

II. Baltische hydrologische und hydrometrische Konferenz

Tallinn, Juni 1928.

---

# Die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss im Flussgebiete des Embachs.

Von

**K. Frisch**, Tartu.

TALLINN

Herausgegeben vom Verkehrsministerium Estlands

1928

## Die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss im Flussgebiete des Embachs.

Von **K. Frisch**, Tartu.

In den folgenden Ausführungen werden wir uns mit der Frage befassen, was mit einem auf die Erdoberfläche fallenden Niederschlag geschieht, d. h., in welcher Weise er verbraucht wird um den nachher folgenden Niederschlägen wieder Platz zu machen. Zu diesem Zwecke werden wir uns näher mit der Niederschlagsverteilung im Flussgebiet des Embachs beschäftigen, wo einerseits die täglichen Niederschlagsmessungen der Regenstationen und andererseits die Wasserhöhenablassungen des Embachs in Tartu (Dorpat) zur Verfügung stehen. Die Wasserstandsablesungen wurden in cm an einem an der Steinbrücke befestigten Pegel täglich um 13 Uhr angestellt. Leider sind die Messungen nur bei offenem Wasser ausgeführt worden, während sie bei Eisbedeckung vollständig fehlen.

Das Abflussgebiet erstreckt sich auf die Kreise Tartu, Fellin und Walk, deren Oberfläche sich im Sommerhalbjahr meist unter einer Grasdecke befindet. (s. Tabelle Nr. 1).

T a b e l l e 1.<sup>1)</sup>

| Kreise | Kulturland<br>% | Heuschlag<br>% | Weideland<br>% | Wald<br>% | Moor, Sümpfe<br>usw.<br>% |
|--------|-----------------|----------------|----------------|-----------|---------------------------|
| Tartu  | 32,34           | 21,19          | 12,84          | 21,53     | 12,10                     |
| Fellin | 25,10           | 21,67          | 16,12          | 18,92     | 18,19                     |
| Walk   | 34,33           | 15,61          | 11,51          | 29,07     | 9,48                      |

Das in Frage kommende Abflussgebiet des Embachs umfasst rund 7320 km<sup>2</sup> und enthält 15 Regenstationen. Die Flächenmessung wurde mit Hilfe des Planimeters nach der Binnengewässerkarte vom Sisevetebüro<sup>2)</sup> ausgeführt.

Ausser den Niederschlags- und Wasserstandsmessungen werden wir weiter die Abflussmengenlinie benutzen, die nach einer grösseren Anzahl von Flügelmessungen vom Leiter des Sisevetebüro Herrn A. Wellner zusammengestellt ist und mir freundlichst zur Verfügung gestellt wurde.

1). *Annuaire de la statistique agricole.* Tallinn 1923..

2). A. Wellner, *Binnengewässer Karte.* Tallinn 1924.

Die betreffende Abflussmengenlinie bezogen auf den Durchschnitt des Flusses, wo die Wasserstandsmessungen vorgenommen sind, ist in der Fig Nr. 1 angegeben, wobei die Wasserhöhen in m durch die Ordinatenachse aufs Meeresniveau bezogen, die Abflussmengen in cbm pro sek. durch die Abszissenachse dargestellt sind.

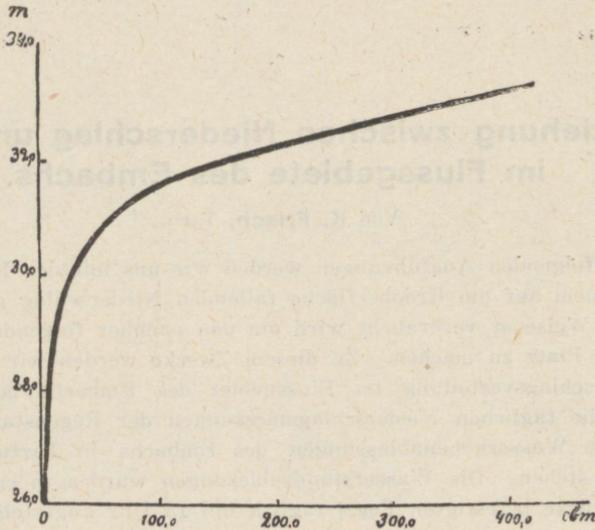


Fig. 1.

Um über die Beziehung zwischen den im Abflussgebiet fallenden Niederschlagsmengen und Wasserständen des Embachs bei Tartu eine bessere Uebersicht zu gewinnen, sind in Fig Nr. 2 und Fig Nr. 3 die täglichen Wasserhöhen im Jahre 1924 und 1925 durch eine kontinuierliche Kurve angegeben. Die täglich im Abflussgebiet fallenden Niederschlagsmengen ausgedrückt in cbm sind für jeden Tag durch gerade Linien dargestellt, deren Längen den Niederschlagsmengen proportional sind.

Zur Berechnung der täglichen Niederschlagsmenge wurden nach den Angaben der Regenstationen tägliche Isohyetenkarten gezeichnet und nach diesen mit Hilfe des Planimeters die Niederschlagsmengen in cbm berechnet.

Aus den Fig Nr. 2 und Nr. 3 ersehen wir einen grossen Unterschied zwischen den beiden Jahren: im Jahre 1924 beobachten wir im Frühling einen ausserordentlich hohen Wasserstand, wodurch die niedrigeren Stadtteile überflutet wurden, während im Sommer und Herbst die Flusshöhe einen niedrigen Stand zeigte, im Jahre 1925 haben wir umgekehrt im Herbst beinahe gleich hohen Wasserstand wie im Frühling. Dieser Unterschied lässt sich leicht durch die Temperatur und Niederschlagsverhältnisse in beiden Jahren erklären.

Weiter sind in der folgenden Tabelle die monatlichen Niederschlagsmengen von dem in Frage kommenden Abflussgebiet ausgedrückt in cbm und in denselben Einheiten die monatlichen Abflussmengen angegeben.



Fig. 2. Tägliche Wasserhöhen und Niederschlagsmengen 1924.

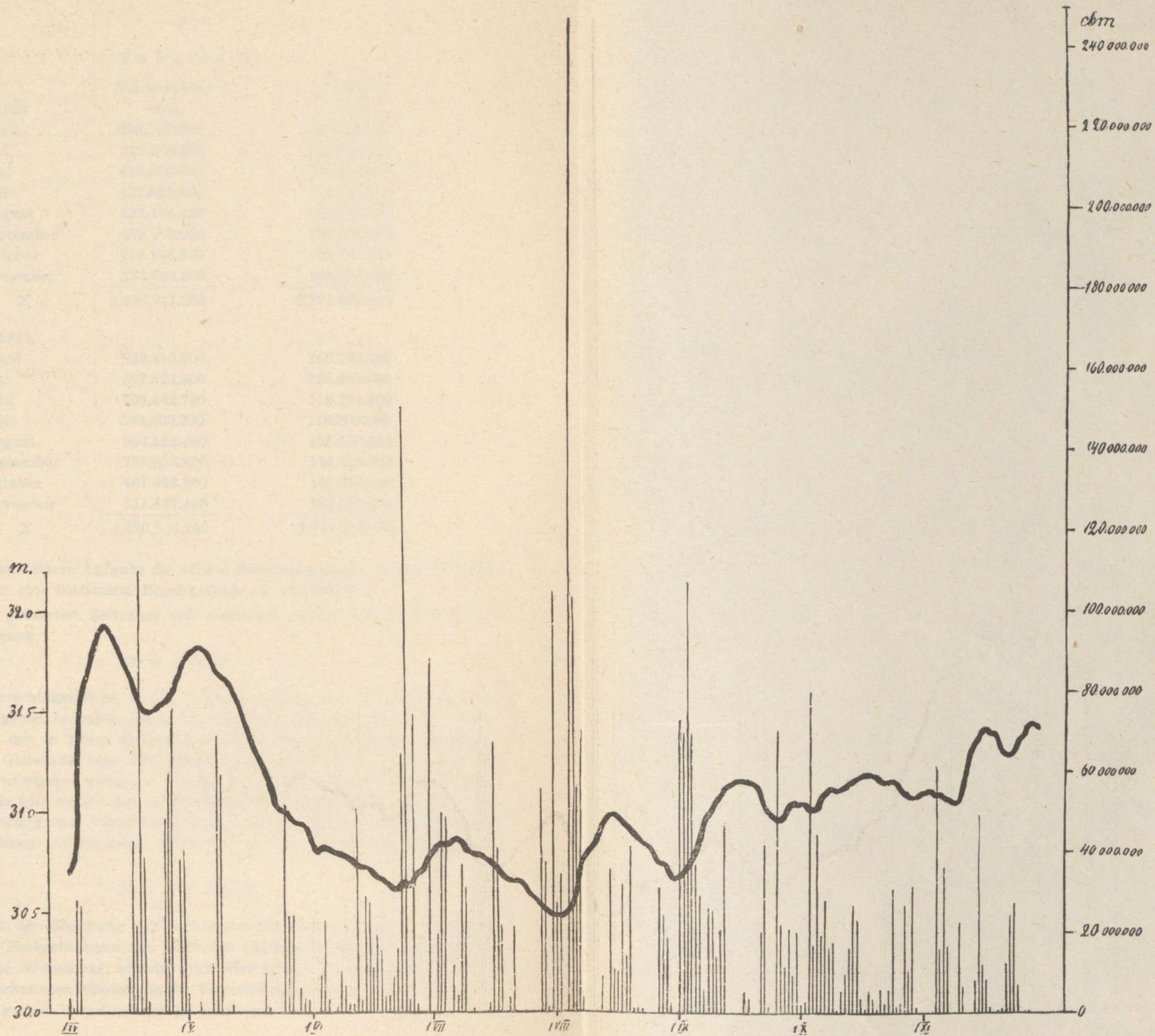


Fig. 3. Tägliche Wasserhöhen und Niederschlagsmengen 1925.

T a b e l l e 2.

|           | Niederschlag<br><i>cbm</i> | Abfluss<br><i>cbm</i> |
|-----------|----------------------------|-----------------------|
| 1924      |                            |                       |
| April     | 286.167.000                | 596.073.600           |
| Mai       | 329.248.200                | 728.352.000           |
| Juni      | 426.070.800                | 279.244.800           |
| Juli      | 437.851.800                | 175.046.400           |
| August    | 822.476.400                | 144.806.400           |
| September | 678.060.000                | 122.428.800           |
| Oktober   | 218.158.800                | 120.700.800           |
| November  | 232.768.200                | 104.630.400           |
| Σ         | 3.430.741.200              | 2.271.283.200         |
| 1925      |                            |                       |
| April     | 523.415.600                | 268.790.400           |
| Mai       | 267.522.300                | 228.009.600           |
| Juni      | 709.442.700                | 116.294.400           |
| Juli      | 563.500.200                | 118.800.000           |
| August    | 864.181.400                | 125.020.800           |
| September | 753.253.800                | 144.115.200           |
| Oktober   | 437.392.800                | 161.654.400           |
| November  | 311.647.400                | 184.550.400           |
| Σ         | 4.430.356.200              | 1.347.235.200         |

Es ist unsere weitere Aufgabe die nähere Beziehung zwischen Regenmengen und Abfluss für eine bestimmte Regenperiode zu untersuchen.

Für einen grösseren Zeitraum von mehreren Jahren besteht bekannterweise die Gleichung:

$$N = A + V. \quad (1)$$

wo  $N$  die Niederschlagsmenge,  $A$  den Abfluss,  $V$  aber die Verdunstung vom ganzen Abflussgebiet bedeutet, unter der Annahme, dass der Wasservorrat im Abflussgebiet in den in Frage kommenden Jahren keine Aendrun gen aufweist. Wenn wir die Gleichung aber für kürzere Regenperioden — sagen wir für einige Tage — anwenden wollen, so würden wir es mit einigen Schwierigkeiten zu tun haben, da hier ausser dem Abfluss und der Verdunstung noch die sogenannte Versickerung zum Vorschein kommt. Deshalb müssen wir zur rechten Seite der Gleichung (1) ein neues Glied ( $S$ ), das die Versickerung ausdrückt, hinzufügen:

$$N = A + V + S. \quad (2)$$

Von den in der Gleichung (2) vorkommenden Gliedern ist einiger massen sicher aus den Beobachtungen mit Hilfe der täglichen Isohyeten nur die Niederschlagsmenge  $N$  messbar, obwohl auch hier grosse Abweichungen von der Wirklichkeit vorkommen können, da die Regenstärke schon oft in den kleinsten Entfernungen grosse Verschiedenheiten aufweist.

Was aber die anderen Grössen betrifft, so sind ihre direkten Messungen für eine grössere Fläche undurchführbar. So besteht der durch die oben angegebene Abflussmengenkurve erhaltene gesamte Abfluss ausser dem von dem betrachteten Regen stammenden Abfluss, noch aus dem Abfluss des früheren Vorrates, da in unserer gleichmässigen Zone auch nach längeren Trockenperioden die Flüsse nicht austrocknen.

In gleicher Weise geben die in der Englischen Hütte aufgestellten Verdunstungsmesser keine der Wirklichkeit entsprechende Verdunstung im Freien, wo ausserdem noch zwischen einzelnen Teilen des Abflussgebietes dank der Verschiedenheit der Unterlage grosse Schwankungen vorkommen können. Zum Vergleich seien hier (Tabelle Nr. 3) die Verdunstungsmessungen von verschiedenen Grundflächen in Petrograd gegeben 1)

T a b e l l e 3.

| 1896      | Teich   | Gras    | Sand    | Wild'sche Verdunstungsm.<br>in der Engl. Hütte |
|-----------|---------|---------|---------|--|
| Mai       | 79.2 mm | 89.5 mm | 90.9 mm | 51.8 mm  |
| Juni      | 126.3 " | 108.1 " | 95.1 "  | 57.8 "   |
| Juli      | 138.5 " | 78.3 "  | 80.2 "  | 58.1 "   |
| August    | 70.5 "  | 26.7 "  | 38.7 "  | 26.5 "   |
| September | 30.3 "  | 7.3 "   | 16.2 "  | 15.1 "   |

Aus der Tabelle Nr. 3 ersehen wir, dass die in der Englischen Hütte gemessene Verdunstung stark von der Verdunstung im Freien zurückbleibt. Zur besseren Uebersicht sind in der folgenden Tabelle Nr. 4 die betreffenden Verhältniszahlen zwischen der Verdunstung im Freien und der Verdunstung in der Englischen Hütte gegeben.

T a b e l l e 4.

|           | Teich zum<br>Verdunstungsmesser | Gras zum<br>Verdunstungsmesser | Sand zum<br>Verdunstungsmesser |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Mai       | 1.5                             | 1.7                            | 1.7                            |
| Juni      | 2.2                             | 1.9                            | 1.6                            |
| Juli      | 2.4                             | 1.3                            | 1.4                            |
| August    | 2.7                             | 1.0                            | 1.5                            |
| September | 2.0                             | 0.5                            | 1.0                            |

Die angegebenen Verhältniszahlen zeigen, dass die Verdunstung von der freien Oberfläche meist bedeutend grösser ist als die in der Englischen Hütte gemessene Verdunstung. Eine Ausnahme ergibt sich beim Grase, wo die Verdunstung regelmässig vom Juni bis zum September abnimmt, was dadurch erklärbar ist, dass der Verdunstungsmesser im August und September durchs zugewachsene Gras viel mehr vom Winde geschützt ist als im Mai und Juni.

Allgemein können wir annehmen, dass die Verdunstung von der freien Oberfläche unter normalen Bedingungen im Mittel etwa 1.6 bis 1.9 mal grösser ist, als die in der Englischen Hütte gemessene Verdunstung.

1) Ljuboslawsky, Die Wetterkunde., 1915.

Weiter begegnen wir bei der Berechnung der Verdunstung für eine bestimmte Regenperiode im ganzen Abflussgebiet mit der Schwierigkeit, dass die Verdunstung ähnlicherweise wie der Abfluss nicht allein vom betrachteten Regen stammt, sondern teilweise auch von den Wasservorräten, die in der Erde vom vorhergehenden Regen versickert sind.

Zusammenfassend können wir sagen, dass die in der rechten Seite der Gleichung (2) vorkommenden Glieder allgemein durch direkte Messungen unbestimmbar sind.

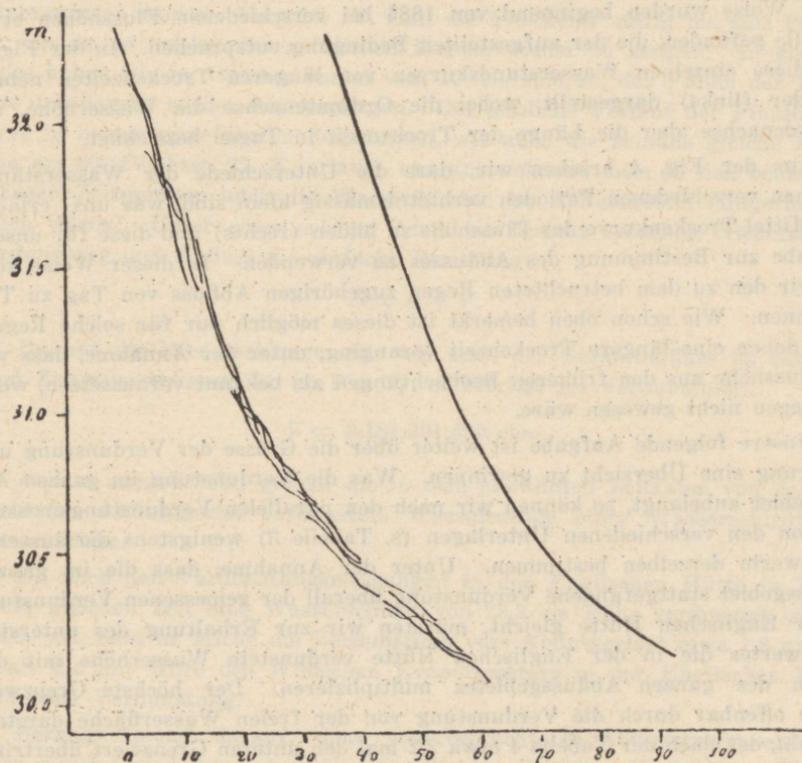


Fig. 4.

Nur in einzelnen Fällen unter der Annahme, dass bei ähnlicher Witterung auch die Veränderung der Flusshöhe in gleicher Weise vorsieht, lassen sich die einzelnen Glieder der Gleichung (2) bestimmen. Am leichtesten ist das mit der Abflussgrösse  $A$ , wenn wir annehmen, dass aus den früheren Beobachtungen es möglich ist, die Flusshöhe als bekannt anzusehn, wenn der in Betracht kommende Regen nicht gewesen wäre. Diese Annahme würde die sichersten Resultate ergeben, wenn wir sie in solchen Fällen anwenden würden, wo vor den betrachteten Niederschlägen eine längere Trockenzeit gewesen wäre. Dazu ist es infolgedessen nötig, die Veränderung der Flusshöhe bei solchen längeren Trockenperioden zu kennen. Der Abfluss vom kommenden Regen würde sich dann als Differenz zwischen dem allgemeinen Abfluss, der uns nach der Ab-

flussmengenkurve bekannt ist, und dem Abfluss nach der Trockenkurve der Flusshöhe darstellen. Es ist deshalb unsere nächste Aufgabe, die Flusshöhe bei längeren Trockenperioden miteinander zu vergleichen, um zu sehen, wie grosse Unterschiede zwischen der Veränderung der Flusshöhe bei den einzelnen Trockenperioden vorkommen.

Dazu wurden aus den Niederschlagsbeobachtungen zuerst Trockenzeiten, wo wenigstens etwa 10 Tage ohne Regen gewesen waren, ausgesucht, und für diese Tage die zugehörigen Wasserstände mit einer Kurve verbunden. In dieser Weise wurden beginnend von 1885 bei verschiedenen Flusshöhen etwa 20 Fälle gefunden, die der aufgestellten Bedingung entsprachen. In der Fig. 4 sind diese einzelnen Wasserstandskurven von längeren Trockenzeiten nebeneinander (links) dargestellt, wobei die Ordinatenachse die Wasserhöhe, die Abszissenachse aber die Länge der Trockenzeit in Tagen bezeichnet.

Aus der Fig. 4 ersehen wir, dass die Unterschiede der Wasserstände zwischen verschiedenen Perioden verhältnismässig klein sind, was uns erlaubt eine Mittel-Trockenkurve der Flusshöhe zu bilden (rechts) und diese für unsere Aufgabe zur Bestimmung des Abflusses zu verwenden. In dieser Weise können wir den zu dem betrachteten Regen zugehörigen Abfluss von Tag zu Tag berechnen. Wie schon oben bemerkt ist dieses möglich nur für solche Regenfälle, denen eine längere Trockenzeit voranging, unter der Annahme, dass wir die Flusshöhe aus den früheren Beobachtungen als bekannt voraussetzen, wenn der Regen nicht gewesen wäre.

Unsere folgende Aufgabe ist weiter über die Grösse der Verdunstung und Sickerung eine Übersicht zu gewinnen. Was die Verdunstung im ganzen Abflussgebiet anbelangt, so können wir nach den parallelen Verdunstungsmessungen von den verschiedenen Unterlagen (s. Tabelle 3) wenigstens die äusseren Grenzwerte derselben bestimmen. Unter der Annahme, dass die im ganzen Abflussgebiet stattgefundenene Verdunstung überall der gemessenen Verdunstung in der Englischen Hütte gleich, müssten wir zur Erhaltung des untersten Grenzwertes die in der Englischen Hütte verdunstete Wasserhöhe mit der Fläche des ganzen Abflussgebietes multiplizieren. Der höchste Grenzwert würde offenbar durch die Verdunstung von der freien Wasserfläche darstellbar sein, der nach der Tabelle 4 etwa 2,2 mal den unteren Grenzwert übertrifft. Um jetzt für die wirkliche Verdunstungsgrösse einen annähernden Wert zu finden, würde es am einfachsten sein die arithmetischen Mittel der beiden Grenzwerte einander gleich zu setzen. Daraus ergibt sich, dass die im ganzen Abflussgebiet stattgefundenene Verdunstung etwa 1.6 mal die verdunstete Wasserhöhe in der Englischen Hütte multipliziert mit der Fläche des Abflussgebietes, übertreffen würde.

Zur Bestimmung des Verhältnisses zwischen der Verdunstung des Abflussgebietes und der verdunsteten Wasserhöhe in der Englischen Hütte, ausgedehnt auf die ganze Fläche des Abflussgebietes, haben wir noch einen anderen Weg. Oben haben wir erwähnt, dass für eine Anzahl von Jahren die in einem Abflussgebiet fallende Niederschlagsmenge der Summe der Verdunstung und des Abflusses gleich. Diese Beziehung könnten wir uns auch für einen kürzeren Zeitraum, etwa einem Sommerhalbjahr, als geltend denken, wenn

wir nach einigen Merkmalen den Wasservorrat im Abflussgebiete am Anfang und am Schluss der betrachteten Zeit gleich setzen dürfen. Ein Kennzeichen dafür ist die Flusshöhe selbst, wenn sie im Anfangs- und Schlussmoment gleich ist, so erlaubt dieses uns anzunehmen, dass auch die Wasservorräte im ganzen Abflussgebiet am Anfang und am Schluss der betrachteten Zeit gleich sind. Einen solchen Fall hatten wir vor uns im Jahre 1925 (s. Fig. 3). Im Frühling vom 1. IV. bis zum 10. IV. beobachten wir ein rasches Steigen der Flusshöhe, was durch das Auftauen der im Winter angesammelten Schneemengen hervorgerufen wurde. Vom 10. IV. fällt die Flusshöhe stätig bis zum 20. IV. um von da an infolge des gefallenen Regens wieder zu steigen. In gleicher Weise haben wir im Oktober zuerst vom 15. bis zum 22. das Fallen der Flusshöhe und darauf wieder das Ansteigen. Der ähnliche Verlauf der Flusshöhenkurve in beiden angeführten Zeiträumen, wie auch die beinahe gleiche Flusshöhe am 20. IV. bzw. 22. X. erlaubt uns anzunehmen, dass zu den beiden erwähnten Zeitpunkten auch die Wasservorräte im Abflussgebiet einigermassen gleich waren. Unter einer solchen Annahme besteht zwischen Niederschlag, Verdunstung und Abfluss die einfache Beziehung:

$$N = A + V.$$

Da uns die Niederschlagsmenge wie auch der Gesamtabfluss im betrachteten Zeitraum bekannt ist (s. Fig. 3), so beträgt die Verdunstung

$$V = 3.181.291.500 \text{ cbm.}$$

Anders ausgedrückt, gleicht die in dem erwähnten Zeitraum von dem betrachteten Abflussgebiet verdunstete Wassermenge einer Wasserschicht von 43.4 cm Höhe.

Da nach den Verdunstungsmessungen in der Englischen Hütte in Tartu in der gleichen Zeit eine Wasserschicht von 23,3 cm Höhe verdunstet ist, erhalten wir, dass im Mittel die Verdunstung vom Abflussgebiet etwa 1.8 grösser ist als die mit Hilfe des Wildschen Evaporometers in der Englischen Hütte gemessene Verdunstung.

Bezugnehmend darauf, dass vom betrachteten Abflussgebiet etwa  $\frac{2}{3}$  unter einer Grasdecke sich befindet, (Weiden, Wälder, Heuschläge, Sümpfe usw., siehe Tabelle 1) und es ausserdem eine Anzahl von Seen enthält (Wirtsjärw usw.), von wo die Verdunstung bedeutend grösser ist, als vom nackten Boden, scheint es uns, dass die gefundene Verhältniszahl nicht sehr weit vom wirklichen Zustand abweicht (s. Tabelle 4) und deshalb als erste Annäherung für die Berechnung der Verdunstung vom betrachteten Abflussgebiet benutzt werden kann.

Da wir jetzt für solche Regenperioden, wo der Abfluss durch die Trockenkurve der Flusshöhe (s. Fig. 4) bestimmbar ist, auch die vom Abflussgebiet stattgehabte Verdunstung nach den täglichen Angaben der Verdunstungsmessungen für die gleiche Zeitperiode berechnen können, lässt sich auch die Versickerung feststellen. Nach der Gleichung (2) ist:

$$S = N - A - V.$$

In dieser Weise sind etwa 10 Fälle bearbeitet, die den aufgestellten Bedingungen entsprachen, und alle in Betracht kommenden Grössen sind in der Tabelle 5 angegeben. Es enthält die erste Rubrik die Daten des Beginns und des Schlusses der Regenperiode, weiter die Rubriken  $h_1$  und  $h_2$  die Flusshöhe zu Beginn und Schluss der betrachteten Regenperiode in m. Nachher folgen die Grössen  $N$ ,  $A$ ,  $V$  und  $S$ , die bezw. den in der erwähnten Zeit im Abflussgebiet fallenden Niederschlag, den Abfluss, die Verdunstung und Versickerung in cbm ausdrücken. Wenn der beobachtete Regen zu Beginn nicht im ganzen Flussgebiet gefallen ist, sondern nur in einem Teil, so ist auch die an den einzelnen Tagen stattgehabte Verdunstung proportional verkleinert worden.

Tabelle 5.

| Regenzeit            | $h_1$ | $h_2$ | $N$         | $A$        | $V$         | $S$         |
|----------------------|-------|-------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 20.—27. VI. 1901     | 30.70 | 30.89 | 272.157.000 | 4.579.200  | 206.863.200 | 60 714.600  |
| 15.—24. V. 1902      | 32.12 | 32.46 | 384.151.800 | 70.329.600 | 159.429.600 | 154.392.600 |
| 22.—25. VI. 1902     | 31.22 | 31.38 | 154.812.000 | 3.283.200  | 126.489.600 | 25.039.200  |
| 9.—12. VIII. 1906    | 30.50 | 30.59 | 104.781.000 | 777.600    | 27.669.600  | 76.333.800  |
| 13.—20. VIII. 1908   | 30.19 | 30.34 | 275.901.000 | 2.851.200  | 100.137.600 | 172.912.200 |
| 17.VII.—5.VIII. 1923 | 30.53 | 30.56 | 609.856.800 | 4.838.400  | 312.271.200 | 292.747.200 |
| 18.—24. VIII. 1924   | 30.84 | 31.08 | 475.686.600 | 5.097.600  | 89.596.800  | 380.992.200 |
| 25.IV.—1.V. 1925     | 31.55 | 31.79 | 265.229.000 | 15.638.400 | 135.712.800 | 113.877.800 |
| 28.VII.—8.VIII. 1925 | 30.54 | 30.79 | 736.412.600 | 5.011.200  | 177.876.000 | 553.525.400 |
| 12.—18. VIII. 1927   | 30.56 | 30.63 | 541.808.400 | 1.987.200  | 47.433.600  | 492.387.600 |

Aus diesen berechneten Beispielen erfolgt, dass die Verdunstung und die Versickerung bedeutend den Abfluss übersteigen. Wie es zu erwarten ist, ist die Versickerung am grössten in solchen Fällen, wo die Flusshöhe niedrig, und dadurch der Abfluss klein war, wie: vom 12.—18.VIII. 1927, 23.VII.—8.VIII. 1925, 18.—24.VIII. 1924.

Dagegen übertrifft die Verdunstung die Versickerung bei hoher Flusshöhe, wo auch der Abfluss gross ist.

Zum Schluss möchten wir bemerken, dass die oben berechneten Werte für Abfluss, Verdunstung und Versickerung aus sich keine absolut genauen sind, sondern nur als angenäherte Lösung unserer Aufgabe zu betrachten sind.

+ Est

A-3707