

Über die Abkühlungsgrösse in Eesti.

H. Liidema a.

Die Klimatologie der Gegenwart beschäftigt sich schon seit längerer Zeit mit der Frage des Einflusses des Klimas auf das psychische und physische Wohlbefinden des Menschen und Tieres, sowie auf die Pflanzenwelt.

Da die Darstellung der einzelnen meteorologischen Elemente, wie Luftdruck, Temperatur, Wind u. s. w. kein klares Bild des Einwirkens des Klimas auf einen organischen Körper gibt, wurde in die Meteorologie der Begriff der sog. Abkühlungsgrösse eingeführt. Unter letzterer versteht man die gleichzeitige Abkühlungswirkung aller klimatischen Faktoren auf den Organismus. Es ist eine Grösse, die den Wärmeaustausch des Körpers mit der Umgebung, das sog. Wärmegefühl, charakterisiert. Genauer ausgedrückt, ist es die Wärmemenge in mgcal, die einem cm² der Oberfläche des Körpers bei normaler Bluttemperatur 36,5° C in einer Sekunde entzogen wird. Es kann die Abkühlungsgrösse an trockenem, sowie auch an feuchtem Thermometer gemessen werden. Da je nach den Verhältnissen bald die eine, bald die andere der Wirklichkeit mehr entspricht, wurden in vorliegender Arbeit beide nebeneinander untersucht.

Direkte Beobachtungen der Abkühlungsgrösse sind nur in geringer Anzahl vorhanden und beziehen sich meist, abgesehen vom Beobachtungsmaterial grösserer Observatorien, welche Registrierapparate der Abkühlungsgrösse besitzen, nur auf kurze Zeitperioden. Aus diesem Grunde ist es wichtig einen Weg zu finden, der ermöglichen würde nach den zur Verfügung stehenden meteorologischen Beobachtungen rasch die entsprechende Abkühlungsgrösse festzustellen. Die Bearbeitung der in Tartu gleichzeitig angestellten Beobachtungen der Abkühlungsgrössen und anderer meteorologischer Faktoren ergab zwei lineare Gleichungen, die dem oben genannten Zweck dienen können.

Die Beobachtungen der Abkühlungsgrösse trocken und feucht sind mit Hilfe des Katathermometers angestellt worden. Es sind

im ganzen 260 Beobachtungen um 13^h gemacht worden, die gleichmässig über ein Jahr (September 1933 — August 1934) verteilt sind. Als Beobachtungsort ist der Turm des Meteorologischen Observatoriums zu Tartu gewählt worden. Das Katathermometer wurde in einer Höhe von 1¹/₂ m über der Fläche der Plattform 95 m über dem Meeresniveau frei aufgehängt, daselbst wurden die übrigen meteorologischen Beobachtungen durchgeführt. Als Windgeschwindigkeit wurde der Mittelwert derselben für die Beobachtungszeit der Abkühlungsgrössen genommen.

Auf Grund des vorhandenen Beobachtungsmaterials sind zunächst Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Grössen bestimmt worden. Es hat sich erwiesen, dass die Korrelationskoeffizienten zwischen der Abkühlungsgrösse einerseits und der Temperatur, absoluten Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit andererseits genügend grosse Werte haben. Die übrigen meteorologischen Elemente, wie Luftdruck, Windrichtung, Bewölkung, relative Feuchtigkeit und Niederschlagsmenge ergaben sehr geringe Koeffizienten und wurden aus diesem Grunde bei den weiteren Berechnungen nicht mehr berücksichtigt. Tab. 1. enthält die Korrelationskoeffizienten, die bei der Zusammenstellung der Gleichungen benutzt wurden.

Tab. 1.

	A _t	t	e	v		A _f	t	e	v
A _t	1	-0.90	-0.86	0.45	A _f	1	-0.76	-0.74	0.58
t	-0.90	1	0.90	0	t	-0.76	1	0.90	0
e	-0.86	0.90	1	0	e	-0.74	0.90	1	0
v	0.45	0	0	1	v	0.58	0	0	1

Ferner sind die beiden Gleichungen zur Bestimmung der Abkühlungsgrösse trocken bzw. feucht nach der bekannten Formel der Korrelationsrechnung

$$x_1 - h_1 = -\frac{R_{12}}{R_{11}} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_2} (x_2 - h_2) - \frac{R_{13}}{R_{11}} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_3} (x_3 - h_3) - \frac{R_{14}}{R_{11}} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_4} (x_4 - h_4)$$

bestimmt worden.

Die auf diesem Wege erhaltenen Gleichungen lauten:

$$A_t = -0.79 t - 0.94 e + 3.21 v + 27.95 \quad \text{und}$$

$$A_f = -0.46 t - 0.83 e + 3.24 v + 39.45.$$

In den Gleichungen, wie auch in den Tabellen bedeuten:

A_t — Abkühlungsgrösse des trockenen Katathermometers in mgcal / cm² sek

A_f — Abkühlungsgrösse des feuchten Katathermometers in mgcal / cm² sek

t — Lufttemperatur

e — Dampfdruck in mm

v — Windgeschwindigkeit in m/sek.

Um die Genauigkeit der erhaltenen Gleichungen zu prüfen, sind mit Hilfe derselben nach den beobachteten Temperaturen, absoluten Feuchtigkeiten und Windgeschwindigkeiten die Abkühlungsgrössen trocken und feucht für jeden einzelnen Beobachtungstermin und die Differenzen $A_{\text{beobachtet}} - A_{\text{berechnet}}$ bestimmt worden. Für die Abkühlungsgrösse trocken sind 51% der Abweichungen positiv und 49% — negativ. Das arithmetische Mittel aus den Abweichungen ist 0.1. Für die Abkühlungsgrösse feucht ist die Zahl der Abweichungen nach der positiven und negativen Seite dieselbe und das arithmetische Mittel derselben gleich 0.0. Ferner ist die Zahl der Fehler mit den absoluten Werten von 0.0 bis 2.0, 2.1 bis 4.0, 4.1 bis 6.0, u. s. w. berechnet worden. Tab. 2. enthält die in Prozenten ausgedrückte Wahrscheinlichkeit der Fehler mit den genannten absoluten Werten.

Tab. 2.

	0.0—2.0	2.1—4.0	4.1—6.0	6.1—8.0	8.1—10.0	> 10.0
A trocken	36	31	20	10	2	1
A feucht	38	27	18	11	5	1

Der mittlere Fehler beträgt für die Abkühlungsgrösse trocken bzw. feucht 4.0 und 4.4.

Berechnet man mit Hilfe der gegebenen Gleichungen die mittleren Abkühlungsgrössen für jeden Monat, sowie die Abweichungen derselben von den beobachteten Grössen, so ist die Zahl der positiven Fehler gleich der der negativen wie für die Abkühlungsgrösse trocken, so auch für die Abkühlungsgrösse feucht. Der mittlere Fehler beträgt in diesem Fall für die Abkühlungsgrösse trocken und feucht 1.8 bzw. 1.6.

Die für das Jahr berechnete Abkühlungsgrösse trocken weicht von der tatsächlich beobachteten um 0.1 ab, ebenfalls um denselben Wert die Abkühlungsgrösse feucht. Tab. 3. gibt ein Bild der

Verteilung der bei der Berechnung der monatlichen Mittelwerte entstandenen Fehler nach ihren absoluten Werten.

Tab. 3.

	0.0—1.0	1.1—2.0	2.1—3.0	> 3
A trocken	4	5	1	2
A feucht	3	6	3	—

Hierbei sei bemerkt, dass die genannten Abkühlungsgrössen und Fehler einzelner Monate gewiss nicht als genaue Mittelwerte der Monate betrachtet werden können, da die Beobachtungen an einzelnen Tagen nicht angestellt wurden. Die Berechnungen sind jedoch durchgeführt worden, um die Genauigkeit der nach den Formeln erhaltenen Mittelwerte für grössere Zeitabschnitte zu zeigen. Da im gegebenen Fall für jeden Monat durchschnittlich 22 Beobachtungen vorlagen, ist ersichtlich, dass bei der Bestimmung der Abkühlungsgrössen für einen vollen Monat (30 Tage) der Fehler kleiner ausfallen müsste.

Somit entstehen bei der Berechnung der Abkühlungsgrösse für einzelne Zeitmomente nach beiden Seiten recht beträchtliche Fehler, die sich aber bei der Bildung von Mittelwerten aus den erhaltenen Grössen zum grossen Teil aufheben. Bei der Bestimmung der monatlichen Mittelwerte nach der mittleren Temperatur, absoluten Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit ist der Fehler jedoch ganz gering und wird bei der Berechnung der jährlichen Abkühlungsgrösse gleich 0.1. Somit wäre die gegebene Gleichung bei der Bestimmung von Mittelwerten gut anwendbar.

Es seien nun einige Worte über die allgemein bekannte Hill'sche Formel gesagt. Zum Vergleich der Güte derselben und der in vorliegender Arbeit gegebenen Formel, sind für alle genannten Beobachtungstermine auch nach der Hill'schen Formel die Abkühlungsgrössen trocken berechnet worden. Die nach der Formel $A_t = \Theta(0.12 + 0.54\sqrt{v})$ erhaltenen Werte (A_t — Abkühlung, $\Theta = 36.5^\circ\text{C}$ — Lufttemperatur, v — Windgeschwindigkeit) erwiesen sich als bedeutend grösser als die beobachteten. Bei Anwendung der Formel $A_t = \Theta(0.13 + 0.47\sqrt{v})$ zeigte sich eine viel bessere Übereinstimmung der berechneten und beobachteten Grössen. Der mittlere Fehler betrug in diesem Fall 4.2, wobei die Zahl der negativen Abweichungen diejenige der positiven wiederum stark übertraf: 65% der Fehler waren negativ und 35% — positiv.

An dieser Stelle sei gesagt, dass auch Conrad¹⁾ gefunden hat, dass die nach der Hill'schen Formel erhaltenen Werte der Abkühlungsgrösse zu gross seien im Vergleich zu den beobachteten. Er gibt den Rat, die nach der Hill'schen Formel erhaltenen Grössen bei der Berechnung der Mittelwerte für Windgeschwindigkeiten von 1—4 m/sek um 10 % zu verkleinern.

Die Einführung der absoluten Feuchtigkeit in die Gleichung zur Bestimmung der Abkühlungsgrösse trocken hat den mittleren Fehler somit um ein Geringes verkleinert, ebenfalls sind die bei Gebrauch der linearen Gleichung entstandenen Fehler gleichmässiger nach der positiven und negativen Seite verteilt.

Bei der Berechnung der Abkühlungsgrösse sind die oben genannten linearen Gleichungen im Vergleich zu den Hill'schen bequemer, da die gesuchten Werte nur durch die Operationen der Multiplikation und Addition erhalten werden können. Die Bestimmung der Abkühlungsgrösse nach Hill, insbesondere die der feuchten Abkühlungsgrösse erfolgt durch kompliziertere Berechnungen. Als Beispiel sei hier die Formel zur Berechnung der feuchten Abkühlungsgrösse genannt: $A_f = A_t + (0.085 + 0.102 v^{0.3}) (F-f)^{1/3}$, wo für $v > 0.4$ $A_t = \Theta(0.12 + 0.54 \sqrt{v})$. Diese erfordert unter anderem mehrfaches Rechnen mit gebrochenen Exponenten. Bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten würde die Hill'sche Formel bessere Resultate liefern, da durch die Annahme einer linearen Beziehung zwischen der Windgeschwindigkeit und Abkühlungsgrösse eine gewisse Ungenauigkeit entstanden ist. Es sei aber bemerkt, dass dieses nur für ganz kleine Windgeschwindigkeiten, die als Mittelwerte bei unseren Verhältnissen gar nicht in Betracht kommen, gilt, und die der Hill'schen Formel entsprechende Parabel sich bei etwas grösseren Windgeschwindigkeiten einer Geraden nähert.

Die Bestimmung der Abkühlungsgrösse nach den oben genannten linearen Gleichungen kann auch auf graphischem Wege erfolgen. Das in Fig. 1. gegebene Nomogramm dient zur Bestimmung der Abkühlungsgrösse trocken. Es ist folgendermassen gezeichnet worden: zunächst ist aus der Formel für A_t ein Teil $A_t' = -0.79t - 0.94e + 27.95$ herausgegriffen worden. Auf der horizontalen Koordinatenachse sind die Werte der Temperaturen (untere Zahlen-

1) „Messung und Berechnung der Abkühlungsgrösse“. Gerlands Beiträge zur Geophysik, 1929.

reihe), auf der vertikalen die der absoluten Feuchtigkeit abgetragen worden. Durch 2 Punkte auf den Koordinatenachsen, welche einer bestimmten Temperatur bzw. absoluten Feuchtigkeit entsprechen, sind Parallele zu den Achsen gezogen und dem Schnittpunkt derselben der entsprechende Wert von A_t' zugeordnet worden. Für eine Reihe auf diese Art erhaltener A_t' -Werte in der t -Ebene sind Isolethen gezogen worden. Die der Gleichung $-0.79t - 0.94e + 27.95 - A_t' = 0$ entsprechenden fallenden Geraden bilden die Isolethendarstellung des Gliedes A_t' . Ferner ist der Ausdruck

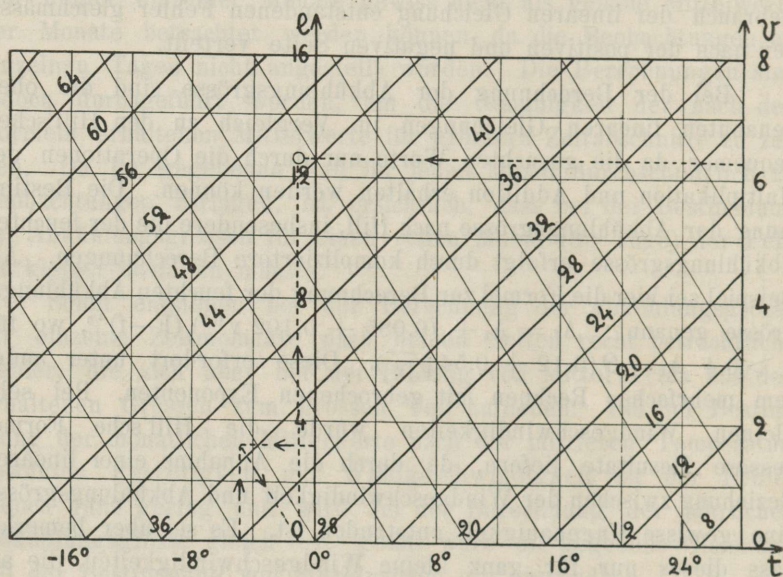


Fig. 1.

$A_t = A_t' + 3.21v$ betrachtet worden. Es wurde ein zweites Koordinatensystem genommen: auf der horizontalen Achse die gefundenen A_t' -Werte (die Teilpunkte sind durch die Schnittpunkte der fallenden Geraden mit der Horizontalachse schon abgetragen — obere Zahlenreihe), auf der vertikalen — die Windgeschwindigkeiten (rechts). Durch 2 Punkte auf den Achsen, die dem erhaltenen Wert von A_t' bzw. einer bestimmten Windgeschwindigkeit entsprechen, sind wiederum Parallele zu den Achsen gezogen worden. Dem Schnittpunkt der beiden letzten entspricht ein bestimmter Wert von A_t . Die steigenden Geraden bilden die Isolethendarstellung für $A_t = A_t' + 3.21v$, somit kann auf diesen die gesuchte

Tab. 4.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Jahr	Ampli- tude
Abkühlungsgrösse trocken.														
Tartu	43.6	43.6	40.2	32.4	22.6	19.4	12.4	15.0	22.8	31.3	35.1	41.1	30.0	31.2
Tallinn	51.5	50.4	46.5	39.3	31.1	26.1	18.3	21.1	30.2	39.9	42.2	48.4	37.1	33.2
Pärnu	44.4	43.8	40.3	33.3	24.4	23.2	14.0	16.9	25.1	33.4	35.5	42.1	31.5	30.4
Narva-Jõesuu	48.9	46.8	43.5	34.2	26.5	24.0	13.8	17.7	29.5	38.4	40.2	46.1	34.2	35.1
Vilsandi	45.7	45.6	42.0	36.6	30.1	27.7	18.7	22.6	30.1	38.7	40.1	44.4	35.0	27.0
Tooma	43.6	44.4	40.0	32.8	23.8	20.2	12.8	14.9	22.8	30.8	34.1	40.4	30.2	31.6
Olustvere	40.9	41.6	39.5	31.0	21.4	18.1	9.8	13.3	20.9	28.6	32.7	39.1	28.1	31.8
Tiirikoja	42.5	42.8	39.7	31.2	24.0	19.1	11.6	15.0	22.8	30.7	34.1	39.5	29.5	31.2
Võru	39.8	41.1	37.9	30.4	19.9	17.0	9.3	11.3	19.5	28.3	32.3	37.8	27.1	31.8
Abkühlungsgrösse feucht.														
Tartu	53.6	53.2	51.2	45.7	38.9	36.7	31.3	33.1	38.9	45.3	47.5	51.7	44.0	22.3
Tallinn	62.0	60.2	57.4	52.2	46.5	43.1	37.1	39.1	46.5	54.2	54.9	59.8	51.1	24.9
Pärnu	51.8	53.8	51.3	46.5	40.6	40.6	33.0	35.1	41.5	47.8	48.2	53.4	45.7	21.8
Narva-Jõesuu	58.9	56.2	54.1	47.1	42.3	41.3	32.8	36.2	45.8	52.6	52.7	57.0	48.1	26.1
Vilsandi	57.2	56.3	53.6	49.7	45.3	44.3	37.2	41.0	46.9	53.6	53.6	56.7	49.5	20.0
Tooma	53.5	53.7	50.7	45.8	39.8	37.3	31.5	32.8	38.7	44.7	46.4	51.1	44.0	22.2
Olustvere	51.0	51.2	50.3	44.1	37.5	35.3	38.5	31.2	36.9	42.5	45.1	49.9	42.0	22.7
Tiirikoja	52.4	52.2	50.3	44.0	39.5	36.3	30.5	33.2	39.0	44.8	46.5	50.2	43.4	21.9
Võru	49.8	50.6	48.8	43.7	36.2	34.4	28.2	29.4	35.7	42.4	44.7	48.4	41.1	22.4

Tab. 5.

	φ N	λ E Gr.	Höhe der Station	Höhe der Windfahne über d. Erd- boden
Tartu	58°23'	26°43'	69	28
Tallinn	59°26'	24°48'	45	19
Pärnu	58°23'	24°30'	10	13
Narva-Jõesuu	59°28'	28°02'	4	29
Vilsandi	58°23'	21°49'	7	14
Tooma	58°52'	26°17'	83	11
Olustvere	58°33'	25°34'	76	13
Tiirikoja	58°52'	26°56'	32	9
Võru	57°50'	27°01'	87	13

Entsprechend der Einteilung von Conrad¹⁾:

Abkühlungsgrösse (trocken) < 10	—	Überhitzungsklima
„ „ 10—20	—	Schonungsklima
„ „ 20—30	—	reizmildes Klima
„ „ 30—40	—	reizstarkes „
„ „ > 40	—	Unterkühlungsklima

¹⁾ „Die Abkühlungsgrösse als klimatischer Faktor . . .“ Zeitschrift für angewandte Meteorologie, 1929.

kann unser Klima im allgemeinen im Winter als Unterkühlungsklima, im Sommer jedoch als Schonungsklima betrachtet werden.

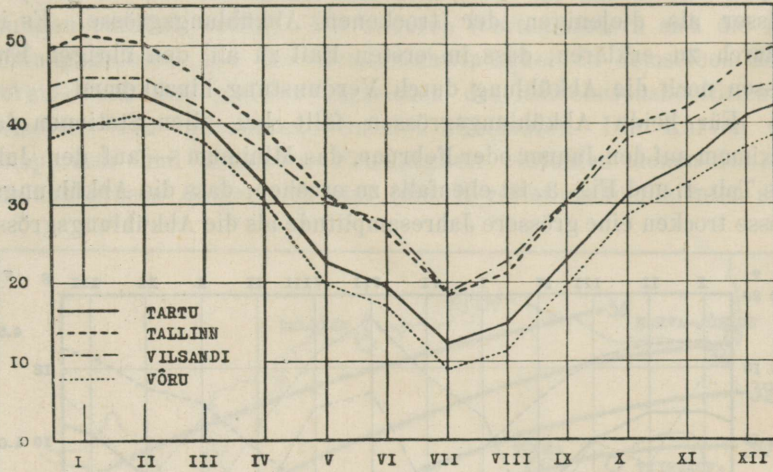


Fig. 3. Abkühlungsgröße trocken.

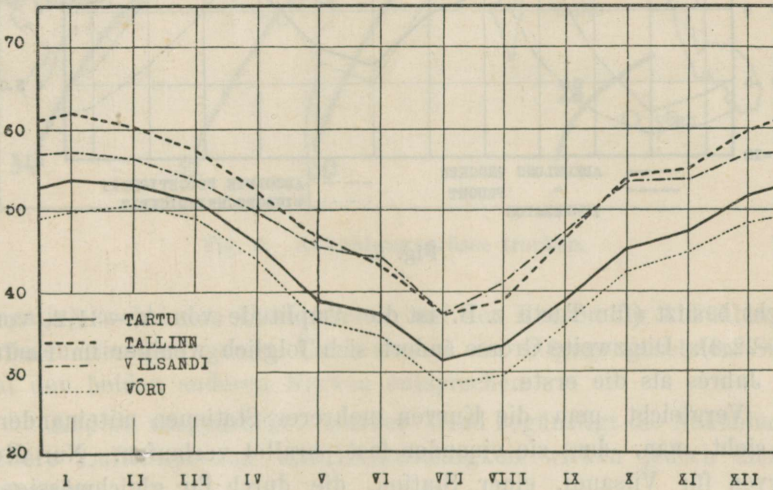


Fig. 4. Abkühlungsgröße feucht.

In Fig. 3. ist der jährliche Gang der Abkühlungsgröße trocken für die Stationen: Tartu, Tallinn, Vilsandi und Võru dargestellt; in Fig. 4. — der jährliche Gang der Abkühlungsgröße feucht

dieselben Stationen. Aus den Zeichnungen sieht man, dass die Kurven der beiden Abkühlungsgrössen ein und denselben Charakter tragen, nur sind die Werte der Abkühlungsgrösse feucht bedeutend grösser als diejenigen der trockenen Abkühlungsgrösse. Es ist dadurch zu erklären, dass im ersten Fall zu all' den übrigen Einflüssen noch die Abkühlung durch Verdunstung hinzukommt.

Für beide Abkühlungsgrössen fällt bei allen Stationen das Maximum auf den Januar oder Februar, das Minimum — auf den Juli. Aus Tab. 4. und Fig. 3. ist ebenfalls zu ersehen, dass die Abkühlungsgrösse trocken eine grössere Jahresamplitude als die Abkühlungsgrösse

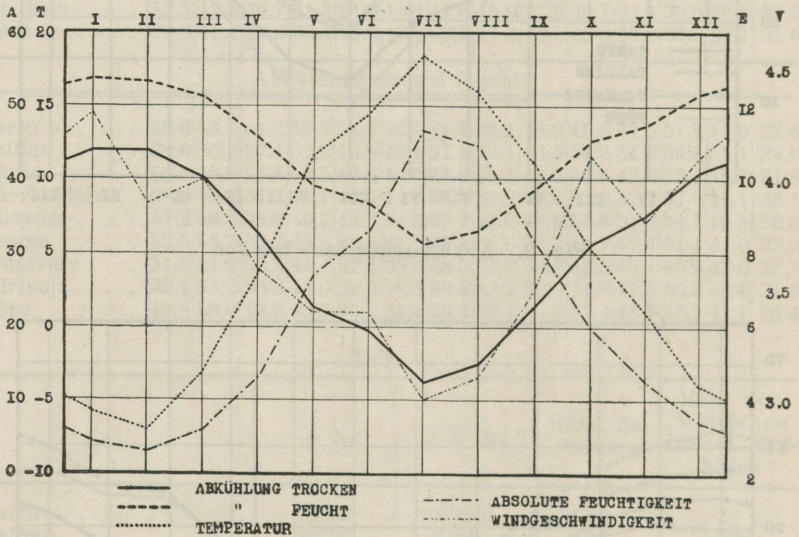


Fig. 5.

feucht besitzt (für Tartu z. B. ist die Amplitude von A_t —31.2, von A_f —22.3). Die zweite Grösse ändert sich folglich weniger im Laufe des Jahres als die erste.

Vergleicht man die Kurven mehrerer Stationen miteinander, so sieht man, dass sie einander fast parallel verlaufen. Nur die Kurven für Vilsandi, einer Station, die durch ihr gleichmässiges Klima schon bekannt ist, zeigt einen etwas anderen Charakter (die Amplitude ist kleiner, als bei den anderen Stationen).

In Fig. 5. ist für Tartu der jährliche Gang der Abkühlungsgrössen trocken und feucht, sowie derjenige anderer meteorologischer Elemente, die bei der Zusammenstellung der Gleichungen

berücksichtigt wurden, dargestellt. Aus der Fig. ist zu ersehen, dass die Kurve des jährlichen Ganges der Windgeschwindigkeit denjenigen der beiden Abkühlungsgrößen bis auf einige Abweichungen parallel verläuft. Mit anderen Worten ändern sich die Abkühlungsgrößen und die Windgeschwindigkeit in demselben Sinn, worauf auch das positive Vorzeichen des Korrelationskoeffizienten zwischen den genannten Größen hindeutet. Die Kurven der Temperatur und absoluten Feuchtigkeit verlaufen denen der Abkühlungsgröße entgegengesetzt (die Korrelationskoeffizienten sind

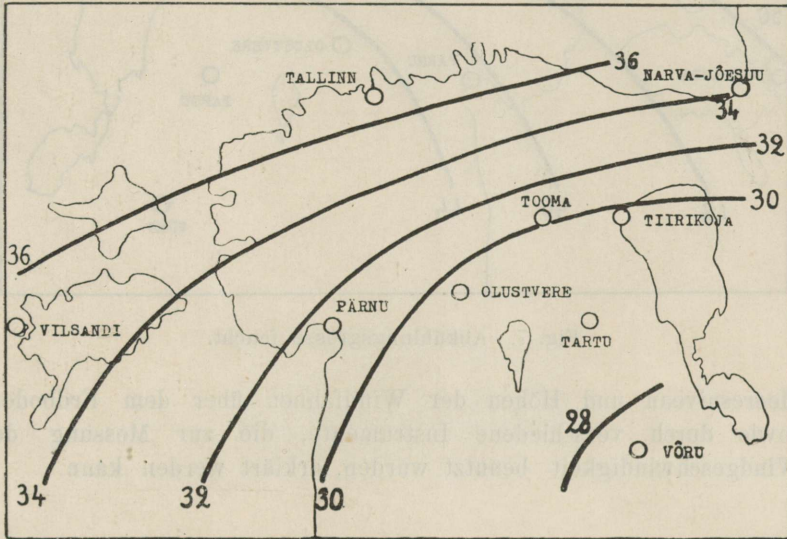


Fig. 6. Abkühlungsgröße trocken.

negativ), wobei den Unebenheiten auf den Kurven der Abkühlungsgrößen ziemlich genau Unebenheiten im entgegengesetzten Sinn auf den beiden anderen Kurven entsprechen.

Anders ausgedrückt: starker Wind begünstigt die Abkühlung, höhere Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit wirken jedoch dieser entgegen.

Zum Schluss ist noch in Fig. 6. und Fig. 7. die kartographische Darstellung der Abkühlungsverhältnisse des Jahres gegeben. Es ist zu ersehen, dass die Abkühlungsgröße zur Ostsee zu stark zunimmt — ein Umstand auf den schon C. Dorno¹ und E. Göhlert² für Deutschland hingewiesen haben.

An einzelnen Stellen ist diese Gesetzmässigkeit etwas gestört, was wohl durch verschiedene Höhen der Stationen über dem

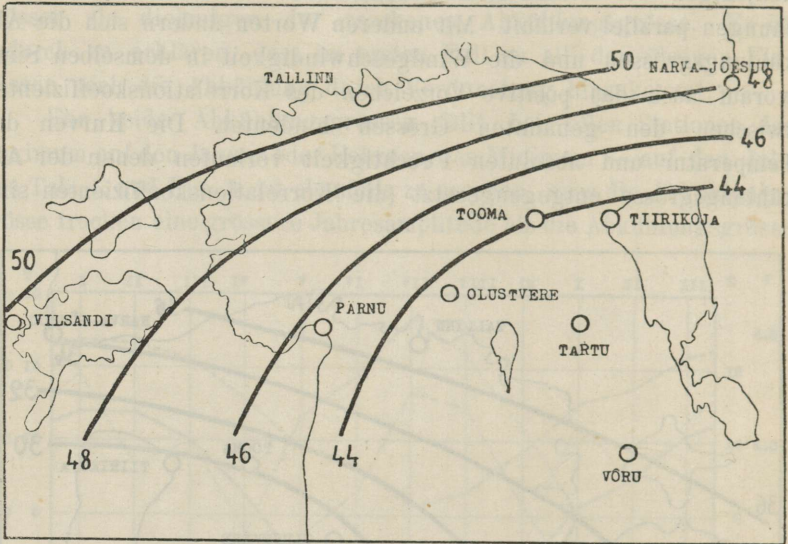


Fig. 7. Abkühlungsgrösse feucht.

Meeresniveau und Höhen der Windfahnen über dem Erdboden, sowie durch verschiedene Instrumente, die zur Messung der Windgeschwindigkeit benutzt wurden, erklärt werden kann.

1 Meteorologische Zeitschrift, 1928. „Die Abkühlungsgrösse in verschiedenen Klimaten . . .“

2 Deutsches Meteorologisches Jahrbuch — Sachsen, 1927. „Untersuchung der Abkühlungsverhältnisse . . .“