

# ZUR FRAGE DER ZYKLONEN- VERTIEFUNG

VON

**K. FRISCH**

---

TARTU 1930

K. Mattiesens Buchdruckerei Ant.-Ges., Tartu.

In folgenden Zeilen werden einige Bemerkungen zur Frage über die Vertiefung der Zyklonen gegeben. Bevor wir zur Betrachtung der betreffenden Wetterkarten schreiten, wollen wir einige Erörterungen über die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen vorausschicken.

In allgemeiner Form lassen sich die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen in folgender Weise darstellen<sup>1)</sup>:

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{d^2x}{dt^2} - 2\omega \sin\varphi \frac{dy}{dt} + 2\omega \cos\varphi \frac{dz}{dt} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial x} + X \\ \rho \left[ \frac{d^2y}{dt^2} + 2\omega \sin\varphi \frac{dx}{dt} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial y} + Y \\ \rho \left[ \frac{d^2z}{dt^2} - 2\omega \cos\varphi \frac{dx}{dt} + g \right] &= -\frac{\partial p}{\partial z} + Z \end{aligned}$$

wo  $p$  — den Luftdruck,  $\rho$  — die Luftdichte,  $\omega$  — die Winkelgeschwindigkeit der Erde,  $\varphi$  — die geographische Breite,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — die Komponenten der Reibungskraft,  $g$  — die Schwerebeschleunigung bedeutet. Bei Vernachlässigung der Reibung und der verhältnismässig kleinen Glieder  $\frac{dz}{dt}$  sowie  $2\omega \cos\varphi \frac{dx}{dt}$  in der dritten Gleichung<sup>2)</sup>, erhalten wir im Falle des Gleichgewichtes:

$$\begin{aligned} -\rho 2\omega \sin\varphi \frac{dy}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} \\ \rho 2\omega \sin\varphi \frac{dx}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} \\ \rho g &= -\frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned}$$

Demnach halten sich die horizontalen Komponenten der Druckkraft mit den Komponenten der Ablenkungskraft und die

1) Vergleiche zum Beispiel V. H. Ryd, Travelling Cyclones, S. 7.

2) Th. Hesselberg und A. Friedmann, Die Grössenordnung der meteorologischen Elemente und ihrer räumlichen und zeitlichen Ableitungen, S. 162 f.

vertikale Komponente der Druckkraft mit der Schwerebeschleunigung im Gleichgewicht. Eine Zyklone, für die die angegebenen Beziehungen in allen Punkten gelten, würde, ohne sich zu vertiefen oder zu verflachen, eine andauernde konstante Druckverteilung beibehalten.

Wenn nun in irgendeinem Teile der Zyklone die Luftdichte  $\rho$  sich verändern sollte, würden sich die Produkte  $\rho \, 2\omega \sin\varphi \frac{dy}{dt}$  und  $-\rho \, 2\omega \sin\varphi \frac{dx}{dt}$  bei der Zunahme von  $\rho$  vergrößern, bei der Abnahme von  $\rho$  verkleinern, wodurch im ersteren Falle die Luftpartikeln sich vom Zyklonenzentrum zu entfernen, im letzteren dagegen sich ihm zu nähern beginnen. Bei der Erhöhung der Luftdichte würde demnach am betreffenden Teil der Zyklone eine Schiebung der Luft nach aussen hin stattfinden und infolgedessen eine Abnahme des Luftdruckes vor sich gehen. Eine Dichtezunahme ist vorauszusetzen bei der Annäherung kalter Luftmassen, wodurch sich die Zyklone plötzlich vertieft, eine Erscheinung, die sich öfters an synoptischen Wetterkarten verfolgen lässt<sup>1)</sup>. Leider ist es nicht immer möglich, eine solche Vertiefung der Zyklone frühzeitig genug auf Grund der Wetterkarten voraussehen, wodurch manchmal Fehlprognosen, besonders über die kommende Windstärke, entstehen.

Die Vertiefung der Zyklone würde demnach in folgender Weise vor sich gehen. Bei einer Vergrößerung der Dichte bzw. Erniedrigung der Temperatur wird auch der Druckgradient sich vergrößern, um wieder mit der Ablenkungskraft ins Gleichgewicht zu kommen. Wenn nun aber das Fallen der Temperatur eine Zeitlang andauert, wird das Gleichgewicht erst nach Aufhören des Fallens der Temperatur erreicht werden. Dank der Zunahme der Ablenkungskraft der Erdrotation werden daher die erkalteten Luftmassen vom Zyklonenzentrum fortgeschoben, so dass die höher liegenden Luftschichten infolgedessen kontinuierlich niedersinken.

Fig. 1 stellt einen Querschnitt durch eine Zyklone dar, wobei A ein dem Zyklonenzentrum näher liegender Punkt ist, B aber ein entfernterer. Wenn nun das Fallen der Temperatur von der Erdoberfläche CB bis etwa CD stattfindet, so werden die erkalteten Luftmassen in einer Zeit  $\Delta t$  um die Strecke  $\Delta l$

1) Bergeron und Swoboda, Veröff. d. Geophys. Inst. d. Univ. Leipzig 1924 S. 69.

nach rechts verschoben, wodurch die darübergelagerten Luftmassen um  $\Delta h = \Delta l \sin \alpha$  niedersinken, wobei  $\alpha$  die Neigung von CD zur Erdoberfläche ist. Durch dieses Niedersinken wird aber die potentielle Energie fortlaufend in kinetische übergehen, weshalb die Windstärke  $v$  die ganze Zeit über etwa nach der Formel  $v = \sqrt{2g \Delta h}$  zunimmt.

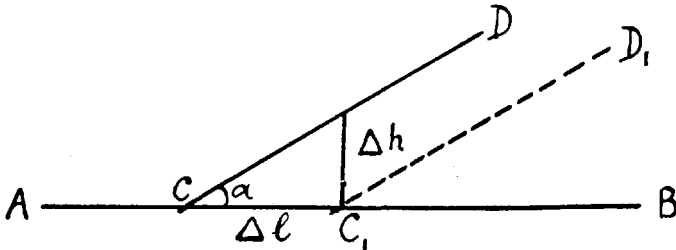


Fig. 1.

Hierdurch wächst infolge der Zunahme der Windstärke die Ablenkungskraft der Erdrotation, was andererseits ein weiteres Fallen des Luftdruckes mit sich führt.

Durch den beschriebenen Vorgang wird das Fallgebiet der Zyklone sich hauptsächlich auf dem Gebiete der Temperaturniedrigung ausbilden, wodurch die Zyklone gleichzeitig sich vertieft und an Ausdehnung abnimmt, eine Erscheinung, die sich oft aus den Wetterkarten ersehen lässt.

Unsere weitere Aufgabe wird es sein, einige solche Fälle näher zu besprechen, wo die verflachten und im Absterben begriffenen Zyklonen wieder lebendig wurden und durch plötzliche Vertiefung stürmische Winde erzeugten. Zu diesem Zweck wurden die Wetterkarten der Deutschen Seewarte ausgebeutet und aus den Jahren 1927, 1928 und 1929 solche markante Fälle ausgesucht, wo die verflachten Zyklonen mit bereits verschwindendem warmem Sektor sich am folgenden Tage wenigstens um 10—15 mm vertieft hatten.

Als ersten Fall betrachten wir die Vertiefung der Zyklone, die vom 12. bis zum 13. XI 1927 sich vom Balkan in nordöstlicher Richtung fortbewegend, bis zu Sturmstärke anwachsende Winde mit sich gebracht hat (s. Fig. 2 und 3).

Was die Luftdruckverteilung am 12. XI anbelangt, so sehen wir über Skandinavien eine Antizyklone, von der ein Hochdruckkeil sich über die Ostsee bis Südrussland erstreckte. Über dem

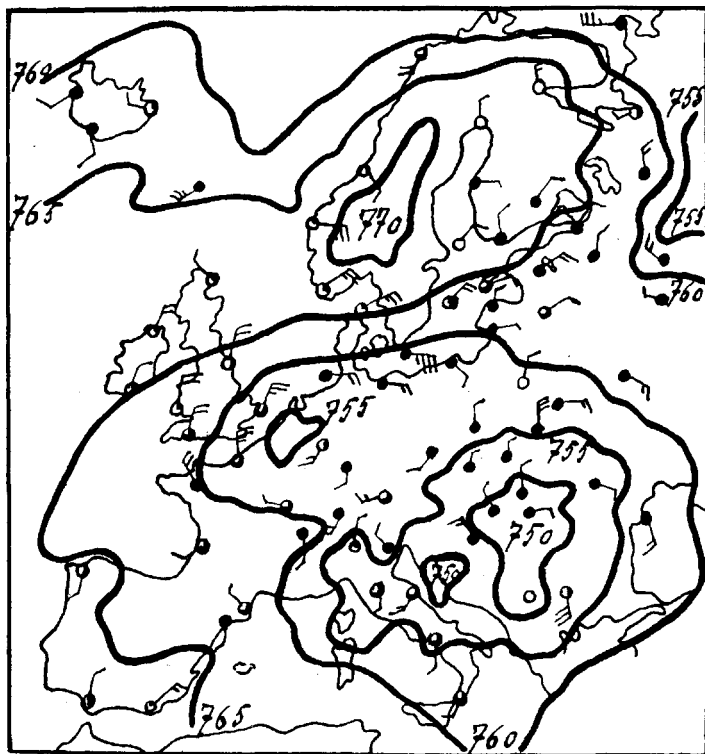


Fig. 2. Die Luftdruckverteilung am 12. XI 1927. 8h.

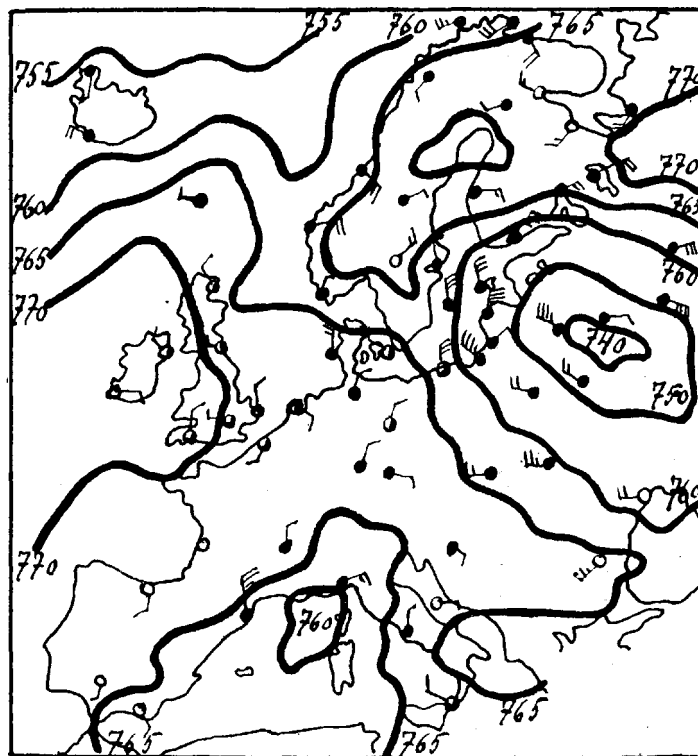


Fig. 3. Die Luftdruckverteilung am 13. XI 1927. 8h.

nördlichen Ural befand sich ein flaches Tiefdruckgebiet, wodurch in Nordeuropa die Isobaren eine beinahe nördliche Richtung erhielten und einen breiten Kaltluftstrom bis in das Gebiet der über dem Balkan sich befindenden Zyklone verursachten. Über die Höhe dieses Kaltluftstromes können wir keine genauen Daten geben; wohl aber zeigen die Pilotballonaufstiege in Lindenberg (12. XI, 15<sup>h</sup>) und Stockholm (12. XI, 8<sup>h</sup>) einen N- bis NE-Strom bis 3 km bzw. 2 km Höhe. In Helsingfors war um 8<sup>h</sup> bis 1 km Höhe ein NE-Strom, höher aber ein schwacher SE-Wind vorhanden. Die Temperaturabnahme an der Erdoberfläche war nicht besonders gross (s. Tab. 1), da die unteren Luftschichten sich bei der Berührung mit der warmen Erdoberfläche erwärmt hatten.

Tabelle 1.

Lufttemperatur in C° vom 11. bis zum 13. November 1927.

	11,19 <sup>h</sup>	12,8 <sup>h</sup>	12,14 <sup>h</sup>	12,19	13,8 <sup>h</sup>
Tartu	—3	—3	—2	—5	—6
Narva-Jõesuu	—4	—3	—2	—5	—6
Leningrad	—2	—2	—4	—5	—6
Luga	—4	—4	—4	—6	—7
Podany	—5	—11	—10	—17	—16

Weiter können wir aus den Wolkenbeobachtungen schliessen, dass der vertikale Temperaturgradient in den höheren Luftschichten ziemlich gross war, da trotz einer breiten Schichtwolkendecke, die sich gewöhnlich im Herbst zu bilden pflegt, an vielen Stellen von den Beobachtern Cu-Wolken notiert wurden. Leider sind uns die Wolkenarten nur aus den Wettertelegrammen von Westeuropa und nur für die Beobachtungen von 8<sup>h</sup> bekannt. Jedoch werden in den Morgentelegrammen des 12. XI an einer Reihe von Orten Cu-Wolken erwähnt (Haustholm, Ska-gen, Hernösand, Turku). Gleicherweise finden wir um 14<sup>h</sup>, wo wir Notizen über die Wolkenarten nur aus Estland haben, an 4 Stationen Cu-Wolken (Vilsandi, Polli, Haapsalu, Jõhvi). Da diese Cu-Wolken alle als dynamisch zu betrachten sind, ersehen wir daraus, dass in den höheren Luftschichten eine starke Temperaturerniedrigung vor sich ging. Über die Temperaturverhältnisse in der Höhe können wir auch aus den berechneten Potentialtemperaturen an der Erdoberfläche einige Schlüsse ziehen. Wenn wir

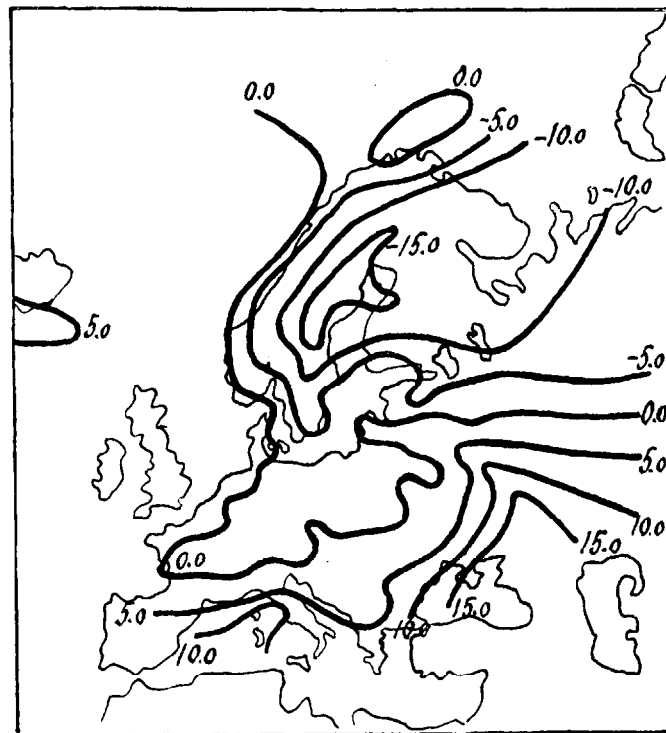
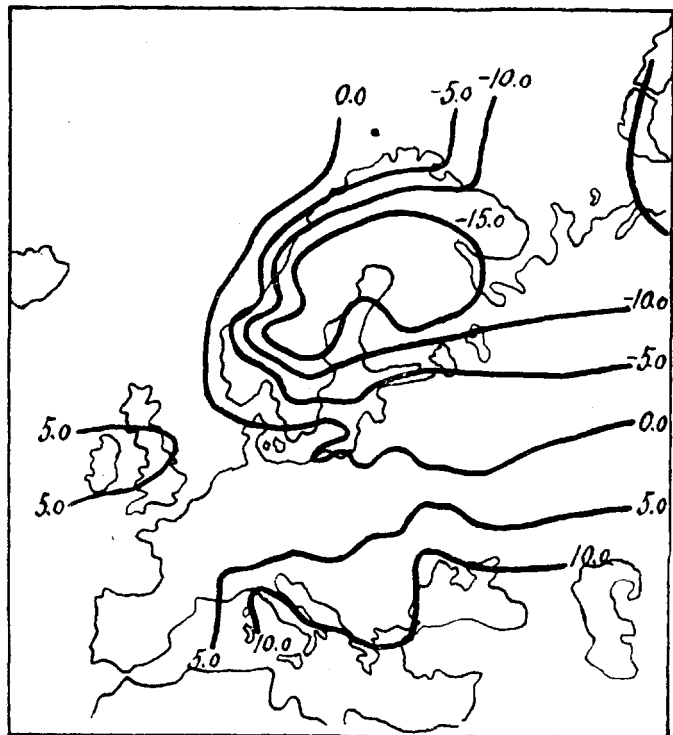


Fig. 4. Linien gleicher Potentialtemperatur am 12. XI 1927. 8h.

Fig. 5. Linien gleicher Potentialtemperatur am 13. XI 1927. 8h.

die Isopotential-Temperaturlinien am 12. und 13. XI aus den Morgenbeobachtungen miteinander vergleichen, ergibt sich, dass besonders in Russland die erwähnten Linien (s. Fig. 4 und 5) sich stark einander genähert hatten (vgl. z. B. die — 5.0- und 5.0-Linien). Daraus geht hervor, dass die räumlichen Isothermflächen vom 12. bis zum 13. XI stark zusammengeschrumpft waren und eine viel steilere Lage eingenommen hatten. Das alles zwingt uns zu der Annahme, dass der auf Seite 5 beschriebene Effekt in diesem Falle besonders stark zur Wirkung kam. Und wirklich ersehen wir aus der Isobarenkarte vom 13. XI, dass die Zyklone sich stark vertieft und in der Richtung nach Norden dem Kältegebiet genähert hatte.

Als zweites Beispiel sehen wir uns die Vertiefung einer Zyklone vom 7. bis zum 8. Juli 1929 an (s. Fig. 6 und 7). Am Morgen des 7. Juli hatten wir ein flaches Tiefdruckgebiet mit dem Zentrum von 750 mm über Polen, während ein zweites Tiefdruckgebiet von 745 mm über Nordostrussland lag. Über Südrussland, Spanien und Skandinavien befanden sich Antizyklonen. Zwischen den beiden Zyklonen hatten infolgedessen die Isobaren eine sattelförmige Gestalt angenommen.

Was die Temperaturverhältnisse betrifft, so herrschten über Südosteuropa hohe Temperaturen von 18° bis 24°. Auch die über Polen befindliche Zyklone wies in ihrem Zentrum Temperaturen bis 19° auf. Nördlich von der Zyklone war es dank den Winden aus nördlichen Richtungen bedeutend kühler: so waren in Südschweden und stellenweise in Estland und Lettland nur 12°—13°. Auch in Westeuropa herrschte eine kühle Witterung. Die 15°-Isotherme verlief, beinahe parallel der Meridianlinie, vom Balkan zur Ostsee. Auch hier dürfen wir voraussetzen, dass die Vertiefung der Zyklone durch das Fallen der Temperatur bzw. die Zunahme der Luftdichte bedingt war.

Tabelle 2.

Lufttemperatur in C° vom 6. bis zum 8. Juli 1929.

	6,19 <sup>h</sup>	7,8 <sup>h</sup>	7,14 <sup>h</sup>	7,19 <sup>h</sup>	8,8 <sup>h</sup>
Stettin	16	14	18	15	13
Danzig	—	15	14	12	—
Königsberg	17	14	17	13	13
Memel	—	—	16	14	12
Stockholm	17	16	16	14	12
Wisby	18	14	11	11	9
Kalmar	16	14	12	12	—



Fig. 6. Die Luftdruckverteilung am 7. VII 1929. 8h.

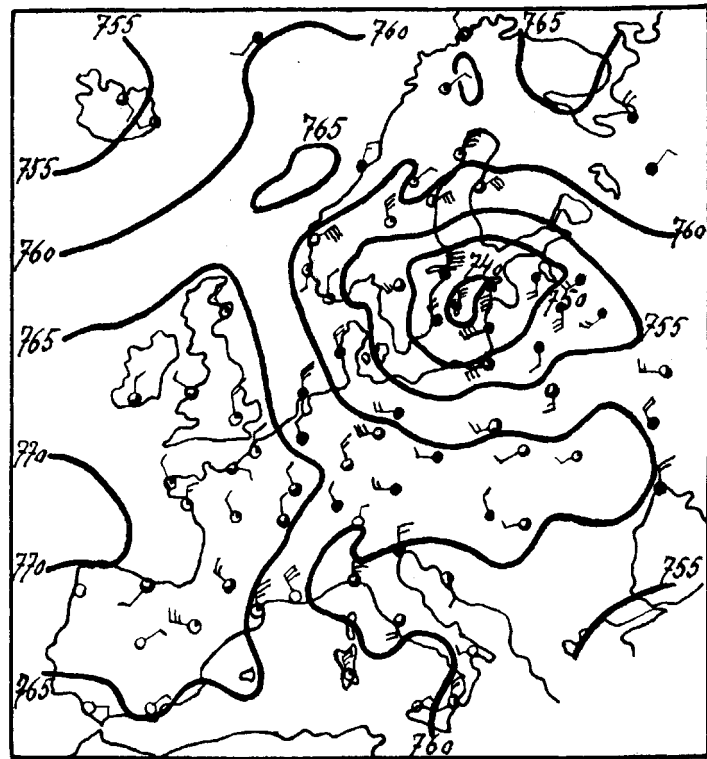


Fig. 7. Die Luftdruckverteilung am 8. VII 1929. 8h.

Die Erniedrigung der Temperatur an der Erdoberfläche erreichte stellenweise bis  $10^{\circ}$  (vgl. die Tabelle 2).

Am folgenden Tage hatte sich die Zyklone bis zu 740 mm vertieft und sich in der Richtung der Temperaturenniedrigung bis über die Ostsee bewegt (s. Fig. 7). Gleichzeitig herrschten im Gebiet der Temperaturabnahme starke bis stürmische Winde.

In gleicher Weise zeigen noch 9 weitere Fälle mit starker Luftdruckabnahme, dass das Fortschreiten einer sich vertiefenden Zyklone stets in der Richtung eines Temperaturfallgebietes vor sich ging, wodurch in oben beschriebener Weise ein starker Luftdruckfall und eine starke Windzunahme hervorgerufen wurde.

Die untersuchten Fälle sind folgende: 13.—14. IV 1927, 26.—27. V 1927, 16.—17. IV 1928, 8.—9. V 1928, 18.—19. VI 1928, 8.—9. VIII 1928, 6.—7. IX 1928, 12.—13. I 1929, 1.—2. III 1929.

Was die Frage anbelangt, auf welche Weise ein solches Fallen der Temperatur hervorgerufen wird, so zeigen die Wetterkarten, dass hier als Hauptursache eine vorhergehende Zyklone anzusehen ist, an deren Westseite die von Norden wehenden Winde eine Abkühlung in der Richtung der darauf folgenden und sich später vertiefenden Zyklone herbeiführen, — eine Erscheinung, auf die bereits Bergeron und Swoboda sowie Schröder<sup>1)</sup> hingewiesen haben.

---

1) Richard Schröder, Veröff. d. Geophys. Inst. d. Univ. Leipzig 1929, S. 51.