

Deutsches Reich
Reichsamt für Wetterdienst

Wissenschaftliche Abhandlungen
Band VI

Nr. 3

Über Tromben

von

Harald Koschmieder

Mit 5 Tafeln

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01718-0 ISBN 978-3-662-02013-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-02013-5

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	3
I. Die Trombe von Thiessow vom 29. VIII. 1937	3
A. Berichte der Augenzeugen	3
B. Erläuterung der Lichtbilder	5
C. Zahlenmäßige Auswertung der Lichtbilder	7
D. Die Bahn der Wasserhose	8
E. Die Abmessungen der Wasserhose	10
F. Die Wetterlage	10
Zusammenfassung	14
II. Die Trombe von Dubrovnik vom 5. IX. 1938	15
A. Bericht des Augenzeugen	15
B. Erläuterung der Lichtbilder	15
C. Bahn und Abmessungen der Trombe	15
D. Die Wetterlage	17
Zusammenfassung	17
III. Zur Theorie der Tromben	17
A. Für und gegen die mechanische Theorie	17
B. Für und gegen die thermodynamische Theorie	18
C. Neue Form der thermodynamischen Theorie	19
Zusammenfassung	23
Schriftennachweis	24
5 Tafeln	

Einleitung.

Die erste Kunde einer bei Thiessow auf Rügen aufgetretenen Trombe gab ein kurzer Bericht des „Berliner Lokalanzeigers“ vom 3. September 1937, der auch ein Lichtbild enthielt. Etwas später erschien auch in der „Berliner Illustrierten (Nr. 37/1937) ein Lichtbild dieser Naturerscheinung. Daraufhin verfolgte Herr Prof. Robitzsch, Reichsamt für Wetterdienst, Berlin, die Angelegenheit und konnte nach einigen Schwierigkeiten von Herrn von Gervais 14 Aufnahmen der Trombe erwerben, die im folgenden mit den Abkürzungen Gs a, Gs b, Gs 1 – Gs 12 bezeichnet sind. Im Juni 1938 erhielt der Verfasser vom stellvertretenden Präsidenten des Reichsamts für Wetterdienst, Herrn Prof. Knoch, den Auftrag, die Trombe eingehender zu untersuchen und zu bearbeiten. Nachdem seit dem Auftreten der Trombe fast ein Jahr verstrichen war und nachdem umfangreiche briefliche Auseinandersetzungen mit den Beobachtern nicht zu einer Klärung aller Einzelheiten führten, begab ich mich im November 1938 selbst nach Rügen. Diese Reise verlief über Erwarten erfolgreich, indem ich weitere 14 Bilder erwerben konnte, die zum Teil Blickrichtungen besitzen, die zu denen der Bilder Gs fast senkrecht liegen, zum Teil die Doppelröhre wiedergeben. Die beiden schönsten Bilder der Doppelröhre erhielt ich durch einen Aufruf in der „Umschau“ vom 1. Januar 1939. Er war sehr fruchtbar: Er brachte außerdem das Bild einer zweiten Trombe, die ebenfalls in der Nähe von Thiessow, aber im Juli 1937 bei Lobbe aufgetreten war, das Bild einer blinden Trombe von Husum und schließlich die drei Bilder der Trombe von Dubrovnik 1938, die im zweiten Abschnitt bearbeitet sind und von Herrn Prof. Clusius stammen. Ich benutzte eine Ferienreise, um in der Umgebung von Dubrovnik nach Zerstörungsspuren zu suchen. Dabei unterstützten mich der Hafenkommendant von Dubrovnik, Herr Linienschiffskapitän Kuster und Herr Korvettenkapitän Mardesić in der lebenswürdigsten Weise, wofür ich auch an dieser Stelle danke. Für die Überlassung von Beobachtungen zum Entwurf der Wetterkarten bin ich den meteorologischen Instituten von Holland, Dänemark, Norwegen, Schweden, Lettland, Litaun, Jugoslawien und Italien zu Dank verpflichtet.

Über die Ergebnisse der hier vorgelegten Untersuchung habe ich vor der Internationalen Aerologischen Kommission am 18. Juni 1939 in Lindenberg vorgetragen.

I. Die Trombe von Thiessow (Rügen) vom 29. August 1937.

A. Berichte der Augenzeugen.

1. Herr von Gervais, 14 Lichtbilder (Gs), Standort 1, Strand von Thiessow, Bericht vom 25. Januar 1938 (die Standorte s. in Abbildung 3):

„Am 29. August 1937 gegen 12 Uhr mittags herrschte eine äußerst schwüle Luft, Temperatur ca. 25–28° C, auffallende Windstille, fast gar keine Dünung. Es bildete sich ein breiter, nahezu schwarzer Wolkenstreifen, der das Meer unter sich dunkel färbte. Gegen 12 Uhr 15 bildete sich über dem Land, links in Bild Gs b [muß heißen Gs a] ein Wolkenzipfel, der sich wieder auflöste. Kurz darauf senkte sich die Wolkenbildung in Form einer sich schnell ausbreitenden Nebelwand in Richtung auf das Meer zu, sodaß das bis dahin klar zu sehende Göhrener Hoeft hinter einer dunklen Nebelwand verschwand. Diese Erscheinung dauerte nur wenige Sekunden, um sich alsdann in eine gebogene Wolkensäule zu verwandeln, die sich bis auf das Wasser erstreckte. – An meinem Beobachtungsort, bzw. Aufnahmeort veränderte sich die Luftbewegung nicht. – Die Wolkensäule richtete sich senkrecht auf, im Durchmesser immer mehr zunehmend, und entfernte sich immer mehr vom Land (Göhrener Hoeft). Trotz der großen Entfernung war das Rauschen des Wassers deutlich vernehmbar. Nach meiner Schätzung dauerte diese Naturerscheinung ca. 8 Minuten. Nach Auflösung dieser Erscheinung erhöhte sich der Wellenschlag und gleichzeitig* trat starker, wolkenbruchartiger Regen [über See] ein, der einige Minuten anhielt. Die dunkle Wolke hellte sich etwas auf, blieb längere Zeit stehen, sodaß ich eine Wiederholung der Wasserhose vermutete.“

Die in []-Klammern gesetzten Bemerkungen sind nachträglich auf Grund einer Besprechung mit Herrn von Gervais vom 29. November 1938 eingefügt. Bei dieser Besprechung teilte Herr von Gervais noch mit, daß nach dem Zerreißen der Trombe der obere Teil fast wie ein Anker aussehen habe.

2. Frau Lübeck, 7 Lichtbilder (L1–L7), Standort 1, Strand von Thiessow wenige Meter landeinwärts hinter Herrn von Gervais, etwa 1 m höher, Aussage vom 18. November 1938:

„Am Sonntag, den 29. August 1937, trat zuerst in Richtung des [NNW-wärts verlaufenden] Promenadenwegs von Thiessow nach Lobbe eine Trombe auf, die nicht bis zur Erde herunter reichte, sondern ein kleiner kurzer Stummel blieb. Dieser verschwand nach 1–2 Minuten. Dann bildete sich nach weniger als einer Minute in Richtung Göhrener Hoeft eine zweite Trombe, von der die 7 Lichtbilder stammen. Sie zog direkt auf mich zu und ging kurz* vor der Aalreuse, der sogenannten „Landreuse“ hoch. Geregnet hat es [am Strande!] nicht, auch nicht gewittert.“

3. Der Fischer Herr Richard Tietz aus Thiessow, Standort: Signalmast der Thiessower Rettungstation, Aussage vom 18. November 1938:

„Ich sah die Trombe zwischen Lobbe und Göhren herauskommen. Sie zog auf die Landreuse zu, die 1937 etwa 700–800 m vom Strande ausgelegt war. Wir fürchteten, daß sie* von der Trombe beschädigt werden würde. Glücklicherweise ging die Trombe etwa 50 m* vorher hoch, wobei sie sich verkürzte und dünner wurde. Von einer Neubildung der Trombe habe ich nichts gesehen, ebensowenig von Gewitter, Regen* oder Hagel.“

4. Frau Godglück, 4 Lichtbilder (Gk 1–Gk 4), Standort 2, SE-Ausgang von Groß-Zicker, unfern der Kirche:

Eine blinde Trombe wurde nicht gesehen. Die 5 Bilder beziehen sich auf dieselbe Trombe wie die 12 Aufnahmen des Herrn von Gervais und die 7 Aufnahmen der Frau Lübeck. Die Trombe wurde immer dicker und zerriß schließlich, wobei sie sich schlängelte. Der untere Teil war noch ein paar Sekunden zu sehen.

Nach dem Verschwinden der Haupttrombe bildete sich eine neue Trombe auf dem Zicker-See, von der jedoch nur der Wasserstaubfuß zu sehen war, der mindestens 2–3 m hoch gewesen sein soll und etwa 2 Minuten anhielt. Das Rauschen des Wassers war deutlich zu hören.

5. Der Gemeindesekretär Herr Emmel, 2 Lichtbilder (E 1, E 2) Standort 3, Göhren, Thiessower Straße, Haus Eintracht:

Herr Emmel hat die Trombe erst kurz vor dem Zerfall gesehen und die beiden Lichtbilder von seinem Hause aus gemacht.

6. Herr Dr. Thost, nahe bei Standort 1:

„Meine Beobachtungsmöglichkeit jener Trombe war nur sehr bedingt, ich selbst bin kurzsichtig. . . Die Richtung [der Trombe] war somit NE–SW. Es war windstill. Soweit ich glaube, mit Sicherheit festzustellen, hat sich die Trombe im Sinne des Uhrzeigers, also von rechts nach links gedreht. . . Dauer des ganzen Phänomens 8–10 Min.“

Hier sind nur die mir unmittelbar gemachten Berichte aufgeführt, bei denen Rede und Gegenrede möglich war und Aussagen eingeschränkt werden konnten. Sie enthalten trotzdem noch einige Widersprüche oder unrichtige Beobachtungen (die durch ein * gekennzeichnet sind). Insbesondere gingen die Aussagen über den Regenfall weit auseinander. Die mir aus zweiter Hand zugegangenen Berichte konnte ich überhaupt nicht verwenden (insbesondere was die Bahn der Trombe betrifft). Das ist auch nicht erstaunlich. Einmal ist die Beobachtung einer Trombe schon für einen geübten Beobachter nicht ganz einfach, dann aber war bei Beginn der Bearbeitung bereits ein volles Jahr verstrichen, sodaß ein ungewöhnliches Gedächtnis erforderlich wäre, um das Gesehene richtig wiederzugeben.

Schaltet man offensichtliche Irrtümer aus, wozu auch die weiter unten erörterten Lichtbilder herangezogen werden können, so erhält man folgenden Sachverhalt:

Im ganzen sind mindestens 3 Tromben aufgetreten und zwar:

1. die über Land aufgetretene blinde Trombe (Bild Gs a); diese bestand nur 1–2 Minuten (Frau Lübeck). Dann senkte sich eine Nebelwand (von Gervais) auf das Meer herab. Es liegt sehr nahe, anzunehmen, daß es sich nicht um eine Nebel-, sondern um eine Regenwand handelte, doch hat Herr von Gervais dies mit Entschiedenheit abgestritten, und zwar im Hinblick auf die faserige Struktur der Erscheinung.
2. Die Haupttrombe (sämtliche Bilder mit Ausnahme Gs a und Gs b) entstand weniger als 1 Minute nach dem Verschwinden der blinden Trombe und bewegte sich aus der Richtung Göhrener Hoeft nach der Aalreuse, wobei sie sich ständig verdickte. Sie schnürte sich dann in der Mitte ein und riß dort ab. Der untere Teil war noch einige Sekunden zu sehen (Bericht Godglück), der obere Teil nahm angeblich die Form eines Ankers oder eines auf dem Kopf stehenden Pilzes an.

Das Zerreißen der Trombe erfolgte kurz nach dem Beginn des wolkenbruchartigen Regens, der auf die See beschränkt blieb, wie aus den Bildern ersichtlich ist. Auf dem Land fiel kein Regen, wie

die Berichte von Frau Lübeck und Herrn Tietz und die Beobachtungen der Regenmeßstation Thiessow (Mitteilung des Oberlotsen Herrn Witt) zeigen.

3. Nach dem Verschwinden der Haupttrombe bildete sich eine nicht vollständige Trombe auf dem Großzicker-See (Bericht Godglück), von der nur der Wasserstaubfuß – etwa 2 min lang – zu sehen war.

Alle Beobachter stimmen überein, daß es fast völlig windstill war. Die Dauer der ganzen Erscheinung wird von Herrn v. Gervais zu 8, von Frau Lübeck zu 8–10, von Frau Godglück zu reichlich 10 Minuten angegeben. Eine Drehbewegung war bestimmt vorhanden (Dr. Struwe). Über den Drehsinn liegt nur die eine etwas unsichere Beobachtung vor (Dr. Thost), wonach die Drehung antizyklonal gewesen sein soll.

B. Erläuterung der Lichtbilder.

Die auf Tafel I und II¹⁾ dargestellten 30 Lichtbilder sind Abzüge der mir zur Verfügung gestellten Filme²⁾. Zunächst war bei jeder einzelnen Bilderserie die Reihenfolge festzulegen, was in den meisten Fällen zweifelsfrei durch Vergleich der Schnittflächen geschehen kann. Insbesondere ist die Reihenfolge der Bilder Gs 7, Gs 8 und Gs 9 sichergestellt. Alsdann waren die Bilder auf einen wagerechten Horizont zu bringen, um falsche Vorstellungen über die Neigung der Trombe hintanzuhalten. Um das zu erreichen, mußten die Bilder teilweise etwas beschnitten werden.

Hier handelt es sich zunächst darum, eine Vorstellung über die mit der Trombe verbundene Wolkenform zu vermitteln. Die Einzelheiten des Trombenschlauches werden später an Hand von Vergrößerungen einiger weniger Bilder besonders besprochen.

Die Lichtbilder Gs und L sind praktisch vom selben Standort 1 (Thiessow) aufgenommen, die Bilder H etwa 100 m NNW vom Standort 1. Zur Auswertung der Blickrichtungen diente das Nordperd bei Göhren (= Göhrener Hoeft), das auf sämtlichen Bildern (mit Ausnahme von Gs a) erscheint.

Auf Gs a (Tafel I) ist oberhalb der hell beleuchteten Cb-Spitze der kleine Wolkenstummel zu erkennen, der die erste blinde Trombe hervorrief, die über dem festen Land etwa in NNW von Thiessow auftrat. – Schon auf Gs a erkennt man eine von den Tornados her bekannte Eigentümlichkeit der Wolkenbildung, die dann auf den Bildern Gk 1–4 besonders deutlich wird: nämlich die Tatsache, daß die Trombe häufig nicht in die glatte Unterfläche des erzeugenden Cb einmündet, sondern in einen aus der Wolkenunterfläche herabhängenden Wolkensockel, der etwa die Form einer aufrechtstehenden Tasse (ohne Henkel) besitzt und mit seiner Oberfläche an das allgemeine Wolkenniveau anschließt. – Gs b gibt den Wolkenhimmel nach Verschwinden des Trombenstummels. Von dem tassenförmigen Wolkensockel ist nichts mehr zu erkennen, allerdings liegt die Zielrichtung bei dem Bilde wesentlich weiter ostwärts, sodaß das Nordperd bereits in der Bildmitte erscheint. – Gs 1 stellt die Trombe im ersten Augenblick dar. Gegenüber den späteren Bildern ist die noch etwas zittrige Gestalt unverkennbar, ebenso – wie eine spätere Ausmessung bestätigen wird – eine noch geringe Dicke. Das Bild zeigt, wie Gs 2 und 3, keinen Wolkensockel unterhalb des erzeugenden Cb, vielmehr scheint die Trombe in einen ziemlich zerfaserten Teil des Cb zu münden, wie auch die (hier nicht wiedergegebenen) Vergrößerungen des vollen Bildausschnittes zu bestätigen scheinen. Freilich ist der Kontrast an der Trombenwurzel verhältnismäßig gering und die Aussage nicht völlig sicher. Erst auf Gs 4 ist die Bildung des Wolkensockels leicht angedeutet, auf Gs 5 ist er voll entwickelt und auf Gs 6 nimmt er eine sehr kompakte Form an. Daß er hier auf den ersten Blick halbkugelförmig erscheint im Gegensatz zu den Bildern Gk 1–4, hat seinen Grund darin, daß dort der Wolkensockel unter sehr viel geringeren Höhenwinkeln, d. h. bereits fast im Aufriß gesehen wird, während er hier schräg von unten betrachtet wird. Auf Gs 7 ist er etwas zerzaust, auch noch auf Gs 8, während er bei den weiteren Bildern Gs 9–Gs 12, ja auch noch auf H 1 sehr kompakt erscheint.

Die Bilder L 1 bis L 3 (Tafel II) scheinen (auch an Hand der Vergrößerungen des gesamten Bildausschnittes) die oben gemachte Aussage zu bestätigen, daß in der ersten Zeit des Bestandes der Trombe der Wolkensockel unter dem Cb fehlt. Auf Bild L 3 wird er ein wenig angedeutet, auf L 4 bis L 6 ist er deutlich zu erkennen, auch noch auf L 7 wahrnehmbar. Die zeitliche Reihenfolge der Bilder Gs und L wurde aus den Winkeldifferenzen Δ gegen das Nordperd wie folgt bestimmt:

¹⁾ Die Tafeln I bis V werden am Schluß der Arbeit gebracht.

²⁾ Die Aufnahme B stammt von Herrn Bitterling, die Aufnahme H 1 und H 2 von Herrn Hopper.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Gs 1	Gs 2	L 1	Gs 3	L 2	L 3	L 4	Gs 4	L 5	Gs 5	L 6	Gs 6	Gs 7	Gs 8	L 7	Gs 9	Gs 10	Gs 11	Gs 12
$\Delta =$	2.3	2.7	3.4	3.5	3.7	4.0	4.2	4.4	4.6	4.9	5.3	5.9	7.3	8.5	8.6	9.8	10.5	11.0	13.8°

Die Lichtbilder Gk legen die Trombe vom Standort 2 (Gr. Zicker) aus etwa 2800 m Entfernung fest. Zur Auswertung der Winkelabstände diente dabei die Bake, die links der Trombe in immer wachsendem Abstand erkennbar ist. Das wichtigste Ergebnis dieser Bilder ist – von ihrer Benutzung für die Standortbestimmung abgesehen – die sichere Erkennbarkeit des Wolkensockels unter der allgemeinen Cb – Unterfläche. Weiter zeigen die Bilder Gk 3, insbesondere Gk 4, die ganz sicher vor Gs 12, H 1 und H 2 gemacht worden sind (da sie noch keine Doppelröhre erkennen lassen), daß schon vor der Bildung der Doppelröhre Regenfall auf See und zwar links vorn, in Zugrichtung der Trombe gesehen, auftrat. Dieser Regenfall muß verhältnismäßig weit draußen auf See noch südlich des Fahrstrahles Gk 4 und weit östlich des Fahrstrahles Gs 12 gelegen haben, da er in den Bildern Gs 12, H 1 und H 2 nicht erscheint (vgl. Abbildung 3).

Die Bilder E 1, E 2 und B sind vom Standort 3 und 3a, also von „rückwärts“ aufgenommen. E 1 und E 2 zeigen, daß zeitlich nach dem Bild Gk 4, nämlich unmittelbar nach dem Zerfall der äußeren Röhre, der Regenfall wesentlich näher der Trombe lag. Dabei stellt E 2 zweifellos das letzte Bild der gesamten Entwicklung dar, da die Doppelröhre dort bereits zerfällt. Auf E 1 und E 2 wie auf Bild B ist der tassenförmige Wolkensockel nur angedeutet. Deutlich ist aber auf E 1 und E 2 zu sehen, daß auf der rechten Seite der Trombe bereits das rechte Ende des Cb auf dem Bildausschnitt erscheint, wie die hellen Partien der Rand-Cu zeigen, während die Rand-Cu links der Trombe noch im Wolken Schatten liegen.

Das Bild B muß etwa zwischen Gs 6 und Gs 10 gemacht worden sein, da es noch keinen Regenfall erkennen läßt. Da bei den Bildern E 1, E 2 und B die Trombe von rückwärts gesehen wird, ist auf ihnen die Neigung der Trombe die entgegengesetzte wie auf allen Bildern Gs, H und L. Die Neigung der Trombe ist also etwas nach vorn und merkwürdigerweise etwas gegen den rechten Rand des Cb gerichtet, also nicht auf den Hauptturm des Cb hin, der wie der Regen zeigt, sicherlich links, von Göhren aus gesehen, gelegen hat.

Auf Tafel III und IV sind Ausschnitte der Vergrößerungen von Gs 2, 6, 8, 11, 12, H 1, H 2, E 1 und E 2 dargestellt, um den Wolken Schlauch und auch den Staubfuß genauer darzustellen. Von Bild Gs 1 abgesehen zeigen sämtliche Bilder Gs ebenso wie die Bilder L 1 bis L 7 deutlich ein helles Band in der Mitte des Schlauches, das umso deutlicher zu erkennen ist, je heller der Hintergrund, d. h. je heller der dahinter gelegene Himmel ist. Schon auf Bild Gs 8 zeigt sich auf der unteren Hälfte in dem hellen Streifen ein gerade erkennbarer dunkler Strich, der auf Gs 11 unverkennbar ist und in Gs 12 als innere Röhre erscheint, besonders auf der unteren Hälfte des Bildes. Damit ist bereits die Doppelröhre gebildet. Sie tritt auf H 1, H 2 und E 1, E 2 in prachtvoller Klarheit zu Tage. Zeitlich dürfte die Reihenfolge H 1, E 1, H 2 und E 2 sein, doch ist der Zeitunterschied zwischen H 1 und E 1 sicher nicht groß gewesen. In H 2 ist die Doppelröhre auch gegen den dunklen Hintergrund deutlich zu erkennen, wobei eine kleine Unregelmäßigkeit auffällt, die an der Stelle des dunkelsten Hintergrundes erkennbar ist. Dort wird die linke Seite der äußeren Röhre ausgebaucht und es scheint sich zwischen äußere und innere Röhre etwas ähnliches wie ein Wirbelring geschoben zu haben. Auf H 2 erkennt man weiter, daß – im Gegensatz zu H 1 – die innere Röhre hohl geworden ist. Das erstaunlichste ist aber, daß die innere Röhre ihren eigenen Wasserstaubfuß bildet. Das macht es m. E. sehr wahrscheinlich, daß die innere Röhre eine Neubildung darstellt. E 2 ist sicherlich die letzte Aufnahme, da schon die äußere Röhre zerrissen ist und, wie die unsymmetrische Gestalt zeigt, sich bereits in Fetzen aufzulösen beginnt.

Das Wesentliche der eben erörterten Vergrößerungen ist in den Strichzeichnungen der Abbildung 1 festgehalten. Ausgezogen sind die deutlich erkennbaren Teile des Trombenschlauches, gestrichelt die nur schwach angedeutete Begrenzung, strichpunktiert der oberste durch den Kontrastmangel ganz unsicher erkennbare Teil, der im folgenden außer Betracht bleibt und nur die Höherer Streckung der Trombe andeuten soll (bei H 2 ist der strichpunktierte Teil eine reine Ergänzung). Die Strichzeichnungen von E 1 und E 2 sind gespiegelt wiedergegeben, um auch das letzte Stadium „von vorn“ zu sehen. Sie enthalten sehr viel weniger Einzelheiten, da sie aus sehr großer Entfernung aufgenommen worden sind, also sehr klein erschienen, sodaß sich bei den Vergrößerungen schon die Korngröße des Filmes bemerkbar machte. Punktiert ist der Wasserstaubfuß angegeben. Freilich ist der Wasserstaubfuß auf den Bildern

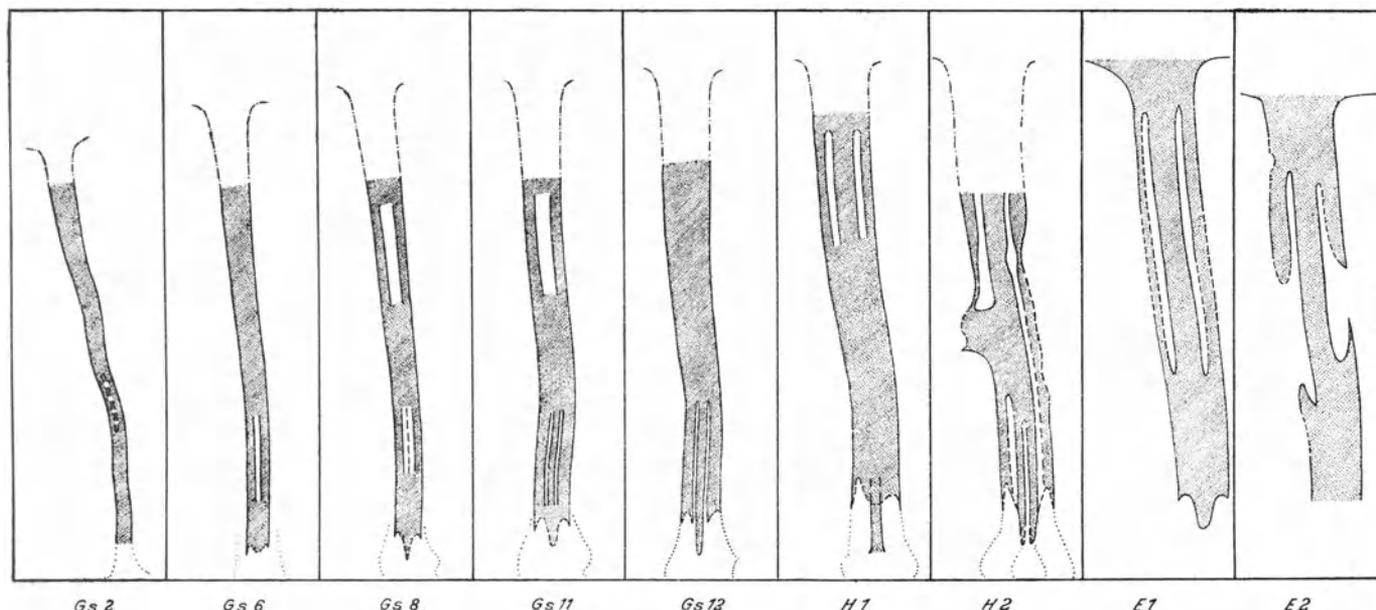


Abb. 1. Schema-Zeichnungen zu den Lichtbildern der Tafel III.

nicht deutlich begrenzt, und das wird er auch in Wirklichkeit nicht gewesen sein. Um ihn einigermaßen in seiner Begrenzung festlegen zu können, wurden mehrere von einander unabhängige Skizzierungen vorgenommen und dann die gemeinsamen Bestandteile als das Richtige angesehen. Zu Beginn der Trombe ist auf Gs 2 der Wasserstaubfuß zweifellos stetig in den Trombenschlauch aufgegangen, scheint aber eine kleine Unsymmetrie in Form einer rechts auftretenden Zacke besessen zu haben. Bei den Bildern Gs 6, 8 und 11 besaß der Wasserstaubfuß einen größeren Querschnitt als das untere Ende des Trombenschlauches, was zu der Annahme zwingt, daß sich eine lebhaftere Vertikalbewegung auch noch außerhalb des Trombenschlauches findet. Die Form des Wasserstaubfußes war bei Gs 6 merklich anders als bei Gs 8 bis 11, wo er eine korbformige Gestalt besitzt. Erst im letzten Bild (Gs 12) läuft der Wasserstaubfuß wieder stetig in den Trombenschlauch ein. Das scheint auch bei H 1 und H 2 der Fall zu sein. Diese Aussagen sind verständlich: Gs 1 und Gs 12, H 1, H 2 stellen den Anfang und das Ende der Trombe dar, in denen weder die Dreh- noch die Aufwärtsbewegung so stark gewesen sind wie z. Zt. der kräftigsten Entwicklung, die zwischen den Bildern Gs 3 und Gs 11 liegt. Auf den eigenen Wasserstaubfuß der inneren Röhre auf Bild H 2 ist bereits oben hingewiesen worden.

Bemerkenswert ist die unsymmetrische Gestalt des Wasserstaubfußes, die auf der östlichen Seite stärkere Ausbuchtungen erkennen läßt als auf der westlichen. Man müßte daher annehmen, daß die relative Geschwindigkeit zum Erdboden auf der östlichen Seite größer ist als auf der westlichen. Daraus würde folgen, da die Zugrichtung etwa von Nord nach Süd verlief, daß auf der östlichen Seite Translationsgeschwindigkeit und Drehgeschwindigkeit sich summieren, auf der westlichen Seite dagegen einander entgegenwirken. Das würde also gleichfalls auf eine antizyklonale Rotation der Trombe hindeuten. Doch ist diese Schlußfolgerung (wegen der geringen Translationsgeschwindigkeit der ganzen Trombe) sehr unsicher.

C. Zahlenmäßige Auswertung der Lichtbilder.

Die Bahn der Trombe kann nur aus den Lichtbildern bestimmt werden, da die Trombe über See zog und keine Zerstörungsspuren zurückgelassen hat. Aber auch die Lichtbilder gestatten keinen völlig eindeutigen Schluß über die Bahn, da sie von den verschiedenen Orten aus naturgemäß nicht gleichzeitig aufgenommen worden sind. Doch ermöglichen sie das, was für die vorliegenden Zwecke völlig ausreichend ist, nämlich die Bahn soweit einzuschränken, daß einmal die Abmessungen der Trombe bestimmt und die Zugrichtung der Trombe leidlich festgelegt werden können.

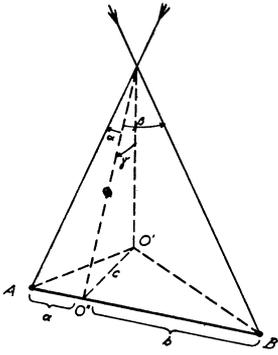


Abb. 2. Zur Berechnung der Winkelabstände zweier Punkte.

Über die benutzten Apparate sind mir folgende Angaben gemacht worden:

Name	Standort	Format cm ²	Brennweite cm	Type
Gs	1	6 × 6	7.5	Rolleiflex, Tessar 1:3,5
L	1	6 × 9	11.0	Zeiss-Ikon, Baldur
Gk	2	6 × 9	11.0	Zeiss-Ikon, Baldur
E	3	6 × 9	10.5	Zeiss-Ikon Derval, Novar 1:6,3
H	1a	6 × 6	7.5	Voigtländer Superb, Skopar 1:3,5
B	3a	?	?	

Herr von Gervais benutzte Blende 5,6 und belichtet $\frac{1}{50}$ bzw. $\frac{1}{100}$ Sekunde (Film: Pan). Von Herrn Bitterling (Standort 3a) erhielt ich keine Angaben.

Gesucht wird der Winkelabstand zweier Punkte mit dem Objektiv als Scheitel (vergl. Abb. 2). Es sei O das Objektiv, A und B zwei Bildpunkte, deren Winkelabstand gemessen werden soll, OO' das Lot vom Objektiv auf die Filmbene, in der das Dreieck O'AB liegt, OO'' das Lot von O auf AB und AO'' = a, BO'' = b, O'O'' = c, OO' = f, OO'' = f'.

Dann gilt

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma &= c/f \\ \operatorname{tg} \beta &= b/f' \\ &= \cos \gamma \cdot b/f \\ \operatorname{tg} \alpha &= a/f' \\ &= \cos \gamma \cdot a/f. \end{aligned}$$

Der gesuchte Winkel AOB wird dann gleich $\alpha + \beta$.

Der Winkel γ ist klein und $\cos \gamma$ kann oft gleich 1 gesetzt werden. Der Fehler e in $\operatorname{tg} \alpha$ oder $\operatorname{tg} \beta$ und damit auch – bei den kleinen Winkeln – in α oder β wird

$$\begin{array}{ccc} e \leq 1.0 & 2.0 & 3.0\% \\ \text{für } \gamma \leq 8.1 & 11.5 & 14.0^\circ \end{array}$$

Im folgenden wird ein Fehler $e \leq 2\%$ zugelassen. Mit $\operatorname{tg} \gamma^* = \operatorname{tg} 11.5 = 0.2035$ wurde dann jeweils der Grenzwert $c^* = 0,2035 \cdot f$ bestimmt, unterhalb dessen $f' = f$ gesetzt werden kann. Eine größere Genauigkeit anzustreben, erscheint unnötig, da die abzunehmenden Punkte (die Mitte des Trombenfußes und die Festpunkte) nicht genauer abgegriffen werden können. Die Auswertung erfolgte jedoch nicht an den Originalabzügen. Vielmehr wurden dazu Vergrößerungen benutzt. Ist die lineare Vergrößerung V, (V lag zwischen 3 und 4), so ist in allen Formeln $F = f \cdot V$ statt f einzusetzen. Dann bedeuten a, b, c wieder unmittelbare Längenablesungen, die auf der Vergrößerung vorzunehmen sind.

D. Die Bahn der Wasserhose.

Nach den Angaben der Augenzeugen lag angeblich der Endpunkt der Trombenbahn etwa 50 m nördlich der Aalreuse. Einige Zeugen sagen: vor der Land-, andere vor der Seereuse¹). Es ist hier, wie so oft, auf die Augenbeobachtungen wenig Verlaß. Die Entscheidungen bringen die praktisch gleichzeitigen Fahrstrahlen E 2 und H 2. Der Schnittpunkt dieser beiden Linien ist als Endpunkt (vergl. Abbildung 3) eingetragen. – Dann klären sich auch völlig die Widersprüche hinsichtlich der Land- und der Seereuse: Tatsächlich zieht die Trombe auf die Seereuse zu, erscheint aber, von Thiessow aus gesehen, hinter der Landreuse. Diese erscheint auch auf den vergrößerten Lichtbildern Gs 11, 12 und H 1 und 2 unter der Trombe, während die Seereuse nicht zu erkennen ist. Die Entfernung von der Reuse ist aller-

¹) Land- und Seereuse sind Teile der Aalreuse (vgl. Abb. 3). Die Seereuse liegt an der (seewärtigen) Spitze, die Landreuse etwa in der Mitte des aus gefühlten Netzen bestehenden „Wehres“ zwischen der Spitze und dem Lande.

dings erheblich unterschätzt, was nicht Wunder nimmt. Der Anfang ist schwerer festzulegen. Ich ging von den Aufnahmen Gk aus, bei denen in der Entfernung der Trombe vom Standort 2 (2 800 m) keine großen Irrtümer möglich sind. Sie liefern als Höhe des Trombenschlauches 490 m, als Höhe des Trombensockels rund 140 m, zusammen 630 m. Diese Länge wird die Trombe z. Zt. der Aufnahme Gs 1, wo noch kein Trombensockel erkennbar ist, insgesamt gehabt haben. Mit dem dazugehörigen Höhenwinkel errechnet sich dann eine Entfernung vom Standort 1 von 1800 m. Diese ist auf den Fahrstrahl Gs 1 aufgetragen.

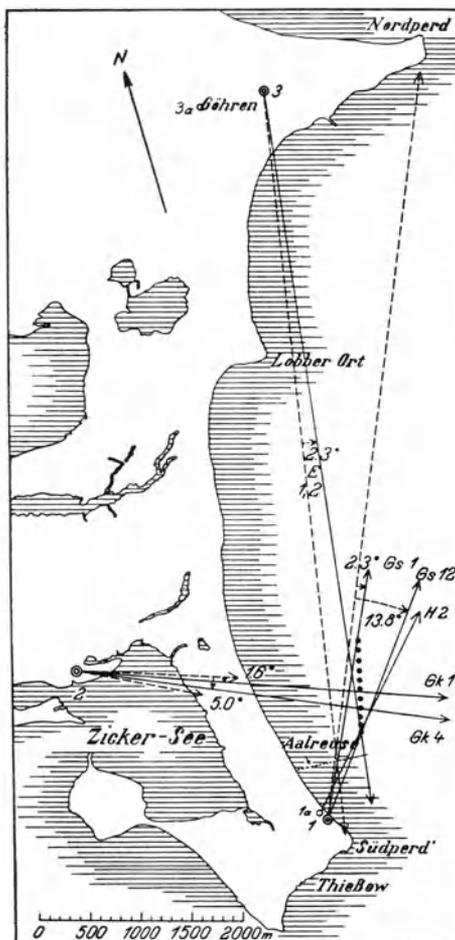


Abb. 3. Lageplan von Thiessow auf Rügen.

Doppelt eingekreist die Standorte 1 (Herr v. Gervais, Frau Lübeck)
 2 (Frau Godglück)
 3 (Herr Emmel)
 Einfach eingekreist die Standorte 1a (Herr Hopfer)
 3a (Herr Bitterling).

Gestrichelte Pfeile: jeweils die Bezugsfahrstrahlen.

Ausgezogene Pfeile: einige Fahrstrahlen zur Bahnbestimmung.

Dickpunktiert: die Bahn der Trombe.

Danach beträgt die ganze Länge der Trombenbahn höchstens 900 m. Nimmt man mit dem sorgfältigen Beobachter Gs eine Lebensdauer der Trombe von $8 \text{ min} = 480 \text{ sec}$ an, so zieht die Trombe mit knapp 2 m/s aus NNE nach SSW. Das stimmt nicht schlecht mit der Höhenwindmessung von Stettin überein. Dort wurden um 10 Uhr 30 und um 13 Uhr in 700 m Höhe $N 2 - 3 \text{ m/s}$ gemessen. Auch die Augenzeugen stimmen — hier einmal einstimmig — überein, daß die Windgeschwindigkeit gering, fast verschwindend gewesen ist. Die fast vertikale Stellung der Trombe macht es wahrscheinlich, daß auch in Höhe der Wolkenunterfläche die geringe Windgeschwindigkeit wie am Boden herrschte, wieder in Übereinstimmung mit der Höhenwindmessung. Die Bahn der Trombe dürfte daher ziemlich sicher sein.

E. Die Abmessungen der Wasserhose.

Am sichersten werden die Größenverhältnisse der Trombe aus den Bildern Gk 1–4 bestimmt, weil hier die Trombe und die Wolkenunterfläche bereits praktisch im Aufriß erscheinen. Die Bilder Gs eignen sich nicht dazu, weil sich auf ihnen die Trombenwurzel gegen den perspektivisch dahinter liegenden Trombensockel nicht hinreichend abhebt. Mit anderen Worten: Auf den Bildern Gs erscheint die Trombe zu kurz. Weiter liegt die Entfernung der Trombe vom Standort 2 ziemlich fest und ändert sich in dem kleinen Winkelbereich zwischen Gk 1 und Gk 4 nur ganz unwesentlich, weil die Trombe fast rechtwinkelig zu Gk 1 zieht. Bei den Bildern Gs dagegen läuft die Trombe beinahe auf den Photographen zu und die Entfernungsänderungen sind beträchtlich. Die Bilder E und B scheiden aus, da die Entfernungen so groß sind, daß die Ausmeßgenauigkeit auf den photographischen Abzügen nicht mehr hinreicht.

Die Höhe der Trombe (=Entfernung Wolkenunterfläche–Wasseroberfläche) wird im Mittel der 4 Bilder Gk 1–4 bei einer mittleren Entfernung von 2800 m vom Standort 2 zu 490 m bestimmt. (Nach dem oben Gesagten müssen die Höhen nach den Gs-Bildern kleiner ausfallen: tatsächlich liefert das Bild Gs 12, für das die Entfernung der Trombe vom Standort 1 ziemlich sicher auf 900 m bestimmt wurde, nur 455 m). Die Höhe des Trombensockels bestimmt sich aus Gk zu etwa 140 m. Da in Gs 1 der Trombensockel noch fehlt, so ist dort als Länge der Trombe $490+140 = 630$ m anzunehmen.

Der Durchmesser des Trombenschlauches am unteren Ende nimmt rasch zu: schon in den kleinen Winkeldifferenzen Gk 1 und Gk 3 (Gk 4 kann wegen der Unschärfe nicht ausgewertet werden) wächst er, gemessen in rd. 150 m Höhe, von 25 auf 27, dann 32 m. Von Gs 1 bis Gs 12, H 1 und H 2 nimmt er gar von 11 auf 34, 42, 48 m, d. h. also während des ganzen Bestehens auf das $4\frac{1}{2}$ -fache zu. Am oberen Ende, d. h. hart unter der Wolkenunterfläche scheint er ziemlich unveränderlich zu sein: Gs 1 liefert 57, Gs 12 47 m. Die Abnahme von Gs 1 auf Gs 12 ist wohl aber eine Folge davon, daß bei Gs 12 der Durchmesser wegen des fehlenden Kontrastes garnicht an der Wolkenunterfläche abgegriffen werden konnte. Der Durchmesser des Wasserstaubfußes läßt sich nur unsicher ermitteln. Bei Gs 6 beträgt er rund das zweifache des (dort etwa 30 m dicken) Trombenschlauches, bei Gs 8 an der dicksten Stelle das $2\frac{1}{4}$ -, bei Gs 11 wieder rund das 2fache, bei H 1 und H 2 knapp das $1\frac{3}{4}$ fache des Trombenschlauches. Doch sind, wie schon oben bemerkt, die Grenzen des Wasserstaubfußes schwer zu bestimmen. Man wird aber nicht weit fehlgehen, wenn man den Durchmesser zuerst auf 40, später auf 80 m veranschlagt.

F. Die Wetterlage.

Die Wetterlage ist aufgrund allen erreichbaren Materials in den Karten der Abb. 4a und 4b für 8, 11, 14 Uhr dargestellt. Die Beschaffung des Materials hat viel Mühe gemacht, die in keinem befriedigenden Verhältnis zu den Ergebnissen steht: Man erkennt unschwer eine Reihe von Stationen, die durchgängig zu hohen oder zu tiefen Druck angeben. Diese Werte wurden, soweit offensichtliche Fehler vorliegen, zwar eingetragen, aber bei der Linienführung der Isobaren unberücksichtigt gelassen¹⁾.

Wie bei so vielen Tromben ist die Wetterlage durch geringe horizontale Druckunterschiede gekennzeichnet. Im Großen gesehen liegt die mittlere und östliche Ostsee in einer Tiefdruckfurche, die sich von Mittelskandinavien nach dem Mittelmeer erstreckt. Darin liegt Rügen, wie die Wetterkarten vom 29. Aug. 1937, 8, 11, 14 und 19 Uhr zeigen, immer auf der West- (Rück-) Seite: um 8 Uhr fast an der Troglinie, um 11 Uhr anscheinend auch noch, während um 14 und 19 Uhr die Troglinie nach der östlichen Ostsee abgezogen ist. Das einzige auffallende ist eine vorübergehende Drehung der Winde über den dänischen Inseln von W–NW auf NNW–NE. Dies tritt auf der 11Uhr-Karte deutlich hervor. Offensichtlich zieht eine kleine „Böenfront“ von N nach S. Sie dürfte um 11 Uhr gerade die mecklenburgische Küste erreicht haben und hart nördlich von Rügen ENE-wärts nach Bornholm verlaufen. Ihre Auswirkungen sind sehr gering. Doch treten in Ruden, rund 12 km SSE von Thiessow, von 11 (?) – 14 Uhr schwere Gewitter auf und Prenzlau, rund 110 km fast südlich Thiessow, meldet um 19 Uhr Regen im Gesichtsfeld. – Der Vorbeizug der schwachen Böenlinie deutet sich ein wenig auch in den Isobaren an. Während um 8 und 11 Uhr über Mecklenburg ein schwacher Tiefdruckausläufer liegt, zeigen die 14- und 19 Uhr-Karten ein schwaches Rand-Hoch über der Odermündung und der Pommerschen Küste, was wohl als Ausdruck

¹⁾ Ich verweise dabei auf meine ausführlichen Darlegungen in Scientia 1934, S. 118 f.

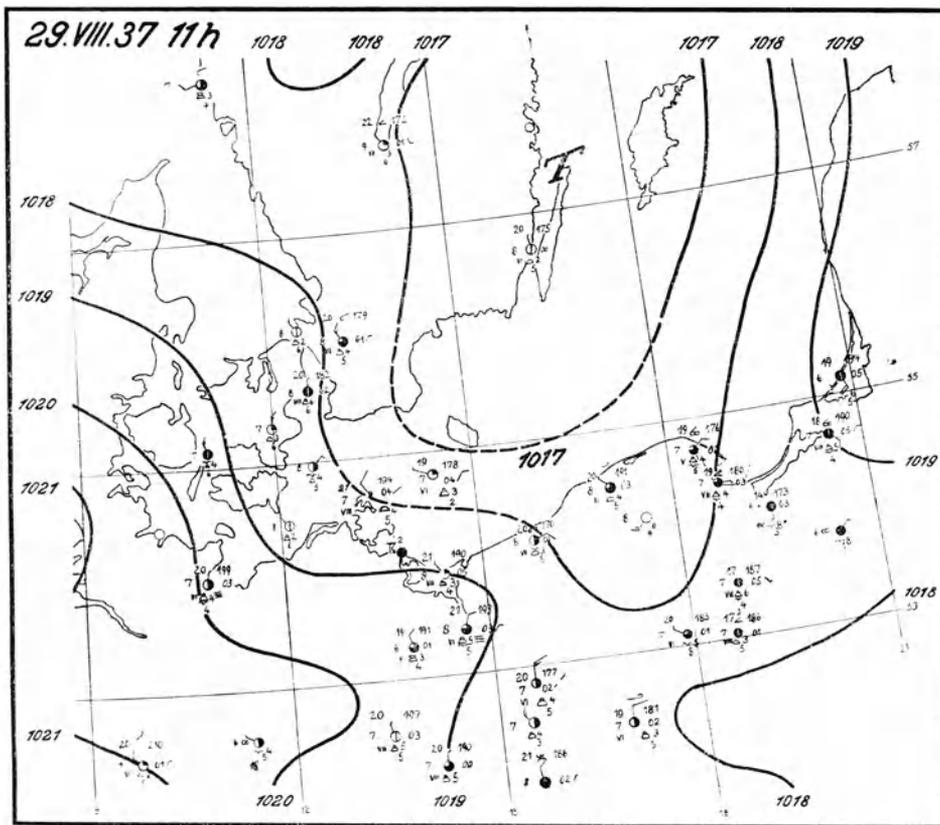
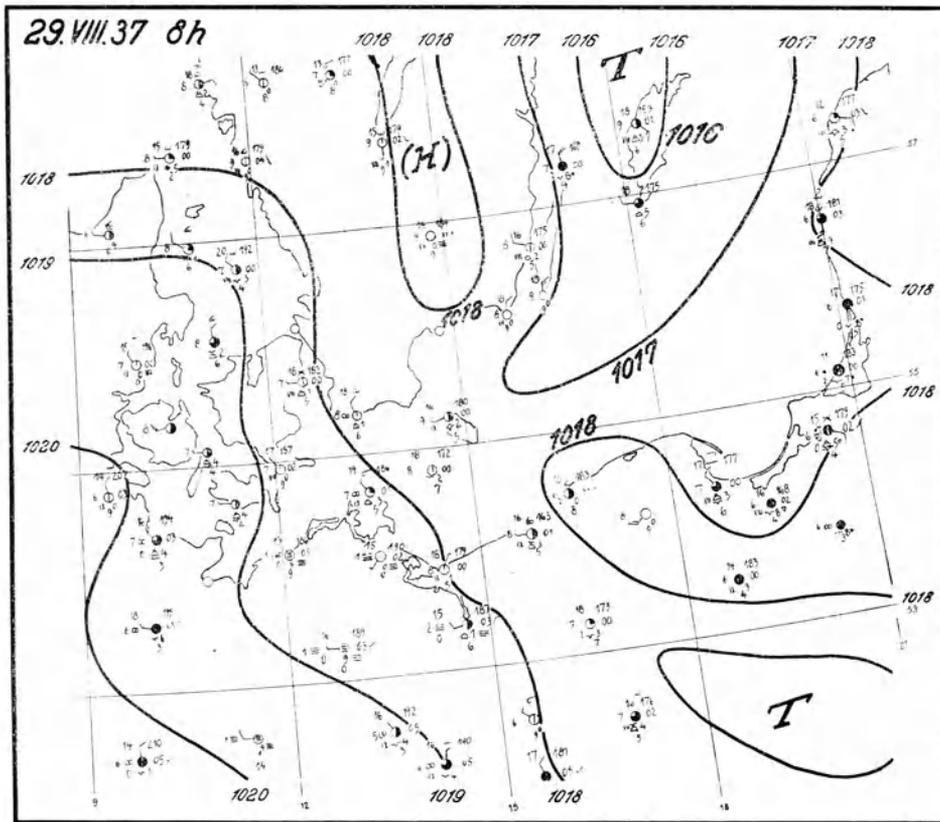


Abb. 4a. Wetterkarten des 29. August 1937 von 8 und 11 Uhr.
 Bei der Zeichnung sind manche Luftdruckwerte nicht berücksichtigt. Das starke Druckgefälle über der Elbmündung ist wenig wahrscheinlich.

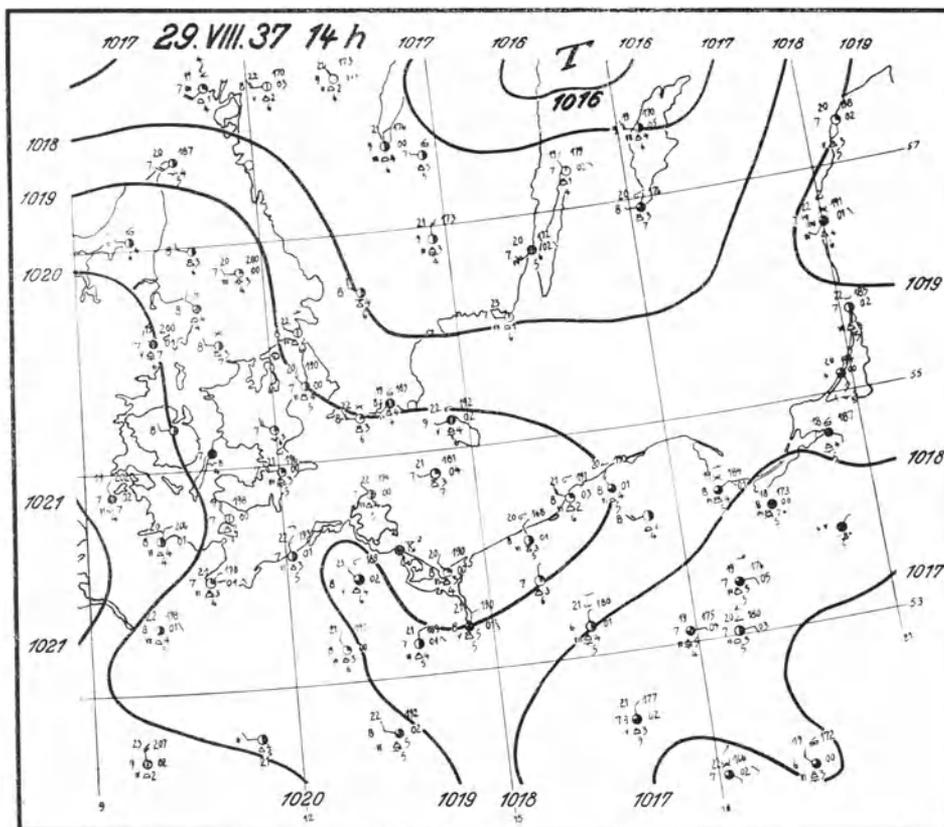


Abb. 4b. Wetterkarte des 29. August 1937 von 14 Uhr.

einer kleinen eingedrungenen Kaltluftmasse anzusehen ist. Da am Boden eine Temperaturänderung nicht erkennbar ist, so kann die Kaltluft nur in der Höhe eingedrungen sein. Ihre Höhe läßt sich nur dahin festlegen, daß sie zwischen unterer und oberer Wolkengrenze gelegen war.

Die Verhältnisse in der freien Atmosphäre sind durch Isothermen für das 500, 1000, . . . , 5000 m Niveau dargestellt worden (vgl. Abbildung 5). Sie zeigen, daß das Gebiet östlich der Elbe, also die Tiefdruckfurche, von 1000 m Höhe an wie üblich kalt, das Gebiet hohen Druckes (über NW- und W-Deutschland) wie üblich warm ist. Die Temperaturdifferenzen beider Gebiete wachsen bis 5000 m Höhe bis auf 6°C an, werden jedoch im Gebiet der mittleren Ostsee nicht unmittelbar wirksam. Wenn auch leider für den 29. August 1937 Flugzeugaufstiege von Skandinavien fehlen, so zeigt ein Vergleich der Temperatur-Höhenkurven vom 29. und 30. August 1937, daß in Norderney, Hamburg und Berlin keine wesentlichen Temperaturänderungen vom 29. zum 30. August aufgetreten sind (in Berlin insbesondere gehen die Temperaturänderungen bis 4000 m kaum über 1°C hinaus, im Gegensatz zur merklichen Erwärmung und Austrocknung von Königsberg und Breslau oberhalb rund 3 km Höhe.) Insbesondere lassen sie von einem Kaltluftseinbruch in der Höhe nichts erkennen, sondern zeigen eher eine schwache Erwärmung und Stabilisierung. Trotzdem können sie nicht als ein Beweis gegen die Auffassung angeführt werden, daß ein schwacher und räumlich begrenzter Kaltluftseinbruch in der Höhe über der mittleren Ostsee erfolgt. Dazu liegen die Stationen zu weit auseinander und zu weit von Rügen entfernt. Daß die Stationen Hamburg, Berlin und Lindenberg nicht völlig repräsentativ sind, geht auch aus dem Kondensationsniveau hervor. Dieses liegt nach den Morgenaufstiegen in 1090, 930 bzw. 900 m Höhe, während die Thiessower Lichtbilder nur 630 m ergeben. Das ist nichts Erstaunliches, da das heutige aerologische Netz, von Zufallstreffern abgesehen, nur zur Bestimmung der Großluftkörper ausreicht.

Die Höhenwinde um Rügen liegen zwischen N und NW. Die beiden räumlich und zeitlich nächsten Höhenwindmessungen lieferte Stettin, die in der folgenden kleinen Tabelle vollständig wiedergegeben werden. Ein Sprung in der Windrichtung liegt in der Nähe des Kondensationsniveaus zwischen 500 und 700 m, von N auf NW, und ein Sprung in der Windgeschwindigkeit zwischen 3700 und 4100 m (von 6 auf 10 bzw. 9 auf 13 m/s). Die Sprungwerte sind jedoch zahlenmäßig viel zu klein, um zur Erklärung der Trombe herangezogen zu werden.

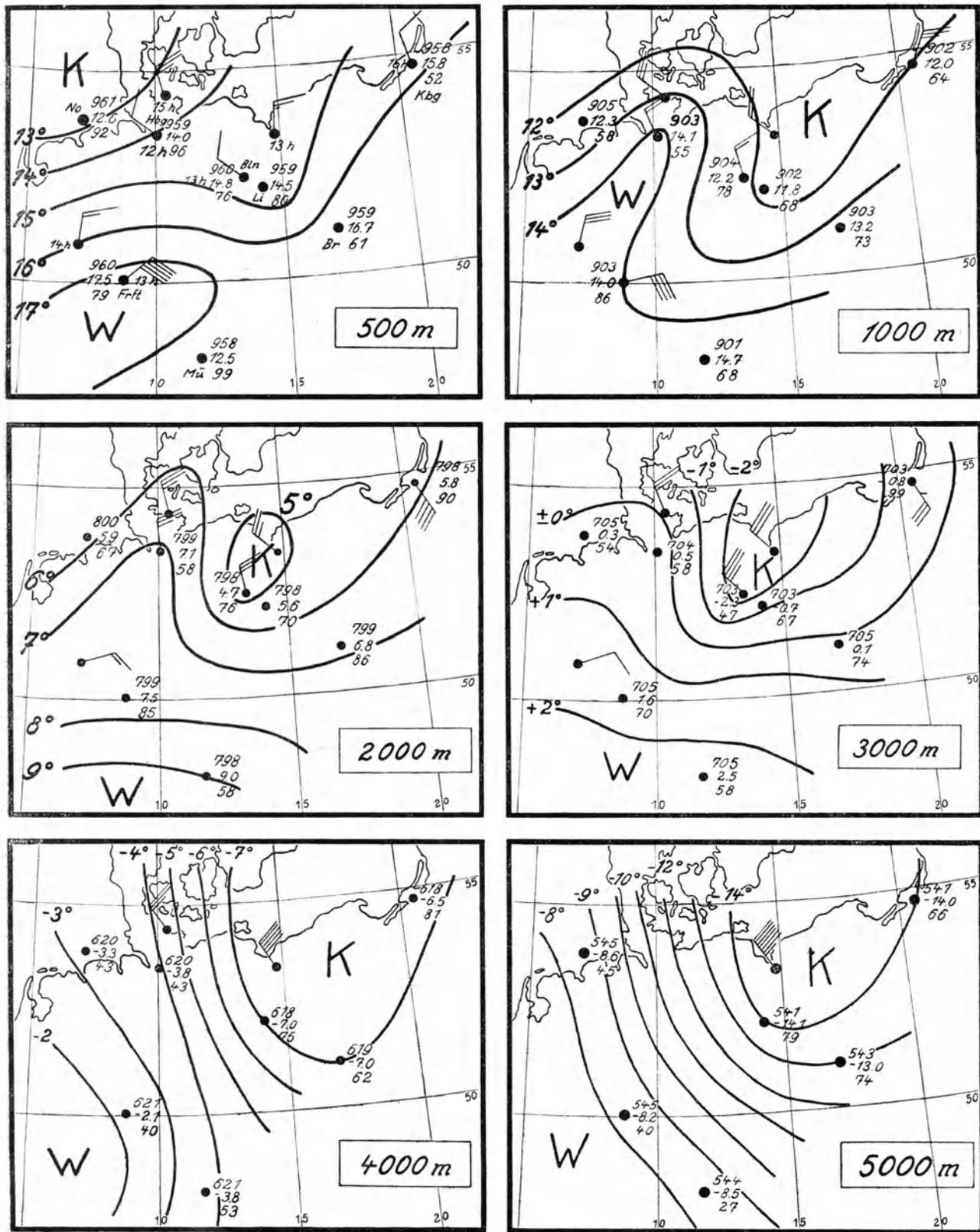


Abb. 5. Die aerologischen Verhältnisse am 29. August 1937.

Eingetragen sind die zwischen 6 und 8^h vormittags erfolgten Fessel- und Flugzeugaufstiege über Deutschland (Druck in mb, Temperatur in °C, Rel. Feuchte in %; Skandinavien hat Aufstiege nicht gemeldet) sowie die zwischen 12 und 16^h erfolgten Höhenwindmessungen über Deutschland. Ihre Zeit ist in der Karte des 500 m-Niveaus beigeschrieben. Ein kleiner Strich bedeutet 1 m/s. Die eingezeichneten Linien sind Isothermen.

Es wurde gemessen:

Schichtmitte km		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7
10 h 30	Richtung	N	N	N	N	N	NNE	NNE	N	—	—	—	—	—	—
	m/s	3	2	3	3	4	4	4	5	—	—	—	—	—	—
13 h	Richtung	NNE	NNE	N	NW	NNW	NW								
	m/s	2	2	3	3	3	5	6	5	6	6	4	5	5	6

Schichtmitte km		2.9	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	5.1	5.3	5.5
13 h	Richtung	NNW	NW	NW	NW	NW	NNW								
	m/s	7	5	5	4	6	10	9	13	14	10	12	13	14	14

Das Rückdrehen der Winde oberhalb 500 m von N – NNE auf NW – NNW kann vielleicht als ein Zeichen dafür angesehen werden, daß um 13 Uhr Stettin hart vor der schwachen Böenlinie liegt.

Zusammenfassung.

Auf der rechten Seite eines sehr langsam ziehenden Cumulonimbus bilden sich nacheinander 3 Wasserhosen. Die erste und dritte sind blind, die zweite, auf die sich alle weiteren Aussagen beziehen, ist voll entwickelt. Der Drehsinn wird unsicher als antizyklonal angegeben. Kurz bevor die Trombe sich auflöst, setzt links vorn, gesehen von der Trombe und in ihrer Zugrichtung, heftiger Regenfall ein. Weder Blitz noch Donner sind beobachtet worden.

30 Lichtbilder gestatten den Verlauf der Trombenentwicklung, die Bildung einer Doppelröhre und den Zerfall mit bisher einzigartiger Vollständigkeit zu verfolgen. Auch die Bahn und die Abmessungen der Trombe können hinreichend bestimmt werden. Danach nimmt der Trombendurchmesser ständig zu (im Gegensatz zu dem durch 7 Bilder belegten Peshawar-Tornado (15)¹).

Die Bodenwindschwankungen, Isobaren-Änderungen und Höhenwindmessungen machen den Vorbeizug einer schwachen Böenfront wahrscheinlich, die zum Auftürmen der Cb führte. Da unten keine merklichen Temperaturänderungen auftreten, so ist weder Labilisierung von unten, noch ein Kaltlufteinbruch unten wahrscheinlich. Das Wahrscheinlichste (wenn auch nicht mehr) ist hier Labilisierung von oben her.

Bemerkenswert ist, daß 1937 noch eine 2. Trombe hart nördlich von Thiessow bei Lobbe aufgetreten ist. Nach einer freundlichen Mitteilung von Herrn v. Berlepsch²) sind 1893 oder 1894 bei Thiessow 2 oder gar 3 Wasserhosen gleichzeitig aufgetreten. Nimmt man das überblickbare Gebiet zu 500 qkm (knapp die Größe des Genfer Sees), so ergeben 3 Wasserhosen auf 500 qkm in 34 Jahren eine Häufigkeit von $1\frac{3}{4}$ Wasserhosen auf 10 000 qkm im Jahre, während für die Niederlande und den Genfer See die entsprechenden Zahlen $2\frac{1}{2}$ und $1\frac{1}{4}$ lauten. Die Zahlen haben also dieselbe Größenordnung. Das ist an sich bemerkenswert, zeigt aber auch, daß es nicht notwendig ist, zur Erklärung der auf den ersten Blick groß erscheinenden Häufigkeit nach örtlichen Einflüssen zu suchen.

1) Die Zahlen in Klammern verweisen auf den Schriftennachweis am Ende der Arbeit.

2) „Bei schlechtem Wetter unternahmen wir . . . eine Fahrt nach der Greifswalder Oie. Auf der Rückfahrt, die ziemlich stürmisch verlief, sahen wir, etwa in der Mitte zwischen der Oie und dem Göhrener Nordperd, also auf der Höhe von Thiessow, nach meiner Erinnerung nicht nur eine, sondern 2 oder sogar 3 Wasserhosen, und zwar in nicht erheblicher Entfernung vom Boot. Ich kann mich an diese Erscheinung, die mir einen unauslöschlichen Eindruck machte, genau erinnern. Aus den tiefhängenden Wolken senkte sich ein Schlauch herab, fast senkrecht stehend, aber mit leichter Krümmung, während von unten ein starker Wasserwirbel in die Höhe stieg.“ . . .

II. Die Trombe von Dubrovnik vom 5. September 1938.

A. Bericht des Augenzeugen.

Herr Clusius schreibt mir am 14. Januar 1939 folgendes:

„Anbei sende ich Ihnen 3 Aufnahmen der von mir beobachteten Trombe, die in einem Abstand von etwa 5 Min. gemacht sind. Gleichzeitig füge ich eine rohe Kartenskizze bei, aus der der Stand des Beschauers und die Zugrichtung der Trombe, die im wesentlichen von SW nach NO lief, zu ersehen sind. Die Erscheinung spielte sich am 5. September 1938 vorm. zwischen 10 und 10.15 ab. Das Wetter war in den vorhergehenden Tagen außerordentlich warm. Am genannten Tage erschien früh um 9 Uhr eine scharf abgezeichnete Bank über dem Meer am Horizont, die mit beträchtlicher Geschwindigkeit landeinwärts zog. Wir konnten etwa um diese Zeit in sehr großer Entfernung bereits eine Trombe sehen, die nach vielleicht 10 Min. wieder aufgelöst war. Die Luft war schwül und während der ganzen Zeit war es an der Beobachtungsstelle nur wenig windig. Es fiel zunächst kein Regen. Der auf Bild C 1 (vgl. Tafel V) sichtbare Trichter, der die Struktur eines ungeheuren in sich verdrehten Korbgeflechtes hatte, war kurz nach der Bildung bis zur Wasseroberfläche zu verfolgen, wo die Massen in rasender Geschwindigkeit herumgepeitscht wurden. Die Bildung vollzog sich durch Verlängerung eines zunächst sehr kleinen Wolkensackes am südlichen, seewärts gelegenen Rande der Wolkenbank.

Auf Bild C 2 ist der Schlauch vollständig ausgebildet und zieht hinter dem südlichen Vorsprung der Insel [Koločep!] vorbei. Der glückliche Umstand, der auf Bild C 2 deutlich zu sehen ist, daß der Schlauch einen weit hinten auf der Insel [Lopud!] gelegenen 125 [214] m hohen Berg gerade verdeckte, gestattet, die Entfernung vom Beschauer zu etwa 4500 [4000] m zu bestimmen. Aus der bekannten Brennweite des Apparates und der Größe der Trombe auf dem Negativ errechnet sich der Schlauchdurchmesser im mittleren Teil zu etwa 70 [54] m und seine Höhe zu rund 400 [350] m. Auf Bild C 3 ist der Schlauch deutlich verbogen und noch weiter gewandert; die Trombe schnürt sich darauf am engsten Teil etwa 100 m über der Wasseroberfläche ab und löste sich dann rasch auf.

Die rotierende Bewegung der Luft um die Trombe herum war an abgerissenen Wolkenfetzen sehr gut zu sehen. Schätzungsweise wurde ein Luftzylinder von 500–800 m Durchmesser in Mitleidenschaft gezogen. Leider habe ich nun versäumt, den Drehsinn der Trombe mir sofort nach der Beobachtung aufzuschreiben. Aber wenn mich nicht alles täuscht, zogen die Wolkenfetzen zwischen Trombe und Beschauer von links nach rechts vorbei.“

Am 1. Februar ergänzte Herr Clusius seine Aussagen wie folgt:

„Ich kann Ihnen bestätigen, daß es sich um eine linksseitige Trombe gehandelt hat, die auf der linken Seite der abziehenden Gewitterwolke, links gesehen in der Zugrichtung der Wolke, aufgetreten ist. Inzwischen ist jeder Zweifel in Bezug auf die Rotationsrichtung der Trombe beseitigt worden, insofern als meine Frau, die ebenfalls Naturwissenschaftlerin ist, das Phänomen in einem Brief an Verwandte ausführlich geschildert hat. Diesen Brief haben wir herausuchen lassen, sodaß ich heute in der Lage bin, die zunächst etwas zweifelhaften Angaben des Rotationssinnes mit voller Sicherheit zu machen. Danach ist die Trombe im Gegenzeigersinn rotiert, wenn man in den Schlauch von oben nach der Erde hineinsieht. Offenbar sind diese Tatsachen nicht ohne weiteres mit der Wegenerschen Theorie in Einklang zu bringen.“

B. Erläuterung der Lichtbilder (Tafel V).

Den Mitteilungen von Herrn Clusius ist wenig hinzuzufügen. Daß die Trombe linksseitig war, geht am deutlichsten aus Bild C 3 hervor. Dann kann folgendes gesagt werden: Die Neigung ist oben gegen den rechts gelegenen Hauptturm gerichtet. In Bild C 1 ist sie nur gering, doch ist hart unter der Wolke das von A. Wegener vermerkte Umbiegen zu erkennen. In Bild C 2 ist sie schon deutlicher ausgesprochen, in Bild C 3 erreicht sie im mittleren Stück wohl einen halben rechten Winkel. Bemerkenswert ist, daß das untere Stück fast senkrecht ist. Die Gestalt ist auf Bild C 1 fast zylindrisch. Bild C 2 deutet eine Doppelröhre an, insofern, als sich der Durchmesser des unteren Endes nicht stetig, sondern sprunghaft verringert. Bild C 3 zeigt schon eine deutliche Altersform der Trombe: Offenbar ist sie vom Winde verweht, der obere Teil durch die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe vorgeeilt. Auf die Altersform deuten auch die vielen Ungleichmäßigkeiten des Trombenschlauches. Die Wolkenformen machen beinahe die Reste einer vorangehenden Trombe wahrscheinlich, insbesondere der schräg nach links unten hängende Wolkenzapfen auf der rechten Seite der Trombe, der auf Bild 2 sich aufzulösen beginnt und auf Bild 3 nur noch als durchscheinender Schleier erscheint.

C. Bahn und Abmessungen der Trombe.

Die Bahn über der Insel Koločep (vergl. Abbildung 6) konnte dank der Angaben eines Fischers festgelegt werden. Es fand sich auch ein armdicker Pinienast, der von der Trombe abgebrochen war. Die sehr widerstandsfähigen Oliven hatten keinen noch im März 1939 erkennbaren Schaden erlitten. Diese Bahn stimmt mit der Handzeichnung von Herrn Clusius überein. Die Entfernung der Trombenfußpunkte vom Standort C beträgt 4100, 3950, 3930 m.

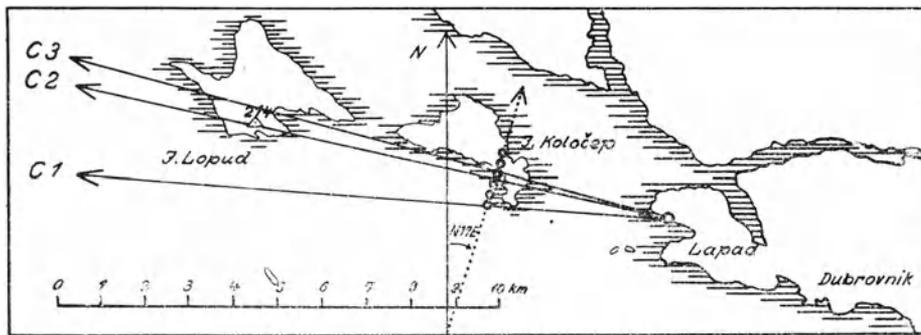


Abb. 6. Lageplan von Dubrovnik (Ragusa) mit den Inseln Koločep und Lopud. Eingekreist der Standort des Photographen auf der Halbinsel Lapad. Die Pfeile sind die vom Photographen aus gezogenen Fahrstrahlen nach der Trombenfußmitte für C 1–3. Dünn punktiert die Richtung der Trombenbahn, dick punktiert das durch Beobachtungen belegte Stück.

Die Winkelabstände auf den Bildern wurden durch die links erscheinende SW-Spitze von Koločep und der auf C 2 hinter der Trombe erscheinenden Höhe 214 (m) auf Lopud bestimmt. Es ist

$$\begin{aligned} \sphericalangle (C 1, C, C 2) &= 8.4^\circ. \\ \sphericalangle (C 2, C, C 3) &= 2.4^\circ. \end{aligned}$$

Die Länge der Bahn beträgt, da die Trombe die Insel an der Einschnürung völlig überquert hat, mindestens $1\frac{1}{4}$ km, ihre Richtung ist SSW – NNE.

Die Höhe der Trombe (= Abstand der Mutterwolke von der Wasseroberfläche) beträgt auf C 1 350, auf C 2 330, auf C 3 600 m. Während der Unterschied von C 1 und C 2 belanglos ist, kann kein Zweifel sein, daß sich auf C 3 die Höhe gegenüber C 1 und C 2 rund verdoppelt hat. Denn daß die Trombe nach C 2 plötzlich ihre Richtung geändert habe und auf den Photographen zugeeilt sei, ist an sich schon, dann aber auch nach den Bildern durchaus unwahrscheinlich. Vielleicht handelt es sich um eine Alterungserscheinung.

Die Dicke bestimmt sich, jeweils in der Trombenmitte gemessen (normal zur Achse), beiläufig zu 54 m auf C 1, 42 m auf C 2, 27 m auf C 3.

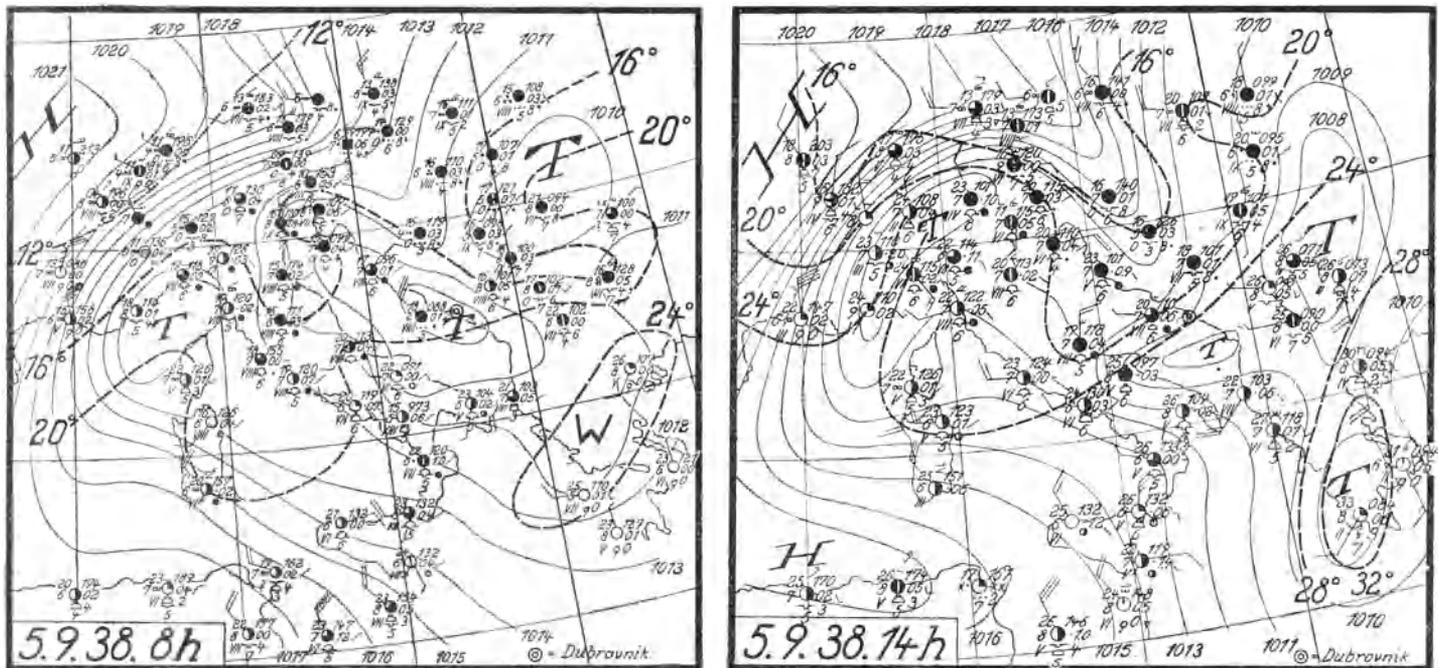


Abb. 7. Wetterkarten vom 5. September 1938, 8 und 14 Uhr.

D. Die Wetterlage.

Die Wetterlage ist in den Abbildungen 7 dargestellt. Über die Genauigkeit der Isobaren gilt hier dasselbe, was für die Wetterkarten vom 29. August 1937 gesagt wurde. Auf der E-Seite eines bei Irland gelegenen Hochdruckgebietes sind Kaltluftmassen nach Mitteleuropa eingedrungen. Am 5. September 8 Uhr haben sie nördlich der Alpen den üblichen Keil hohen Druckes erzeugt. Die Kaltluft beginnt die Alpen im Westen und Osten zu umranden und erzeugt im Rhonetal einen gut entwickelten Mistral. Ob es an der Dalmatinischen Küste zur Entwicklung einer Bora gekommen ist, kann aus den Wetterkarten nicht ersehen werden. Immerhin meldet um 14 Uhr Triest ENE 5, Pola ENE 4. Die Warmluft, die reichlich 4°C wärmer als die Kaltluft ist, bewegt sich im Meeresniveau über der mittleren Adria von SW nach NE. Für die Strömungsverhältnisse in der Höhe liegen zwei Anhaltspunkte vor: Zara etwa 300 km NW von Dubrovnik, meldet um 8 Uhr in 1000 m NW 3 m/s, in 2000 m EzN 4 m/s; Lagosta, rund 100 km W von Dubrovnik, meldet um 19 Uhr in 1000 m WzS 6 m/s, in 2000 m WSW 14 m/s. Ungefähr gibt Zara die Verhältnisse in (und vielleicht oberhalb) der Kaltluft, Lagosta in (und vielleicht oberhalb) der Warmluft an. Daß in Lagosta in der Höhe Kaltluft eingedrungen ist, erscheint trotz der Schirmwirkung der Alpen nicht ausgeschlossen, da bereits am 4. September 8 Uhr die Kaltluft zwischen Alpen und Pyrenäen S-wärts vorzudringen beginnt und sich das Tiefdruckgebiet — im Großen gesehen — vom 4. zum 5. September doch merklich ostwärts verlagert. In der so voraussichtlich labilisierten Schichtung wird dann vor und an der Dalmatinischen Küste, an der die aus SW anströmende Warmluft wohl oder übel auf 1000 bis 1500 m aufsteigen muß, leicht Cb-Bildung einsetzen.

Zusammenfassung.

Am 9. Mai 1938 bilden sich im Abstände von einer Stunde 2 Wasserhosen. Die zweite konnte gut beobachtet werden: Sie lag auf der linken Seite eines NE-wärts ziehenden Cb, ihr Drehsinn war zyklonal, widersprach also der Regel von A. Wegener und M. Pinkhof.

3 Lichtbilder gestatten in Verbindung mit der bekannten Bahn die Abmessungen zu berechnen.

Die Trombenbildung erfolgte hart an der scharf ausgesprochenen Grenze zwischen Kalt- und Warmluft (vgl. besonders die 14 Uhr-Karte). Die zyklonale Drehrichtung der Trombe entspricht dem Gleitwirbel der Luftkörpergrenze.

III. Zur Theorie der Tromben.

A. Für und gegen die mechanische Theorie.

1928 hat A. Wegener seine neue Theorie der Tromben (3) aufgestellt, die er die mechanische nennt. Der hohe Klang seines Namens nötigt dazu, sich mit seiner Theorie eingehend auseinanderzusetzen.

Ihre Hauptstützen sind offenbar folgende 4 Punkte: 1.) Die Erklärung der Seitenstellung der Tromben. Ob sich diese für die Mehrzahl oder gar überwiegenden Mehrzahl der Tromben bestätigen wird, kann erst die Zukunft zeigen. Vieles spricht allerdings dafür. 2.) Die zwanglose Erklärung der äußeren Streufelder. Daß diese verhältnismäßig selten beobachtet werden, könnte dadurch erklärt werden, daß sie nur bei den stärksten Tromben auftreten. 3.) Die häufig beobachtete Neigung der Tromben, die bei der Magdeburger Trombe 1933 (4) und dem Elmwood-Tornado 1919 (5) so groß wird, daß sie als praktisch horizontal bezeichnet werden können. Hier kann vielleicht auch die merkwürdige „Henkelwolke“ von Belfort 1927 angeführt werden (6). 4.) Schließlich hat sich die Voraussage A. Wegeners, daß linksseitige Tromben antizyklonal rotieren, bei der Händelooper Trombe 1938 (7) eindeutig bestätigt. Freilich ist bei der Händelooper Trombe unerwartet und schwer zu deuten, daß zwei linksseitige Tromben auftreten, die beide denselben Drehsinn besaßen.

Gegen die mechanische Theorie sprechen die gleichzeitigen und nahe benachbarten Höhenwindmessungen, die allerdings noch spärlich sind und vielleicht nicht immer die entscheidende Höhe erreichen: Bei den Tromben von Dorpat 1918 (8), Magdeburg 1933 und Händeloopen 1938 sind keine vertikalen Windsprünge beobachtet worden. Ja die Windgeschwindigkeit ist bis in große Höhen (außerhalb des Cb) so gering, daß man fast von Windstille sprechen kann.

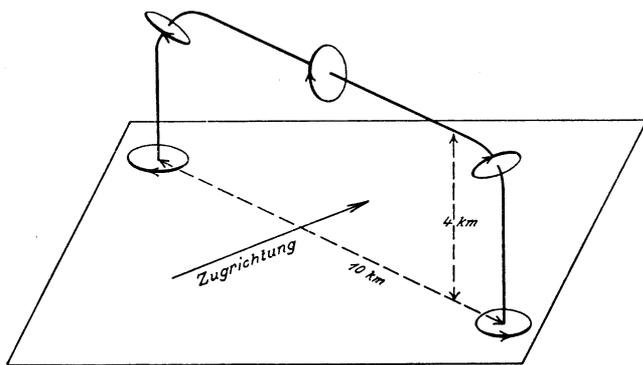


Abb. 8. A. Wegeners horizontaler Mutterwirbel mit der rechtsseitigen (zyklonalen) und der linksseitigen (antizyklonalen) Trombe.

können. Da die Tromben immer mit starken Aufwärtsbewegungen verbunden sind, (mögen auch vereinzelte Beobachter einmal von absteigenden Bewegungen sprechen), so ist nicht einzusehen, wo die von beiden Tromben aufwärts geschaffte Luft innerhalb des horizontalen Mutterwirbels verbleibt. Es ist also ein solches, durch den horizontalen Mutterwirbel verbundenes Trombenpaar schon kinematisch nicht möglich.

Aber selbst wenn man die Zweiseitigkeit grundsätzlich aufgibt, finden sich einige Fälle mit einem Drehsinn, der Wegeners Forderung widerspricht, so die rechtsseitige antizyklonale Trombe von Doetinchen 1931 (7) und die linksseitige zyklonale Trombe von Dubrovnik 1938 (siehe oben).

Die Hauptschwierigkeit der mechanischen Theorie liegt aber doch in der Energiefrage. In seinem 1918 erschienenen Buch schreibt A. Wegener dazu (1, S. 294): Seine Theorie sei „eine mechanische, in welcher nicht die Wärmeverhältnisse als Ursache und die Rotation als Folge, sondern umgekehrt die Rotation, mechanisch oder hydrodynamisch entstanden, als Ursache der thermodynamischen Effekte betrachtet wird, die sich in der Kondensation der Wolkensäule äußern.“ Wenn er diese scharfe Formulierung 1928 nicht den Worten nach wiederholt hat, so doch dem Sinne nach. Er spricht davon (3, S. 202), daß, je länger der (horizontale) Mutterwirbel sei, er umso mehr Energie aus der Gewitterwolke erhalte, daß (S. 210) „die Gewitterwirbel zusammengerollt“ werden und daß (S. 211) der Vorderrand des Cb die „Sammlung der Wirbelenergie“ bewirke. Am deutlichsten äußert er seine Vorstellung S. 208 dahin: „rechts- und linksseitige Tromben sind die Enden ein- und desselben horizontalen Mutterwirbels.“ Das besagt doch, daß die Energie der Trombe von außen aufgenommen wird und die Kondensationsvorgänge in der Trombe und über der Trombe keine wesentliche Rolle spielen. Nach alledem wird also die Energie aus bereits vorhandenen Wirbeln durch deren Zusammenrollung geschöpft. Die bei den Kondensationsvorgängen im Cb freiwerdenden Energien spielen wenn überhaupt, dann nur eine untergeordnete Rolle. Diese Vorstellung erscheint heute, wo – im Gegensatz zu 1928 – die überwiegende Bedeutung feucht-labiler Aufwärtsbewegungen klargestellt ist, als unhaltbar.

B. Für und gegen die thermodynamische Theorie.

Beginnen wir mit den Einwänden gegen diese Theorie, insbesondere mit den Einwänden, die A. Wegener selbst vorgebracht hat. Er schreibt in seinem Buch (1, S. 293), daß für die thermodynamische Theorie das Aufstrudeln überhitzter Luftmassen vom Boden eine notwendige und hinreichende Bedingung der Trombenbildung sei, daß dies aber nur auf die Staubtromben zuträfe. Er bezieht sich dabei auf Sprung, aber auch auf Reye (1, S. 291). Wenn Th. Reye in seinem Buche (10) auf Seite 44 auch meint, daß für die Entwicklung der Trombe trockenlabile Schichtung günstig sei, so sucht er doch (S. 45) die Energiequelle in dem, was heute feuchtlabiles Aufsteigen genannt wird. Ja, er sagt geradezu, daß zur Bildung aufsteigender Luftströme trockenlabile Schichtung keineswegs erforderlich sei, wenn er auch glaube, daß sie den Tromben immer vorangeht, und er hält (S. 54) die Trombenbildung auch dadurch für möglich, daß eine Labilisierung durch Kaltluftzufluß in der Höhe erfolgt. Ganz ähnlich A. Sprung in seinem Lehrbuch (11). Zunächst stellt er (S. 221) fest, daß bei den Tromben wegen ihrer geringen horizontalen Ausdehnung das, was heute Asymmetrie des Temperaturfeldes genannt wird, und

Die nächsten Einwände richten sich gegen den horizontalen Mutterwirbel selbst. An sich sollte man an seinen beiden Enden je eine Trombe erwarten, denn „rechtsseitige [zyklonale] und linksseitige [antizyklonale] Tromben sind . . . als die zur Erde herabgebogenen Enden eines und desselben Mutterwirbels zu betrachten.“ Ein solches Trombenpaar ist nun noch nie beobachtet worden. Auch der von A. Wegener mit Vorbehalt angezogene Austin-Tornado (9) entspricht nicht dieser Auffassung. A. Wegener hat das Fehlen solcher Fälle als große Schwierigkeit empfunden: „es wäre seltsam, wenn solche gar nicht vorkämen.“ Doch ist leicht einzusehen (vgl. Abbildung 8), daß sie überhaupt nicht auftreten

wegen der großen Windgeschwindigkeiten in der Trombe die Corioliskraft belanglos sind. Zur Energiefrage äußerte er sich dann (S. 226) dahin, daß, wenn auch unten das Zentrum der Trombe kälter sei, dies in der Höhe sicher nicht der Fall ist, und zwar wegen der langsamen Temperaturabnahme beim adiabatischen Aufsteigen feuchter Luft. „Dies ist notwendige Bedingung für die Fortexistenz“. Er meint auch (S. 227), daß eine Trombe sehr gut „in höheren Schichten“ entstehen könne und erklärt dann das nach unten gerichtete Wachsen des kondensierenden Trombenschlauches durch die Druckübertragung von oben nach unten, die (S. 229) „mit Schallgeschwindigkeit“ erfolgen könne. Der Einfluß der Reibung wirke dem Fortbestehen der Trombe entgegen (S. 230), „wenn nicht der Bewegungsverlust durch fremde Einflüsse neu ersetzt wird.“ Bei vielen Trombenexperimenten geschähe das durch die rotierende Scheibe oberhalb der künstlichen Trombe, „bei wirklichen Tromben . . . durch den Kondensationsprozeß in der Achse des oberen Teiles der Trombe.“ Wenn also Reye schon eine Erklärungsmöglichkeit der Tromben ohne Mitwirkung der bodennahen Schichten erkannt hat, so hält Sprung die bodennahen Schichten energetisch für bedeutungslos und sieht die Erklärung im feuchtlabilen Aufsteigen.

Diese Vorstellungen sind heute noch der Kern der thermodynamischen Theorie der Tromben. Die Energiequelle liegt danach in der feuchtlabilen Schichtung, die durch die gewaltige Mutterwolke (Cb) unmittelbar sichtbar wird. Wodurch die Bildung des Cb eingeleitet wird, ist eine Sache für sich. Hier genügt, daß durch den Cb Feuchtlabilität nachgewiesen wird. Die Vorgänge, die die Trombenbildung einleiten und unterhalten, liegen also weder in der bodennahen Schicht, noch in dem oberen Teil des sichtbaren Trombenschlauches, sondern in der Mutterwolke.

C. Neue Form der thermodynamischen Theorie.

Soweit mir bekannt, haben alle Trombentheorien bisher die Frage offen gelassen, wie es zu der gewaltigen Druckerniedrigung in der Trombe kommt. Es sei denn, daß die Zentrifugalkraft als Ursache angeführt wird. Diese kann aber als Scheinkraft keine Arbeit leisten, also auch nicht die potentielle Energie der Druckverteilung schaffen. Vielmehr müssen erst horizontale oder nicht kompensierte vertikale Druckunterschiede da sein, die dann die Geschwindigkeiten erzeugen. Wenn man nicht bisher unbekannte Eigenschaften des Wasserdampfes bei rascher Druckabnahme (2 mb/sec) oder ungewöhnliche Übersättigungen (von mehreren 100%) einführen will, wofür vielleicht manches spräche, so bleibt z. Zt. wohl nur folgende Vorstellung übrig: Die Cb-Bildung spielt sich zunächst in einem vertikalen Bereich ab, der feuchtlabil ist, aber nach oben durch eine schwache, feuchtstabile Schicht begrenzt wird. Der Cb breitet sich dann unter dieser schwachen Inversion mehr oder weniger amboßförmig aus. Werden nun Luftmassen zugeführt, die eine höhere potentielle Ausgangstemperatur besitzen als die bisher den Cb aufbauenden Luftmassen, so kann die Sperrschicht überwunden werden und die Luft schießt über den nächsten Bereich hinweg, dessen vertikaler Temperaturgradient überfeuchtadiabatisch ist. Solche Vorgänge sind wohl bekannt und sind schon von Stüve erörtert worden. Nun kann der Fall eintreten, daß der zweite Bereich mit überfeuchtadiabatischen Gradienten von großer Mächtigkeit und fast trockenadiabatisch ist.

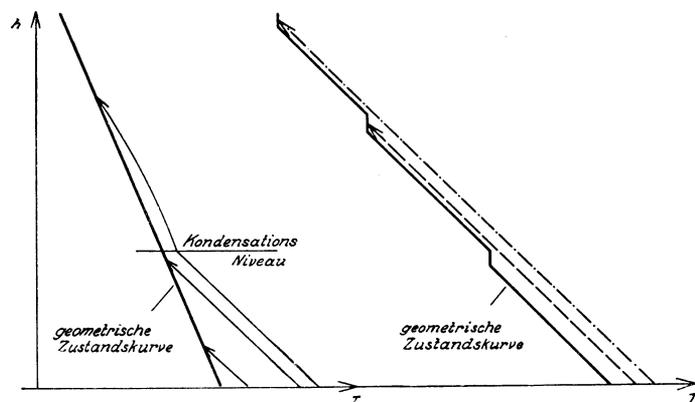


Abb. 9. Zunahme der Vertikalverschiebungen bei Zunahme der Bodentemperaturen.

Vertikalverschiebung, wie die am weitesten rechts im linken Diagramm gelegene individuelle Zustandskurve (dünn ausgezogen) erkennen läßt. Das rechte Diagramm zeigt dick ausgezogen die geome-

Alsdann ist das dort emporschießende Luftpaket von großem Umfang und großer Höhe und das Emporschießen erfolgt mit großer Geschwindigkeit. In Abbildung 9 sind die Verhältnisse schematisch dargestellt: Links nach Stüve die Zunahme der Vertikalverschiebungen durch Konvektion bei Erwärmung in den unteren Luftschichten, z. B. durch den täglichen Gang der Lufttemperatur. Zunächst nimmt die Vertikalverschiebung bei gleichmäßig ansteigender Temperatur gleichmäßig zu. In dem Augenblick aber, in dem die Vertikalverschiebung das Kondensationsniveau erreicht, erfolgt eine sprunghafte Zunahme der

trische Zustandskurve, die in der Umgebung der sich meist nachmittags bildenden T o r n a d o s aufzutreten scheint: trockenadiabatische Stücke mit eingestreuten kleinen Inversionen. Dann genügt die Zufuhr nur wenig höher temperierter Luft am Boden (oder nur wenig tiefer temperierter Luft in der Höhe!), um sprunghaft große Vertikalverschiebungen auszulösen. An sich reicht es, wenn oberhalb des Kondensationsniveaus die zwischen den Inversionen gelegenen Stücke der geometrischen Zustandskurve überfeuchtadiabatisch sind, was bei den europäischen Tromben eher der Fall sein dürfte als das Auftreten trockenadiabatischer Schichten. Das wesentliche ist das Durchstoßen einer schwachen Inversion und der Eintritt in eine (trocken- oder feucht-) labile Schichtung großer Höhererstreckung.

Was ist die Folge davon? Offensichtlich wird der Sog, der dies emporschießende Luftpaket emporhebt, statisch nach unten, bis zum Erdboden übertragen. (Ein hier möglicher Einwand ist mir bekannt). Hat dies emporschießende Luftpaket einen kleinen Querschnitt, etwa 1–10 m Durchmesser, so werden sich die horizontalen Druckunterschiede sehr rasch durch seitlichen Zufluß ausgleichen. Selbst wenn die momentane Druckerniedrigung 50 mb betrüge, dürfte sie in Bruchteilen von Sekunden ausgeglichen sein. — Wenn aber durch irgendwelche Umstände das Luftpaket einen Durchmesser von 1–10 Hektometer besitzt, so werden die darunter gelegenen Luftmassen zum Druckausgleich schon beträchtliche Wege zurücklegen müssen. Sie werden, wie nach einer Explosion, nach dem Zentrum der Druckerniedrigung stürzen und dabei Geschwindigkeiten erreichen, die große Bruchteile der Schallgeschwindigkeit, 50–100 m/s, ausmachen.

In diesem Augenblick werden für die Trombenbildung zwei Vorgänge von großer Bedeutung. Wenn der Zufluß nach dem Zentrum völlig radial erfolgt, so wird der horizontale Druckausgleich sehr rasch vor sich gehen. Ist dagegen schon vorher irgendeine Asymmetrie der Luftbewegung vorhanden, und das scheint unter Gewitterwolken die Regel zu sein, so kommt es zu einer Drehbewegung. Der Sinn dieser Drehbewegung wird durch die vorhandene Asymmetrie des Stromfeldes festgelegt. [Schon Ferrel, Brunt u. a. haben gezeigt, daß bereits die stets vorhandenen Wirbel der Erddrehung ausreichen, die gewaltigen Drehbewegungen der T o r n a d o s zu erzeugen, wenn sich die Luft unter Erhaltung des Rotationsmomentes der Rotationsachse nähert. Daß hier die Erhaltung des Rotationsmomentes mit leidlicher Annäherung vorausgesetzt werden kann, hat seinen Grund darin, daß die Bewegung durch impulsiven Druck erzeugt wird.]

Geschähe nichts weiteres, so würde, wenn auch auf gekrümmten Bahnen, der Druckausgleich immer noch sehr rasch erfolgen. Es geschieht aber noch ein zweites: die mit der Bahnkrümmung einsetzende Zentrifugalkraft verhindert einen radialen Druckausgleich! Sie hat also eine ganz andere Aufgabe als bisher so oft angenommen: Sie erzeugt nicht die Druckunterschiede, sondern sie erhält die einmal vorhandenen Druckunterschiede am Leben (12).

Freilich kann sie die Druckunterschiede nur dort erhalten, wo nicht die Reibung in starkem Maße wirksam ist. Dies ist aber am Erdboden der Fall. Ferrel hat daher vollständig recht, wenn er sagt, daß durch die Verminderung der Druckerniedrigung am Boden auf der Achse der Trombe die größten vertikalen Druckgradienten entstehen und „die Reibung mithin zur mächtigsten Ursache des aufsteigenden Stromes“ wird. Das ist von A. Wegener in seinem Buch (S. 213) offenbar nicht richtig dargestellt worden: Die gestrichelte Kurve der Abbildung 55 stellt eher die (horizontale) Druckverteilung oberhalb der Reibungshöhe dar, die ausgezogene eher die Druckverteilung am Boden. Auf jeden Fall bilden sich auf der Trombenachse in Bodennähe starke aufwärtsgerichtete, durch die Schwere nicht kompensierte Druckgradienten heraus, die dort die stärksten, nach oben gerichteten Beschleunigungen erzeugen.

Aus dieser Überlegung ergibt sich folgender Aufbau des Stromfeldes unter der Mutterwolke: der eine Teil wird dargestellt durch eine Schlotströmung (vergl. Abbildung 10). Der stärkste Zufluß findet am Boden statt, dort liegen also die radial gerichteten Stromlinien am engsten. In dem Schnittpunkt der Trombenachse mit der Erdoberfläche bildet sich notwendig ein Staupunkt. In ihm herrscht die Geschwindigkeit null. Die Geschwindigkeit der (am Erdboden horizontalen) Schlotströmung zeigt daher am Erdboden folgenden Verlauf: In sehr großer Entfernung von der Trombenachse, d. h. in einer Entfernung von etwa 10–50 Durchmessern des Trombenschlauches, ist die Radialkomponente verschwindend klein. Sie wächst mit der Annäherung an die Trombe annähernd umgekehrt proportional dem Abstände von der Trombenachse, in deren unmittelbarer Nähe fällt sie dann rasch ab, um im Staupunkt wieder den Wert null zu erreichen. Das Bild, das sich so ergibt, ähnelt stark der von A. Wegener und J. Letzmann gegebenen Einteilung des Wirbels in Kern und Mantel. Auch in größerer Höhe über dem Boden gilt für die Horizontalkomponente der Schlotströmung ungefähr dasselbe, nicht aber für

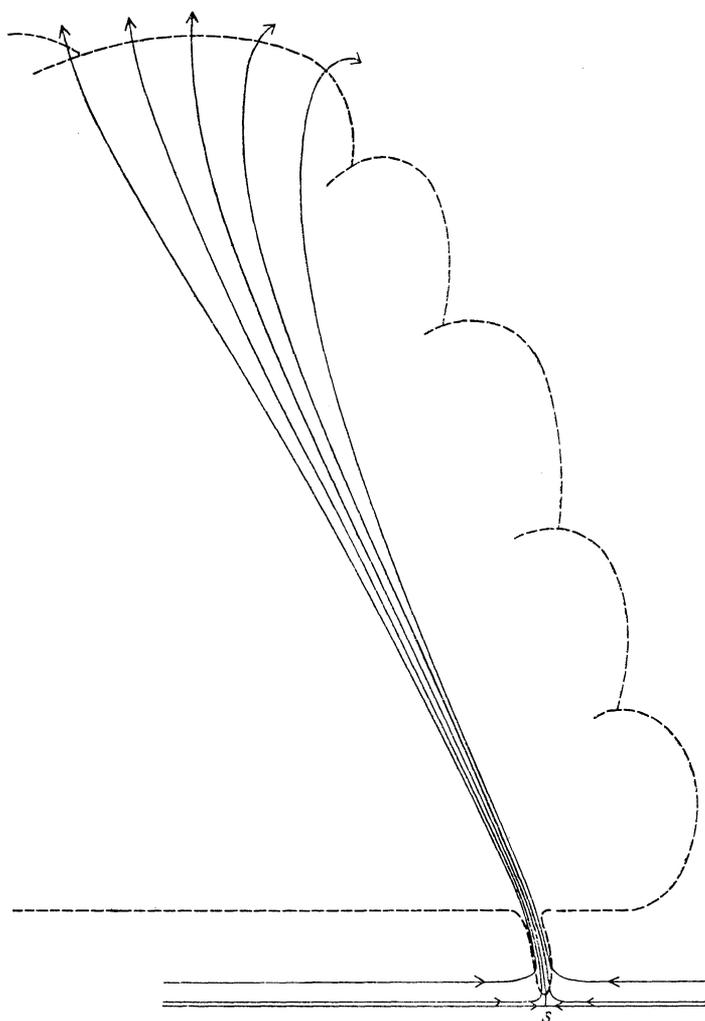


Abb. 10. Schema der reinen Schlotströmung einer Trombe (d. h. bei fortgelassener Drehbewegung).
Stromlinien ausgezogen, Wolkengrenze (einschl. des Trombenschlauches) gestrichelt.

ihren Gesamtbetrag. Dieser wird vielmehr vielleicht schon im 10 m-Niveau, infolge des raschen Anwachsens der Vertikalgeschwindigkeit mit der Höhe, bis zur Trombenachse stetig zunehmen. — Zu der geschilderten Schlotströmung tritt ein zweites Bewegungsfeld, die Drehbewegung, die sich der Schlotströmung überlagert. In hinreichender Entfernung von der Erdoberfläche wird sie, abgesehen von einem kleinen Kern, voraussichtlich dem Gesetz des konstanten Drehmomentes entsprechen. Dieser Kern wird durch die Wirkung der äußeren Reibung und des Staupunktes in der Nähe der Erdoberfläche sich erheblich erweitern. Die Richtung der Drehbewegung wird weiter unten erörtert.

Ehe die entwickelten Vorstellungen an Hand des Beobachtungsmaterials geprüft werden sollen, sind noch die Fragen zu erörtern, die durch A. Wegeners Entdeckungen aufgeworfen wurden. Zunächst die Frage: setzt sich die räumlich enge Begrenzung der drehenden Schlotströmung auch in der Wolke fort? Dafür spräche das Auftreten der äußeren Streufelder. Gegen deren Beweiskraft kann man einwenden, daß sie nur bei einem verschwindenden Bruchteil der Tromben auftreten, ihre Erklärung also eine spätere Sorge sein kann. Aber auch abgesehen davon bereitet es nach Segelflugerfahrungen, die A. Wegener noch nicht zur Verfügung standen, keine Schwierigkeiten, sich folgendes vorzustellen: die drehende Schlotströmung erweitert sich in der Wolke mehr und mehr bis zu einem großen Bruchteil des Durchmessers desjenigen Luftpaketes, dessen Emporschießen die Trombenbildung einleitete, ohne daß die Vertikalbewegung so stark nachlasse, daß sie nicht noch schwereres Streugut tragen könnte. Ja man wird noch sehr starke Aufwärtsbewegungen in der Höhe vermuten, in der das plötzliche Emporschießen einsetzte. Denn dort muß offenbar die starke Aufwärtsbewegung andauern, damit die Trombe am Leben bleibt. Die zweite Frage gilt der Neigung des Trombenschlauches. Da sie in vielen (wenn auch keineswegs allen) Fällen beobachtet wird, muß sie eine Erklärung finden. Dasselbe gilt für die Seiten-

stellung der Trombe, mit der die Neigung wahrscheinlich im Zusammenhang steht. Dazu ist folgendes zu sagen: Wenn unterhalb des aufschießenden Luftpaketes die Luftmassen mehr oder weniger radial zusammenstürzen, so wird die resultierende Drehbewegung in derselben Weise zustande kommen wie z. B. die Rotation einer schwebenden Ölkugel im Wasser, wo die Resultante der scherenden Oberflächenkräfte den Drehsinn und die Drehachse bestimmt. Schon die Richtung, in der das Luftpaket in die Höhe schießt, braucht keineswegs vertikal zu sein. Sehr vieles spricht sogar dafür, daß dies oft nicht der Fall ist: die Warmluftmassen, die den Cb aufbauen, werden sehr oft auf einer geneigten Bahn in den Cb einströmen und diese Neigung auch bei dem entscheidenden Emporschießen z. T. beibehalten. Damit ist gleichzeitig die Seitenstellung gegeben. Warum aber treten die Tromben meist auf der rechten Seite auf, mit überwiegend zyklonaler Drehung? Es ist schon darauf hingewiesen worden, daß diese Regel keineswegs in allen Fällen erfüllt ist. Eine Möglichkeit zur Erklärung wäre die, daß die den Cb aufbauenden, von vorn einströmenden Warmluftmassen relativ zur Geschwindigkeit der Wolke oft eine rückwärtsgerichtete Bewegungskomponente besitzen, wodurch auf der rechten Seite oft eine zyklonale, auf der linken Seite eine antizyklonale Drehbewegung entstände¹⁾. Diese Asymmetrie braucht nicht stark zu sein, da sie nur den Drehsinn festlegt, nicht aber die Energie hergibt.

Was nun die stationäre Trombe betrifft, so liegen dort die Verhältnisse theoretisch nicht so einfach, wie bisher meist angenommen wurde. Auch von den untersten, 1–10 m hohen Luftschichten abgesehen, herrscht in der Horizontalen nur annähernd Gleichgewicht zwischen Zentrifugal- und Gradientkraft, da die Luftbahnen, auch so weit sie als horizontal betrachtet werden können, nicht Kreise, sondern Spiralen sind. Es erfolgen also individuelle Beschleunigungen, die gelegentlich beträchtlich werden können, sodaß bei einer Berechnung die konvektiven Glieder ($u \partial u / \partial x + \dots$) nicht ohne weiteres beiseite bleiben dürfen. In den untersten Schichten wird man auch auf die Reibungskräfte nicht verzichten können. Durch deren Wirkung kommen die für die gigantischen Vertikalbeschleunigungen unerläßlichen, durch die Schwere nicht kompensierten Druckgradienten zustande. Wenn man aber auf eine quantitative Durchrechnung verzichtet, die z. Zt. völlig aussichtslos erscheint, so stellt das Gleichgewicht zwischen Zentrifugalkraft und Gradientkraft durchaus eine brauchbare Näherung dar.

Auch eine sichtbare Eigentümlichkeit vieler Tromben erfährt durch die Zentrifugalkraft ihre Erklärung: die Ansammlung der in der Trombe gebildeten Wassertröpfchen in einem Zylindermantel, während die unmittelbare Nähe der Trombenachse im wesentlichen tropfenfrei, zumindest tropfenarm bleibt. Schon Finsterwalder (13), dann A. Wegener, J. Letzmann, aber auch die amerikanischen Forscher, so W. J. Humphreys sahen darin übereinstimmend eine Zentrifugalwirkung. Eine absteigende Luftbewegung innerhalb des Trombenschlauches, die öfter in Parallele zu den tropischen Wirbelstürmen angenommen wurde, um die Tropfenarmut der Trombenachse zu erklären, ist dagegen schwer vorstellbar: einmal fehlt eine vernünftige Ursache, vor allem aber würde der Abwind, der von den heftigen Aufwinden nur wenige Meter oder Dekameter entfernt wäre, durch die innere Reibung rasch vernichtet werden.

Das Ende, das Absterben der Trombe, setzt ein Nachlassen der Aufwärtsbewegung in der Wolke voraus. Daß eine Gewitterwolke nicht stetig wächst, wird an anderer Stelle dargelegt werden. Aber auch gar manche Segelflugbeobachtungen zeigen, daß die Aufwärtsbewegung sehr rasch abgestoppt, ja sogar in Abwärtsbewegung umgewandelt werden kann. Wodurch diese Veränderungen zustande kommen, ist eine Sache für sich, hier genügt die Kenntnis von ihrem Vorhandensein. Aber eine mitunter sichtbare Eigentümlichkeit der Trombenauflösung erfordert noch eine Erklärung: die Bildung der Doppelröhre. Die Thiessower Trombe zeigt deutlich, daß sich die Doppelröhre erst bildet, unmittelbar bevor die in dem ersten Zeitabschnitt allein erkennbare (äußere) Röhre zu zerfallen beginnt. Auch beim Gothenburg-Tornado stellt die Doppelröhre den Beginn des Zerfalls dar, während bei der Wasserhose in Cottage City eine lange anhaltende Neubildung eingeleitet wird. Soweit die spärlichen Lichtbilder von Doppelröhren eine Aussage zulassen, scheinen daher die Doppelröhren kein stationärer Zustand zu sein, sondern eine vorübergehende (Thiessow) oder länger anhaltende Neubildung (Cottage City) darzustellen. Warum es zu solchen kurz oder länger anhaltenden Neubildungen kommt, ist im Einzelfall nicht zu sagen. Daß aber innerhalb des Cb Unterbrechungen der Aufwärtsbewegungen eintreten können, darüber kann nach Segelflugbeobachtungen kein Zweifel sein.

¹⁾ Wie ich nachträglich feststelle, hat E. Barkow ähnliche Ansichten ausgesprochen. Erg. Gew. Beob. Preußen 1908/09. Die Gewitterbö am 14. Juni 1908. S. 12.

Prüfen wir nun die hier entwickelte Form der thermodynamischen Trombentheorie an Hand von Beobachtungsergebnissen. Zunächst die Energiefrage. Segelflugerfahrungen, insbesondere die der letzten Tage des Rhönwettbewerbes von 1938 haben gezeigt, daß innerhalb gut ausgebildeter Cumulonimbi noch in 5000 m Höhe Aufwinde von 25 m/s auftreten können. Da diese nicht auf so kleinem Querschnitt, wie ihn Tromben besitzen, beschränkt sind, so reicht die im Cb entwickelte Energie sicher gelegentlich aus, um eine Trombe zu erzeugen. Der Cb ist also nicht nur stets notwendige, sondern gelegentlich auch hinreichende Bedingung zur Trombenbildung¹⁾.

Was die vorausgesetzte Temperatur-Höhenkurve mit feuchtlabilen Stücken und eingestreuten Sperrschichten betrifft, so liegt hierfür eine glänzende Bestätigung aus der Tornadoforschung vor. W. J. Humphreys (14), wohl der beste Kenner der Tornados, gibt schon 1926 als aerologisches Kennzeichen der vor der „windshift-line“ liegenden Warmluft bei der Tornadobildung an, daß die Schichtung stückweise trockenlabil sei, mit eingestreuten Inversionen. Er kommt zu diesem Ergebnis aufgrund von 26 aerologischen Aufstiegen, die zufälligerweise in der Nähe von Tornados stattfanden.

Auch darauf, daß die starke Druckerniedrigung im ersten Augenblick auf großer Fläche erfolgt, deuten einige Beobachtungen, am deutlichsten bei der Thiessower Trombe. Dort spricht Herr v. Gervais von der Bildung einer „Nebelwand“. Dieser Beobachter hat sich in seinen Aussagen auch in strittigen Punkten als zuverlässig erwiesen; deshalb verdient auch diese Beobachtung Vertrauen; ausdrücklich hat er eine Verwechslung mit einer Regenwand in Abrede gestellt. Diese Nebelwand, also ein räumlich ausgedehntes Gebilde, kann sehr gut als Folge einer adiabatischen Temperaturabnahme infolge Druckverminderung über großem Querschnitt angesehen werden. Auch bei der Bildung der Hindelooper Trombe ist von Nebel die Rede, allerdings kann es sich da auch um Staub gehandelt haben.

Daß die Bildung des sichtbaren Trombenschlauches überwiegend durch Übertragung der Druckerniedrigung von oben nach unten erfolgt, darüber herrscht heute Einverständnis. Bestätigt wird die Vorstellung durch die Beobachtungen über die große Geschwindigkeit der Schlauchbildung, die eine wesentliche Mitwirkung der Reibung ausschließt.

Damit ist der schwierigste Teil der Trombentheorie: Ursache und Vorgang der Trombenbildung, als nicht im Widerspruch mit den Beobachtungen befunden worden, vielmehr sprechen viele Beobachtungen für die hier entwickelten Vorstellungen. Überblickt man die thermodynamische Trombentheorie, so gilt folgendes:

Die thermodynamische Trombentheorie in der hier entwickelten Form kommt ohne Ausnahmen ad hoc (horizontaler Mutterwirbel, unbekannte Kondensationsvorgänge usw.) aus. Sie erfordert lediglich ungewöhnlich starke und ungewöhnlich ausgedehnte Aufwärtsbewegungen im erzeugenden Cumulonimbus, in dieser Hinsicht also nur quantitative Unterschiede gegenüber den meisten Gewitterwolken. Nur hinsichtlich der Temperaturhöhenkurve kann man von qualitativen Unterschieden sprechen, die aber gerade als Kennzeichen von Tornadobildungen bekannt sind. Damit dürfte die Theorie in den Grundzügen dem Stande unseres heutigen Wissens entsprechen.

Dieses Wissen ist freilich noch mangelhaft. Da es aber bei der Eigenart der Tromben wohl noch längere Zeit auf diesem Stande verharren wird, so blieb nichts anderes übrig, als zu den bisherigen Beobachtungen Stellung zu nehmen, selbst auf die Gefahr hin, daß spätere Beobachtungsergebnisse zu Abänderungen nötigen.

Zusammenfassung.

Das neue an den hier entwickelten Vorstellungen ist folgendes:

1. Durch Überwindung einer schwachen Sperrschicht in oder oberhalb des Cb schießt in der darübergelegenen labilen Schichtung ein Luftpaket mit großer Geschwindigkeit (beispielsweise >20 m/s) aufwärts.
2. Das Luftpaket hat einen großen Durchmesser (beispielsweise 100–1000 m). Der dabei auftretende Sog wird statisch nach unten übertragen, eine entsprechende Druckerniedrigung unten aufgeprägt.
3. Dieser große Raum starker Druckerniedrigung stürzt zusammen. Die von der Seite hereinstürzenden Luftmassen erreichen Geschwindigkeiten, die große Bruchteile (Größenordnung $\frac{1}{4}$) der Schallgeschwindigkeit betragen.

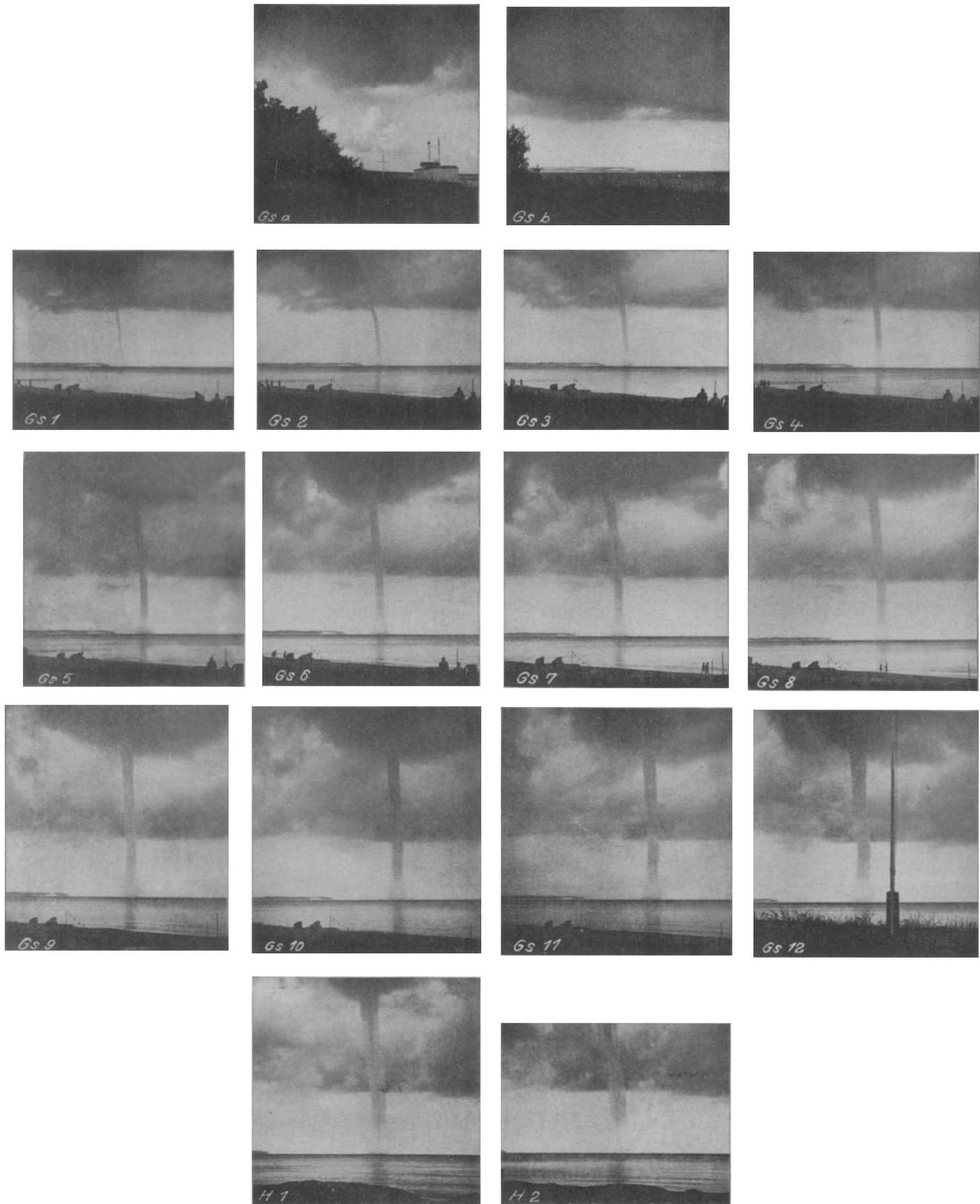
¹⁾ Nach Mitteilungen, die ich erst nach Abschluß dieser Untersuchung erhalten habe, trat am 25. Juli 1938, an dem vier Segelflugzeuge in Gewitterwolken Höhen über 4000 m erreichten, über der Rhön tatsächlich eine Trombe auf. Diese Tatsache kann als eine vorzügliche Bestätigung der oben entwickelten Vorstellungen betrachtet werden (16).

4. Das entstehende Stromfeld ist dynamisch nicht stabil. Eine kleine Unsymmetrie der Bewegungen vor dem Zusammensturz führt bei dem Zusammensturz zu einer Drehbewegung.
5. Die Drehbewegung erzeugt sofort Zentrifugalkräfte.
6. Diese wirken dem weiteren radialen Zufluß und damit dem horizontalen Druckausgleich entgegen und erhalten die Trombe solange am Leben, als die Vertikalbewegungen in der Höhe für hinreichenden Abfluß der besonders am Erdboden einströmenden Luft sorgen.

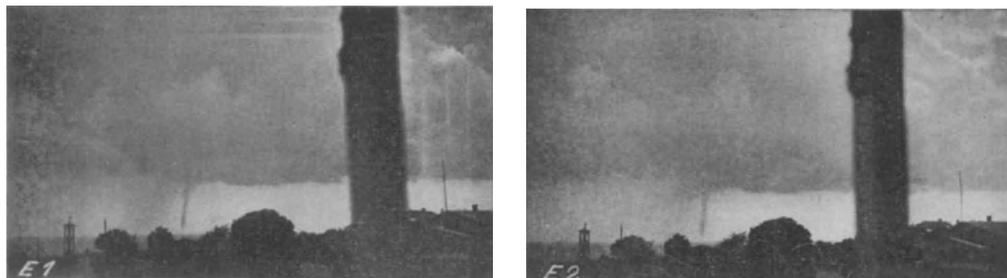
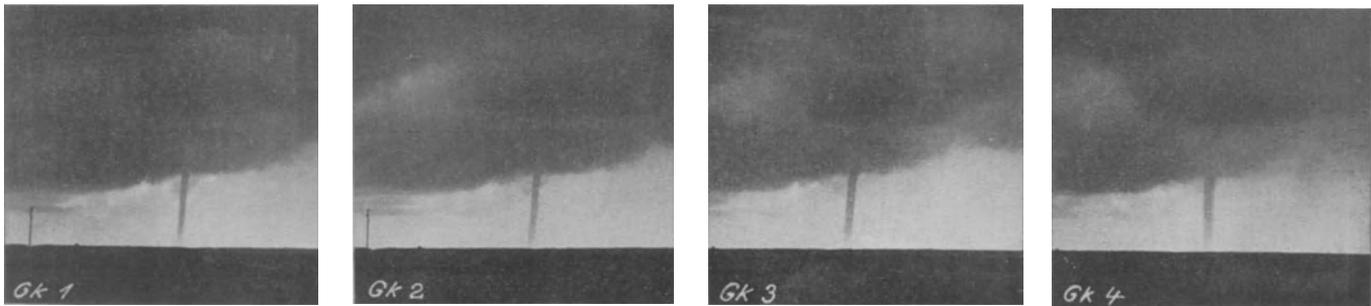
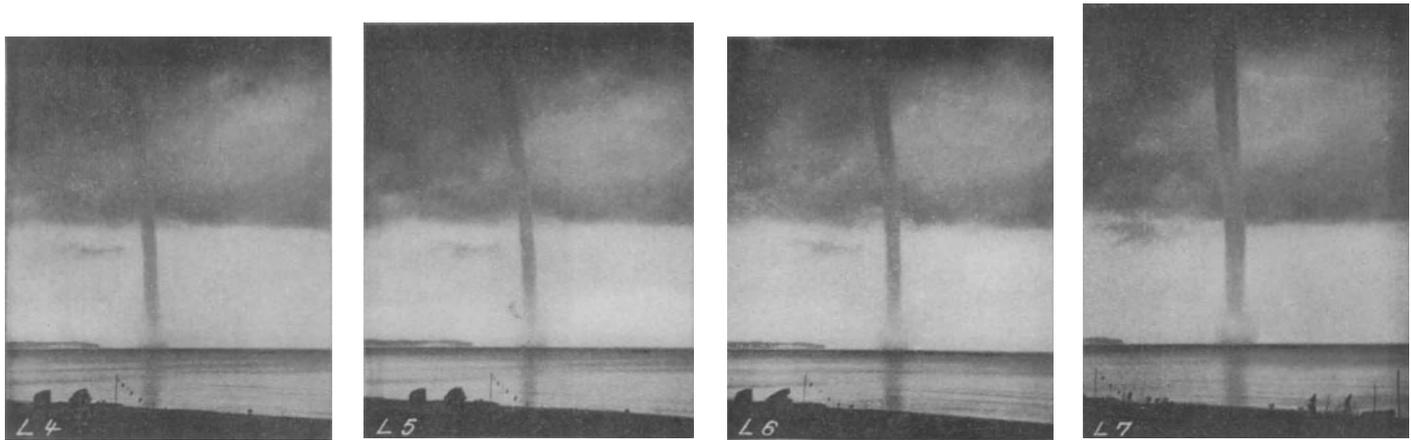
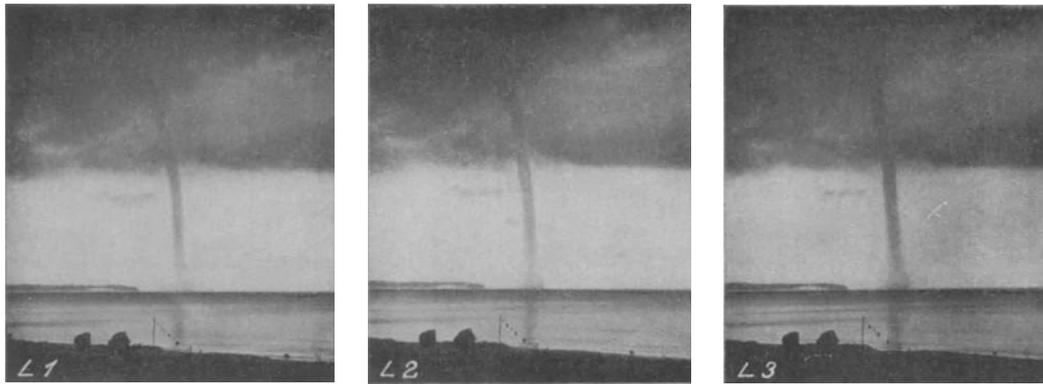
Überlegungen, die freilich noch der Bestätigung bedürfen, machen es wahrscheinlich, daß in der Regel rechtsseitige Tromben zyklonal, linksseitige antizyklonal rotieren, und werden so den Entdeckungen gerecht, die wir der unermüdlichen Arbeit A. Wegeners verdanken.

Schriftennachweis.

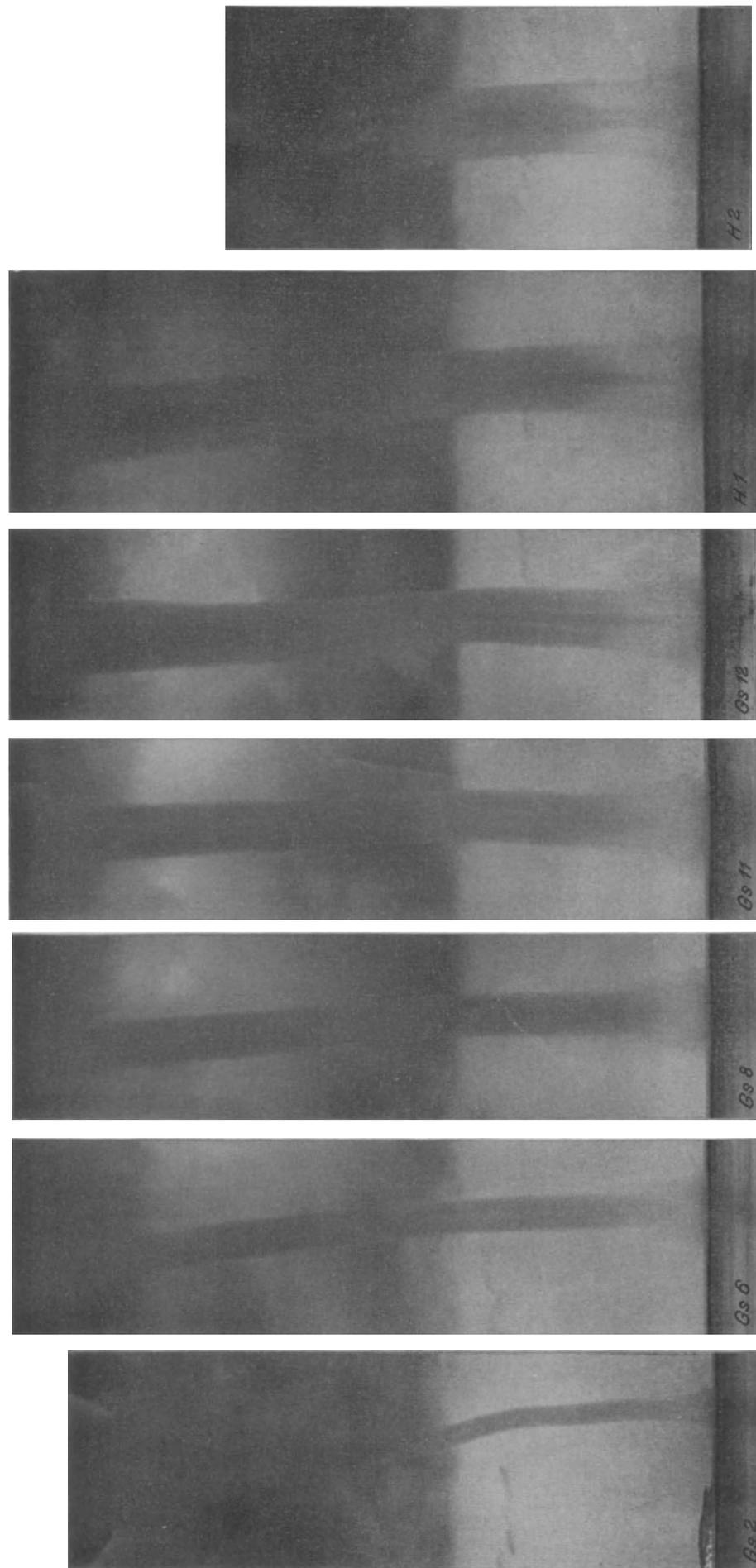
1. A. Wegener, Wind- und Wasserhosen in Europa, Die Wissenschaft **60**, Braunschweig 1917.
 2. A. Wegener, Meteorol. Zeitschr. **35**, 245, 1918.
 3. A. Wegener, Meteorol. Zeitschr. **45**, 201, 1928.
 4. H. Koschmieder, Meteorol. Zeitschr. **54**, 340, 1937 (s. a. Meteorol. Zeitschr. **55**, 33, 1938).
 5. G. A. Loveland, Monthly Weather Review **47**, 234, 1919.
 6. M. Courvoisier und L. Besson, La Mét. **3**, 517, 1927.
 7. M. Pinkhof, Hemel en Dampkrink **36**, 348, 1938.
 8. J. Letzmann, Ann. Hydr. mar. Met. **57**, 385, 1929.
 9. F. Morris, Monthly Weather Review **50**, 251, 1922.
 10. Th. Reye, Wirbelstürme, Tornados und Wettersäulen, 2. Auflage, Hannover 1880.
 11. A. Sprung, Lehrbuch der Meteorologie, Hamburg 1885.
 12. H. Koschmieder, Naturwiss. **25**, 657, 1937.
 13. S. Finsterwalder, Meteorol. Zeitschr. **15**, 79, 1898.
 14. W. J. Humphreys, Monthly Weather Review **54**, 501, 1926.
 15. R. G. Veryard, Ind. Met. Dep., Scientific Notes, **5**, 109, 1935.
 16. W. Schwabl, Luftwelt **5**, 300, 1938.
-



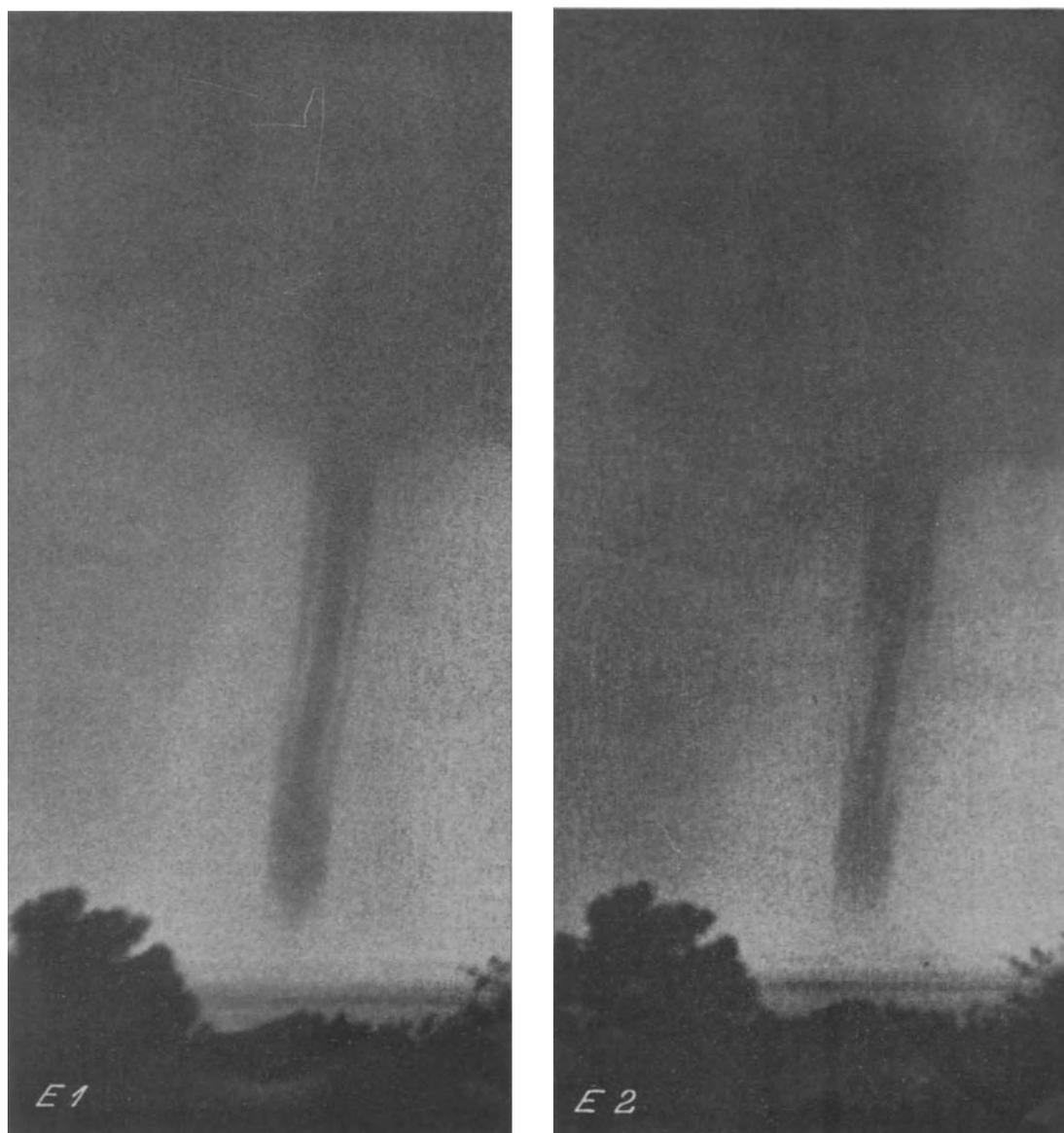
Lichtbilder der Trombe von Thiessow.



Lichtbilder der Trombe von Thiessow.



Vergrößerte Lichtbilder der Trombe von Thiesow.



Vergrößerte Lichtbilder der Trombe von Thiessow.



Lichtbilder der Trombe von Dubrovnik.