerte erhalten wurden. Unsere

Gleichung gibt eine Zunahme der Verdunstung um 57 mm für 1° Temperatursteigerung und also eine ebenso grosse Abnahme im Abfluss. WUND¹ führt als Durchschnittswert für Areale mit ungefähr gleichem Jahresniederschlag eine bedeutend niedrigere Zahl, 20 mm, an.

Unser Material gibt uns keine Möglichkeit, etwas über den Betrag der Verdunstung für kleinere Werte von t_{VI-X} auszusagen. Gleichung (3) kann hier nicht mehr gelten, das würde zu einem zu kleinen Verdunstungswert führen. Veranschaulichen wir die Beziehung zwischen Temperatur und Verdunstung mit einer Kurve, wozu auf grund der Lage der Punkte in unserer Abbildung ein gewisser Anlass vorzuliegen scheint, so können wir uns diese Kurve nach unten fortgesetzt denken und erhalten aus derselben immer noch plausible Verdunstungsziffern. Unser niedrigster Punkt ($t = 5.1$, $E = 62$), welcher das Niederschlagsgebiet des Flusses Patsjoki vertritt, liegt etwas unter der Kurve, was darauf beruhen kann, dass der

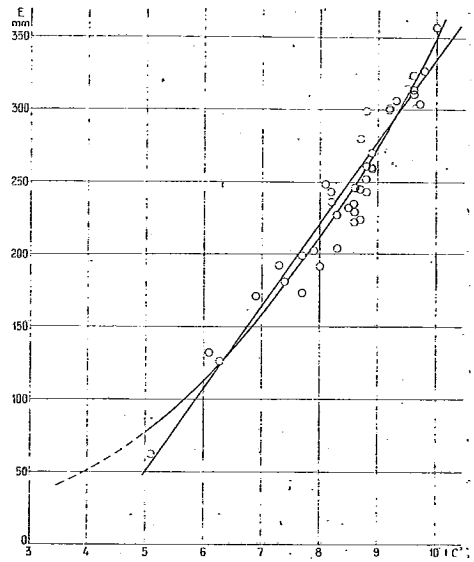


Abb. 2. Zusammenhang zwischen der mittleren Jahresverdunstung (E) und der Temperatur (t) für April—Oktober.

¹) W, WUND.: Das Bild des Wasserkreislaufs auf Grund früherer und neuerer Forschungen, VI Balt. Hydr. Konf., Berlin 1938.

Niederschlag für dieses Areal zu niedrig berechnet wurde. Der Niederschlagswert stützt sich auf Beobachtungen von einer geringen Anzahl Stationen im Zentrum des Gebietes, während Angaben über die Niederschlagsverhältnisse in der ausgedehnten Gebirgsgegend des Gebietes fehlen. (In einer Untersuchung von W. W. KORHONEN: «Korrigierte Niederschlagswerte für Finnland», die als Handschrift vorliegt, werden zwar etwas höhere Niederschlagswerte als die hier für Nord-Finnland verwendeten angegeben.)

Abhängigkeit der Verdunstung vom Niederschlag.

Wir befassen uns nun mit den Niederschlags- und Abflusswerten für die einzelnen Jahre. Die Differenz Niederschlag-Abfluss gibt im allgemeinen nicht die Jahresverdunstung, da das Glied M in der Gleichung (1) nur ausnahmsweise $=0$ ist. Um jedoch unser umfangreiches Material für die Verdunstungsberechnungen anwendbar gestalten zu können, habe ich den Niederschlag für Zwölfmonatsperioden Dezember—November mit dem Abfluss während der 4 Monate später beginnenden Zeitspannen von 12 Monaten April—März verglichen. Der Einfluss der Aufspeicherung ist hierdurch möglichst gering gemacht worden; der Niederschlag während Dezember—März fließt ja erst nach dem 1. April ab und in der gleichen Zeit wird der während der vorhergehenden Monate entstandene Vorrat teilweise geleert. Die Aufspeicherung spielt jedoch fortgesetzt auf sämtlichen hier untersuchten Gebieten eine so grosse Rolle, dass die Zahlen für die Differenz $P-A$ stark variieren. In den Durchschnittsberechnungen dürfte man jedoch berechtigt sein, auch nun die Differenz $P-A$ die Verdunstung vertreten zu lassen. Für die meisten Gebiete waren Beobachtungen von 35 Jahren zugänglich. Während dieser Jahre wechseln die Jahresniederschläge in ein und demselben Gebiet sehr stark, am meisten in SW-Finnland (in dem Areal der Ähtäri-Strasse zwischen 325 und 826 mm), am wenigsten im Norden (in dem Bereich des Flusses Patsjoki zwischen 279 und 567 mm). Dies gibt uns die Möglichkeit, den Betrag der Verdunstung unter verschiedenen Niederschlagsverhältnissen abzuschätzen. Wir geben für ein Gebiet die $(P-A)$ - und P -Werte der einzelnen Jahre in einem Diagramm wieder und erhalten eine Punktschar, auf welche wir die Korrelationsmethode anwenden. Für jedes Gebiet wird somit eine gerade Linie erhalten, welche als Darstellung des Zusammenhanges zwischen Jahresverdunstung und Niederschlag angesehen werden kann. Abb. 3 zeigt eine

Anzahl solcher Linien für Gebiete in verschiedenen Teilen von Finnland. Die Linien sind zwischen den extremen P -Werten eines jeden Gebietes ausgezogen worden.

Aus der Abbildung geht hervor, dass bei uns die Verdunstung einiger-

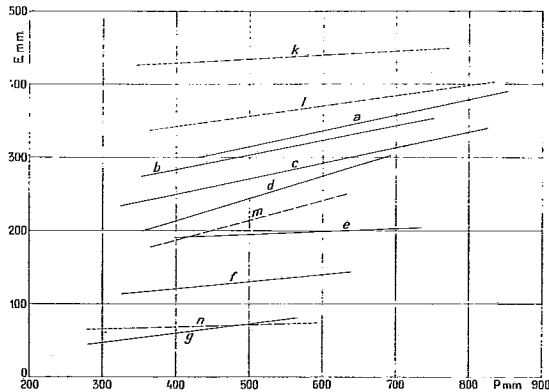


Abb. 3. Verdunstung (E) und Niederschlag (P) in einigen Niederschlagsgebieten. a = Vandaå, b = Kokemäenjoki, Harjavalta, c = Ähtäri-Strasse, Herraskoski, d = Vuoksi, Imatra, e = Oulujoki, Vaala, f = Kemijoki, Taivalkoski, g = Patsjoki, Virtaniemi, k = mitteleuropäische Gebiete, l = Nyköpingsån, m = Swir, n = Kolafluss.

massen mit dem Niederschlag zunimmt. Am grössten ist der Einfluss des Niederschlags im Bereich des Stromes Vuoksi; eine Steigerung des Jahresniederschlags um 100 mm verursacht hier eine Verdunstungszunahme von 30 mm, am geringsten ist die Einwirkung im Gebiet des Flusses Oulujoki, nur 5 mm je 100 mm Niederschlagssteigerung. Im übrigen ist die Übereinstimmung unter den verschiedenen Gebieten augenfällig.

Vergleichshalber sind die entsprechenden Linien für das Svir-Areal nach WALLMANN¹⁾ eingezeichnet sowie ferner nach SOKOLOWSKY²⁾ für das Niederschlagsgebiet des Kolafusses und für dasjenige des Nyköpingsflusses nach WALLÉN³⁾, die zwei letztgenannten ohne Angabe darüber, zwischen welche P -Werte sich die Beobachtungen erstrecken. Zuoberst

¹⁾ W. N. WALLMANN: Abhängigkeit des Abflusses von den Niederschlägen im Onega-Swir-Gebiet. V. Balt. Hydr. Konf., Helsingfors 1936.

²⁾ D. L. SOKOLOWSKY: Niederschläge, Abfluss, Verdunstung und Sickerung nach Angaben vieljähriger Beobachtungen. V. Balt. Hydr. Konf., Helsingfors 1936.

³⁾ AXEL WALLÉN: Eau tombée, débit et évaporation dans la Suède meridionale. Geogr. Ann., Stockholm 1927.

wird Kellers Verdunstungslinie nach der zeitiger erwähnten Arbeit von WUND wiedergegeben. Für kontinentale Gebiete sind Linien mit viel stärkerer Neigung erhalten worden, (siehe z.B. obengenannte Arbeit von SOKOLOWSKY).

Der jährliche Verlauf der Verdunstung.

Die bisher in dieser Untersuchung erzielten Resultate sind jedoch vom wenigem Nutzen für eine hydrologische Voraussage. Hierzu müsste man zu jedem Zeitpunkt die Abhängigkeit der Verdunstung von messbaren meteorologischen Grössen kennen. MEYER¹⁾ hat sich mit dieser Frage beschäftigt und gibt erleuchtende Ergebnisse aus USA an. MELIN²⁾ hat die Verteilung der Jahresverdunstung auf die verschiedenen Monate des Jahres im Durchschnitt für ein Gebiet in Schweden bestimmt. COUTAGNE³⁾ und DE MARTONNE haben die Temperaturabhängigkeit der Monatsverdunstung untersucht, und für das Päijänne-Gebiet versuchte der Verfasser⁴⁾ eine Methode zu entwickeln, um Monat für Monat einen Wert für die Verdunstung zu gewinnen. Im hydrologischen Prognosedienst ist

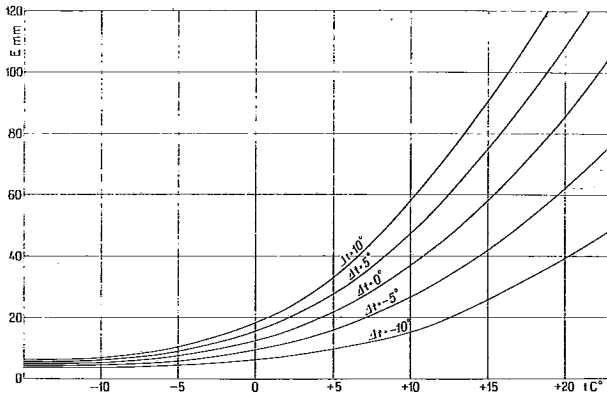


Abb. 4. Monatsverdunstung (E), Temperatur (t) und Temperaturänderung (Δt) während eines Monats im Päijänne-Gebiet.

1) ADOLPH F. MEYER: The Elements of Hydrology. New York 1944.

2) RAGNAR MELIN: Täkern, Meddelanden fr. St. Met.-Hydr. Anst., Stockholm.

3) A. COUTAGNE und E. DE MARTONNE: De l'eau qui tombe à l'eau qui coule. Evaporation et deficit d'écoulement. Bull. 20 Ass. Int. de Hydr. Scient.

4) ALLAN SIRÉN: Niederschlag, Abfluss und Verdunstung des Päijänne-Gebiets. V. Balt. Hydr. Konf., Helsingfors 1936.

man gezwungen, irgendeinen Wert für die Verdunstung anzuwenden, für den Päijänne sind vorläufig die besten Resultate nach folgender Methode erzielt worden: Die Monatsverdunstung wird aus einer Kurvenschar (Abb. 4) in einem (t, E) -Diagramm bestimmt, worin die verschiedenen Kurven die Verdunstung in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Werte der Temperaturänderung Δt während des Verlaufes des Monats angeben. In den Sommermonaten wird der Einfluss des Niederschlags beachtet, wobei folgende Gleichung in Anwendung kommt:

$$(4) \quad E = E_t [1 - C (E_t - P)]$$

worin E_t die aus der Kurvenschar erhaltene Monatsverdunstung und C eine Konstante (0.05 oder 0.10) ist. Der Windeinfluss wird durch Hinzufügung eines proportionalen Faktors k der Quadratwurzel der Windstärke berücksichtigt. Die Methode ist freilich nicht absolut zufriedenstellend, liefert aber doch sichere Werte als die direkten Verdunstungsmessungen mit Wild's Verdunstungswaage und die während einer Anzahl von Jahren in Finnland ausgeführten Lysimeterbeobachtungen.

Verdunstung und Ablauf.

Für den praktischen Hydrologen ist es notwendig zu wissen, wieviel von den gefallenen Niederschlägen abfließt und in welchem Takt dies geschieht. RENQVIST¹⁾ hat für ein kleines Niederschlagsgebiet in S-Finnland »Grundkurven« konstruiert, welche den Abfluss als Funktion der Zeit für eine gewisse Niederschlagsmenge angeben. Derartige Basiskurven können für solche Wasserläufe aufgestellt werden, in denen der Abfluss verhältnismässig schnell erfolgt. So habe ich für den Fluss Kyrönjoki ungefähr schätzen können, ein wie grosser Teil des Niederschlags eines jeden Monats abfloss und in welcher Zeit dies geschah. Durch Bildung des Durchschnitts aus diesen Monatsabflussziffern und Vergleich derselben mit der zugeordneten durchschnittlichen Niederschlagszahl wird Mittelwerte für die Monatsverdunstung erhalten. Die Ergebnisse sind aus Tabelle 2 ersichtlich.

¹⁾ HENRIK RENQVIST: Om sommarregnen och deras hydrologiska konsekvenser. Helsingfors 1917.

Tabelle 2. Niederschlag P , Abfluss A und Verdunstung E im Niederschlagsgebiet des Kyrjoki im Durchschnitt 1911—40 (mm).

	XII—III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
P	113	30	39	53	66	68	64	53	43
A	87	9	9	13	11	30	40	40	34
E	26	21	30	40	55	38	24	13	9

Aus der Tabelle geht die Bedeutung der Herbstniederschläge für die Wasserversorgung hervor. Noch deutlicher tritt dies in Abb. 5 zutage, welche

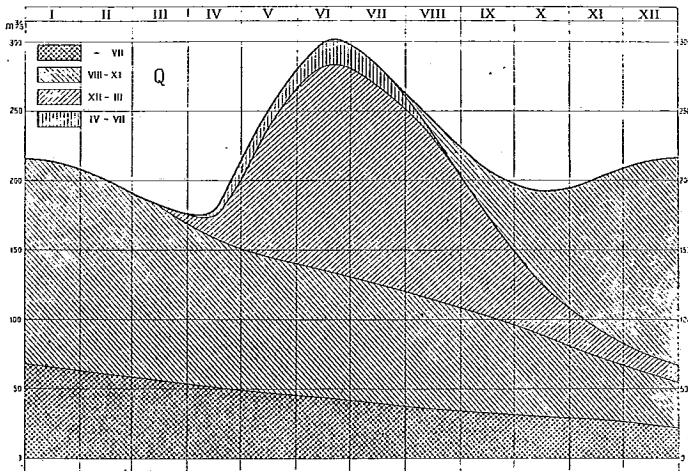


Abb. 5. Einfluss des Niederschlags der Herbst- (VIII—XI), Winter- (XII—III) und Frühling-Sommermonate (IV—VII) und der Zeit vor dem Beginn der Herbstregen im vorigen Jahre (—VII) auf die Wassermenge (Q) im Kyminjoki bei Kalkkinen.

zeigt, welchen Anteil der Niederschlag in den verschiedenen Jahreszeiten an der Wassermenge des Flusses Kyminjoki hat. Die Niederschlagsmenge der Wintermonate beträgt in Mittel 120 mm und ist die hauptsächliche Ursache des Sommerhochwassers. Der Niederschlag der Sommermonate von 198 mm verdunstet zum grössten Teil und liefert gemäss der Abbildung nur einen unbedeutenden Beitrag während des Hochsommers. Der grösste Teil der Jahreswassermenge rührt von den 248 mm Niederschlag der Herbstmonate her. Bemerkenswert ist der Anteil der Wassermenge, der von der Zeit vor Beginn des vorangegangenen Herbstregens her stammt (der dunkelschattierte Teil unten in der Abbildung).

Die Landesverdunstung in Finnland.

Wie die Abb. 1 zeigt, umfasst unsere Untersuchung fast die ganze Oberfläche Finnlands. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass Faktoren örtlicher Art (Seenprozent, die Grösse des Niederschlagsgebiets) die Landesverdunstung nur wenig beeinflusst. Es ist somit möglich auf Grund unserer Verdunstungswerte und in Hinsicht auf dem Gang der April—Oktober-Isothermen Linien gleicher Verdunstung zu ziehen. So erhalten wir ein Bild über die Abnahme der Verdunstung von Süden nach Norden (Abb. 6). Die Karte zeigt, dass der Jahreswert der Landesverdunstung in Mittel in den nördlichsten Teilen Finnlands unter 100 mm, in Süd-Finnland über 350 mm ist.

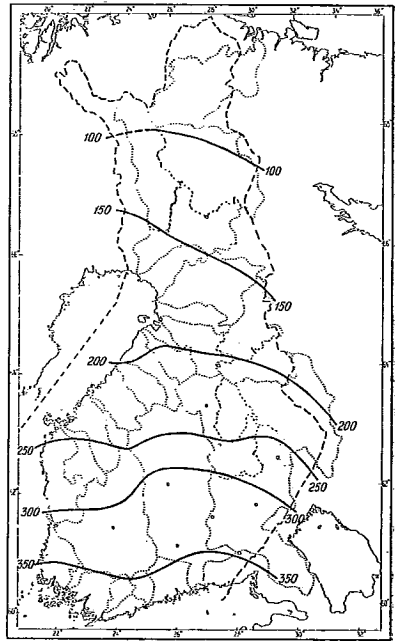


Abb. 6. Mittlere Jahresverdunstung in Finnland 1911—40 (mm).