

B. Béll:

### Über das Verhalten der an Isothermenflächen festgestellten Labilitätsenergie

*Об энергии неустойчивости, измеренной на изотермических поверхностях.* Для исследования условий образования гроз в Будапеште и его окрестностях радиусом в 50 км автор выбрал известный из литературы фактор неустойчивости по Симилю, потому что этот фактор вследствие простоты способа его вычисления хорошо применим в повседневной практике. Фактор неустойчивости относится при этом не к произвольно выбранному уровню 500 мб, но, на основании соображений физики облаков, к изотермическим поверхностям  $0^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-30^\circ$ . Для вычисления измененного таким образом фактора построены простые номограммы. Путем испытания удалось установить, что фактор неустойчивости, вычисленный для изотермической поверхности  $-30^\circ$ , является лучшей характеристической величиной для отделения грозовых дней от дней с осадками без грозы. Чтобы оценить возможность прогностического использования фактора неустойчивости автор произвел исследование на основе наблюдений на центральной станции в Будапеште, в области Большого Будапешта и в окрестностях Будапешта радиусом в 50 км. Статистическими методами определялись критические значения неустойчивости, при превышении которых наступление грозы ожидается с определенной вероятностью. Показано, как при увеличении фактора неустойчивости растет среднее число гроз, наблюдаемых в течение одного дня (плотность гроз) в районе радиусом в 50 км. На основании радиозондовых наблюдений через каждые 6 часов автор показывает, насколько важно предсказание кривой состояния с точки зрения прогноза гроз.

\*

Als die wichtigste Energiequelle in einem Gewittervorgang ist die im Laufe der Wasserdampfkondensation freiwerdende Labilitätsenergie zu betrachten. Es ist vollkommen begreiflich, dass in der synoptischen Praxis eine labile Schichtung als die notwendige Voraussetzung für das Zustandekommen eines Gewitters betrachtet wird. Bei der Anstellung prognostischer Erwägungen im Zusammenhang mit der Labilitätsenergie muss es jedoch beachtet werden, dass bei der Ausbildung eines Gewittervorganges eine ganze Reihe von dynamischer, thermischer und luftelektrischer Faktoren in Frage kommt. Aus diesem Grunde ist es gar nicht zu erwarten, dass die Gewittertätigkeit schon durch einen einzigen Faktor eindeutig bestimmt werden könnte.

In der vorliegenden Arbeit soll es untersucht werden, welches Gewicht der Labilitätsenergie bei der Aufstellung einer für die Umgebung von Budapest gültige Gewittervorhersage beigemessen werden kann. Diese Untersuchung wird sich auf Niederschlagstage beschränken. Man darf nämlich mit voller Berechtigung annehmen, dass in der praktischen synoptischen Arbeit zunächst über das Auftreten eines

trockenen oder niederschlagbringenden Wetters entscheidet wird, und erst später nur Betrachtungen über den Labilitätsgrad angestellt werden.

Diese Bearbeitung erstreckt sich lediglich auf das Sommerhalbjahr. Gewitter, welche im Laufe des Winterhalbjahrs verzeichnet werden, sind einerseits von minderer Bedeutung für das gesamte Wettergeschehen, und dieselben unterscheiden sich auch aus energetischem Standpunkt recht stark von einem Sommergewitter. Zu den Untersuchungen wurden die in Budapest während des Jahrzehnts 1951—1960 ausgeführten Radiosondenaufstiege herangezogen. Entsprechend des allgemein befolgten Verfahrens [1] wurden die Labilitätsverhältnisse eines gegebenen Tages aus den in der Zeit zwischen 00 und 03 GMT durchgeführten Aufstiegen ermittelt; diejenigen Regenfälle und Gewitter wurden in Betracht gezogen, welche im Zeitraum von 07<sup>h</sup> des betreffenden Tages bis 07<sup>h</sup> des nachfolgenden Tages sich ereignet hatten.

Dabei soll es beachtet werden, dass die in dieser Weise festgestellten Labilitätsverhältnisse eigentlich nur entlang der Trajektorie des Ballons eine Gültigkeit besitzen, in der Praxis hingegen für einen Umkreis der Beobachtungsstelle mit einem Radius von etwa 50 bis 100 Kilometer für eine Beurteilung der zu erwartenden Gewittertätigkeit verwendet werden. In dieser Arbeit sollen auch die Folgen einer solchen in Zeit und Raum ausgeführten Extrapolation behandelt werden.

In Anbetracht der erwähnten Vernachlässigungen sowie der beschränkten Verarbeitungsmöglichkeiten, die innerhalb des synoptischen Dienstes zur Verfügung stehen, sind wir zur Überzeugung gelangt, dass eine beste Charakterisierung der Labilitätsverhältnisse durch den sogenannten  $\Delta T$ -Faktor erreicht werden kann, der von *Similä* im Jahre 1949 vorgeschlagen und später für eine Verwendung unter skandinavischen Verhältnissen eingehend untersucht wurde [2]. Zwecks der Vereinfachung der Berechnungen wird hier vorausgesetzt, dass das Kondensationsniveau an der Isobarenfläche 850 mb liegt. Bezeichnet man die Temperatur, mit welcher die aus dem 850-mb Punkt der Zustandskurve ausgehende Feuchtadiabate die Fläche 500 mb erreicht, durch  $T_f^{500}$ , und die Temperatur, mit welcher die vom selben Punkt ausgehende Trockenadiabate an der 500-mb Fläche angelangt, durch  $T_t^{500}$ , und besitzt die Zustandskurve selbst an der 500-mb Fläche eine tatsächliche Temperatur  $T^{500}$ , dann lautet der von *Similä* eingeführte Faktor:

$$\Delta T = 10 \frac{T_f^{500} - T^{500}}{T_f^{500} - T_t^{500}}$$

Im Interesse der Beschleunigung der Berechnungen werden durch den Faktor  $\Delta T$  die Labilitätsverhältnisse in Bezug auf die Isobarenfläche 500 mb angegeben, doch ist das Verfahren im Prinzip für jedes beliebige Höhengniveau anzuwenden.

Nach unserer Ansicht können die in einer Gewitterwolke sich abspielenden wolkenphysikalischen Vorgänge besser behandelt werden, wenn die Labilität für ein solches Druckniveau festgestellt wird, in deren Umgebung die entlang der Feuchtadiabate aufsteigende Luft Temperaturen erreicht, welche als charakteristisch für die Elektrifikationsvorgänge in der Wolke anzusprechen sind. Namentlich ist es auf Grund der verschiedenen Theorien zur Erklärung des Entstehens der Gewitterelektrizität als wahrscheinlich zu bezeichnen, dass das Auftreten der elektrischen Ladungen in der Wolke im Laufe der Aggregatzustandsänderungen des Wassers vor sich geht, während die räumliche Trennung der Ladungen verschiedenen Vorzeichens mit den senkrechten Luftbewegungen und der auf eine senkrecht gerichtete Beschleunigung führenden Labilitätsenergie im Zusammenhang stehen.

Nach den Radarbeobachtungen, welche an Gewitterwolken ausgeführt wurden, erscheint das erste Echo im Zeitpunkt, als der Gipfel der Wolke bis zur 0°-Isotherme



vorgedrungen ist. Zunächst sind die Wolkenelemente noch klein, doch erfahren dieselben im Lauf der Entwicklung der Wolke eine rasche Grössenzunahme. Die Zunahme beschleunigt sich besonders, wenn das Niveau der  $-30^{\circ}$ -Isotherme vom Wolkengipfel erreicht wird. Aus einer Untersuchung der Polaritäten geht es hervor, dass die positiven Ladungen, welche meistens im Oberteil der Wolke sich ansammeln, ihren höchsten Wert in einer Höhe von 6 bis 7 km, bei einer Temperatur um  $-30^{\circ}$  erreichen. Der Raum mit einer negativen Ladung im mittleren Teil der Wolke wird durch die  $0^{\circ}$ -Isotherme von den positiven Ladungen des unteren Wolkenteils abgegrenzt [3, 4]. Nach Untersuchungen von Rossi [5], die an finnischem Beobachtungsmaterial ausgeführt wurden, liegen die niedrigsten Temperaturen in Schauer-

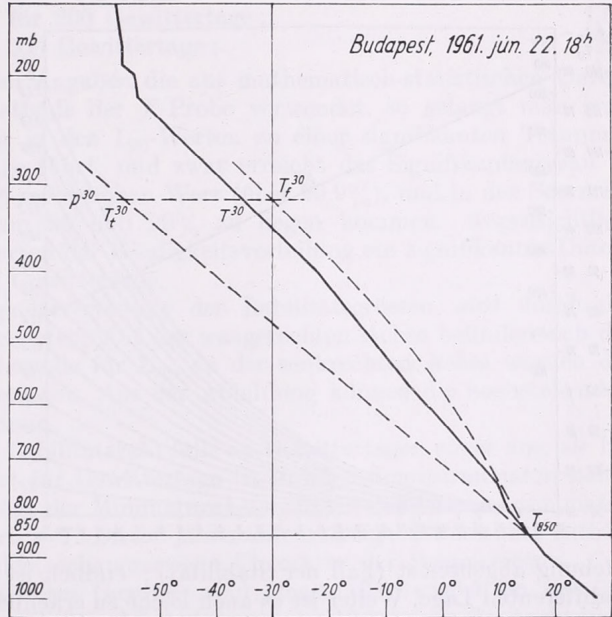


Abb. 1.: Temperatur-Druck Zustandskurve (Budapest, 22. 6. 1961)

1. ábra: Hómérséklet-nyomás állapotgörbe (Budapest, 1961. VI. 22.)

wolken zwischen  $-8^{\circ}$  und  $-15^{\circ}$ , in Gewitterwolken zwischen  $-15^{\circ}$  und  $-30^{\circ}$ . Dementsprechend dürfte die kritische Temperaturgrenze für eine Ladungsbildung und für die Trennung der Ladungen bei  $-15^{\circ}$  liegen. Nach Jones [6] entsteht der erste Blitz dann, wenn das Radarecho bis zur Höhe der  $-30^{\circ}$ -Isotherme vorgedrungen ist.

Auf Grund dieser Erwägungen benützten wir einen modifizierten Wert des Faktors  $\Delta T$ , indem an Stelle der 500-mb Fläche diejenigen Niveaus verwendet wurden, an welchen von der entlang einer Feuchtadiabate aufsteigenden Wolkenluft die Isothermenflächen  $0^{\circ}$ ,  $-15^{\circ}$  und  $-30^{\circ}$  erreicht werden. Aus einer ausführlichen Bearbeitung des Materials ging es hervor, dass die an Regentagen ohne Gewitter auftretenden Labilitätsverhältnisse signifikant von denjenigen abweichen, welche an Gewittertagen beobachtet werden. Namentlich sind die Abweichungen am grössten im Falle des  $-30^{\circ}$ -Niveaus, und am geringsten im Falle des  $0^{\circ}$ -Niveaus. Dementsprechend wird hier ein Labilitätsindex für das  $-30^{\circ}$ -Niveau ( $L_{30}$ ) eingeführt. Nach der Abb. 1 ist:

$$L_{30} = 10 \frac{T_f^{30} - T^{30}}{T_f^{30} - T_t^{30}}$$

Zur raschen Berechnung der  $L_{30}$ -Werte wurde ein einfaches Nomogramm hergestellt (Abb. 2). An der waagerechten Achse des Nomogramms befindet sich die Temperatur des 850-mb Niveaus ( $T_{850}$ ). Von der Kurve  $p^{30}$  wird der Druckwert angegeben, bei welchem an der aus dem Temperaturpunkt  $T_{850}$  ausgehenden Feuchtadiabate die Isothermenfläche  $-30^\circ$  erreicht wird. An der Ordinatenachse des Nomogramms befindet sich der aus der Zustandskurve bei einem Druck von  $p^{30}$  entnommene Temperaturwert  $T^{30}$ . Aus den Werten  $T_{850}$  und  $T^{30}$  erhält man mittels der im Nomogramm dargestellten Kurvenschar den Betrag von  $L_{30}$ .

Offenbar wird bei positiven Werten von  $L_{30}$  die abiabatisch auf das Niveau  $-30^\circ$  gehobene Wolkenluft auf Kosten der Labilitätsenergie weiter nach oben befördert (Fall der Labilität), und bei negativen Werten von  $L_{30}$  wird die erfolgte

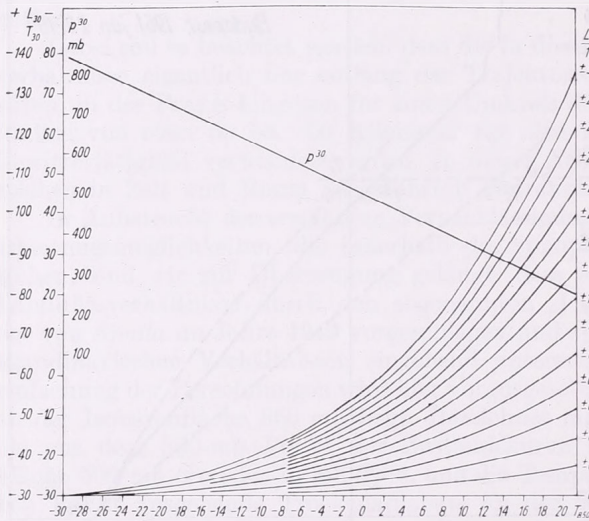


Abb. 2.: Nomogramm zur Berechnung der Labilitätswerte

2. ábra: Nomogramm a labilitási számérték kiszámítására

Hebung abgebremst (Fall der Stabilität); endlich ist  $L_{30} = 0$  der Ausdruck einer indifferenten Lage. Weiter ist es auch leicht zu erkennen, dass der höchste mögliche Wert von  $L_{30}$ , namentlich 10, im Falle auftreten würde, wenn die Zustandskurve von 850 mb bis  $p^{30}$  gänzlich mit der Trockenadiabate übereinstimmen würde. Die möglichen negativen Werte von  $L_{30}$  besitzen nicht eine solche natürliche Begrenzung; in Luftmassen, welche nur eine geringe Temperaturabnahme mit der Höhe aufweisen, und besonders bei der Anwesenheit von Temperaturinversionen, können verhältnismässig hohe negative Beträge des  $L_{30}$  verzeichnet werden.

Die Niederschlagstage, welche im Laufe des Sommerhalbjahrs in den zehn Jahren 1951—1960 verzeichnet wurden, haben wir in Regentage und Gewittertage eingeteilt. Für beide Gruppen wurden die Werte  $L_{30}$  festgestellt. Die Häufigkeit der auftretenden Labilitätswerte wird für Regen- und für Gewittertage in Tabelle I gesondert mitgeteilt.

Aus der Tabelle wird es ersichtlich, dass das verschiedene Verhalten von Regen- und Gewittertagen vor allem in der Ausdehnung des Wertbereiches für  $L_{30}$  in Erscheinung tritt. An Gewittertagen liegen die vorkommenden Werte von  $L_{30}$  zwischen 7 und  $-5$ ; an Regentagen findet man hingegen eine gewaltige Erweiterung des Wertbereiches in der Richtung nach der Stabilität. Dieser Unterschied tritt in den Übergangsmonaten (IV, V, IX) besser, in der Sommerzeit (VI, VII, VIII) geringer in Erscheinung. Infolge der sommerlichen Erwärmung erfährt das Vorkommen der schauerartigen, aber gewitterfreien Regenfälle eine stetige Zunahme.



Monatswerte werden in zwei Gruppen, für Übergangsmonate und Sommermonate, behandelt. Für die so erhaltenen vier Häufigkeitsverteilungen erhielten wir die folgenden Werte der statistischen Kennzahlen:

1. Übergangsmonate:
  - a) Durchschnitt der  $L_{30}$ -Werte für 385 Regentage: —3,07  
Streuung von  $L_{30}$  für 385 Regentage: 4,18
  - b) Durchschnitt der  $L_{30}$ -Werte für 95 Gewittertage: 0,50  
Streuung von  $L_{30}$  für 95 Gewittertage: 2,34
2. Sommermonate:
  - a) Durchschnitt von  $L_{30}$  für 271 Regentage: —0,48  
Streuung von  $L_{30}$  für 271 Regentage: 2,28
  - b) Durchschnitt von  $L_{30}$  für 200 Gewittertage: 1,05  
Streuung von  $L_{30}$  für 200 Gewittertage: 1,95

Wird auf die mitgeteilten Angaben die aus mathematisch-statistischen Untersuchungen wohlbekannte Methode der  $F$ -Probe verwendet, so gelangt man zum Ergebniss, dass die Streuung in den  $L_{30}$ -Werten zu einer signifikanten Trennung der Regen- bzw. Gewittertage führt, und zwar erreicht das Signifikantsniveau in den Übergangsmonaten einen recht hohen Wert (über 99,9%), und in den Sommermonaten Werte, die zwischen 95 und 99% zu liegen kommen. Augensichtlich besteht auch in den Mittelwerten der Häufigkeitsverteilung ein signifikanter Unterschied zwischen Regen- und Gewittertage.

Einblick in die Häufigkeitsverteilung der Labilitätsgrössen wird durch die Summenkurven der *Abb. 3* geboten. Auf der waagerechten Achse befinden sich die oberen Grenzen der Wertintervalle für  $L_{30}$ , an der senkrechten Achse wurden die relativen Häufigkeiten aufgetragen. Aus der Abbildung können die nachstehenden Folgerungen abgeleitet werden:

1. Der Wertbereich der Labilitätszahl fällt an Gewittertagen enger aus, als bei Regentagen. Ihr Minimalwert für Gewittertage ist in allen Sommermonaten höher als —5. An Regentagen beträgt der Minimalwert von  $L_{30}$  in den Übergangsmonaten —17, in den Sommermonaten —7. Dieser jahreszeitenmässige Unterschied enthält einen Hinweis auf den labilen, schauerartigen Charakter der Sommerregen.

2. Die Unterschiede zwischen Gewitter und Regenfälle verschärfen sich bei den geringeren Werten der Labilitätszahl. Auf Grund des 10-jährigen Beobachtungsmaterials kann es behauptet werden, dass *im Vorhersagedienst nicht mit der Möglichkeit eines Gewitters gerechnet werden darf an Tagen, für welchen aus der Zustandskurve*

TABELLE I. — I. TÁBLÁZAT

Zahl der Regentage und Gewittertage, Budapest, 1951—1960.

Az esős és a zivataros napok száma Budapesten, 1951—1960.

Monat Hó	$L_{30}$	6,9— 5,0	4,9— 3,0	2,9— 1,0	0,9— -1,0	-1,1— -3,0	-3,1— -5,0	-5,1— -7,0	-7,1— -9,0	-9,1— -11,0	-11,1— -13,0	-13,1— -15,0	-15,1— -17,0	$\Sigma$
IV.	●	6	9	25	27	20	23	16	10	5	2	3	146	
	☒	1	5	7	4	5							22	
V.	●	4	17	27	34	19	9	7	5	4	3	1	130	
	☒	2	6	26	14	10	2						60	
VI.	●	2	20	32	19	6	6						85	
	☒	1	9	35	21	7	3						76	
VII.	●	2	24	29	15	9	3						82	
	☒	10	26	27	7	1							71	
VIII.	●	7	19	39	29	7	3						104	
	☒	3	7	18	19	5	1						53	
IX.	●	3	18	33	19	12	16	4	2	2			109	
	☒	2	3	5	2	1							13	
IV—IX.	●	24	107	185	143	73	60	27	17	11	5	4	656	
	☒	6	35	113	93	35	13						295	

des Mitternachtsaufstieges ein Labilitätswert  $L_{30} \leq -5$  entnommen wurde. Zur Aufstellung einer solchen entschieden negativen Gewittervorhersage bietet sich in den Übergangsmonaten an 23% aller Regentage, in den Sommermonaten aber nur an 3% derselben eine Gelegenheit.

3. Eine hinreichende Bedingung für das Auftreten der Gewittertätigkeit kann, wie es von vornherein zu erwarten war, in der Gestaltung der Labilitätsenergie nicht gefunden werden. Im Sommerhalbjahr können bei einem positiven Wert der Labilitätsenergie sowie Regen als auch Gewitter auftreten. In den Übergangsmonaten wurde bei 25% aller Regentage und in den Sommermonaten bei 46% derselben ein positiver Labilitätswert in den Mitternachtsaufstiegen gefunden. Der Höchstwert der Labilitätszahl ergab sich an Regentagen als 5 und an Gewitter-

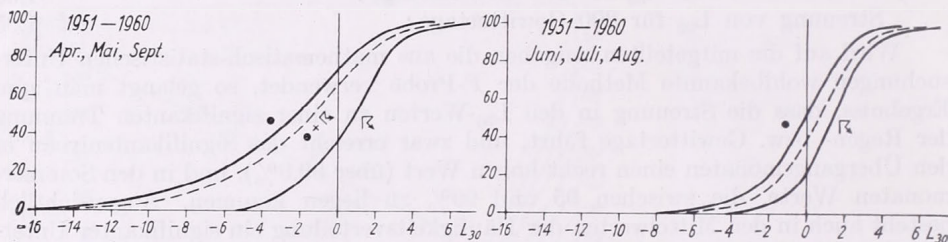


Abb. 3.: Häufigkeit-Summenkurven der Labilitätszahl für Regentage, Niederschlagstage und Gewittertage (00–03 GMT) für Budapest (OMI)

3. ábra: A labilitási számérték gyakorisági összeggörbéi esős, csapadékos és zivataros napokon (0–3 órákor) Budapesten (OMI)

tagen als 7, d. h., es ereignen sich, im Falle einer hohen Labilität, ausser den Gewittern, in geringerer Zahl, auch noch blosse Regenfälle. Demzufolge kann allein nur auf Grund des Vorhandenseins einer hohen Labilität selbst dann nicht mit Sicherheit auf das Zustandekommen eines Gewitters geschlossen werden, wenn auf Grund der synoptischen Lage mit Niederschlägen gerechnet werden muss. Vermutlicherweise sind weitere, sich auf die Gewitterelektrizität beziehende Untersuchungen erforderlich, um eine Antwort auf die Frage geben zu können, unter welchen Umständen Gewitter in einer labilen Wolke zustandekommen bzw. ausbleiben.

4. Im Sommerhalbjahr kommt es zeitweise auch vor, dass nach einem im Mitternachtsaufstieg gefundenen negativen Labilitätswert Gewitter auftreten, und zwar machen diese Fälle in den Übergangsmonaten 40% und in den Sommermonaten 28% aller Gewitterfälle aus. Will man die Gründe dieses Tatbestandes erkennen, so muss man es in Betracht ziehen, dass hier die mitternächtlichen Labilitätswerte mit solchen Gewittern verknüpft werden, welche erst am nachfolgenden Tag auftreten, und dabei ist die etwaige Aenderung der Zustandskurve in der Zwischenzeit nicht beachtet worden. Betreffs der Längendauer dieser Zwischenzeit wird durch Abb. 4. ein Aufschluss geboten, in der die Häufigkeitsverteilung der Zeitpunkte des Gewitterbeginns in Budapest dargestellt wird. Aus der Abbildung ist es ersichtlich, dass die grösste Häufigkeit des Gewitterbeginns keineswegs mit der Zeit der kräftigsten Erwärmung der bodennahen Luftschichten übereinstimmt, sondern eine Verspätung von 2 bis 4 Stunden aufweist, und selbst in den späten Abendstunden zwischen 22 und 24 Uhr noch eine bedeutende Gewitterneigung zu verzeichnen ist. Die geringste Zahl der Gewitter wurde in den Morgen- und Frühvormittagsstunden, von 4 bis 10 Uhr, beobachtet. Das Maximum um 16 bis 18 Uhr erfordert keine ausführlichere Begründung. Die thermische Umschichtung, die von den untersten Luftschichten auch auf höhergelegene Teile der Troposphäre



übergreift, führt nicht zur Zeit der kräftigsten Erwärmung, sondern mit einer Verzögerung von einigen Stunden zur Ausgestaltung der günstigsten Labilitätsverhältnisse. A. Réthly hat bei der Untersuchung des Tagesganges der Sommerniederschläge in Debrecen um 17 Uhr ein ebenfalls scharfes Maximum sowie um 20 Uhr eine auf das Vorhandensein eines sekundären Maximums hindeutende Häufigkeitszunahme gefunden [7]. Auch Weizlederer berichtet über die Häufigkeit der abendlichen (nach 20 Uhr auftretenden) Gewitter [8] und erwähnt die hierfür von Böhme [9] und Ficker [10] gelieferten Erklärungen. Nach dem erstgenannten Forscher müssen die abendlichen Gewitter in den meisten Fällen durch das Auftreten einer Kälteadvекtion in der Höhe erklärt werden. Nach Ficker setzt sich die aus den unteren Luftschichten nach oben fortschreitende labile Umschichtung selbst noch im Zeitraum

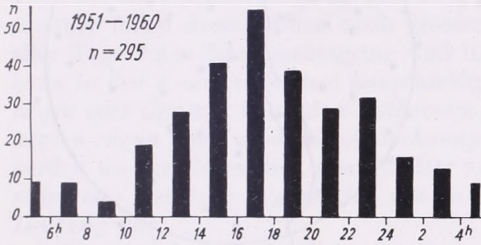


Abb. 4.:  
Häufigkeitsverteilung der Ausbruchzeit  
der Gewitter im Sommerhalbjahr zu Budapest  
(OMI)

4. ábra:  
A zivatarok kezdetének gyakorisági eloszlása  
Budapesten (OMI) a nyári félévben

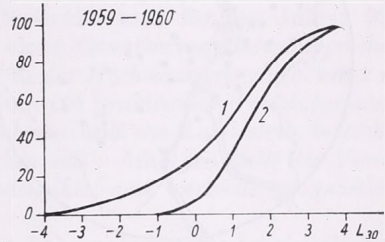


Abb. 5.: Häufigkeits-Summenkurven  
der Labilitätszahl an Gewittertagen in  
Budapest (OMI)

5. ábra: A labilitási számérték gyakorisági összeggörbéi zivataros napokon Budapesten (OMI): 1. 0—3 óra-  
kor, 2. a zivartart megelőző 0—6 órában

fort, wo in Bodennähe schon die Abkühlung eintritt. Begegnet dieser thermische Umschichtungsvorgang oberhalb der unteren stabilen Schicht einer labilen Schichtung, so ergibt sich hieraus eine neue Auftriebskraft, wodurch eine Verschiebung der Gewittertätigkeit auf die Abend- oder Nachtstunden bewirkt wird. Wie ersichtlich, erfolgen die meisten Gewitter erst 16—20 Stunden nach der Feststellung der mitternächtlichen Zustandskurve, somit besteht die Möglichkeit für eine wesentliche Umgestaltung derselben Kurve in der Zwischenzeit. Um eine bessere Einsicht in diese Verhältnisse zu gewinnen, haben wir aus den Jahren 1959—1960 (für welche schon täglich 4 Radiosondenaufstiege zur Verfügung stehen) die Labilitätswerte der Gewittertage auch aus den letzten vor dem Gewitter durchgeführten Aufstiegen ermittelt. Bei diesem Vorgehen kann zwischen Labilitätsfeststellung und Gewitterausbruch ein Zeitraum von höchstens nur 6 Stunden vorhanden sein. Die Ergebnisse werden auf Abb. 5 dargestellt. Dabei ergibt sich, dass negative Werte der Labilität zur Zeit von 00 bis 03 GMT zwar in 31% der Gewittertage, in den dem Gewitter vorangehenden 6 Stunden aber nur in 6% der Fälle vorhanden waren.

Es erscheint als sehr wahrscheinlich, dass unmittelbar vor dem Ausbruch eines Gewitters wohl in allen Fällen eine positive Labilität beobachtet werden müsste. Jedenfalls kann dieser Zusammenhang bei der Ausarbeitung einer Gewittervorhersage auf 24 Stunden nicht verwertet werden, doch erhält man hierdurch einen Hinweis auf die Wichtigkeit der Vorhersage von Änderungen in der Zustandskurve, einer Aufgabe, die heute noch recht viel Unsicherheit enthält.

In der Praxis werden Ergebnisse der aerologischen Aufstiege nicht nur zu Vorhersagen verwendet, die sich auf den Ort des Aufstieges beziehen, sondern sie sollen auch für eine weitere, wenn auch nicht ganz scharf abgegrenzte Umgebung des Auf-

stiegsortes ihre Gültigkeit behalten. Nun ist es eine wichtige Frage, was für eine räumliche Ausdehnung dem Gebiete zukommt, für welche die Ergebnisse eines Radiosondenaufstieges noch als verwendbar betrachtet werden können. Im Nachfolgenden soll es untersucht werden, in wie weit die gefundenen Labilitätswerte zu Zwecken einer Gewittervorhersage für die nähere und fernere Umgebung des Aufstiegsortes verwendet werden können. Diese Untersuchung wurde auf Grund des

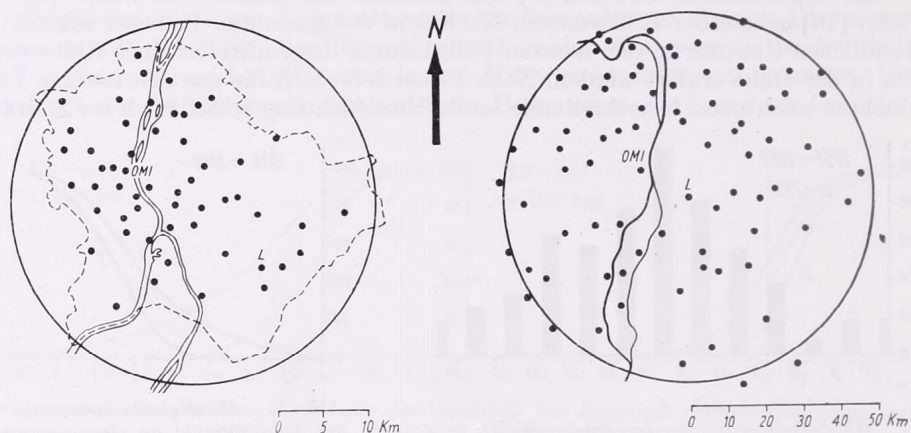


Abb. 6.: Beobachtungsnetz von Gross-Budapest und in der Umgebung mit einem Radius von 50 km von Budapest-Lőrinc (OMI-Zentralstelle des Meteorologischen Instituts, L-Aerologisches Observatorium Budapest-Lőrinc)

6. ábra: Nagy-Budapest és Budapest-Lőrinc 50 km-es körzetének állomáshálózata (OMI = a Meteorológiai Intézet központi észlelő állomása, L = a Budapest-Lőrinc-i Aerológiai Observatórium)

aus den Jahren 1955—1959 stammenden Materials vorgenommen. Um die Unterscheidung zwischen Regentage und Gewittertage durchzuführen, wurden folgende Angaben herangezogen (Abb. 6):

1. Beobachtungen an der Zentralstelle der Ungarischen Landesanstalt für Meteorologie (OMI).
2. Beobachtungen an den 54 meteorologischen Stationen des Beobachtungsnetzes von Gross-Budapest (Bp).
3. Angaben von 85 Beobachtungsstellen in einer Umgebung von 50 km des Aerologischen Observatoriums (50 km).
4. Angaben von 900—1100 Beobachtungsstellen des Landesgebietes (M).

TABELLE II. — II. TÁBLÁZAT

Zahl der Regentage und Gewittertage, 1955—1959.

Az esős és a zivataros napok száma. 1955—1959.

Monat Hó	IV.		V.		VI.		VII.		VIII.		IX.		IV—IX.		$\Sigma$
	●	☉	●	☉	●	☉	●	☉	●	☉	●	☉	●	☉	
OMI	74	10	55	32	45	35	41	42	47	30	40	5	302	154	456
Bp	75	22	49	51	41	64	31	71	37	59	48	18	281	285	566
50 km	74	32	33	74	24	90	19	100	29	79	49	30	228	405	633
M	80	69	43	110	6	138	11	143	13	137	61	69	214	666	880



Die Zahlen der Regen- und Gewittertage befinden sich in *Tabelle II*. Wie aus der Tabelle ersichtlich, erfolgt im Sommerhalbjahr mit der Erweiterung des Beobachtungsgebietes eine Zunahme in der Gesamtzahl der Niederschlagstage, eine Abnahme der Regentage, und eine entsprechende gewaltige Erhöhung der Gewittertage. Im Juli konnte z. B. für die Zentralstelle in 51%, für das Gebiet von Gross-Budapest in 70%, und für einen Umkreis von 50 km bereits in 84% aller Niederschlagstage eine Gewittertätigkeit festgestellt werden.

Bei einer weiteren Erweiterung des Beobachtungsgebietes wird der Anteil der Gewittertage noch mehr erhöht. In der letzten Zeile der *Tabelle II* findet man unter *M* die Zahl der Regen- und Gewittertage für das gesamte Landesgebiet Ungarns. Vor allem kann es festgestellt werden, dass im Sommerhalbjahr 96% aller Tage als ein Niederschlagstag und 73% als ein Gewittertag gelten. Für den Hochsommer fallen diese Zahlen noch grösser aus. So erhält man für den Juli in 99% aller Tage einen Niederschlagstag und in 92% einen Gewittertag. *Dementsprechend kann in den Sommermonaten, hauptsächlich aber in der Hochsommerperiode, einer auf Regen oder Gewitter lautenden Vorhersage nur dann ein praktischer Wert beigemessen werden, wenn dabei auch die Ausdehnung des Gebietes bzw. die Landesteile bezeichnet werden wo der Regen bzw. das Gewitter niedergehen soll; hingegen stellt die Vorhersage eines trockenen Wetters für das ganze Landesgebiet eine wertvolle prognostische Leistung dar.*

Nun ist es offensichtlich, dass bei einer so hohen Gewitterwahrscheinlichkeit die Errechnung des Labilitätswertes keine wesentliche Hilfe bei der Ausarbeitung der Gewittervorhersagen für das gesamte Landesgebiet abgeben kann. Dementsprechend befassen wir uns im Nachfolgenden mit einem engeren Gebiet: mit der bis zur Landesgrenze sich erstreckenden Umgebung der Stadt Budapest von 50 km Radius, und möchten ermitteln, in wie weit ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Labilitätswerten und der Gewittertätigkeit auf dem genannten Gebiete bestehen dürfte. In der *Tabelle III* werden für verschiedene Werte der Labilitätsgrösse  $L_{30}$  die Zahlen der Gewittertage in Prozenten der Zahlen der Niederschlagstage angegeben. Man findet, dass bei einer Zunahme des Wertes  $L_{30}$  eine Erhöhung der Gewitterwahrscheinlichkeit eintritt. Bei dem selben Wert der Labilität  $L_{30}$  besteht im Sommer eine grössere Gewitterwahrscheinlichkeit, als in den Übergangsmonaten. Die Angaben dieser Tabelle können, bei einer gründlichen Erwägung der momentanen synoptischen Lage, zur Ergänzung der Gewittervorhersage benützt werden. So findet man z. B., dass im Falle  $L_{30} \cong 1$  im Sommer die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Gewitters an einer vorgegebenen einzigen Beobachtungsstelle (OMI) 64%, für das Stadtgebiet von Budapest 76%, und für eine Um-

TABELLE III. — III. TÁBLÁZAT  
**Gewitterwahrscheinlichkeit und Gewitterdichte, 1955—1959.**  
 Zivatarvalószínűség és zivatarsűrűség, 1955—1959.

Monat — Hó	$L_{30}$	6,9—	4,9—	2,0—	0,9—	-1,1—	-3,1—	-5,1—	-7,1—	-9,1—	-11,1—	
		5,0	3,0	1,0	-1,0	-3,0	-5,0	-7,0	-9,0	-11,0	-13,0	
		<i>Gewitterwahrscheinlichkeit, % — Zivatarvalószínűség, %</i>										
IV., V., IX.	OMI	100	50	54	25	19	15	0				
	Bp.	100	58	60	38	29	44	12	0			
	50 km	100	69	75	51	41	54	18	21	9	0	
VI., VII., VIII.	OMI	100	75	64	39	33	25	0				
	Bp.	100	88	76	58	57	39	0				
	50 km	100	90	85	81	75	53	17	0			
		<i>Gewitterdichte, % — Zivatarsűrűség, %</i>										
IV—IX.	Bp.	49	24	31	22	19	14	11	3	2		
	50 km	60	21	26	16	16	11	8	6	1	1	

gebung von 50 km Radius mehr als 85% beträgt, unter der Voraussetzung, dass nach der synoptischen Lage überhaupt ein Niederschlag zu erwarten sei. Sinkt der Wert des  $L_{30}$  unterhalb  $-5$ , so besitzt die Gewitterwahrscheinlichkeit sowie im Stadtgebiet als auch in einer Umgebung von 50 km Halbmesser einen geringen Wert (unter 20%). Für eine vorangegebene Beobachtungsstelle (OMI) kann in solchen Fällen mit völliger Gewitterfreiheit gerechnet werden.

Werden die Gewittermeldungen der Beobachtungsstellen nach Werten des  $L_{30}$  gruppiert und in jeder Gruppe die Zahl der Meldungen durch die Zahl der entsprechenden Gewittertage dividiert, so erhält man die sogenannte *Gewitterdichte*, d. h. die tägliche Durchschnittszahl der Gewittermeldungen im Beobachtungsnetz. Diese Zahl, welche eine charakteristische Grösse für die Gewittertätigkeit darstellt, wird

TABELLE IV. — IV. TÁBLÁZAT

Zahl der Tage in Prozenten der Niederschlagstage, Budapest, 1951—1960.

A zivataros napok száma a csapadékos napok százalékában Budapesten, 1951—1960.

R mm $L_{30}$	ny— 1,5	1,6— 4,0	4,1— 10,0	10,1— 25,0	25,1— 65,0	65,1— 100,0	n
6,9 — 5,0	100	100		100			6
4,9 — 3,0	48	57	71	86	100	100	59
2,9 — 1,0	36	54	87	79	89		220
0,9 — -1,0	21	46	52	52	61	100	278
-1,1 — -3,0	8	31	38	45	50		178
-3,1 — -5,0	9	20	25	14	100		86
-5,1 — -13,0	0	0	0	0			124
n	598	136	116	75	24		951

in Prozenten der Gesamtzahl von Beobachtungsstellen ausgedrückt. Nach Tabelle III kann bei einer Zunahme der Labilitätszahl eine Erhöhung der Gewitterdichte in beiden Beobachtungsnetzen festgestellt werden. Allerdings ergibt sich im weiteren Beobachtungsnetz (50 km) bei demselben Wert des  $L_{30}$  eine geringere Prozentzahl der Gewittermeldungen, als dies im Falle des budapester Netzes der Fall ist. Die Angaben dieser Tabelle können zur Vorhersage der Gewitterdichte („vielerorts Gewitter, an einigen Stellen Gewitter“ usw.) verwendet werden. Dabei kann festgestellt werden, dass die aus Radiosondenaufstiegen ermittelten Labilitätswerte noch in einem Umkreise von 50 km eine gute Repräsentativität besitzen.

Endlich können zur Kennzeichnung der Intensität der Gewitter noch die täglichen Niederschlagssummen, und für eine feinere Beurteilung derselben noch die Werte der Niederschlagsintensität herangezogen werden. In dieser Arbeit soll nur auf die erstere Aufgabe eingegangen werden, weil diese in einfacherer Weise gelöst werden kann. Auf Grund von zehnjährigen Beobachtungen des OMI wurden die Niederschlagstage des Sommerhalbjahrs nach den Werten von  $L_{30}$  und nach dem Betrag der täglichen Niederschlagssumme gruppiert und in jeder Gruppe die Zahl der Gewittertage in Prozenten der Zahl der Niederschlagstage errechnet (*Tabelle IV*). Die verwendeten Intervalle für den Betrag des Niederschlages weisen eine logarithmisch gehaltene Erweiterung in der Richtung zu höheren Niederschlagswerten auf. Durch einen Vergleich zwischen den Spalten dieser Tabelle kann festgestellt werden, dass mit einer Abnahme der Labilitätszahl auch eine Senkung der Relativzahl der Gewitter einhergeht. Aus den waagerechten Reihen der Tabelle ergibt sich, dass bei jedem Wert von  $L_{30}$  unter den Tagen mit einem höheren Niederschlagsbetrag auch eine relativ höhere Zahl von Gewittertagen vorhanden war, im Vergleich zu Tagen mit geringeren Niederschlagsbeträgen. In der Tabelle findet man einen zahlenmässigen Beleg dafür, dass Gewittertage gleichfalls durch einen hohen Labilitätsgrad und durch einen bedeutenden Niederschlagsbetrag gekennzeichnet werden und im Laufe von 10 Jahren Werte von  $L_{30}$ , die grösser als 5, und



Werte der Niederschlagssumme, die grösser als 65 waren, ausschliesslich nur bei Gewitter vorgekommen sind.

Auf Grund dieser Bearbeitung konnte ein Zusammenhang zwischen dem Betrag des Labilitätswertes und der täglichen Niederschlagssumme nicht gefunden werden. Bedeutende Niederschläge ergaben sich auch bei negativen Werten des  $L_{30}$ , wogegen eine hohe Labilität zeitweise mit nur geringen Niederschlagsmengen gekoppelt war. Die letzte Reihe und die letzte Spalte der Tabelle enthält die Absolutzahlen von Niederschlagstagen, die einer gewissen Grössenklasse des Niederschlagbetrages bzw. der Labilität entsprechen.

*Zusammenfassend* kann folgendes festgestellt werden :

An Hand des verwendeten Labilitätswertes  $L_{30}$  dürfen die Regentage und die Gewittertage des Sommerhalbjahrs signifikant von einander getrennt werden. Diese Grösse ist dazu geeignet, die Gewitterwahrscheinlichkeit an der Beobachtungsstelle und in einem Umkreis von 20 bis 50 km unter der Voraussetzung einer erfolgreichen Niederschlagsbildung hervorzusagen. Es wurde gefunden, dass im Fall einer angegebenen Labilitätszahl  $L_{30}$  mit einer Erweiterung des Vorhersagegebietes eine Zunahme der Gewitterwahrscheinlichkeit einhergeht. Bei Zunahme der Labilitätszahl ist in der Umgebung der Aufstiegstelle auch eine Zunahme der Gewitterdichte zu verzeichnen. Zwischen dem Betrag des gefallenen Niederschlages und den Wert der Labilitätszahl konnte kein Zusammenhang ermittelt werden.

Die prognostische Verwendbarkeit der Labilitätsenergie wird im Falle von einer wenigstens 24 Stunden umfassenden Gültigkeitsdauer dadurch vermindert, dass in der zwischen Messung und Gewitterausbruch verfloßenen Zeit eine wesentliche Veränderung in der Zustandskurve eintreten kann. In der Arbeit wird auf Grund des Materials aus den zwei Jahren, in welchen Aufstiege in einer grösseren zeitlichen Dichte zur Verfügung standen, auf die Wichtigkeit einer Vorhersage der Umgestaltungen der Zustandskurve hingewiesen.

#### SCHRIFTTUM — IRODALOM

- [1] Bartlett, L. W.—Lamp, W.: Gewittervorhersage in Deutschland. Met. Rundschau. 15. 53 (1962).
- [2] Similä, A.: Über Gewitterbildung und Gewittervorhersage besonders in Skandinavien. Mitt. Met. Zentr. Helsinki. No 38. (1955).
- [3] Simpson, G. C.—Scrase, F. J.: The Distribution of electricity in thunderclouds. Proc. Roy. Soc., A. (1937).
- [4] Simpson, G. C. — Robinson, G. D.: The Distribution of electricity in thunderclouds II. Proc. Roy. Soc., A. (1941).
- [5] Rossi, V.: Aerologische Untersuchungen über die Feuchtlabilität der Luft in Finland besonders in Gewitter- und Schauerwetterlagen. Soc. Scient. Fennica. Comp. Phys. Math. 10. 16. (1942).
- [6] Jones, R. F.: The temperatures at the tops of radar echoes associated with various cloud systems. Quart. J. Roy. Met. Soc. 76. (1950).
- [7] Réthly, A.: Debrecen csapadékviszonyai. OMI Hivatalos Kiadványa. Magyarországi Éghajlata 4. szám. 1945.
- [8] Weislederer, R.: Über den Zusammenhang zwischen Labilitätsenergie und Gewitterbildung in den Nordalpen. Archiv f. Met. Geoph. u. Bioklimat. A. B. II. 119—126. (1950).
- [9] Böhme, G.: Der aerologische Zustand der Atmosphäre bei Gewitterlagen. Z. angew. Meteorol. 1934. 273.
- [10] Ficker, H. v.: Über die Entstehung lokaler Wärmegewitter. S. B. preuss. Akad. Wiss. phys. math. Kl. 16. 197. (1932).

\*

#### AZ IZOTERMA-SZINTEKEN MÉRT LABILITÁSI ENERGIÁRÓL

A dolgozat a labilitási energia jelentőségét vizsgálja a zivatarok előrejelzésénél. Valamely nap labilitási jellemzőjét a 0—3 óra között végzett légállapotmérésből, esős, illetőleg zivataros jellegét pedig a 7 órát követő 24 óra megfigyeléseiből állapít

tottuk meg. A labilitás jellemzésére a Similä által bevezetett labilitási faktort [2] választottuk azzal a módosítással, hogy a labilitási számértéket nem az önkényesen megállapított 500 mb-os szinten, hanem felhőfizikai megfontolások alapján a  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  izotermaszinten számítottuk ki. Az így módosított

$$L_{30} = 10 \frac{T_f^{30} - T^{30}}{T_j^{30} - T_i^{30}}$$

labilitási számérték (1. ábra) kiszámítására egyszerű nomogram (2. ábra) szolgál.

Az  $L_{30}$  értékei szerint csoportosított esős és zivataros napok száma szerint (I. táblázat) Budapesten az  $L_{30}$  szignifikánsan választja szét a nyári félév esős és zivataros napjait, értéktartománya zivataros napokon szűkebb, mint esős napokon (3. ábra).

Olyan esetekben, amikor az  $L_{30}$  értéke éjjélkor nem nagyobb  $-5$ -nél, a zivatarokat a csapadék előrejelzéséből kizárhatjuk. Magas pozitív labilitás esetén a zivatarokon kívül kisebb számban ugyan, de zivatar nélküli esők, negatív labilitás esetében pedig zivatarok is előfordulnak. A zivatarok kezdetének gyakorisága (4. ábra) arra mutat, hogy a zivatarok a labilitás megállapítását (0 óra) követően 16–20 óra múlva léptek fel legnagyobb gyakorisággal, az állapotgörbe átalakulására tehát meg volt a lehetőség. Az állapotgörbe előrejelzésének fontosságára mutat az 5. ábra. Eszerint negatív  $L_{30}$  értékek 0–3 órákor a zivataros napok 31%-ában, a zivatart megelőző 6 órában pedig ezeknek csupán 6%-ában fordultak elő. Nagyon valószínű, hogy a zivatar kitörésekor minden esetben pozitív labilitást észlelünk.

A dolgozat a továbbiakban azzal foglalkozik, hogy a labilitási energia reprezentatív értéke a vonatkoztatási terület nagyobbításával hogyan változik. A II. táblázat az esős és a zivataros napok számát mutatja Budapest egyetlen állomásán (OMI), 20 km-es körzetének (6. ábra) 54 állomásán (Bp), 50 km-es körzetének (6. ábra) 85 állomásán (50 km), végül Magyarország (M) 900–1100 állomásán végzett megfigyelések alapján. Látható, hogy a terület nagyobbításával a csapadékos napok száma, ezen belül pedig a zivataros napok számaránya nő. Mivel pl. nyár derekán Magyarországon az összes napok több, mint 90%-a zivataros nap volt, a nyári hónapokban országgrész megjelölése nélküli eső- és zivatarelőrejelzésnek prognosztikai értéke nincs. Annál értékesebb viszont az egész országra kiterjedő száraz idő előrejelzése.

A III. táblázat a zivataros napok számát a csapadékos napok számának %-aiban (zivatarvalószínűség) és a zivatarjelentések 1 napra eső számát (zivatarsűrűség) adja meg  $L_{30}$  különböző értékeinél. Végül a IV. táblázat a zivataros napok számát tünteti fel a csapadékos napok %-ában az  $L_{30}$  és a lehullott csapadék különböző értékközeiben. A táblázatokat a szinoptikus helyzetet is mérlegelve felhasználhatjuk a zivatarok előrejelzésére. Például ha az  $L_{30}$  értéke nem kisebb 1-nél, nyáron egyetlen állomáson 64%-nál, Budapest területén 76%-nál, 50 km-es körzetében pedig 85%-nál nagyobb valószínűséggel várhatunk zivatart, ha a szinoptikus helyzet szerint csapadékos idő következik be. Ha az  $L_{30}$  értéke  $-5$ -nél kisebb, Budapest területén és 50 km-es körzetében kicsiny (20%-nál kisebb) a zivatarok valószínűsége, egy állomáson (OMI) pedig egyáltalában nem kell zivatarra számítanunk.

Általában a körzet nagyobbításával ugyanazon  $L_{30}$  érték mellett a zivatarvalószínűség növekedését tapasztaltuk. Az  $L_{30}$  növekedésével az aerológiai állomás körzetében a zivatarsűrűség is nőtt.

A lehullott csapadék mennyisége az  $L_{30}$ -cal nem mutatott egyértelmű kapcsolatot, de a IV. táblázat szerint a zivataros napot a magas labilitási érték és a nagy csapadék egyaránt jellemzi: 10 év alatt 5-nél nagyobb labilitási érték és 65 mm-nél nagyobb napi csapadékösszeg csak zivatarok kísérőjeként fordult elő.