

Deutscher Wetterdienst in der US-Zone

Zentralamt Bad Kissingen

Leiter: Prof. Dr. Ludwig Weickmann

---

230373

**Berichte**  
des  
**Deutschen Wetterdienstes**  
in der US-Zone

**Nr. 19**

**Die Windbruchschäden des 22. 7. 1948 im Reichswald bei  
Nürnberg, ein Beispiel für ein Wirbelfeld als Teilerscheinung  
einer Böenfront**

Von Willibrord Müldner, Nürnberg

**Die synoptischen Bedingungen für das Entstehen  
der Unwetterfront vom 22. 7. 1948 über Nordbayern**

Von Dr. Heinrich Faust, Bad Kissingen



## Inhaltsverzeichnis

- A. Die Windbruchschäden des 22. 7. 1948 im Reichswald bei Nürnberg, ein Beispiel für ein Wirbelfeld als Teilerscheinung einer Böenfront, von W. Müldner
  - I. Erscheinungsformen beim Durchgang des Unwetters im Raum Nürnberg
  - II. Die Wetterlage
    - 1. Bodenwetterlage
    - 2. Höhenwetterlage
      - a) Das horizontale Temperaturgefälle in allen Schichten
      - b) Das vertikale Temperaturgefälle
      - c) Die Windverhältnisse
    - 3. Der Wellenvorgang an der Frontalzone, erste und zweite Kaltfront
  - III. Beschreibung der Windbruchschäden unter besonderer Berücksichtigung des Hauptwirbelfeldes bei Fischbach
    - a) Die Schadensstellen nordwestlich der Autobahn
    - b) Die Schadensstellen westlich und nördlich des Brunnerberges
    - c) Die Schadensstelle südlich des Brunnerberges
  - IV. Beurteilung des Windbruches des Wirbelfeldes an der Autobahn mit Hilfe der Letzmann'schen Spurtypen
  - V. Abschätzung der Windgeschwindigkeit aus der Windkraft mit Hilfe einzelner Windbrüche
  - VI. Die Erklärung der trombenartigen Wirbelstöße aus dem thermodynamischen und dynamischen Geschehen
  - VII. Versuch einer Anwendung der neueren Erkenntnisse der statistischen Turbulenztheorie, insbesondere im Hinblick auf den Austausch als Maß der Turbulenzstärke
- B. Die synoptischen Bedingungen für das Entstehen der Unwetterfront vom 22. 7. 1948 über Nordbayern, von H. Faust

# A. Die Windbruchschäden des 22. 7. 1948 im Reichswald bei Nürnberg, ein Beispiel für ein Wirbelfeld als Teilerscheinung einer Böenfront

Von Willibrord Müldner, Nürnberg

## Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem Durchgang einer kräftig entwickelten Böenfront traten am 22. 7. 1948 im Reichswald bei Nürnberg erhebliche Windbruchschäden auf. Ein Teil derselben in der Umgebung der Autobahn bei Fischbach läßt infolge seiner Eigenart auf Drehbewegungen schließen. Zunächst werden die Erscheinungsformen beim Durchgang der Böenfront und Einzelheiten der Wetterlage besprochen. Auffällig für die letztere ist die starke Energieverminderung einer ersten Kaltfront und die Entstehung einer zweiten, der Böenfront auf der Rückseite der ersten und ihre Ausbreitung fast senkrecht zur ersten Front. Es entwickelte sich beim Eintreten des Starkwindfeldes einer Frontalzone in ein Gebiet großer Konvektivität nach einer spontanen Störung des Austauschgleichgewichtes ausgehend vom Raum Stuttgart eine Grenzflächenwelle, die bei einer Wellenlänge von etwa 400 km rasch in Richtung des Windfeldes nach NE zog.

Eine Untersuchung des Windbruchfeldes bei Fischbach nach Fallrichtungen der Bäume zeigt die Ähnlichkeit einzelner Teile desselben mit Letzmann'schen Spurtypenbildern einer fortschreitenden Trombe und läßt so den Schluß zu, daß es sich auch hier um einzelne trombenartige Wirbelstöße mit einer langsamen Translationsgeschwindigkeit von etwa 10 m/sec, in einzelnen Fällen auch um fast stillstehende Stöße handelt. Die Durchmesser schwanken zwischen 120 und 300 m, jedoch treten auch kleinere Stöße bis zu 30 m auf. Die Wirbel zeigen positive Drehung mit Einströmen, in einem Falle auch positive Drehung mit Ausströmen. Einige Integralanalysen von Teilen der Spurbilder, die von der Forschungsstelle für atmosphärische Wirbel, Prof. J. Letzmann, Graz, freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden, zeigen besonders deutlich die Uneinheitlichkeit und starke Turbulenz des Feldes. Auf den besonders rein ausgebildeten, fast stillstehenden Wirbelstoß in Abteilung Hohenlinde a sei in diesem Zusammenhang besonders hingewiesen.

Die Rotationsgeschwindigkeit wird mit Hilfe der bekannten Widerstandsformel für umströmte Körper auf Grund der Abmessungen von Baumbrüchen und unter Beachtung aller wirksamen Kräfte abgeschätzt. Sie ergibt sich zu etwa 60 m/sec.

Eine Prüfung des Falles auf Grund der von Koschmieder beschriebenen thermodynamischen Trombentheorie zeigt einerseits, daß die thermodynamischen Vorbedingungen in vorliegendem Falle gegeben waren, daß andererseits die Autobahn die Verteilung der Hauptwirbelstöße längs der Autobahn bedingte und zwar durch Führung des beim Herannahen des energiespendenden Cumulonimbus angesaugten Warmluftstromes. Weiterhin wird eine mit der thermodynamischen Theorie verwandte Wirbeltheorie von Letzmann mitgeteilt, die dieser als Koinzidenz- oder Zentrierungstheorie bezeichnet und die es ermöglicht, die auffallende Uneinheitlichkeit des Wirbelfeldes — im Gegensatz zu dem Feld einer stabil vorüberziehenden Trombe — und seine Auflösung im Sinne

einer zunehmenden Turbulenz durch den Begriff der unvollkommenen Koinzidenz verständlich zu machen.

Abschließend werden die neueren Erkenntnisse der statistischen Turbulenztheorie (Heisenberg, von Weizsäcker u. a.) erörtert. Es wird der Versuch unternommen, diese auf das vorliegende Wirbelfeld anzuwenden und dabei angenommen, daß ein Cumulonimbus der Böenfront das betrachtete Feld wie ein „Rührer“ umrührt und turbulent macht. Geeignet für die Untersuchung ist vor allem die Austauschgröße als Maß der Turbulenzstärke für verschiedene „Wirbellängen“ des Wirbelspektrums. Es ergibt sich die Austauschgröße des Cumulonimbus zu etwa  $1,5 \cdot 10^5 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ , die eines Turbulenzkörpers vom Durchmesser 250 m zu  $1100 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$  und eines Turbulenzkörpers vom Durchmesser 30 m zu  $65 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ . Die letztgenannte Größe ist vergleichbar mit Ergebnissen einer neueren Untersuchung von Frankengerger, die im Durchschnitt ebenfalls Turbulenzkörper von 30 m Durchmesser betrachtet. Jedoch enthalten alle Betrachtungen der statistischen Theorie die Austauschgröße als Tensor ohne Bevorzugung einer besonderen Richtung, wie sie in den meisten Untersuchungen des Vertikalaustausches gegeben ist. Es wird nach einer neueren Untersuchung von Johannessen gezeigt, daß in labilen Luftmassen die turbulente Reibung oder der Austausch etwa fünfmal größer als der Vertikalaustausch ist, in stabilen Luftmassen sogar um ein Vielfaches größer. Für die Größenordnung eines Cumulonimbus wird das Verhältnis  $\eta/A_{zz}$  jedoch praktisch gleich 1.

Um die statistisch-theoretischen Austauschwerte für den Cumulonimbus auch mit auf anderen Wegen erhaltenen Werten vergleichen zu können, wurde schließlich ein kontinuierlicher Austauschvorgang im oberen — schwingungsfähigen — Teil der Wolke und ein diskontinuierlicher, wohl maßgebender Austausch von Bewegungsenergie, im unteren Teil — letzterer mit Hilfe des Faust'schen Böenmodells — hinzugezogen. Beide ergeben, unter Benutzung der bekannten kinetischen Austauschformel Austauschwerte für den Cumulonimbus von derselben Größenordnung wie oben mitgeteilt.

In den frühen Nachmittagsstunden des 22. 7. 1948 wurde der Raum Nürnberg von einem plötzlich auftretenden Unwetter mit orkanartigen Winden erfaßt, das neben anderen Zerstörungen und Schäden verheerende Windbrüche im sog. Reichswald bei Nürnberg hervorrief. Insbesondere wurde der Lorenzer Reichswald im Ost- und Südostsektor südlich der Pegnitz getroffen, während der Sturm im Sebalder Reichswald im nördlichen Sektor des Raumes nördlich der Pegnitz geringere Schäden aufwies.

Aufgabe der folgenden Arbeit ist es, insbesondere die zwischen Fischbach und dem Röthenbach längs der Autobahn und dem Gelände des Brunner Berges entstandenen besonders starken Zerstörungsspuren und das damit offenbar im Zusammenhang stehende Wirbelfeld zu klären. Eine solche Klärung soll

versucht werden durch eine Untersuchung der Gesamtwetterlage des Tages, durch eine kritische Beurteilung der Zerstörungsspuren in dem fraglichen Gelände im Sinne von Letzmann<sup>1</sup>, vor allem im Unterschied zu den Zerstörungen des übrigen Reichswaldes und anschließend durch eine Ausweitung der Betrachtung mittels der neueren statistischen Turbulenztheorie.

### I. Erscheinungsformen beim Durchgang des Unwetters im Raum Nürnberg

Die Angaben über die Beobachtung der meteorologischen Elemente beim Durchgang des Unwetters stammen vom Amt für Wetterdienst in Fürth, 18 km westnordwestlich vom Hauptforstschaden bei Fischbach, der Klimabeobachtungsstation Buchenbühl, 10 km westnordwestlich von Fischbach, und der Niederschlagsmeßstelle Fischbach, die unmittelbar am Beginn der Hauptzerstörungsspur liegt.

Das Unwetter zog in Form einer kräftig ausgebildeten Böenwalze mit Gewitter etwa von Südwest nach Nordost in den Raum Nürnberg. Das heranziehende Ferngewitter konnte ab 14,35 DSZ beobachtet werden. Das mit dem Eintreffen der Böenwalze beginnende Unwetter dauerte in Fürth von 14,55 bis 15,25 DSZ, in Buchenbühl bis 15,24 Uhr, das Nachgewitter bis 15,40 Uhr, in Buchenbühl bis 15,55 Uhr mit Abzug nach Nordosten. (Die Werte von Buchenbühl werden im Folgenden in Klammern gesetzt.) Letzter Regen fiel um 16,15 Uhr (16,01). Während der Unwetterzeit herrschte bei starkem Regen und zeitweise auch erheblichem Hagel eine außergewöhnliche Verdunkelung mit Sichtrückgang bis 300 m. Die Hauptentfaltung des mit der Böenwalze verbundenen Gewitters lag im S und SE der Stadt. Die stärksten Hagelschäden entstanden im Raum Stein südlich der Stadt und im Stadiongelände südostwärts der Stadt. Dort wurden Hagelkörner bis zu einem Durchmesser von 5 cm beobachtet. Der ostwärtige Rand des Hagelgebietes lag bei Fischbach, das noch schwachen Hagel meldete, während in der Ortschaft Brunn ostwärts der Autobahn (Abb. 21) kein Hagel mehr auftrat. Das weiter ostwärts beginnende Hagelgebiet, wie es die Niederschlagsverteilungskarte (Abb. 10) zeigt, setzte erst im Raum Leinburg-Halmendorf an den Hängen des Moritzberges (546 m NN) wieder ein.

Die Niederschlagsmenge des Tages fiel im wesentlichen während des Unwetters und betrug in Fürth 14 mm, in Buchenbühl 19,2 mm und in Fischbach 12,1 mm. Die Niederschlagsmenge steigt von Fischbach aus nach Nordwesten zu an. Letzteres liegt am Südostrand des Hauptniederschlagsgebietes mit RR > 10 mm der Niederschlagsverteilungskarte (Abb. 10).

Das Temperaturmaximum vor Durchgang des Unwetters betrug 26,9° (26,8°), der Temperaturabfall vom Maximum während zwei Stunden vor der Front zum Minimum während zwei Stunden nach der Front be-

trug nach den Registrierstreifen 11,3° (11,1°). Der entsprechende Druckanstieg 4,7 mb (Abb. 1).

Erwähnenswert sind gleichfalls die Dampfdruckwerte. Sie steigen von morgens 8,00 Uhr DSZ bis kurz vor Durchgang der Böenfront um 15,00 Uhr DSZ von 13,7 auf 15,2 mm an und ließen die außerordentliche Gewitterbereitschaft erkennen (S. 279 Wahrscheinlichkeit nach Scherhag<sup>2</sup> über 70 Proz.).

Zur genauen Ermittlung von Windrichtung und Windstärke stand leider kein Böenschreiber zur Verfügung. Jedoch wurden in Buchenbühl in Minuten-, teilweise Halbminutenabstand Windbeobachtungen am Siap-Windmeßgerät notiert. Sie ergeben, wenn auch unvollkommen, ein ungefähres Bild der Hauptböen. In der graphischen Darstellung (Abb. 2) sind auch die im Registrierstreifen des Gasmanometers beim Gaswerk Nürnberg-Gibitzenhof erkennbaren Böenstöße mit eingetragen. Diese erfolgten zu den Zeiten 15,01, 15,06 (15,11½), 15,20 Uhr DSZ (eingeklammerte Böe nur schwach). Infolge des sehr niedrigen Gasstandes des Behälters erscheinen die Amplituden der Böenstöße auf dem Registrierstreifen nur wie Zeitmarken. Die Zeiten wurden in der Darstellung um 4½ Minute — die Laufzeit der Böe — verschoben eingezeichnet, um die Böenabstände mit denen von Buchenbühl vergleichen zu können. Sie stimmen recht gut überein.

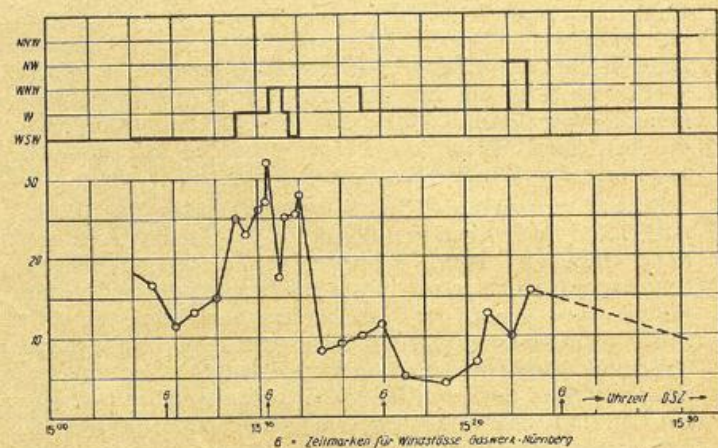


Abbildung 2  
Winddiagramm vom 22. 7. 1948 Nürnberg-Buchenbühl

Es erfolgten im ganzen vier Böenstöße, davon der dritte sehr schwach der stärkste als zweiter in Buchenbühl um 15,10½ Uhr mit einer abgelesenen Windstärke von 32 m/sec. Der Wind drehte bei der ersten Böe von SW auf WSW, bei der zweiten auf WNW und bei der vierten, am Ende der Unwetterzeit, auf NW bis NNW.

Im Nürnberger Stadtgebiet entstanden zahlreiche Schäden; 18 Fassaden stürzten ein, 25 Brandmauern mußten wegen starker Beschädigung umgelegt werden, 6 Kamine stürzten um, eine große Anzahl Kaminköpfe wurden abgerissen, 3 Mauereinstürze erfolgten an bewohnten Gebäuden, wobei nach dem Bericht der Baupolizei selbst Mauern in gutem Zustande bis zu 38 cm Stärke der Wucht des Sturmes nicht standhalten konnten. Dacherker wurden abgerissen, eine große Zahl Dächer abgehoben oder teilweise abgedeckt, Fensterstöcke eingedrückt. Der Personenschaden betrug 4 Tote, 6 Schwerverletzte, 4 Leichtverletzte.

Im Großkraftwerk Franken in Stein-Gebersdorf im Südosten von Nürnberg wurde eine große, 95 Tonnen schwere Kohlenverladebrücke, die abgebremst quer zur Windrichtung auf einem von WSW nach ENE verlaufenden Geleise stand, vom Sturm erfaßt und konnte durch Gegenfahren nicht zum Stillstand gebracht werden. Der Kranführer hatte im Förderkorb den Eindruck, als ob er hochgehoben würde. Die Brücke wurde schließlich mit festgestellten Rädern — Schleifspuren

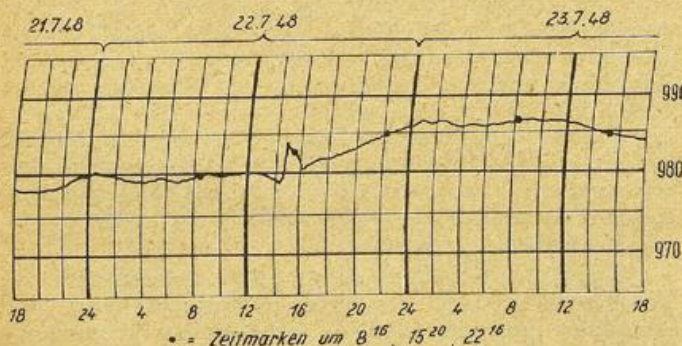


Abbildung 1  
Barogramm vom 22. 7. 1948 Fürth

auf Schienen und an Rädern — nach ENE in Bewegung gesetzt und stieß nach Angabe des Werkes mit einer Stoßkraft von zirka 300 Tonnen gegen die Puffer am östlichen Ende der Schienen und kippte um. Zu dieser Angabe wurde allerdings die Windangabe von Fürth mitbenutzt.

Wald- und Flurschäden entstanden zahlreich im gesamten Raum, besonders aber im Bereich des Nürnberger Reichswaldes und zwar im Lorenzer Reichswald ostwärts von Nürnberg auf einer Fläche von zirka 12 000 ha ein Schaden von 52 000 fm, im Sebaldler Reichswald nördlich von Nürnberg auf einer Fläche von zirka 7 000 ha ein Schaden von etwa 17 000 fm. Die nachfolgende Aufstellung zeigt eine Verteilung des Schadens pro Hektar und damit deutlich das Hauptschadensgebiet im Bereich von Altdorf-West in den Forstbezirken Fischbach und Brunn. Die Darstellung erfolgte nach der alten Einteilung der Forstämter, wie sie am Unwettertage bestand.

Forstschäden im Reichswald Nürnberg 22. 7. 1948

Forstamt	Fläche in ha	Schaden in fm	Schaden pro ha
<b>Sebaldler Reichswald</b>			
Erlangen-West (nur kl. Teile b. Neunhof)		300	
Nürnberg-Nord	4350	8030	1,9
Behringersdorf	2620	9000	3,4
<b>Lorenzer Reichswald</b>			
Nürnberg-Ost	4400	24000	5,5
Altdorf-West Bezirke Fischbach u. Brunn)	1400	9500	6,7 (!)
Nürnberg-Süd	4200	17000	4,0
Feucht (Reichswald)	2930	2000	0,7

Von den Außenstellen des Bereiches wurden Weißenburg im Süden und Neustadt im Norden von dem Unwetter nicht erfaßt. In Erlangen herrschte eine Windstärke von etwa 60 km/h, eine stärkere Böe hob das Wellblechdach bei der Raso-Erlangen-Bruck ab; in Neumarkt erreichten die Winde etwa 75 km/h dabei wurden Bäume entwurzelt und Dächer abgehoben. Auch im Raume Weiden wirkte sich das Unwetter wieder stärker aus; der Unwetterstreifen betrug dort ähnlich wie in Franken zwischen Tirschenreuth und Oberviechtach etwa 50 bis 60 km. In Weiden traten Böen bis 100 km/h auf, es fiel dort Hagel bis zu 3 cm Durchmesser und vernichtete etwa 40 Proz. der Obstfrüchte.

## II. Die Wetterlage

### 1. Bodenwetterlage

Vom 21. zum 22. 7. wanderte ein Sturmtief von Irland zur Mittelnorwegischen Küste. Die zugehörige Kaltluft erreichte am 21. 7. morgens das Festland und überquerte am 22. 7. in Verbindung mit einem ausgedehnten Tiefdrucktrog und mit verbreiteter Gewittertätigkeit Süddeutschland (Abb. 3).

Die Kaltfront kam über Nordeuropa wesentlich rascher voran als über Süddeutschland, wo sie sich von SW nach NE erstreckte und nach SE verlagerte. Sie erfuhr offenbar in der Zeit von 0000 bis 1200 GMT besonders im süddeutschen Raum eine Verzögerung und Abschwächung. Während ihre Geschwindigkeit über Frankreich noch etwa 30 km/h betrug, nahm diese auf dem Wege vom Rhein-Main-Gebiet bis zur Donau auf etwa 15 km/h ab. Die Wetterwirksamkeit wurde ge-

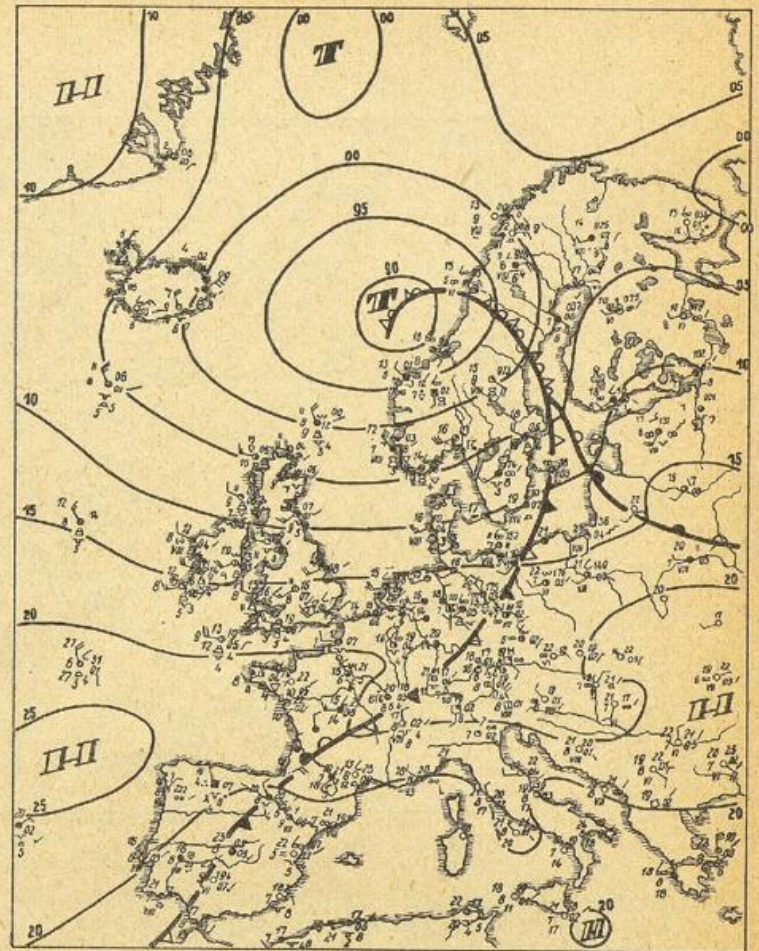


Abbildung 3  
Wetterlage 0600 Uhr GMT 22. 7. 1948

ring, auf den Karten ist sie durch einen ausgesprochenen Windsprung zu erkennen. Die Kaltluft gab in Süddeutschland ihre Energie vermutlich an einen sich sekundär ausbildenden Vorgang ab. Der Durchgang der beschriebenen Kaltfront erfolgte in Nürnberg kurz nach 0600 GMT (0800 DSZ) mit einem Windsprung von SSE auf W, später vorübergehend N. Am Boden erfolgte weiterhin bei nur wenig gehinderter Einstrahlung anhaltende kräftige Erwärmung.

Während die dreistündige Isallobarenkarte 03/06 Uhr noch allgemein vor und hinter der Front Druckanstieg zeigte, mit einem mäßigen relativen Steiggebiet hinter der Front im Rhein-Main-Gebiet, bildete sich im weiteren Verlauf vor der Front ein leichtes Druckfallgebiet und hinter der Front im Raum Stuttgart ein räumlich begrenztes kräftiges Drucksteiggebiet aus, dessen Wanderung in den Isallobarenkarten 09/12, 12/15 und 15/18 Uhr GMT\*) (Abb. 4—6) gut zu erkennen ist.

Es wanderte mit seinem Kern von 3 mb in drei Stunden aus dem Raum südöstlich Heilbronn (12 Uhr GMT) zunächst noch unter Verstärkung etwa in den Raum Weiden (15 Uhr GMT), danach unter Abschwächung und Verzögerung auf etwa 50 km/h in den Raum südwestlich Prag (1800 GMT). Über Süddeutschland zog das Steiggebiet mit 250° 70 km/h etwa mit der Höhenströmung (Gradientwind hinter der Front in 500 mb etwa 240° 80 km/h), was eine alte Erfahrung bei ähnlichen Wetterlagen bestätigt<sup>2)</sup>.

Vor dem erwähnten Steiggebiet entwickelte sich im Raum Stuttgart eine kräftige Gewitterböenfront, die von dort unter laufender Verstärkung der Luftmassengegensätze infolge der zunehmenden Sonneneinstrah-

\*) DSZ = GMT + 2 Std.

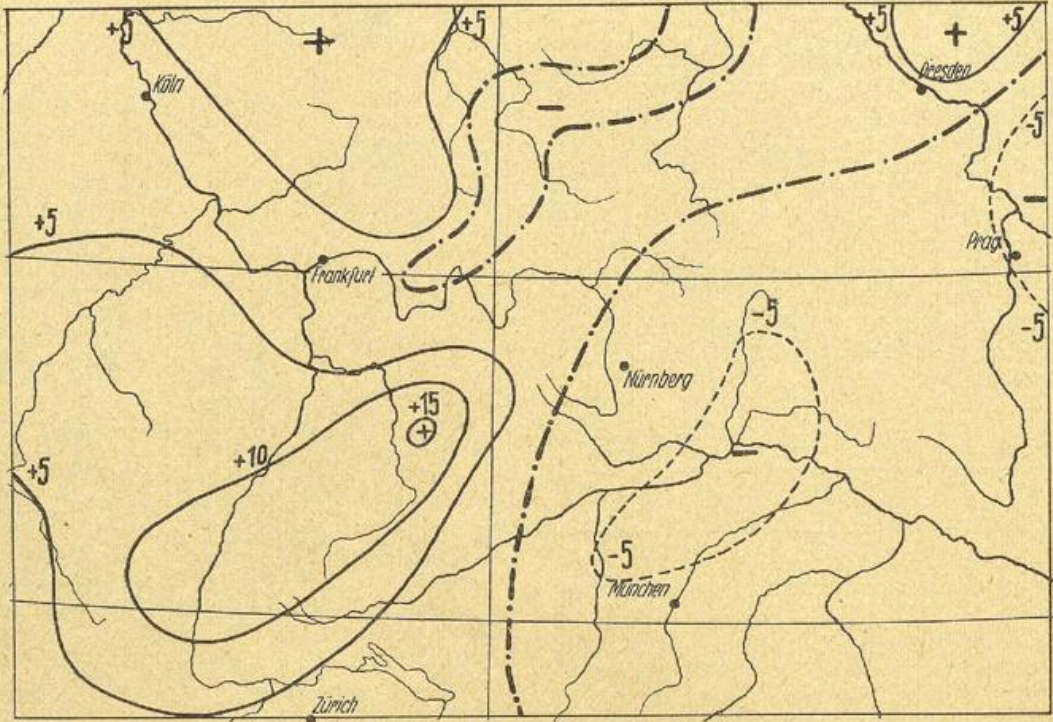


Abbildung 4  
Dreistündige Druckänderungskarte 09/12 Uhr

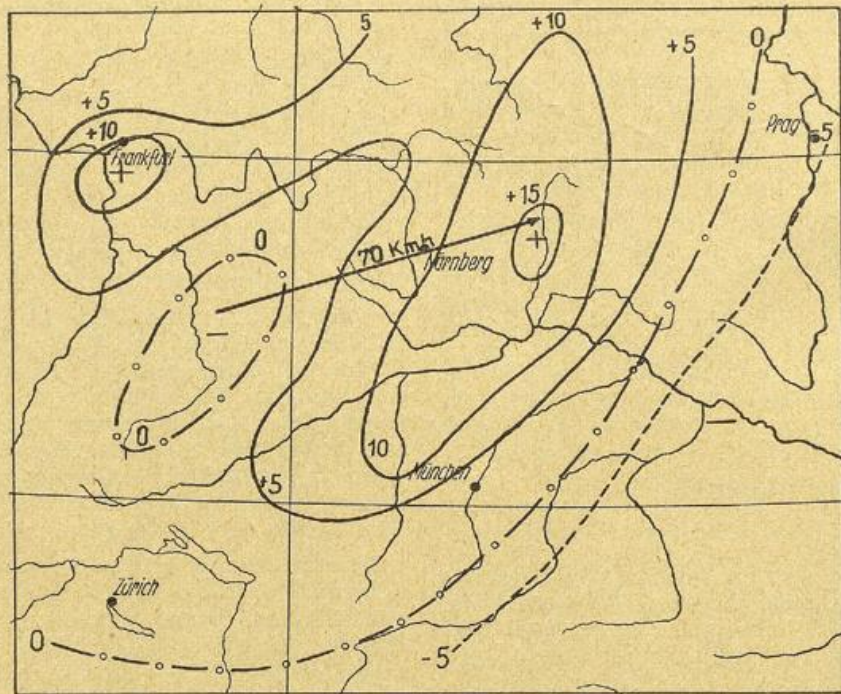


Abbildung 5  
Dreistündige Druckänderungskarte 12/15 Uhr

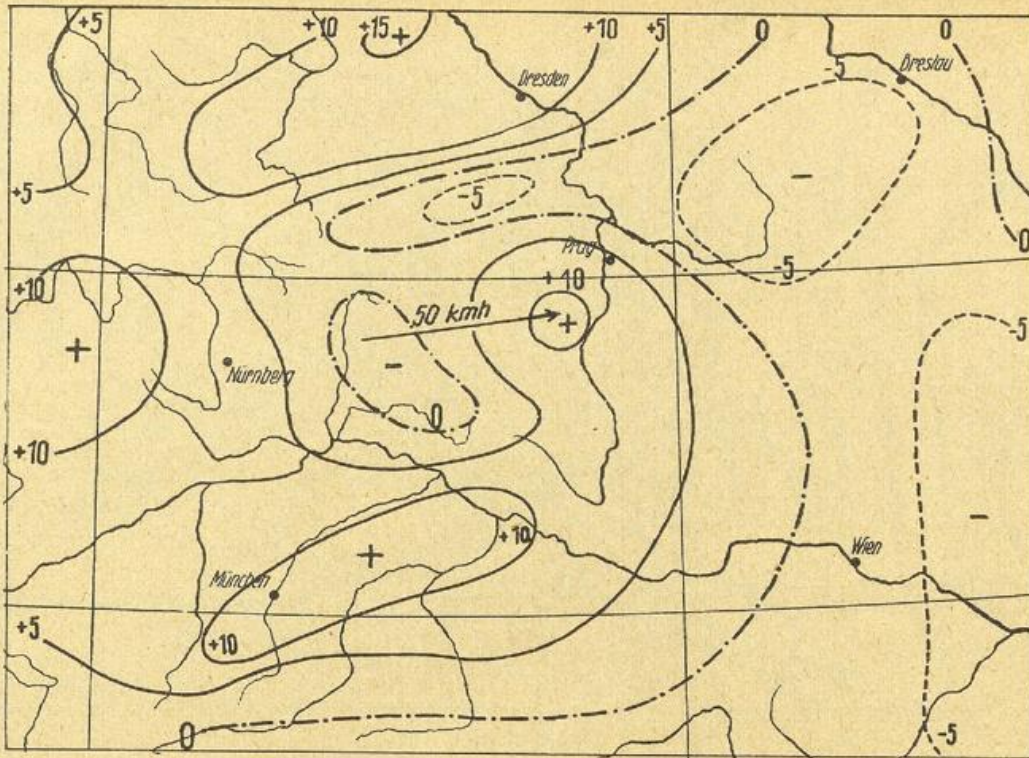


Abbildung 6  
Dreistündige Druckänderungskarte 15/18 Uhr

lung gleichfalls mit etwa 70 km/h nach NE wanderte. Die Isochronen dieser Böenfront, sowie einige von Teilen der Hauptfront, wie auch die Wanderung des Drucksteiggebietes sind in Abbildung 7 zu erkennen.

Der Winkel, den die Fortbewegungsrichtungen von 1. und 2. Kaltfront (Böenwalze) miteinander einschlossen, betrug etwa 60—70°.

Die Bodenlage vom 1200-Uhr-GMT-Termin zeigt Abbildung 8.

Wenn auch bei der damals gebräuchlichen Angabe in ganzen mb eine Zeichnung der Isobaren im Abstand

von mb zu mb unzureichend sein muß, erkennt man doch deutlich das auf der Rückseite der Böenfront entwickelte abgegrenzte Hochdruckgebiet, den Temperaturabfall und die kräftige Gewittertätigkeit.

In einer Sonderkarte (Abb. 9) wurden die Linien gleichen Temperaturabfalles, der beim Durchgang der Front entstand, gezeichnet. Sie zeigen ein Gebiet maximalen Temperatursprunges, das sich vom Raum Stuttgart—Nördlingen über Neumarkt nach Weiden ausweitete und verstärkte. Dieses Gebiet entspricht wieder etwa dem Gang des Unwetters. Im übrigen ist es deutlich

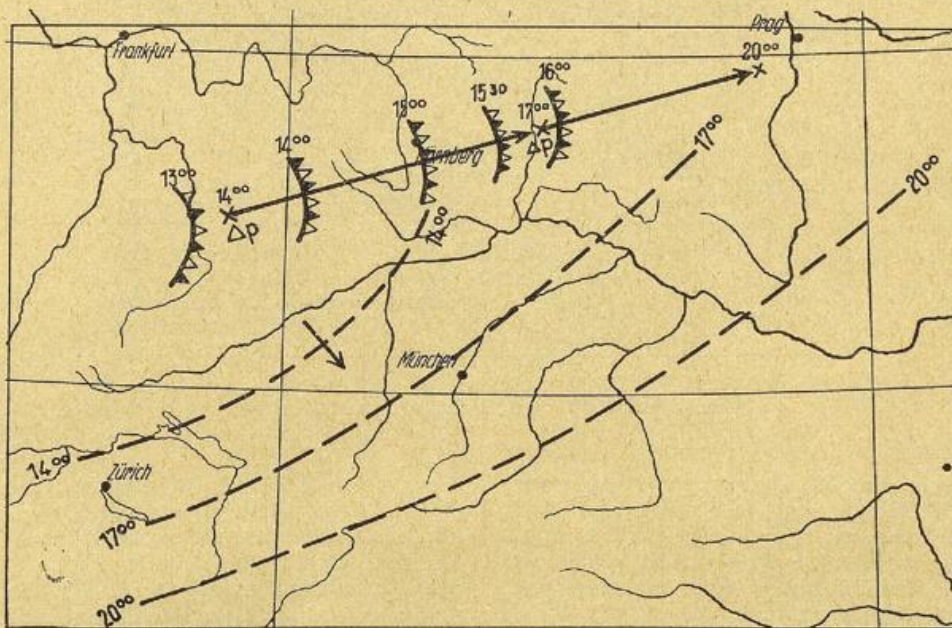


Abbildung 7  
Verlagerung von Böenfront und Kaltfront  
— Böenfront, --- Kaltfront, Δp Drucksteiggebiet. Zeit DSZ

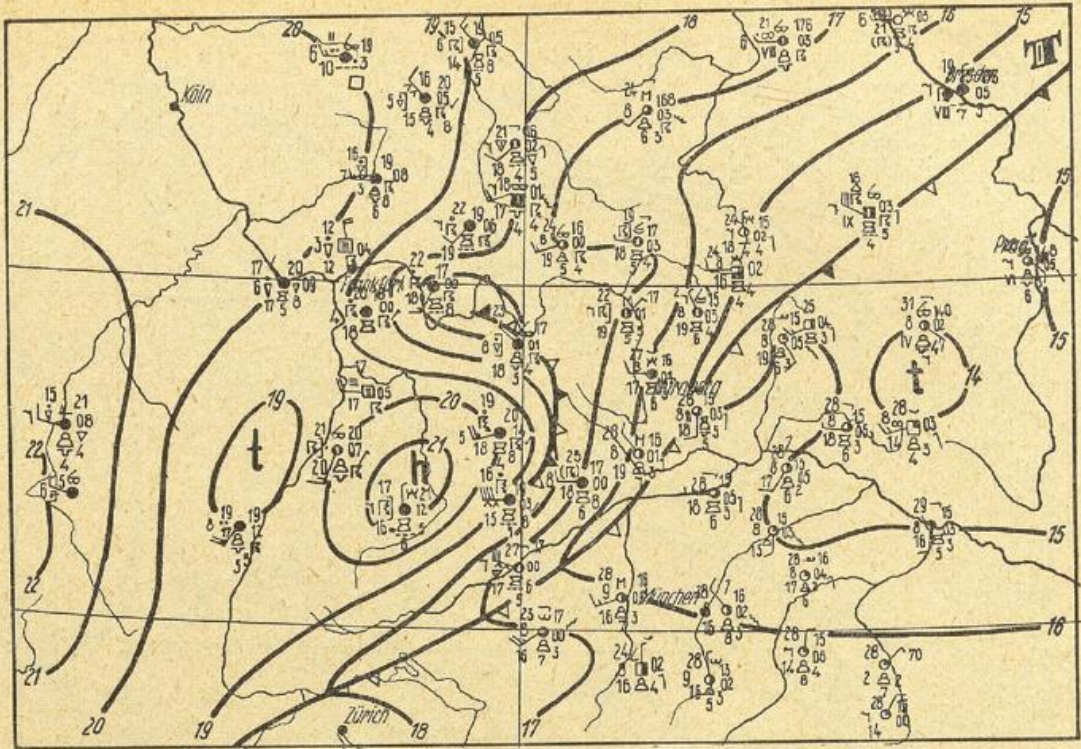


Abbildung 8  
Wetterlage 12 Uhr GMT, Karte 1 : 2 500 000

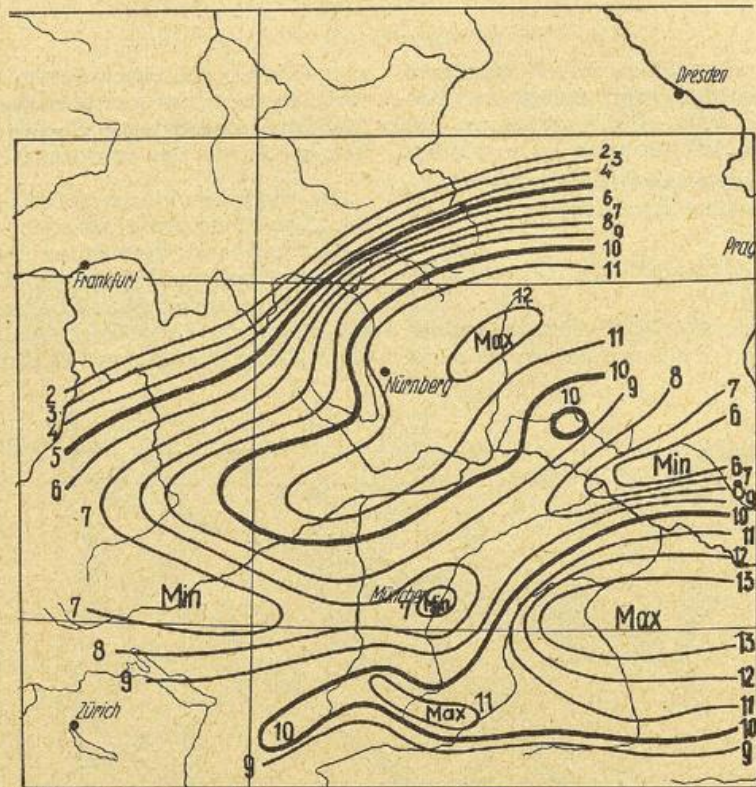


Abbildung 9  
Temperaturabfall nach Durchgang der Böenfront

abgesetzt von einem Gebiet geringeren Temperaturabfalles südlich der Donau und im Bayerischen Wald. Die Werte wurden aus den Thermographenstreifen gewonnen, und zwar wurde jeweils das Maximum zwei Stunden vor und das Minimum zwei Stunden nach Böenfrontdurchgang festgestellt.

Recht aufschlußreiche Einzelheiten ergeben sich aus der Niederschlags- und Hagelkarte (Abb. 10) (Hagelangaben nur aus Bayern eingetragen). Die Nieder-

schlagsgebiete 10, 20, 30 mm und die Hagelgebiete 0, 50, 100 Proz. Schaden sind besonders hervorgehoben. Man erkennt einzelne von SW nach NE verlaufende stärkere Niederschlagsbänder RR > 10 mm, von denen das letzte etwa dem Laufe des erwähnten Steiggebietes und der betrachteten Böenfront entspricht; allerdings im Gebiet des Fränkischen Jura infolge Stau eine Ausweitung nach Norden und im Raum von Grafenwöhr infolge Lee-Wirkung eine Unterbrechung erfährt. SE-

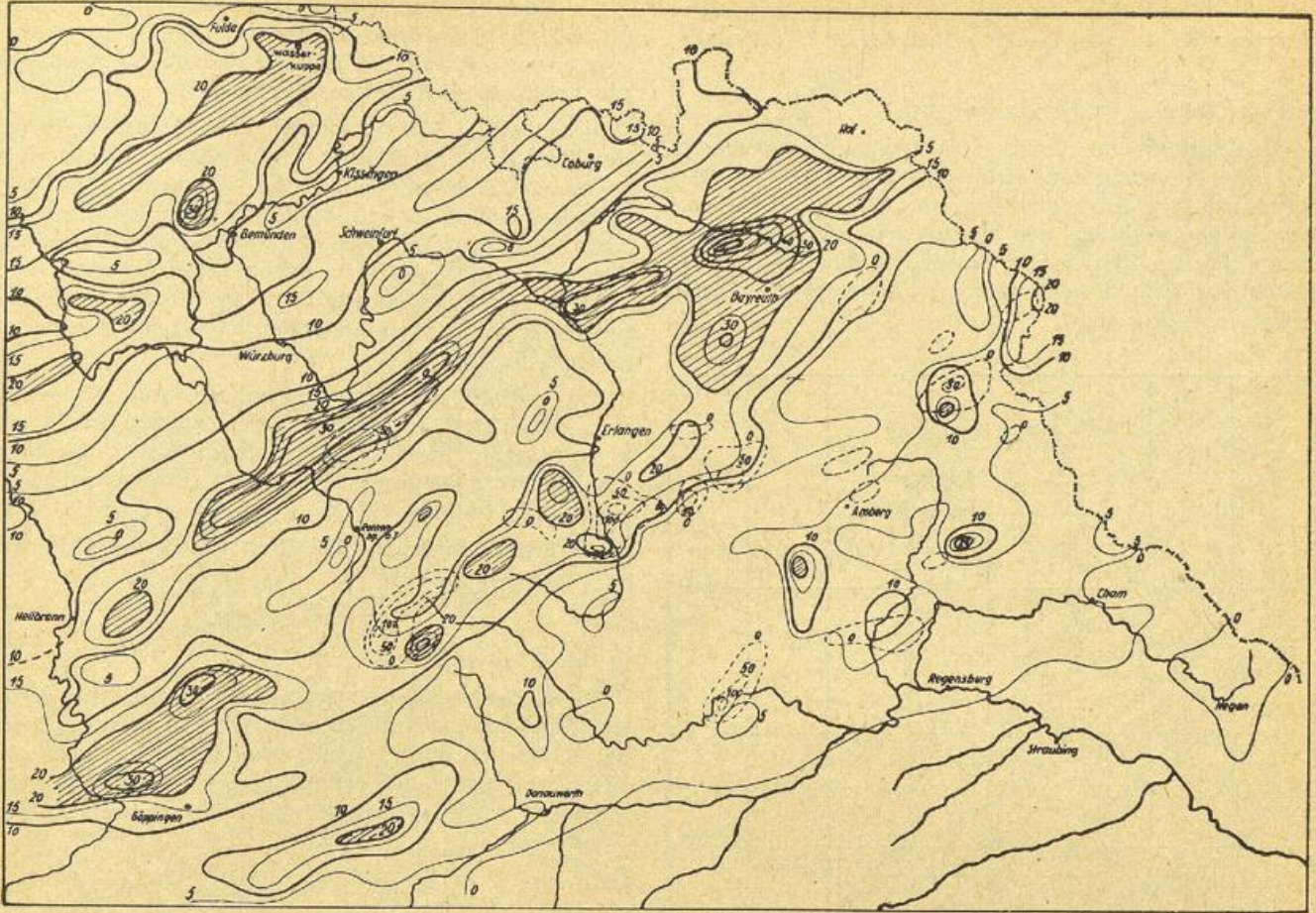


Abbildung 10  
Karte der Niederschlags- und Hagelverteilung

ausgezogene Linien: Niederschlag, gemessen 23. 7. 48 morgens

gestrichelte Linien: Hagelschäden 0 Proz., 50 Proz., 100 Proz. nach Angaben der Bayer. Versicherungskammer München

△ : Lage des Forstschadens bei Fischbach

wärts davon treten keine zusammenhängenden derartigen Niederschlagbänder mehr auf. Auch die Kette der Hagelgebiete von Feuchtwangen—Nürnberg—Hersbruck—Weiden kennzeichnet die Spur der mit der Böenfront verknüpften Cumulonimben. Der auffällige Wechsel in den Hagel- und Niederschlagsgebieten deutet periodische Schwankungen der Intensität der Vertikalströmungen an. Man kann die Periode dieser „freien“ Schwingungen für Wolkenluft — wie im Abschnitt VIII in anderem Zusammenhang gezeigt wird — aus dem Erlanger Aufstieg zu etwa 11 Minuten berechnen. Faust<sup>4</sup> kommt auf Grund anders gearteter Überlegungen für ein Gebiet stärkeren Windes eines Cb mit „Schadensstreifen“ zu einer Lebensdauer von 4 Minuten. Nimmt man nun eine Zeit schwächeren Windes gleichfalls zu 4 Minuten an so erhält man eine volle Schwingungsdauer von etwa 8 Minuten. Man kann die Auffassung vertreten, daß die Amplituden der Schwingungen sich von Mal zu Mal verstärkten und im Raum Nürnberg und dort wieder im Gebiet der größten Hagelkörner im Stadiongelande die Vertikalströmung ein absolutes Maximum erreichte. Eine Erklärung für eine solche pulsierend aufschaukelnde Konvektion hat Seifert<sup>5</sup> gegeben. Auch das Böenmodell von Koschmieder gibt eine erklärende Vorstellung, worauf Faust<sup>4</sup> (S. 296) aufmerksam machte.

Schließlich sei an Hand der Niederschlagskarte darauf hingewiesen, daß die Spur des Cb stückweise — Feuchtwangen/westlich Fürth, Ansbach/Hersbruck, Sulzbach/Weiden/Tirschenreuth — und sprunghaft etwas nach SE verschoben erscheint.

## 2. Höhenwetterlage

a) Das horizontale Temperaturgefälle in allen Schichten.

Die relativen Topographien 500/1000 mb zeigen eine kräftige Warmluftzunge über Ungarn und einen Kaltlufttropfen nördlich Irland (Abb. 17). Die 0300-Uhr-Lage zeigt von Wiesbaden zum Kanal einen Abfall der relativen Topographie von 16 gdkm, d. h. etwa 1,6° Mitteltemperatur auf 100 km. In der 1500-Uhr-Lage (Abb. 18) verschieben sich diese Temperaturgegensätze nach SE und es ergibt sich zwischen Linz und etwa Gießen auf einer Strecke von zirka 500 km eine Abnahme von 12 gdkm d. h. 1,2° auf 100 km. Aus den Aufstiegen selbst entnimmt man für den 3-Uhr-Termin für die Strecke Erlangen—Iserlohn und für den 1500-Uhr-Termin für die Strecke Wien—Erlangen folgenden Temperaturabfall:

	0300 GMT		1500 GMT	
	△ t Erlangen—Iserlohn		△ t Wien—Erlangen	
Höhen	△ t	△ t/100 km	△ t	△ t/100 km
Boden	4°	1,0°	12°	2,9°
850 mb	7°	1,8°	8°	1,9°
700 mb	3°	0,8°	4°	1,0°
500 mb	6°	1,6°	4,5°	1,0°
	Mittelwert: 1,3°		Mittelwert: 1,7°	

Diese Werte des horizontalen Temperaturgefälles sprechen für eine gewisse Windschichtung in der Höhe.

b) Das vertikale Temperaturgefälle.

Ein Vergleich der Temps von Straßburg, Wiesbaden (Abb. 11), München und Erlangen (Abb. 11) vom Morgen-termin des 22. 7. zeigt eine von West nach Ost zunehmende Labilität, wie sie in den entsprechenden Temperaturgradienten der Schicht zwischen etwa 1000 Meter und der oberen Inversionsschicht bei 5000 Meter zum Ausdruck kommt.

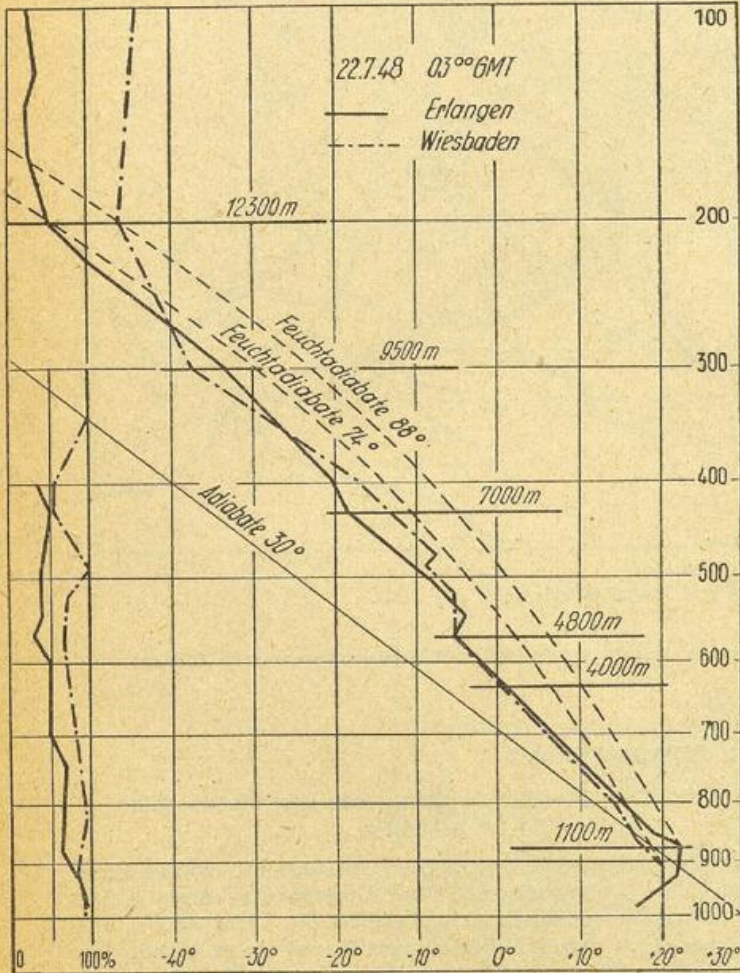


Abb. 11:

Radiosondenaufstieg Wiesbaden 0300 Uhr, Erlangen 0300 Uhr

In der folgenden Darstellung der Temperaturgradienten sind für Erlangen auch die höheren Schichten berücksichtigt, was für weitere Überlegungen von Bedeutung ist.

Ort:	Temperaturgradienten pro 100 m		
	Uhrzeit:	Schicht	$\gamma^{\circ}/100\text{ m}$
Straßburg	0200 GMT	1000— 5000 m	0,60
Wiesbaden	0300 "	1000— 4700 m	0,68
München	0300 "	1000— 4700 m	0,68
Erlangen	0300 GMT	1150— 1550 m	1,00 (!)
		1550— 4800 m	0,74
		5300— 5800 m	0,73
		5800— 7000 m	0,85 (!)
		7000— 9500 m	0,40
		9500—12300 m	0,65

Der Raum Erlangen weist dabei die stärkste Labilität auf. Bemerkenswert sind die starken Temperaturgradienten oberhalb der unteren und oberen Inversion. Die Labilität reicht bis zur Tropopause.

Es ist wenig wahrscheinlich, daß die untere Inversion bereits durch die erste, sehr abgeschwächte Kaltfront zerstört wurde, da mit ihr im wesentlichen Alto-cumulus castellatus aufkam, die Cumulonimbus-Bildung aber bis 1200 Uhr GMT 3/10 nicht überschritt. Die erste Kaltfront trat in Franken vielmehr stark abgeschwächt als Höhenkaltluft in Erscheinung und brachte vermutlich eine zusätzliche Labilisierung in höheren Schichten.

Die zeitliche Temperaturabnahme vom 0300-Uhr-zum 1500-Uhr-Termin betrug in Erlangen in 850 mb 5°, in 700 mb 1° und in 500 mb gleichfalls 1°. Die durch die Böenfront bedingte Abkühlung erfolgte vornehmlich in den unteren 3000 m.

Die Mitteltemperatur der Gesamtschicht 500/1000 mb Erlangen nahm um 2° ab.

c) Die Windverhältnisse.

Die Bodenwinde drehten bei Durchgang der ersten Kaltfront von SE auf SW, gebietsweise vorübergehend bis N, blieben aber schwach. Erst nach Durchgang der Böenfront drehten sie endgültig von SW auf NW. Diese Drehung trat in gleicher Weise bis etwa zum 3000-m-Niveau ein.

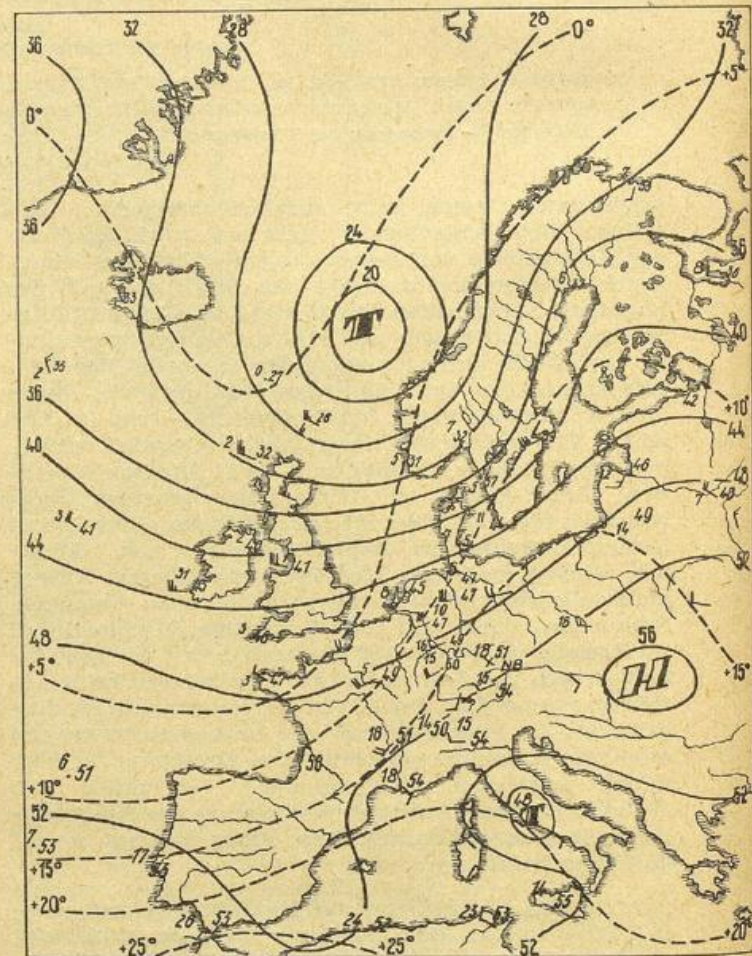


Abbildung 12

Abs. Topogr. mit Isothermen 850 mb 0300 Uhr

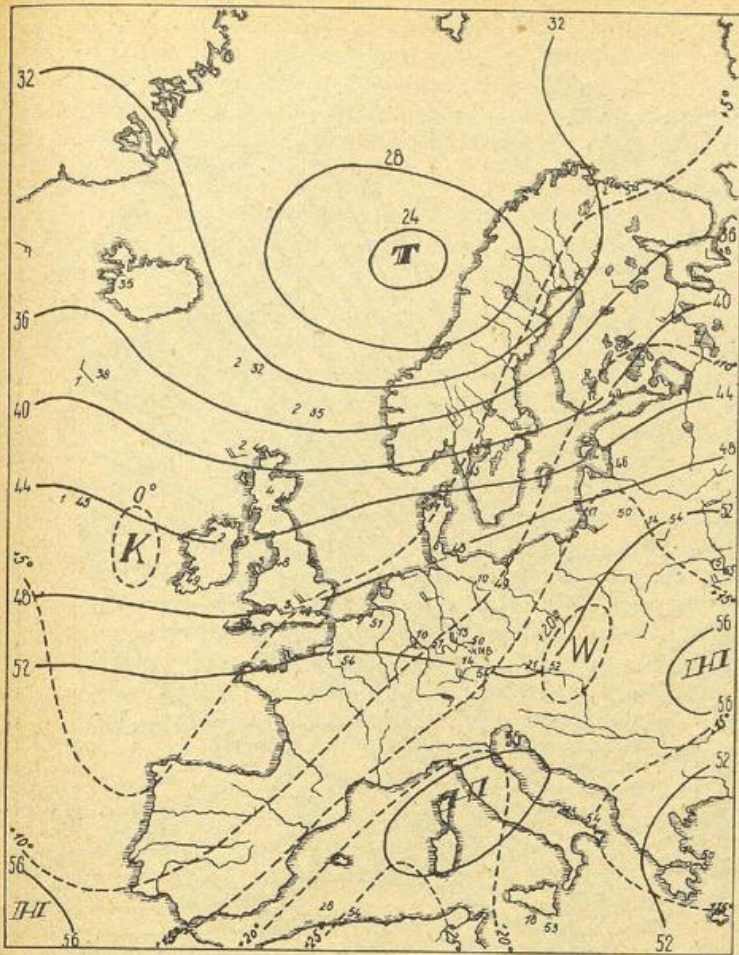


Abbildung 13  
Abs. Topogr. mit Isothermen 850 mb 1500 Uhr

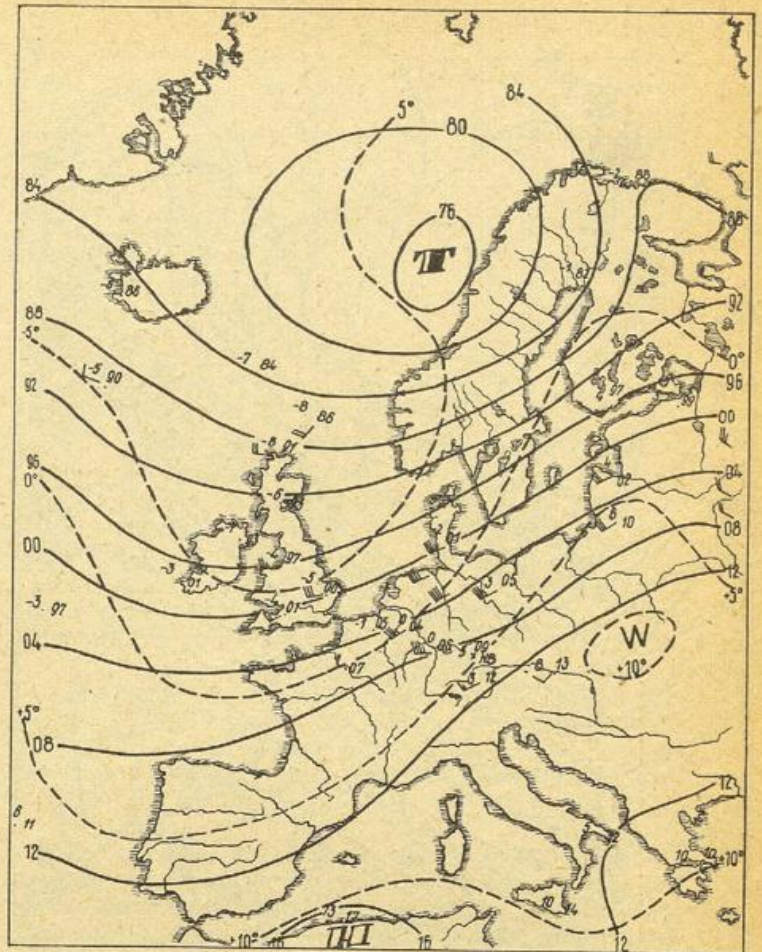


Abbildung 15  
Abs. Topogr. mit Isothermen 700 mb 1500 Uhr

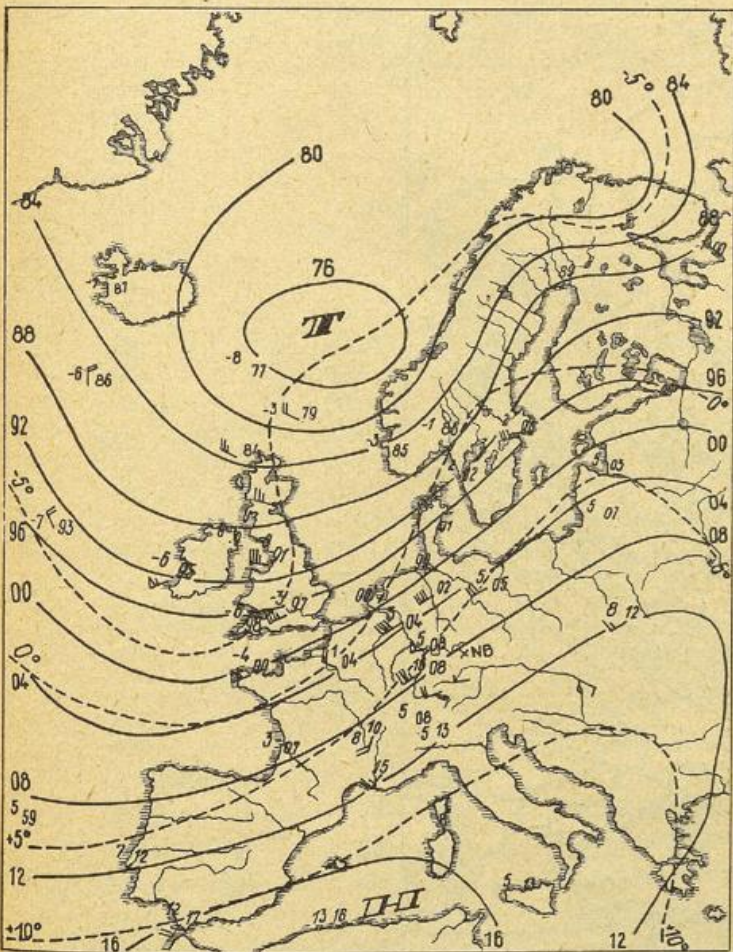


Abbildung 14  
Abs. Topogr. mit Isothermen 700 mb 0300 Uhr

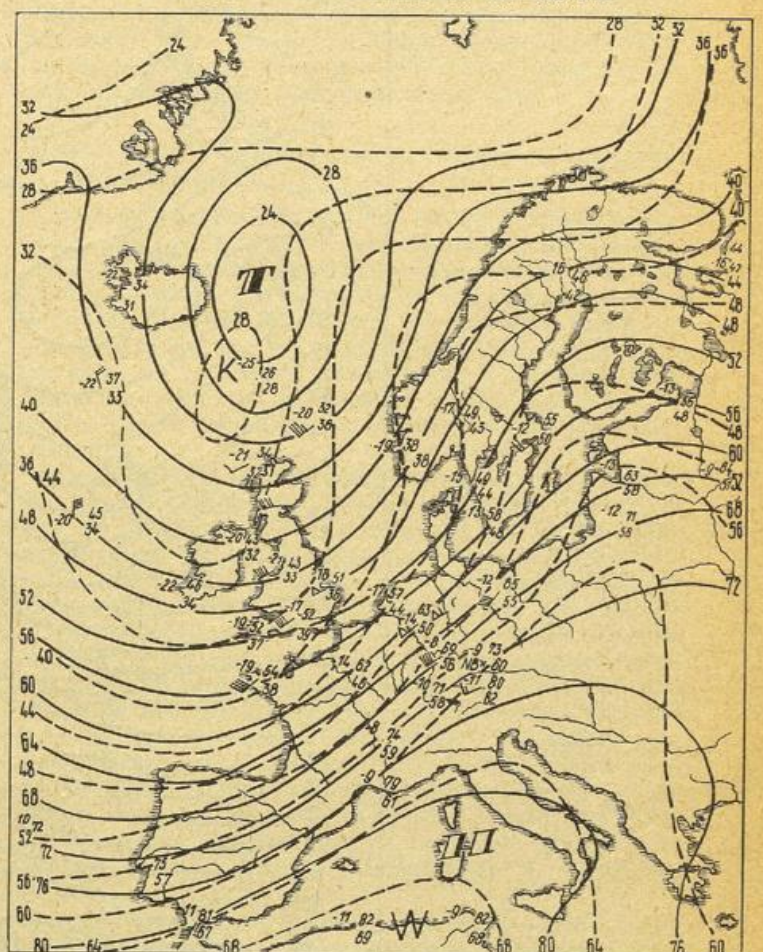


Abbildung 16  
Abs. und Rel. Topographie 500 mb 0300 Uhr

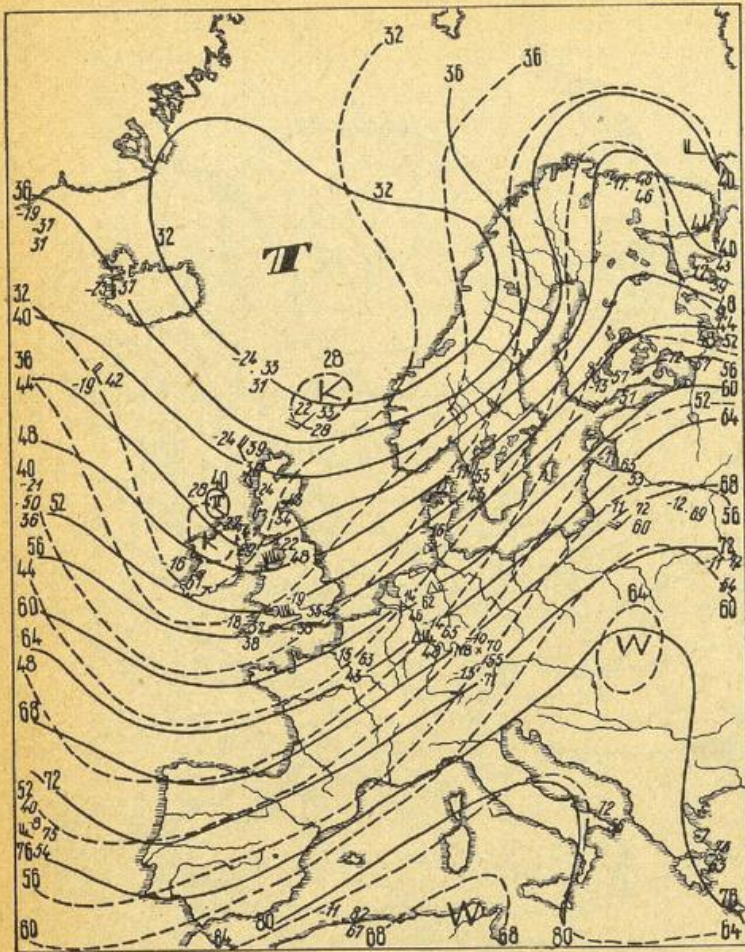


Abbildung 17  
Abs. und Rel. Topographie 500 mb 1500 Uhr

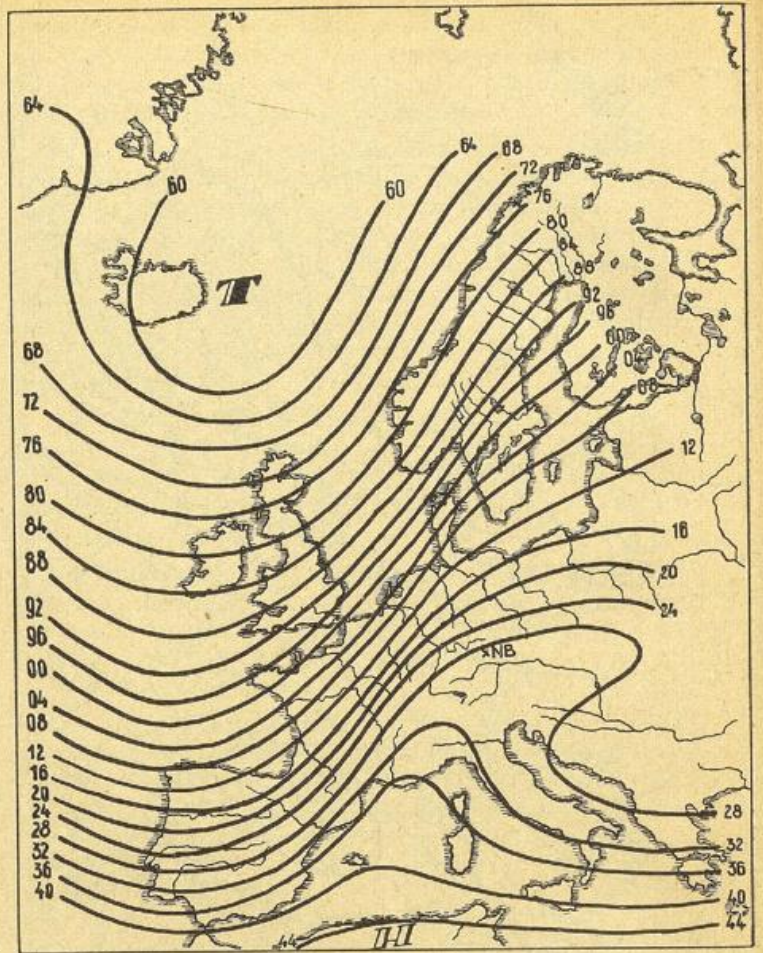


Abbildung 18  
Abs. Topographie 22. 7. 225 mb 0300 Uhr

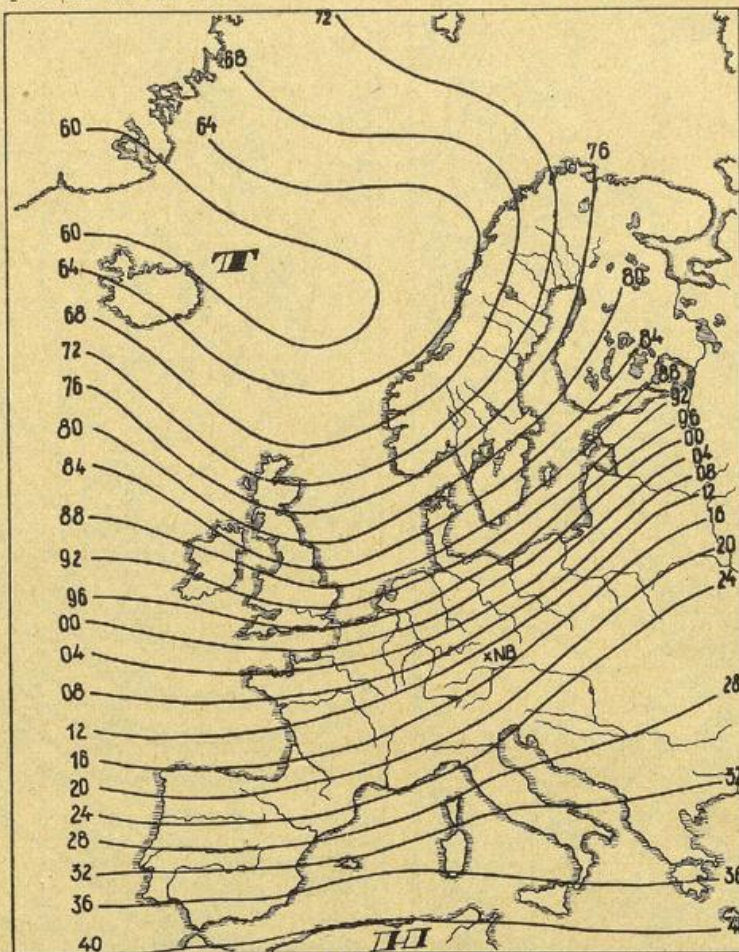


Abbildung 19  
Abs. Topographie 23. 7. 225 mb 0300 Uhr

Die Absolute Topographie der 250 mb-Fläche von 15 Uhr zeigt insbesondere durch die Höhenwinde erhärtet im Verlauf der Isolinie 52 eine Ausweitung und Umbiegung im Raum Nürnberg und spricht noch auf den in Verbindung mit der Böenfront vorstoßenden Kaltluftkeil an.

Die Karten der 700 mb Fläche zeigen vom 3 Uhr zum 15 Uhr-Termin eine Verlagerung eines stärkeren Gradientwindfeldes von NW nach SE.

Noch deutlicher erweisen die absolute Topographie 500 mb und 225 mb 3 Uhr GMT die Verlagerung eines Starkwindfeldes der von SW nach NE gerichteten Frontalzone vom Nordseeraum nach SE, jedoch wird der Nürnberger Raum jedenfalls bis 9 Uhr GMT (= 11 DSZ) nicht von ihm erfaßt, wie die Cirrenbeobachtungen der Silberhütte (250° 33km/h) von 9 Uhr GMT zeigen. Aus diesem Grunde wird auch der Wert von München 3 Uhr von 580 gdkm als zu hoch erachtet. Nach der Karte der absoluten Topographie 500 mb 15 Uhr hat sich das einheitliche Windfeld über den ganzen Raum bis über die Alpen ausgebreitet, jedoch bereits stärker abgeschwächt. Das Gleiche findet man aus der Betrachtung der 225 mb Fläche vom 23. 7. 1948, 3 Uhr und kann wohl annehmen, daß diese Verhältnisse sich in etwa bereits am 22. 7. nach Böenfrontdurchgang einstellten.

Im folgenden sind Höhenwinde und Wolkenzugmessungen für die Termine 0300 und 1500 Uhr GMT (alle Angaben in km/h) dargestellt:

Höhenwinde 22. 7. 1948 0300 Uhr GMT.

Höhe in m	Karlsruhe 0300 <sup>h</sup>	Wiesbaden 0300 <sup>h</sup>	München 0300 <sup>h</sup>	Grad. Wind Raum nordwestl. Nürnberg 0300 <sup>h</sup>
16800			250/29	
15200			240/44	
13700			270/46	
12200			290/39	
10700		240/150 (225 mb 03 <sup>h</sup> )	270/32	225 mb 250/170
9100			260/28	
7900			260/24	
7000			260/21	
6100		250/63	260/21	500 mb 230/90
4900		250/72	250/22	
4000		260/67	270/13	
3000	220/65	250/89	270/7	700 mb 240/45
2400	230/52	250/57	270/13	
1800	220/43	250/31	260/15	
1200	240/37	260/19	260/17	850 mb 240/30
900	250/41	270/11	250/19	
600	250/37	310/7	220/19	
300	250/30	30/6		

Neph-Meldungen:

Hof	06 <sup>h</sup>	Ac	4000/220/44
Silberhütte	09 <sup>h</sup>	Ci	7000/250/35
Weiden	06 <sup>h</sup>	Ci	7000/220/40
Weißenburg	06 <sup>h</sup>	Ci	7000/280/26
Weißenburg	09 <sup>h</sup>	Ci	7000/200/33
Darmstadt	08 <sup>h</sup>	Ci	7000/200/39
Karlsruhe	14 <sup>h</sup>	Ac	4000/230/33

Höhenwinde 22. 7. 1948 15<sup>h</sup> GMT.

Höhe in m	Wiesbaden 1500 <sup>h</sup>	Erlangen 1500 <sup>h</sup>	Grad. Wind Nürnberg 1500 <sup>h</sup>	München 1500 <sup>h</sup>
13700				230/74
12200				230/56
10700	252/150 225 mb	255/140 23. 7. 03 <sup>h</sup>	255/140	220/57
9100				210/57
7900				230/74
7000				240/56
6100		500 mb 242/80	242/80	240/50
4900	270/159			240/41
4000	260/108			270/46
3000	270/65	700 mb 245/60	245/60	(240/29)
2400	260/54	359/59		270/46
1800	270/39	290/52		280/65
1200	290/33	290/44	280/30	300/56
900	290/32	290/37		310/35
600	300/30	260/30		290/15
300	300/19	300/4		

Leider steht für Nürnberg nur ein Höhenwind Erlangen 15 Uhr GMT — 2 Stunden nach Böenfrontdurchgang — und nur bis 2000 m Höhe zur Verfügung. Er wurde mit Hilfe der Gradientwinde von 15 Uhr ergänzt und für 225 mb mit Hilfe der Karte vom 23. 7. 3 Uhr.

Eine stärkere Windschichtung, d. h. Windzunahme mit der Höhe ist für Wiesbaden oberhalb 3000 m für beide Aufstiegstermine festzustellen, für Nürnberg lag am Vormittag mindestens bis 9 Uhr GMT eine solche nicht vor, am Nachmittag 15 Uhr eine solche bei 3000 m nach Einbruch der Kaltluft. In der Höhe ist zu diesem Termin nur ein schwächerer Anstieg festzustellen. München zeigt überhaupt keine wesentliche Windschichtung, es sei denn den Windrichtungssprung an der Obergrenze der eingeflossenen Kaltluft.

3) Der Wellenvorgang an der Frontalzone, erste und zweite Kaltfront.

Das gesamte Wettergeschehen des 22. 7. zeigt als charakteristischen Zug über dem nördlichen Süddeutschland die starke Abschwächung bzw. Auflösung einer ersten Kaltfront, die in diesem Gebiet strömungsparallel wurde, und die Entstehung einer zweiten Kaltfront, der Böenfront, die in Verbindung mit einem Wellenvorgang am Rande der Frontalzone — im Augenblick deren Eintretens in einen stark labilisierten Raum — entstand und fast senkrecht zur Frontalzone orientiert war.

Zur Erklärung der Vorgänge betrachten wir zunächst die Verhältnisse in den höheren Schichten. Die Karte der 500 mb und besonders die der 225 mb Fläche 3 Uhr GMT (Abb. 16 und 18) zeigt südlich des Maingebietes ein antizyklonales Abbiegen der Stromlinien nach E bzw. SE, also eine Divergenzerscheinung. Die mit der ersten Kaltfront einströmenden Luftmassen erlitten hier einerseits eine frontsenkrechte Dehnung, andererseits eine frontparallele Schrumpfung. Die erste verminderte das zur ersten Kaltfront gehörende horizontale Temperaturgefälle, die letztere verstärkte das schon durch den Tagesgang der Sonneneinstrahlung vorhandene westöstliche Temperaturgefälle. Auf diese Weise erscheint das Entstehen einer neuen Kaltfront, die senkrecht zur Frontalzone orientiert ist und in deren Richtung zieht, verständlich (s. a. Raethjen<sup>6</sup>, S. 320).

Durch die oben beschriebene Wanderung des Drucksteiggebietes wird andererseits ein Druckwellenvor-

gang an der Frontalzone sichtbar. Er weist eine Wellenlänge  $\lambda$  von etwa 400 km auf. Es sind 2 Perioden zwischen Stuttgart und Prag erkennbar. Wellenstörungen über mehrere Perioden mit der Wellenlänge 300—1000 km sind an Frontalzone oft beobachtet worden. Es entstehen abwechselnd zyklonale und antizyklonale Krümmungen der Stromlinien. Die Wellenlänge liegt nach *Godske*<sup>7</sup>) (Gleichg. 5b u 6b) im Bereich

$$\frac{\pi}{l} (U_K - U_W) \leq L \leq \frac{2\pi}{l} (U_K - U_W) \quad l \sim 10^{-4}$$

wobei  $U_K$  die Geschwindigkeit in der kalten,  $U_W$  die Geschwindigkeit in der warmen Strömung bedeuten. In unserem Falle wird im Mittel zwischen Boden und 6000 m nach Höhenwindmessungen von München und Wiesbaden 3 Uhr  $U_K - U_W$  gleich 7 m/sec also:

$$210 \text{ km} \leq L \leq 420 \text{ km}$$

Notwendige und in diesem Falle auch hinreichende Bedingungen für das Entstehen solcher Frontalwellen ist das Vorhandensein von Trägheitslabilität (dynamische Labilität im Gegensatz zur statischen Labilität) in der Frontalzone.

Das Strömungs- und Austauschgleichgewicht (Gleitaustausch innerhalb der Isentropenflächen) in einer Frontalzone ist vorhanden, wenn der vertikale Windgradient  $\partial v_y / \partial z$ , das horizontale Temperaturgefälle  $\partial T / \partial x$ , sowie das vertikale Temperaturgefälle  $\partial T / \partial z$  in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. (s. a. *Raethjen*<sup>8</sup>, Seite 188 ff. Gl. 119 und *Raethjen*<sup>6</sup>, Ungleichg. 35, 36 u. 37).

Ist der Zustand labil — was für unseren Fall im folgenden noch näher untersucht werden soll — so genügt eine geringe Störung, um das Gleichgewicht zwischen der schweren Kaltluft und der leichteren Warmluft umzustürzen.

Die Störung liegt hier in der Tatsache begründet, daß das vertikale Windgefälle  $\partial v_y / \partial z$  mit dem Eintreten des Starkwindfeldes in den Raum südlich des Mains, wo stärkste Konvektion vorherrschte, erheblich abnehmen mußte, andererseits aber das horizontale Temperaturgefälle  $\partial T / \partial x$  in der Mittagszeit stark vergrößert wurde.

Es soll die Trägheitslabilität etwas näher untersucht werden.

Ob der Gleitaustausch in einem Frontalzonefeld stabil oder labil ist, hängt von der Neigung der Isentropen- zu den Isobarenflächen ab, also vom Winkel

$$\alpha' = \frac{\partial \theta / \partial x'}{\partial \theta / \partial z} = \frac{\partial T / \partial x'}{\partial T / \partial z + dT/dz} \quad \frac{dT}{dz} = 1$$

bzw. bei Wolkenluft vom Winkel

$$\alpha'_f = \frac{\partial T / \partial x'}{\partial T / \partial z + (dT/dz)_f}$$

(s. a. *Raethjen*<sup>8</sup>, Seite 213 ff. Gleichg. 160 u. 160a). Dabei bedeutet

$$\left( \frac{dT}{dz} \right)_f$$

den feuchtadiabatischen Temperaturgradienten.

Das zugehörige Koordinatensystem ist dabei so ausgerichtet, daß die positive x-Achse in Richtung der Temperaturzunahme liegt, die positive y-Achse senkrecht dazu derart, daß sich der kalte Raum links befindet. Die gestrichelten Koordinaten deuten an, daß das Koordinatensystem mit dem geostrophischen Wind driftet.

Stabilität bzw. Labilität ist nun vorhanden, je nachdem ob

$$\alpha' < \bar{\alpha}' \text{ oder } \alpha' > \bar{\alpha}'$$

Es bedeutet dabei (*Raethjen*<sup>8</sup> S. 213 Gleichg. 161)

$$\bar{\alpha}'^2 = \frac{T}{\partial T / \partial z + dT/dz} \frac{1}{g} \cdot \left( 1 + \frac{\partial v_y'}{\partial x'} \right)$$

Für Wolkenluft gilt entsprechend

$$\alpha'_f \leq \bar{\alpha}'_f$$

wobei der feuchtadiabatische Temperaturgradient zu benutzen ist.

Für den Aufstieg von Wiesbaden 3 Uhr ergibt sich: Eine Windschichtung bei etwa 520 mb

$$T = 267^{\circ}$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -0,51^{\circ}/100 \text{ m (mittl. Grad. zw. 3200 u. 7500 m).}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x'} = 1,6^{\circ}/100 \text{ km (Erlangen-Iserlohn in 500 mb).}$$

$$\left( \frac{dT}{dz} \right)_f = 0,6^{\circ}/100 \text{ m (für } -6^{\circ} \text{ und 520 mb nach Raethjen}^9, \text{ Seite 69, Tab. 4).}$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} = 4,4 \text{ m/sec auf 100 km (Vgl. mittl. Winde zw. 4000 u. 6000 m v. Wiesbaden u. München).}$$

Damit ergibt sich

$$\alpha' = 3,25 \cdot 10^{-3}$$

$$\bar{\alpha}' = 5,4 \cdot 10^{-3}$$

also  $\alpha' < \bar{\alpha}'$  d. h. Stabilität für wolkenfreie Gleitbewegungen. Andererseits erhält man für Wolkenluft

$$\alpha'_f = 17,8 \cdot 10^{-3}$$

$$\bar{\alpha}'_f = 12,2 \cdot 10^{-3}$$

und  $\alpha'_f - \bar{\alpha}'_f = 5,6 \cdot 10^{-3}$

also  $\alpha'_f > \bar{\alpha}'_f$  d. h. Trägheitslabilität für Wolkenluftquanten.

Definiert man mit *Raethjen*<sup>8</sup> (S. 213) den sogenannten labilen Sektor als den Sektor, der die Isentropenfläche in den Winkel  $2 \psi_{f_0}$  einschließt, wobei

$$\psi_{f_0}^2 = \alpha'^2 - \bar{\alpha}'^2$$

so ergibt sich für Wiesbaden

$$2 \psi_{f_0} = 25,8 \cdot 10^{-3}$$

d. h. bei einer Störung des Gleichgewichtes in einem begrenzten Raum entwickeln sich die labilen Umlagerungen von diesem Punkt in den labilen Sektor hinein unter Verbreiterung oberhalb und unterhalb der Isentropenfläche.

Wie zu erwarten, erhält man für Erlangen auf dieselbe Weise eine viel schwächere Trägheitsfeuchtlabilität:

$$\alpha'_f = 9,4 \cdot 10^{-3}$$

$$\bar{\alpha}'_f = 9,1 \cdot 10^{-3}$$

$$\alpha'_f - \bar{\alpha}'_f = 0,3 \cdot 10^{-3}$$

Die Größe des labilen Sektors ergibt sich dort zu

$$2 \psi_{f_0} = 4,4 \cdot 10^{-3}$$

Es war schon weiter oben vermutet worden, daß die notwendige Initialstörung durch den starken Vertikalaustausch südlich des Maingebietes vermutlich im Raum Stuttgart zustande kam.

Auch das Verhältnis des anisentropen Vertikalaustausches  $A_z$  zum isentropen Austausch  $A_i$  kann als Kriterium herangezogen werden. Austauschgleichgewicht besteht ja dann, wenn eine höhere atmosphärische Schicht durch den Austausch  $A_z$  ebensoviel Windimpulse verliert, wie sie durch den Austausch  $A_i$  zugeführt erhält und umgekehrt. Für das Austauschgleichgewicht gilt

$$A_z/A_i = \bar{\alpha}'^2 - \alpha'^2 \quad (\text{hier für wolkenlose Luft} = 2 \cdot 10^{-5})$$

Man bezeichnet

$$(A_z/A_i)_{kr} = \bar{\alpha}'^2$$

als den kritischen Wert des Austauschverhältnisses. Er beträgt beispielsweise für Wiesbaden für wolkenlose Luft  $30 \cdot 10^{-6}$  und für Wolkenluft  $150 \cdot 10^{-6}$ .





Ablenkungen in größeren Waldparzellen (Abb. 20 Nr. 9, 10 u. a.).

Allerdings wurden auch in diesem Gebiet eine Reihe von Nesterbrüchen mit gekreuzten Stämmen vorgefunden, ohne daß an diesen Stämmen eine Wirbelung nachweisbar ist (Abb. 20 Nr. 1, 24, 25, 26, 36, 76).

Das Hauptinteresse verdienen jedoch die Forstschäden des Wirbelfeldes bei Fischbach-Brunn, die in einem Forstkartenausschnitt 1:10 000 im einzelnen dargestellt sind (Abb. 21).

Schon der Vergleich der Forstschäden pro Hektar (s. Abschn. I) — sie zeigten für das eingerahmte Gebiet Fischbach-Brunn ein Maximum von 6,7 fm/ha — läßt die besondere Windwirkung in diesem Gebiet erkennen. Aber auch ein Blick auf die Karte zeigt, daß in einem nördlich Fischbach gelegenen, etwa 3½ km langen Streifen nordwestlich der Autobahn und in einem um den Brunnerberg (437 m NN = 100 m höher als Fischbach) bis zum Röthenbach angeordneten Feld besondere Wirkungen insbesondere in der Fallrichtung der Bäume hervorgerufen wurden.

Auffällig in dem nordwestlich der Autobahn gelegenen Streifen ist die Vielzahl der gekreuzt in Konvergenz bzw. Divergenz gefallenen Bäume und vor allem auch ihre Gesamterstreckung längs der Autobahn.

Das Gelände steigt von Fischbach erst langsam und in der Mitte der Abteilung Hohenlinde sprunghaft in 2 markanten Stufen, weiterhin wieder langsamer, im ganzen 50 m bis zum sog. Brunnerweg (391 m NN) an. Letzterer führt über die Autobahn an die Südflanke des Brunnerberges. Nördlich des eben genannten Weges fällt das Gelände zunächst rasch etwa 20—30 m, später langsamer bis in den Grund des Zelch und weiter des Zweibrückleinsgrabens ab, wobei vor dem letzteren eine leichte Geländewelle liegt. Die letzte Schadensstelle dieses Streifens liegt im Gebiet des nördlichen Höllgrabens nur etwa 1 km von der großen Autobahnkreuzung entfernt.

Im Folgenden werden die einzelnen Schadensstellen kurz beschrieben, wobei die mit W gekennzeichneten typische Wirbelscheinungen zeigen und später noch besonders untersucht werden. Im allgemeinen lagen die Stämme mit nördlicher Fallrichtung unter denen mit östlicher.

a) Die Schadensstellen nordwestlich der Autobahn

W 1. Brändlein c (Nr. 37) (Abb. 22)

224 fm, 90—110jährige Weißtannen und Föhren. Der Schaden liegt am Beginn eines großen Waldgebietes, das sich an die große waldfreie Fläche bei Fischbach anschließt, etwa 200 m von deren Rand entfernt, unmittelbar an der Autobahn. Es handelt sich um drei getrennte Stellen, von denen zwei mit sehr regelmäßig gekreuzten Bäumen — nördlicher Richtung unter der östlichen — den stärksten Schaden aufweisen. Es wurden hier fast durchwegs die älteren Bestände geworfen. Der jüngere Bestand auf der anderen Seite der Autobahn wurde nicht oder erst wieder im Bretzengraben e angegriffen.

2. Hohenlinde b (Nr. 38)

350 fm, 110jährige Fichten, gemischt mit Föhren und einzelnen Eichen. Umgebender Bestand jünger. Unmittelbar an der Autobahn. Ziemlich einheitliche Fallrichtung nach ENE bis NE. Vermutlich normaler Böenschaden, vielleicht in Fortsetzung der weiter westlich aufgetretenen Schadensflächen der Abteilung Schlüsselstein, Fortsetzung auf der anderen Seite der Autobahn, Abt. Otterbrücklein.

3. Hohenlinde d und c (Nr. 39)

Zwei Nesterbrüche im dichten Jungholz. Föhrenbestand. Es ist zweifelhaft, ob alle diese Nester in diesem Bestand erfaßt werden konnten.



Abbildung 22

Foto Brändlein c. südlichster Schaden; Stämme liegen, obwohl abgesägt, so, wie sie gefallen sind. Blickrichtung etwa nach NE

Hohenlinde d. Ellipsenförmige Schadensfläche, Längserstreckung 60 m, 50—70 fm, 45—50jährige Föhren und Fichten. Zunächst ergab sich ein äußerst turbulentes Schadensbild und erst nach Aufräumung konnten die Fallrichtungen nach den Wurzelstöcken einigermaßen festgelegt werden: SW nach NE, SSW nach NNE, W nach E. Hier war, wie an ähnlichen Nesterbrüchen, eine leichte Verengung des Schadens etwa in Linie der kleinen Halbachse festzustellen.

W 4. Hohenlinde a (Nr. 40) (Abb. 31 i. Abschn. IV)

Eiche, Föhre (250 Jahre), Linde, Buche, Birke. Stellt einen besonders interessanten Schaden dar. Er liegt unweit einer Doppelstufe im Gelände mit einer Höhe von im Ganzen etwa 30 m auf einem Gebiet 120×70 m. Es handelt sich dabei um eine von Jungholz umgebene offene Waldparzelle, auf der noch etwa 20 Bäume standen, die alle geworfen wurden und zwar in den verschiedensten Richtungen, ohne einander — ausgenommen vielleicht bis auf einen Fall — beeinflussen zu können (s. a. Zeichnung 1:1000, Abb. 31).

Zufällig waren Waldarbeiter an dieser Stelle und berichteten, daß der Sturm aus der Südostecke herabgebrochen sei und den größten Teil der Bäume dort und im Mittelfeld geworfen habe. Erst später — Größenordnung Minuten — sei die alte, besonders auffällige Eiche (6½ fm) — in der Zeichnung links oben — über den Weg geworfen worden. Daraus geht hervor, daß sich wirbelartige Windstöße, wenn überhaupt, am Anfang des Unwetters entwickelt haben. Der Wirbelcharakter dieses Schadens steht außer Zweifel. Er wird später noch näher erörtert.

Es folgt nun nördlich des Brunnerweges zu beiden Seiten des Fischbacher Weges in der gesamten Abt. Zelch der stärkste Schaden auf kleinem Raum mit 1540 fm, d. s. etwa 15 fm/ha. Es wurden geworfen, teilweise gebrochen, in der Mehrzahl Föhren und Fichten, einzelne Buchen und vereinzelt Eichen, Alter 75—140jhr. Der größte Schaden entstand im Nordteil der Abt. (Zelch b und e).

W 5. Zelch c (Nr. 41)

Die beiden Schadensflächen bieten gegenüber dem bis her Gesagten nichts Besonderes. Der südlichere liegt noch auf dem oberen Teil des nach NNE abfallenden Geländes und ist von dem zweiten Schaden durch eine größere offene Waldparzelle getrennt. Auch der nördliche Teil stand ziemlich isoliert und unter jüngerem Bestand.

W 6. Zelch f (Nr. 41)

Der südlichere Schaden liegt unmittelbar am Fuße des ziemlich steilen Geländefalles, es handelt sich um eine kleinere, ziemlich isoliert stehende Baumgruppe, die in ihrem westlichen Teil teilweise stehen blieb. Hier treten besonders in seinem Beginn drei voneinander unabhängige, jeweils durch eine Anzahl Bäume vertretene Wurfrihtungen auf, in der Reihenfolge der Aufeinanderlage nach NW, nach N bis NNE und nach E bis ESE. Auch sind eine Reihe besonders markanter Brüche zu finden, die später zur Windberechnung benutzt werden.

Der nördlichere Schaden von Zelch f besteht aus einem großen Flächenbruch älteren Föhrenbestandes, der fast ganz geworfen wurde. Infolge verschiedener Fallrichtungen und Aufeinanderhäufung der Bäume bot er im Anfang ein markantes Bild der Zerstörung. Auch hier zeigen sich außer der nördlichen und östlichen Fallrichtung von der Mitte nach dem westlichen Teil des Bruches auch einzelne Fallrichtungen nach SE, die kaum durch andere Bäume mitgerissen sein können. Etwa in der Mitte der Nordseite befand sich ein offensichtlich im Uhrzeigersinn (Blickrichtung zum Boden) unweit des Wurzelstockes abgedrehter Stamm, Durchmesser 40 cm, Baumlänge etwa 30 m.

W 7. Zelch e (Nr. 41)

80—100jährige Föhren. Am Südrand ausgesprochene Schadensnester im Stangenholz, offenbar Teilwirbel. Durchmesser etwa 20—30 m; in ihnen zwei Hauptfallrichtungen N bis NNE und NE bis E. Anschließend nach Norden zwei größere Flächenbrüche, in denen die östliche Fallrichtung vorherrscht und dahinter noch zwei größere Nesterbrüche fast auf der Talsohle, von denen einer die ungewöhnlichen Fallrichtungen nach ENE und SE aufweist. Die westlichen Teile von Zelch e liegen im Talgrund mit allgemein recht wässrigem Boden. Auch die hier bezeichneten Nesterbrüche weisen deutlich zwei Wurfzentren auf.



Abbildung 23

Foto Zelch b, Aufnahme in unmittelbarer Nähe der Konvergenz. Noch an der Stelle der nördlichen Windrichtung, die auch der im Hintergrund rechts geneigte Baum zeigt. Im Hintergrund links ist die andere, mehr nach Nordost geneigte Baumrichtung zu erkennen

W 8. Zelch b (Abb. 23)

Der Schaden zeigt eine deutliche Konvergenz mit einem schmalen Teil gekreuzter Stämme. Die Lage wurde in Abb. 23 festgehalten. Ein dort befindlicher Bruch, der typisch für mehrere gleicher Art war, wurde für eine Windabschätzung benutzt (s. Abschn. V).

Am Nordrand, am Weg wieder zwei Nesterbrüche zum Teil mit südöstlicher Fallrichtung.

9. Nördlicher Höllgraben d (Nr. 42)

500 fm Föhren und Fichten, 150jährig. Ein breiter, auffälliger Schadensstreifen, von Jungholz umgeben; auffällig die Vielzahl regelmäßig gekreuzter Bäume; unten zahlreich nach NNW bis N, darüber nach ENE bis NE. Von hier liegt die Aussage eines Beobachters vor, der drei Böen feststellte, nach einer Eingangsböe im Abstand von etwa drei Minuten, sei die stärkste Böe mit dem Hauptbruch erfolgt und die dritte erst später mit schwächerer Wirkung.

10. Nördlicher Höllgraben e u. c am Geroldsbrücklein (Nr. 43)

130jährige Fichten, letztes Auftreten regelmäßig gekreuzter Brüche nach Norden, Ende des etwa 3,8 km langen Wirbelfeldes längs der Autobahn. Bei recht wässrigem Boden im Grund des Zweibrückleingrabens ist die Masse im nördlichen Teil nach NE bis ENE geworfen, die nördliche Fallrichtung tritt weiter südlich auf.

Am Brunnerberg ist deutlich eine Teilung der Schadensgassen in solche nördlich und südlich des Brunnerberges zu sehen. Die höchste Erhebung desselben liegt im westlichen an die Autobahn angrenzenden Teil mit 437 m NN. Dabei ist allgemein der auf der Nordseite befindliche Schaden größer als auf der Südseite. Der Brunnerberg bedingte zunächst eine Ablenkung, beginnend an der Überführung des Brunnerweges über die Autobahn in der allgemeinen Richtung NE und später wieder in der Talmulde zwischen Abteilung Aussicht und Abteilung Wässerung bis hin zum Röthenbach eine östliche Richtung.

b) Die Schadensstellen westlich und nördlich des Brunnerberges

1. Otterorücklein a (unmittelbar an der Brücke über die Autobahn) (Nr. 55)

Nesterbruch auf engem Raum, etwa 20×50 m, 200—300 fm Föhren, Eichen, Buchen, Fichten, 150—200jährig. Hauptrichtung nach NE, im zentralen Teil auch nach NNW und E, jedoch keine sehr regelmäßigen Kreuzungen.

2. Hohersteind u. e

840 fm Fichten, Buchen, Föhren, Eichen, 125jährig, verstreute, aber an der Nordwestflanke des Brunnerberges regelmäßig angeordnete Würfe. Auffällig ist in Hoherstein b die hier seltenere Nordrichtung ohne Kreuzungen, die dann in ihrem weiteren Verlauf in Abteilung Aussicht e mit der östlichen Richtung Kreuzungen ergibt. Hier kann die Geländeführung Ursache sein.

3. Aussichte (Nr. 56 u. 57)

Normaler Flächenbruch in Fortsetzung der eben beschriebenen Schäden, jedoch stärkste Wirkung in diesen Teilen. Buchen, Fichte, Föhren, Eichen, Lärchen, 1975 fm, 128jährig. Auffällig eine Tanne, direkt an einem Pflanzgarten, die in 5 m Höhe mit Durchmesser 40 cm gebrochen und deren etwa 150 kg schwere Krone nach weiteren 8 m bei einem Durchmesser von etwa 30 cm abgedreht war.

Bei dem Abfall dieses Schadens in den Talgrund stellte sich hier ein letztes Mal auf kleinem Raum eine nur nördliche Fallrichtung ein.

4. Die Schäden Wässerung d (250 fm Fichten, Föhren, Buchen, Eichen, 140jährig); Wässerung c (120 fm Fichten, Föhren, Buchen, Eichen); Aussig f (200 fm Föhren) sowie die weiteren stark abgeschwächten Schäden Hängig g, Ludergraben i zum Röthenbach sind vermutlich normale Windböenschäden des Talgrundes, ohne erkennbare Wirbelung.

Besonders zu erwähnen sind jedoch noch vier Nesterbrüche in diesem Gebiet mit Wirbelerscheinungen:

W 5. Wässerung e (Nr. 58)

Etwa 120 fm dichtes Jungholz, Hauptwurfrihtungen nach NNW, darüber nach NE und ENE; Lage nahe der markanten Weggabelung. Elliptisch langgezogenes Wir-

belnest, 30×80 m, mit Verengung in der Mitte und zwei deutlichen Schadenszentren rechts und links davon.

W 6. Wässerung b (Nr. 60)

Sehr ausgeprägtes Beispiel eines Wirbelnestes. 118 fm Fichten und Föhren, 78jähriges Jungholz. Der Schaden liegt etwa auf der höchsten Stelle des wieder nach Norden aus dem Talgrund des Höllgrabens zu einer Stufe ansteigenden Geländes Nähe dem dort befindlichen Wasserturm. Auch in der Umgebung ist meist dichter Jungbestand. Die Schadensfläche zeigt wieder eine elliptische Form, etwa 30×80 m, mit einer Verengung in der Mitte der Längserstreckung. Die Fallrichtungen zeigen fast alle Richtungen der Reihe nach angeordnet. Hauptfallrichtung in mittleren Teilen nach Osten. Im östlichen Teil des Wirbels darunter auch nördliche Richtung, im westlichen Teil darüber auch Richtungen nach SSE. Außerdem sind an den Rändern eine Reihe Bäume nach NNE bis N bzw. SSE nur gekippt. Auf diese Weise war es möglich, den Schaden recht wirkungsvoll zu photographieren. Dies ist allerdings der einzige Fall, in dem die Wirbelwirkung so deutlich zum Ausdruck kommt. Jedoch waren die Vorbedingungen für das Auftreten aller Fallrichtungen besonders günstige, da die Fichten auf wässrigem Boden leicht zu werfen waren (Abb. 25 u. 26).

W 7. Hängig i (Nr. 62 und 63)

Zwei Nesterbrüche, diesmal etwa Nähe Talgrund auf feuchtem Boden, im wesentlichen Fichten und Föhren, locker stehend, 120jährig, zusammen 500 fm. Der rechte der beiden Schäden hat recht einheitliche Fallrichtung, der westliche zeigt sehr ungeordnete Fallrichtungen, wobei eine nördliche, teilweise unter, teilweise über einer östlichen liegt. Das Mitreißen von Bäumen ist nicht ausgeschlossen.



Abbildung 24

Foto „Wässerung b“. Aufnahme von E mit der nördlichen Fallrichtung im Vorder- und der südlichen Fallrichtung im Hintergrund

c) Die Schadensstellen südlich des Brunnerberges

Im Bereich der Windgasse an der Südflanke des Brunnerberges liegen zunächst 2 kleine Nesterbrüche ohne Besonderheiten in Abteilung Otterbrücklein d. Danach

8. Otterbrücklein c (Nr. 65)

Großer Flächenbruch, etwa 1000 fm, Fichten, Föhren, Buchen, Tannen, 150jährig, hoher Grundwasserspiegel. Im ganzen verhältnismäßig regelmäßiger Fall mit einzelnen Ausbrüchen nach NE am nördlichen Rand,

jedoch in der Mitte und am ostwärtigen Ende zwei Stellen, wo zum Teil unregelmäßige Fallrichtungen auftreten. Gegenseitige Einwirkung von Bäumen nicht ausgeschlossen.

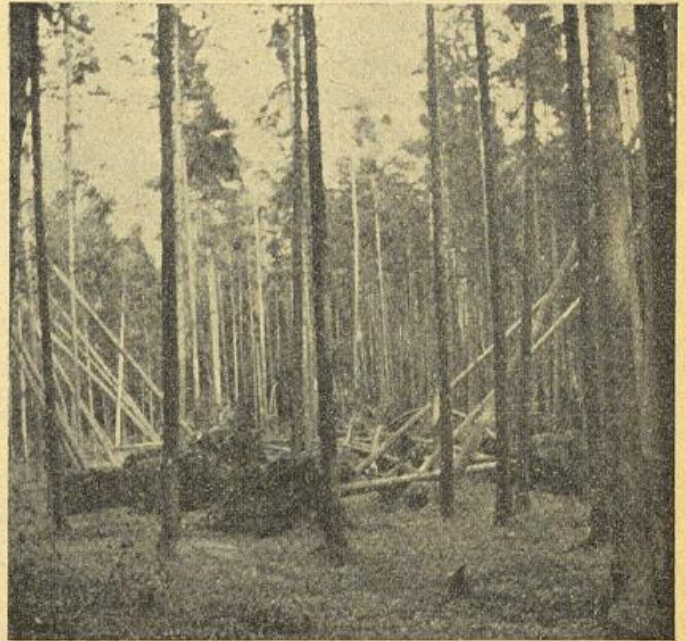


Abbildung 25

Foto „Wässerung b“. Aufnahme von W, im Vordergrund rechts Fallrichtung nach SSE, im Hintergrund links Neigung in nördlicher Richtung

Im weiteren Verlauf sind die Schäden in den Abteilungen

9. Otterbrücklein d, Brunnerberg d u. a (Nr. 66)

550—600 fm Mischwald, 120jährig, dadurch auffällig, daß der Schaden, verursacht durch eine wellenförmige Anordnung des Geländes, in voneinander abgesetzten Streifen auftritt, die auf den Wellenkämmen liegen. Jedoch nehmen die Schäden nicht den Charakter von Flächenschäden an.

Im südöstlichen Eck Brunnerberg a befindet sich ein nesterähnlicher Bruch (Nr. 67) mit einem Schaden von etwa 90 fm.

10. Pfaffensteine u. c

238 fm meist Föhren, 43jährig, Schaden auf dem östlichsten Teil des Brunnerberges, einzelne Stämme bereits im Steilabfall nach Brunn.

Auf den Feldern bei Brunn wurden an drei Stellen Baumkronen (Jungholzgipfel, Fichten) gefunden, die offenbar von dieser Abteilung stammen. In Brunn selbst wurde beobachtet, wie ein etwa 1½ m langer und schätzungsweise 15—20 kg schwerer Fichtengipfel in etwa 50 m Höhe von W nach E durch die Luft getragen wurde. Es handelt sich jedoch hier vermutlich um ein Herabtragen der Gipfel vom Brunnerberg ins Tal.

11. Pfaffenstein f (Nr. 68), Pfaffenstein g (Nr. 70 u. 71)

Gesamtschaden 175 fm Fichten, Föhren, Buchen, Eichen, 128jährig. Der westliche Teil von Pfaffenstein f oberhalb der Weggabelung zeigt eine auffällig bergwärts gerichtete Fallrichtung nach N.

12. Netzallerrangen g (Nr. 72)

Flächenbruch, 380 fm, meist Fichten, 130jährig, exponierter, sturmgefährdeter Bestand, etwas abseits gelegen von der Reihe der eben beschriebenen Schäden im Norden. Einheitliche Fallrichtung nach ENE.

W 13. Bretzengraben e (Nr. 73)

Nesterbruch, von SSW nach NNE, zwei Schadenszentren, umgeben von Altbestand, 120 fm Fichten, 100jährig, im südlichen Schwerpunkt NW unter NE, im

nördlichen Schwerpunkt NE unter NW. Eine nähere Deutung dieser merkwürdigen Aufeinanderfolge ist nicht möglich. Schaden liegt auf einer von Süden 20 m ansteigenden Geländestufe. Vermutlich zugehörig zu Schäden Abteilung Brändlein auf der linken Seite der Autobahn.

**IV. Beurteilung der Windbrüche des Wirbelfeldes an der Autobahn mit Hilfe der Letzmann'schen Spurtypen.**

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß einzelne Schadensstellen des Wirbelfeldes, wie auch die meisten Schäden im übrigen Reichswald durch eine normale Böenwirkung von WSW nach ENE entstanden sein dürften. Es ist jedoch nicht gut möglich, die Gesamtheit der verschiedenen und sicherlich nicht zufälligen Fallrichtungen in dem mit Wirbelfeld bezeichneten Teil durch 2 zeitlich auseinanderliegende Böenstöße zu erklären, da erstens keine der normalen Böen, wie gezeigt wurde, aus S bis SSE gekommen und zweitens es unwahrscheinlich ist, daß an jeder einzelnen dieser vielen Schadensstellen und nur an diesen Stellen beide Böen hintereinander alles geworfen haben sollen. Es handelt sich hier um eine Vielzahl sehr ähnlich gelagerter Schadensstellen, die infolge der gekreuzten Anordnungen mit Konvergenzen und Divergenzen auf irgendeine Turbulenzerscheinung schließen lassen.

Bei den unmittelbar an die Autobahn angrenzenden Schadensnestern Abteilung Brändlein unweit Fischbach könnte man noch an durch die Autobahn bewirkte Leewirbel denken. Die Dimensionen und Kräfteverhältnisse eines flachen Leewirbels dürften für einen so erheblichen Schaden jedoch nicht ausgereicht haben. Doch kommt einem solchen unter Umständen eine auslösende Wirkung in einem größeren Geschehen zu.

Im Großen gesehen (s. Abb. 20 und 21) tritt in den Zerstörungen der normalen Sturmböe im Westen bei Abteilung Flachröst und Schüsselstein beginnend eine auffallende Flächendivergenz auf, die zu einer Aufspaltung der Strömung in 3 Zweige führt:

1. Hohenlinde — Zelch — Höllgraben,
2. Otterbrücklein — Hoherstein — Wässerung,
3. Otterbrücklein — Pfaffenstein  
(eventuell noch schwacher Zweig: Brändlein — Schwarzlach).

Zwei und drei sind durch die Höhenlinien des Brunnerberges getrennt, der eine Führung bewirkte. Keiner der Zweige zeigt einen stetigen Wirbel, etwa das geschlossene Bild eines Asgardweges, wie ihn vollausgebildete Tromben hinterlassen. Jedoch finden sich wiederholt, insbesondere in der Nähe der Autobahn (Zweig 1), einzelne unstete Wirbelstöße, die kurzzeitig am Boden wirksam wurden.

Die Art der Zerstörungen, insbesondere nordwestlich der Autobahn, legt es nahe, diese mit den von Letzmann<sup>1</sup> nach einem graphischen Verfahren theoretisch abgeleiteten Spurbildern einer fortschreitenden Trombe zu vergleichen, um so zu ermessen, ob trombenähnliche Erscheinungen wirksam waren und welche besonderen Daten diesen etwa in unserem Falle zuzuschreiben wären.

Letzmann zeichnet unter bestimmten Annahmen für eine Reihe von Trombenmodellen, die sich im wesentlichen durch das jeweils größte in der Trombe vorkommende Verhältnis.

$$G_{\max} = \frac{v_r}{v_t}$$

der Rotations- zur Translationsgeschwindigkeit und verschiedene Ablenkungswinkel  $\alpha$  der Windrichtung vom Radius unterscheiden, die zugehörigen Isogonen-, Isotachen-Diagramme und die Stromlinien-Diagramme.

Er benutzt dabei die nach früheren Erfahrungen zu erwartenden Werte  $G_{\max} = 0,75$  bis  $G_{\max} = 6$ .

Er bezeichnet ferner mit  $v$  die Resultierende von  $v_t$  und  $v_r$ , mit  $\psi$  den Winkel zwischen  $v$  und  $v_t$  (= Fallwinkel der Bäume), mit  $\varphi$  den Winkel zwischen  $v_t$  und  $v_r$  (s. Abb. 26).

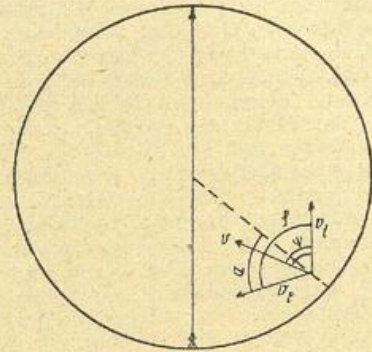


Abbildung 26  
Figur zu Ablenkungswinkel, Fallwinkel

Für jeden gegebenen Punkt des Bewegungsfeldes ist

$$v^2 = v_t^2 + v_r^2 + 2v_t v_r \cos \varphi$$

$$v_r^2 = v^2 + v_t^2 - 2v v_t \cos \psi$$

daraus erhält man  $\cos \psi$  in Abhängigkeit von  $v_t$ ,  $v_r$  und  $v$ . Die Zusammenhänge zwischen  $G$ ,  $\psi$ ,  $\varphi$ ,  $v$  sind in 2 Tabellen<sup>1</sup>(S. 35) zusammengestellt, mit deren Hilfe man bei gegebenen  $G$  und Fallwinkel  $\psi$   $v$  für  $v_t = 1$  bestimmen kann. Man bekommt so den Verhältniswert von  $v$  zu  $v_t$ .

Die Spurbilder erhält Letzmann, indem er entlang einer Isotache die Punkte mit bestimmtem Ablenkungswinkel (z. B. Schnittpunkte der Isogonen und Isotachen) auf eine Gerade senkrecht zur Richtung der fortschreitenden Bewegung projiziert und in diesen Punkten die Fallrichtung unter dem betreffenden Winkel einträgt. Es ergeben sich so für jedes Modell eine Reihe von Trombenspuren, je nach Größe von  $\alpha$  und  $v$ .

Die wichtigsten Züge wurden dann zu Spurtypenbildern — 6 Typen mit je 6 Formen — zusammengefaßt.<sup>1</sup>(S. 108) und<sup>11</sup>(S. 27) (Abb. 27).

Bei dem hier vorliegenden Fall stößt eine Spuruntersuchung nach dieser Methode schon deswegen auf besondere Schwierigkeiten, weil es sich nach Art und Altersstufen, wie die bisherigen Beschreibungen zeigen, nicht um einen einheitlichen Waldbestand handelt, sowie die Orographie des Geländes erheblich störend wirkte und das gesamte Feld ein recht turbulentes Aussehen besitzt. Auch mögen tatsächlich eine Anzahl der gefallen Bäume der Wirkung einer späteren Böe zuzuschreiben sein.

Gekreuzte Stämme sind nun vor allem dort zu erwarten, wo eine rasche Änderung der Größe des Fallwinkels auftritt, also z. B. bei einer kräftigeren Zirkulation. Die Fallrichtung ihrerseits wird um so mehr von der Translationsrichtung abweichen, je langsamer die Wirbelung fortschreitet und je schneller sie rotiert, also besonders für größere Werte von  $G$ . Bei sehr rascher Rotation oder auch fast still stehenden Wirbeln werden auch Fallwinkel von über  $180^\circ$  auftreten können.

Der Typus I —  $G = 0,75$  — der einer schwachen Zirkulation und rascher Translation entspricht und keine gekreuzten Stämme aufweist, kommt für den vorliegenden Fall nicht in Frage und ist auch im Gelände sehr schwierig zu erkennen.

Der Typus II — etwa  $G = 1$  bis  $G = 3,5$  — zeigt schon stärkere Konvergenz und für größere Ablen-

	Form a $\alpha \cdot 0^\circ$	Form b $\alpha \cdot \text{ca. } 30^\circ$	Form c $\alpha \cdot \text{ca. } 60^\circ$	Form d $\alpha \cdot 90^\circ$	Spurtypen
Typus I					
Typus II					Form f $\alpha \cdot 150^\circ$
Typus III					
Typus IV					

Abbildung 27  
Spurtypen nach Letzmann

kungswinkel auch stellenweise gekreuzte Stämme, jedoch findet man in der singulären Linie immer noch den Stamm mit  $\psi = 0$  vor.

Erst der Typus IIIc zeigt ein direktes Überschneiden der beiden verschiedenen Stromrichtungen, wobei in der Nähe der Konvergenz kein Winkel  $\psi = 0$  oder nahe 0 mehr vorkommt. Diesem Typus entspricht etwa  $G = 6$ .

Am nächsten kommen den theoretischen Spurbildern dieser Art die Schadensbilder der Abschnitte Zelch e und b, sowie Zelch c, außerdem Brändlein und Bretzengraben.

So kann man in Abt. Zelch b durch den Punkt des Auftreffens der nordöstlichen auf die südliche Strömung (s. a. Abb. 23) eine singuläre Linie etwa in Richtung N 70° E (Translationsrichtung) annehmen und senkrecht dazu von Zelch b nach Zelch c eine Querlinie ziehen. Diese entspricht dann ziemlich getreu dem Spurbild von IIIc, d. h. einem Wirbel mit  $G_{\text{max}} = 6$  und  $\alpha = -60^\circ$ , genau genommen einer Spur, die durch Benutzung einer Isotache mit einer großen kritischen Geschwindigkeit (= Bruchgeschwindigkeit)  $v = 6v_r$  gewonnen wird (s. dazu Abb. 28, entnommen aus 'S. 99).

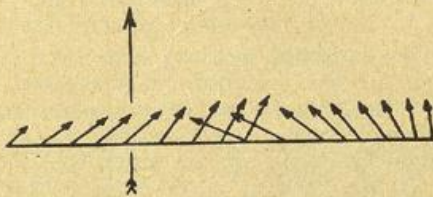


Abbildung 28  
Theoretisches Spurbild für  $\alpha = -60^\circ$ ,  $v = 6v_r$

Der Ablenkungswinkel  $\alpha = -60^\circ$  bedeutet, daß der Wirbel in nordzyklonalem Sinne drehte. (Positive Drehung mit Einströmen).

Die Spuren zu Beginn des Wirbelfeldes in Abteilung Brändlein, die Teile in Abt. Zelch c und südlicher Teil in Zelch f sowie nördlicher Höllgraben am Ende des ersten Zweiges weisen auf diesen Typus hin. Die Formen e und f der Typenbilder, die in allen Typen auftreten können, sind auch in fast allen Spurbildern in Divergenzen zu erkennen.

Prof. Letzmann, der Leiter der Forschungsstelle für atmosphärische Wirbel, dem eine Gesamtbearbeitung zur Verfügung gestellt wurde, stellte von einigen Spurbildern Spuranalysen her, diese zeigen im einzelnen Stromlinien, Konvergenz- und Divergenzlinien. Bei

dem stark turbulenten Feld ist die Festlegung der — dann im Bilde gestrichenen — Linien im einzelnen oft unsicher, im ganzen ergeben die Analysen jedoch recht interessante Aufschlüsse.

Danach handelt es sich hier um einzelne zum Teil nur kurz am Erdboden zur Auswirkung gekommene Wirbelstöße.

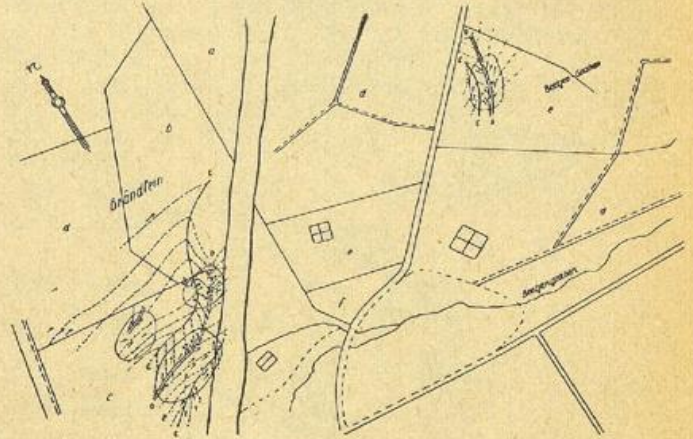


Abbildung 29  
Spuranalyse nach Letzmann: „Brändlein c“, „Bretzengraben e“  
1:5 000

Die Wirbelstöße Brändlein c und Bretzengraben e zeigen langsame Translation (etwa 10m/sec.) in Richtung etwa der Autobahn.

Die Abschnitte Zelche e und b lassen besonders in einzelnen Teilen (s. umrahmtes Feld A in Zelch, Abb. 30) einen Wirbelstoß von etwa 250 m Breite und 600 m Länge, Zugrichtung etwa N 70° E, also unter einem Winkel von etwa 40° gegen die Autobahn erkennen. Das gesamte Gebiet Zelch bis nördlicher Höllgraben zeigt trotz der Auflösung der Bruchflächen in viele Teilflächen und Nester (etwa 12) eine Reihe von kürzeren Konvergenz- und Divergenzlinien, die sich mehr oder weniger deutlich in der Zugrichtung aneinander schließen (s. b. flankierende D-Linien und mittlere C-Linie im Feld A). Abweichungen von theoretischen Spurbildern zeigen sich hier bei den — allerdings auch schon in anderen Fällen, die der Forschungsstelle vorliegen — rechtsseitig begleitenden D-Linien und der Neigung zur Ausbildung linksseitiger D-Linien. Sie gehören mit zum Wirbelfeld als dessen Außengrenze und sind noch Gegenstand der Untersuchung.

Besonders zu erörtern sind die Spurbilder aus Abt. Hohenlinde a (Abb. 1:1000 Nr. 31) und Abt. Zelch f nördlicher Teil, wo, wie besonders im ersten Fall, auch Fallrichtungen über 180° vorkommen (s. a. Abb. 21). Solche Bilder finden sich im Typus IV. Ein Wechsel von Typus III in Typus IV ist nicht ungewöhnlich (S. 118, 119). Er bedeutet im allgemeinen eine Verminderung der translatorischen oder eine größere Verstärkung der Rotationsgeschwindigkeit. So könnte eine Verlangsamung der Translationsgeschwindigkeit im Falle Hohenlinde a durch den früher beschriebenen Geländeanstieg verursacht worden sein. Der Fall Abt. Zelch f weist nur wenig Würfe nach SSW auf, jedoch ist nördlich des Brunnerweges eine allgemeine Verstärkung der Wirkung zu verzeichnen, die mit einer Vergrößerung der Rotationsgeschwindigkeit das Bild des Typus IV verursacht haben könnte.

Die Wirbelung Hohenlinde a zeigt mit das interessanteste Spurbild überhaupt. Es liegt im Winkel der beginnenden — und schon weiter oben beschriebenen — Aufspaltung des großzügigen Stromes in einzelne Zweige. Genaue Beschreibung dieses Schadens er-

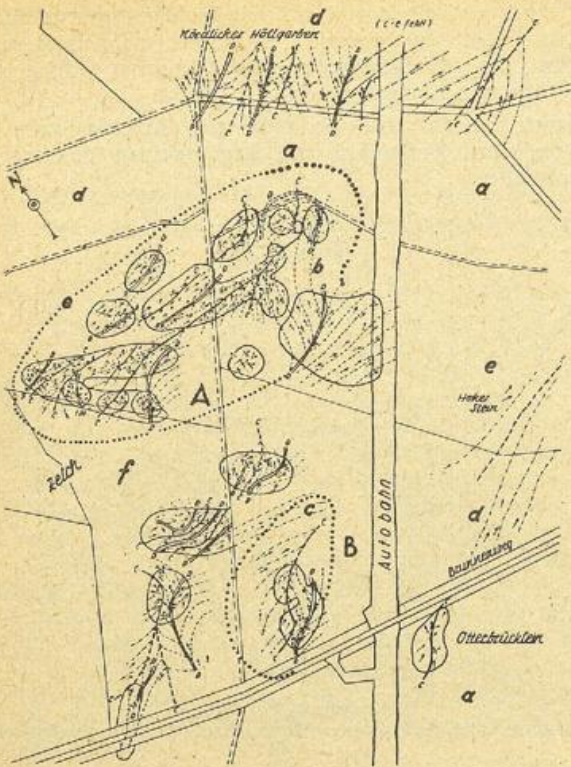


Abbildung 30  
Spuranalyse nach Letzmann: „Zelch“ 1:5 000

folgte bereits in Abschnitt III a. Es handelt sich hier um einen kurzdauernden, fast stillstehenden Wirbelstoß, bei dem  $v_r$  stark überwiegt. Das Feld selbst (Abb. 31) zeigt 2 gegenläufige D-Linien und die den Kern umschließende C-Linie (gute Übereinstimmung

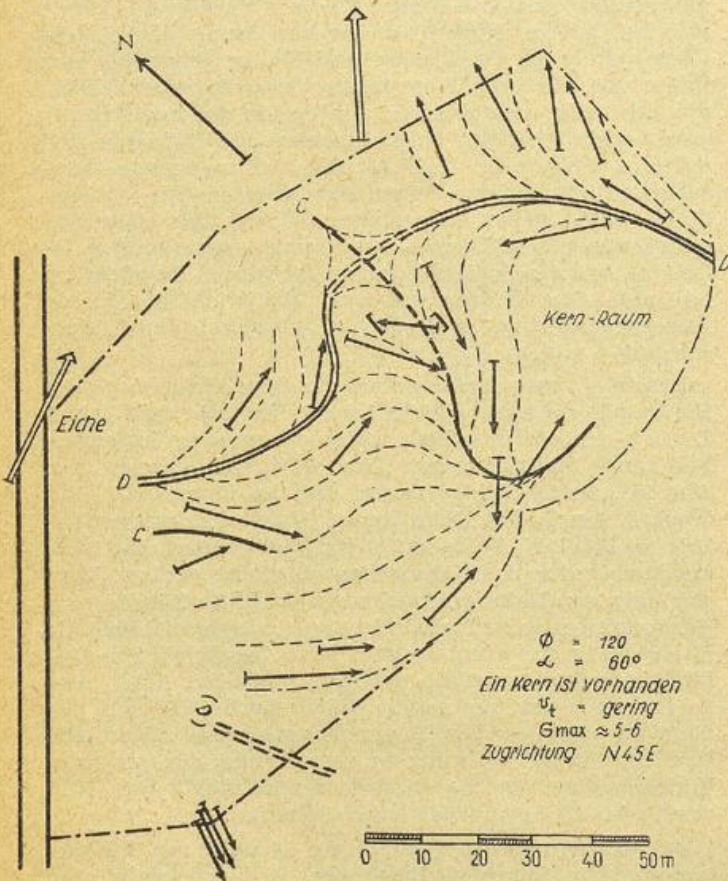


Abbildung 31  
Spuranalyse nach Letzmann: „Hohenlinde a“ 1:1 000  
Alle geworf. Bäume sind eingezeichnet und vermessen worden

mit einem theoretischen Analysenbild [S. 59 Fig. 13 c]). Der Durchmesser beträgt etwa 120 m,  $G = 5 - 6$ ,  $\alpha = -60^\circ$  Zugrichtung N 45 E

Den kleinen im Jungholz auftretenden Nesterbrüchen der Abteilung Hohenlinde und Zelch ist vermutlich als Wirbelelement kleinerer Ordnung ein Eigenleben zuzuschreiben, wie weiter unten dargelegt werden soll.

Auch der zweite Zweig Otterbrücklein — Hoherstein — Wässerung zeigt einzelne Wirbelungen, u. a. den besonders hervortretenden Fall Wässerung b (Abb. 32), einen gleichfalls stillstehenden Wirbelstoß mit einer herabsteigenden Bewegung. Das Analysenbild läßt einen deutlich divergenten Wirbel mit aufgerollter D-Linie erkennen. Eine solche absteigende Bewegung ist an dieser Stelle — am oberen Rand einer Geländestufe — nicht ganz zu erklären. Vielleicht handelt es sich aber um einen kleineren — durch die Geländehebung vorzeitig zum Absturz gebrachten — Kaltluftkörper im Sinne des Böenmodelles nach Faust (dazu Näheres in Abschnitt VII Ende).

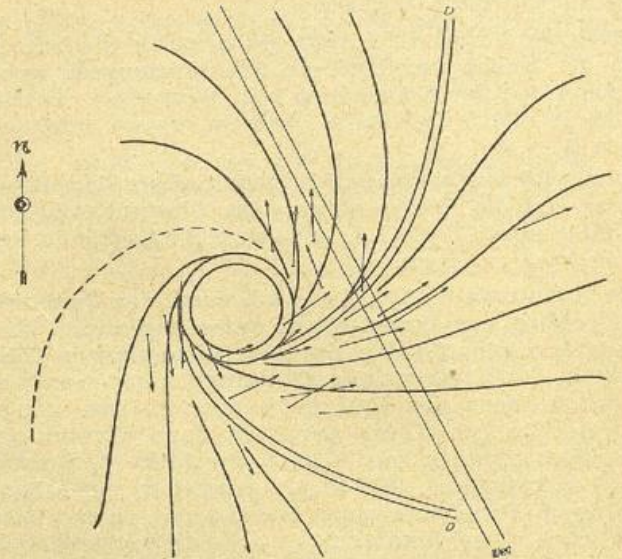


Abbildung 32  
Spuranalyse nach Letzmann: „Wässerung b“ 1:1 000

Im übrigen sprechen gewisse Anzeichen dafür, daß auch sonst in den weiteren untersuchten Gebieten außerhalb Fischbach-Brunn Wirbelungen aufgetreten sind, so beispielsweise im Fischbachtal südlich des Schmausenbuckrückens, wo bei einer Reihe von Schäden (Abb. 20 Nr. 28, 29 u. a.) oder im Gebiet Burgersrangen-Diepersdorf rotationsbedingte Konvergenzen festzustellen sind.

Bevor einer Erklärung der Gesamterscheinungen aus dem thermodynamischen und dynamischen Geschehen versucht wird, soll eine Abschätzung der Windgeschwindigkeit  $v$  aus der Windkraft vorgenommen werden, da damit aus der gefundenen Beziehung  $v = 6v_t$ , die Translationsgeschwindigkeit der Wirbel ermittelt werden kann.

#### V. Abschätzung der Windgeschwindigkeit $v$ aus der Windkraft mit Hilfe einzelner Windbrüche.

Die Abschätzung der kritischen Geschwindigkeit  $v$  an einer bestimmten Stelle des Wirbelfeldes erfolgt durch Berechnung der Windkraft, die zu dem Bruch führte, unter ganz bestimmten Voraussetzungen, die durch die Abmessung des Bruches und des Baumes gegeben sind. Die Rechnung soll möglichst alle in Frage

kommenden Faktoren wie wirksamer Querschnitt, Drehmoment der Windkraft, Eigendrehmoment des Baumes, spezifische Materialkonstanten für die Baumart, Winkel, unter dem der Bruch erfolgte, berücksichtigen, um möglichst viele Fehlerquellen auszuschalten und repräsentative Werte zu erhalten.

Es soll zunächst der theoretische Gang der Rechnung dargelegt werden.

Man behandelt die Biegung eines Baumes als Biegung eines an einem Ende eingespannten freien Trägers<sup>12</sup> (Band 1 Absch. 6). Dabei ist zu beachten, daß im allgemeinen der Bruch nicht am Erdboden erfolgt, sondern in einer gewissen Höhe. Deshalb wird der Baum bis zur Bruchstelle als starres System aufgefaßt. Die charakteristischen Längen des Biegevorganges werden von der Bruchstelle ab gemessen.

Man bezeichne das Gesamtdrehmoment, das den Bruch hervorruft, als Bruchdrehmoment. Das Bruchdrehmoment setzt sich zusammen aus dem Drehmoment der angreifenden Windkraft und dem Eigendrehmoment des Baumgewichtes.

$$D = D_W + D_E$$

Das Bruchdrehmoment  $D$  denke man sich dargestellt als das Produkt einer am Kronenansatz senkrecht zur Baumachse angreifenden Kraft mit dem Abstand  $l$  der Bruchstelle vom Kronenansatz. Es ist (12, S. 198):

$$(1) \quad D = \frac{\pi K}{4} r^3$$

Dabei ist  $K = K_{max}$  die Biegungsbruchspannung eine Materialkonstante des Holzes,  $r$  der Radius des Baumes an der Bruchstelle.

Das Eigendrehmoment des Baumgewichtes  $D_E$  als Eigenbruchdrehmoment bezeichnet, setzt sich zusammen aus dem Eigenbruchdrehmoment  $D_S$  des Stammes und dem Eigenbruchdrehmoment  $D_K$  der Krone.

$$D_E = D_S + D_K$$

Es folgt die Berechnung von  $D_S$ . Im folgenden wird die Variable  $x$  benutzt. Sie ist eine Länge gerechnet von der Bruchstelle in Richtung zur Baumspitze. Es ist  $x = l$  für den Kronenansatz. Da der Radius des Baumes mit der Höhe veränderlich ist, muß ein mittlerer Wert angenommen werden. Man wählt zweckmäßigerweise den zu  $2/3 l$  gehörigen Wert des Radius, um dem mit wachsender Höhe größeren Drehmoment Rechnung zu tragen. Der Baumstamm bis zum Kronenansatz ist dabei als Kegelmast zu denken. Es ist

$$\bar{r} = r_1 + \frac{r_0 - r_1}{3}$$

$r_0$  ist dabei der Radius einer Bruchstelle.

Bei der Berechnung von  $D_S$  und  $D_K$  muß man einen Biegungsbruchwinkel berücksichtigen. Es ist dies der Winkel  $\beta$  zwischen einer durch die Bruchstelle und den Kronenansatz gehenden Geraden und der Vertikalen. Er wird zu etwa  $20^\circ$  angesetzt, eine Schätzung, die man durch eine Überschlagsrechnung aus der Formel für den Biegungspfeil<sup>12</sup> (S. 186, Formel jedoch für zylindrischen Querschnitt umgebildet) erhalten kann.

Ist  $\gamma$  das spezifische Gewicht des Holzes, so ergibt sich also

$$(2) \quad D_S = \gamma \sin \beta \int_0^l \pi x dx = \frac{\pi}{2} \gamma \sin \beta \bar{r}^2$$

Das Eigenbruchdrehmoment  $D_K$  stellt man annähernd dar als das Produkt aus der Länge  $l$  und dem mit  $\sin \beta$  multiplizierten Kronengewicht  $G_K$ .

$$(3) \quad D_K = \sin \beta G_K l$$

Als Windbruchdrehmoment  $D_W$  bezeichnet man das Drehmoment der angreifenden Windkraft im Augenblick des Bruches. Der Bruch wird im wesent-

lichen durch das Angreifen des Windes in der Baumkrone hervorgerufen werden. Bei Föhren wird es zweckmäßig sein, sich die gesamte Baumkrone, insbesondere wenn sie schon etwas geneigt ist, durch eine wirksame Kugel ersetzt zu denken. Da die Krone kein kompaktes Gebilde darstellt, ist man berechtigt, das wirksame Kugelvolumen etwas kleiner zu wählen, als dem wirklichen Kronenvolumen entspricht. Es wurde bei Föhren der Radius  $R = 1/3 b_{Kr}$  angesetzt, wobei  $b_{Kr}$  die Kronenbreite bedeutet. Beispielsweise wird einer Krone von 4 m Höhe, deren Zweige höchstens 1,5 m vom Stamm abstehen, eine wirksame kompakte Kugel mit einem Durchmesser von 2 m zugeordnet. Den Mittelpunkt der Kugel verlege man außerdem in halbe Kronenhöhe.

Die Windkraft  $P$  denke man sich im Mittelpunkt der Kugel angreifend. Da nun

$$D_W = D \cdot D_S - D_K$$

andererseits

$$D_W = P_v \left( l + \frac{l_{Kr}}{2} \right)$$

$P_v$  = Normalkomponente der Windkraft, ergibt sich

$$(4) \quad P_v = \frac{D_W}{\left( l + \frac{l_{Kr}}{2} \right)}$$

Die Berechnung der Windgeschwindigkeit  $v$  erfolgt nach der bekannten Widerstandsformel für umströmte Körper<sup>12</sup>.

$$(5) \quad P = \frac{P_v}{\cos \beta} = \frac{c \cdot \rho \cdot v^2 \cdot F}{2 \cdot g}$$

Nur die Normalkomponente der Windkraft erzeugt jedoch das Windbruchdrehmoment. In der obigen Formel erscheint daher die Windkraft  $P_v$  noch durch  $\cos \beta$  dividiert.

Für die Dichte  $\rho$  wurde der Wert für  $t = 24^\circ$ ,  $p = 735$  mm,  $e = 15$  mm genommen<sup>13</sup> (S. 229).  $\rho = 1,115$ . Für den Querschnitt  $F$  nimmt man den Querschnitt der wirksamen Kugel.

Durch Umstellung folgt

$$(6) \quad v = \left( \frac{2 \cdot g \cdot P_v}{c \cdot \rho \cdot F \cdot \cos \beta} \right)^{1/2}$$

Es wurden zur Berechnung drei jeweils für ihre Umgebung typische Bäume und zwar Föhren mit Brüchen ausgewählt. Aus Zelch f, Zelch c Mitte und Zelch b (Punkte, Abb. 21). In jeder der Abteilungen waren mehrere ähnliche Bäume gebrochen. Die Ausmaße wurden teils gemessen, teils — so das Gewicht — von Förstern geschätzt. Die Materialkonstanten für Kiefer (spezifisches Gewicht und Biegungsbruchspannung) wurden dem technischen Hilfsbuch von Schuchardt und Schütte, 146. Aufl. 1923, S. 112, entnommen. Für die Widerstandsbeizahl  $c$  der Formel 6 wurde der Wert  $c = 0,5$  einer Kugel verwendet.

Abmessungen	Zelch f	Zelch c Mitte	Zelch b
Bruch in m-Höhe	5 m	4 m	3 m
Abstand Bruch-Kronenansatz	17 m	19 m	18 m
Kronenhöhe	$l_{Kr}$ 4 m	5 m	5 m
Kronenbreite	$b_{Kr}$ 3 m	4 m	2,5 m
Kronengewicht	$G_{Kr}$ 100 kp	120 kp	75 kp
Radius Bruchstelle	$r_0$ 0,10m	0,125m	0,10m
Radius Kronenansatz	$r_1$ 0,06m	0,075m	0,06m
Mittl. Baumradius	$\bar{r}$ 0,07m	0,09 m	0,07m
Wirksame Kugel	$R$ 1 m	1,34 m	0,85m
Spéz. Gewidr Fohre	700 kp/cbm		
Biegungsbruchspannung	$K$ $4,7 \cdot 10^6$ kp/m <sup>2</sup>		

Ergebnisse	Zelch f	Zelch c Mitte	Zelch b
Bruchdrehmoment $kp \cdot m$	3691,5	7210,0	3691,5
Eigenbruchdrehm. $DS$	532,7	1100,0	597,3
Eigenbruchdrehm. Krone $DK$	581,3	780,0	461,8
Windbruchdrehm. $DW$	2577,3	5330,0	2632,4
Windkraft $kp/m^2$	$P_v$	135,6	247,9
Windgeschwindigkeit $V$	57 m/sec	58 m/sec	65 m/sec

Die Ergebnisse sind trotz verschiedener Abmessungen, insbesondere auch der verschiedenen Gewichte und Radien der Bäume, sehr ähnliche.

Abschließend wird als  $v$  rund 60 m/sec angenommen.

Die Translationsgeschwindigkeit  $v_t$ , beispielsweise für die Wirbelung von Zelch erhält man aus der früher gefolgerten Beziehung  $v = 6v_t$  zu

$$v_t = 10 \text{ m/sec}$$

Die gesamte Berechnung kann nur als Abschätzung betrachtet werden. Insbesondere wäre es wünschenswert, für ähnliche Fälle so etwas wie eine „Widerstandsbeizahl  $c$ “ für Bäume verschiedener Kronengröße und Art zur Hand zu haben, die in der Formel für  $v$  eine Rolle spielt. Der Ersatz durch eine wirksame Kugel kann nur an einigermaßen gleichmäßigen Bäumen nach der oben angegebenen Weise mit Aussicht auf ein brauchbares Resultat durchgeführt werden.

Auch soll nicht verkannt werden, daß es noch nicht möglich ist, den Einfluß der Eigenschwingungen der Bäume auf das Eintreten von Brüchen genauer zu erfassen. Vielleicht ist es möglich, empirisch die obige Konstante  $c$  zu bestimmen und gleichzeitig diesen letztgenannten Einfluß mit hineinzunehmen.

Das Ziel wäre, die Bruchfestigkeit — vielleicht in Verbindung mit der Arbeit von *Faust*<sup>4</sup> auch die Standfestigkeit der einzelnen Baumarten mit einer spezifischen Windstärke in Verbindung zu bringen.

### VI. Die Erklärung der trombenartigen Wirbelstöße aus dem thermodynamischen und dynamischen Geschehen.

Zur Lösung der im Zusammenhang mit dem Wirbelfeld längs der Autobahn auftretenden Fragen sollen zunächst Trombentheorien herangezogen werden.

Es sind bekannt die kinematische Theorie von *A. Wegener*<sup>15</sup>, die von der Vorstellung eines horizontalen Mutterwirbels als einer Ansammlung von Gleitwirbeln in der Höhe mit zum Boden herabhängenden Enden ausgeht, und die thermodynamische Theorie\*, die *Koschmieder* in seiner Abhandlung „Über Tromben“<sup>16</sup> dargestellt hat, die jedoch schon auf *Reye*, *Ferrel*, *v. Bezold* zurückgeht. *Koschmieder* machte darauf aufmerksam, daß die kinematische Theorie *Wegeners* vor allem der Energiefrage nach nach den heutigen Erkenntnissen nicht mehr zu halten ist. Sie soll daher hier im allgemeinen unberücksichtigt bleiben.

Nach *Koschmieder* werden Tromben dadurch ausgelöst, daß in einer stark feuchtilabilen Troposphäre mit eingelagerten Inversionen ein besonders großes und warmes Luftpaket von etwa 500—1000 m Durchmesser nach dem Durchstoßen der untersten Inversionsschicht in dem darüber liegenden Raum eine

\*) Ergänzende Bemerkungen zur thermodynamischen Theorie gaben in neuerer Zeit *G. Swoboda*<sup>26</sup> und *F. H. Schmidt*<sup>27</sup>. Während *Swoboda* die Zunahme der Feuchtilabilität als Ursache für das Aufschießen der Wolkenpakete erörtert, erklärt *Schmidt* unter Hinweis auf Gedankengänge von *Beers* die extrem starke Aufwärtsbeschleunigung durch die plötzliche Vereisung großer unterkühlter Wassermassen.

Eine völlig neue Theorie der Wolkentromben die einen herabsteigenden Luftstrom zugrunde legt, stellte *F. Roßmann*<sup>28</sup> und <sup>29</sup> auf.

sprunghaft große Vertikalverschiebung erfährt, insbesondere wenn der Abstand zwischen der ersten und zweiten Inversion, wie im vorliegenden Falle, recht groß ist (Abb. 11). Infolge der Trägheit der am Boden mit großer Geschwindigkeit (50—100 m/sec) nachstürzenden — vorher benachbarten — Luftmassen, die Wege bis zu 1 km zurücklegen, entstehen starke, horizontale Druckunterschiede und im Zentrum des Wirbels eine starke Druckerniedrigung. Wesentlich ist, daß nun beim Einströmen der Luftmassen nach dem Zentrum eine irgendwie schon vorhandene Asymmetrie des Stromfeldes am Boden eine Drehbewegung einleitet und diese im Verein mit der durch die Bahnkrümmung einsetzenden Zentrifugalkraft den radialen Druckausgleich verhindert. Die Wirbelbewegung wird dann so lange am Leben erhalten, als die Vertikalbewegungen in der Höhe für hinreichenden Abfluß der in Bodennähe einströmenden Luft sorgen.

Zur Erklärung der Tromben sind nach *Koschmieder* im Vergleich zur Situation bei gewöhnlichen Gewitterwolken nur graduelle Unterschiede des thermodynamischen Aufbaues notwendig, also ungewöhnlich starke und besonders ausgedehnte Aufwärtsbewegungen. *Koschmieder* verweist auf Segelflugerfahrungen, die in gut ausgebildeten Cumulonimben noch in 5000 m Höhe einen Aufwind von 25 m/sec auf einer größeren Fläche als dem kleinen Trombenquerschnitt ergeben, die im Cumulonimbus erzeugte Energie reiche also wohl gelegentlich aus, eine Trombe zu erzeugen. Insbesondere seien die Vorstellungen von *Wegener* über einen horizontalen Mutterwirbel im oberen Teil der Wolke zur Erklärung nicht notwendig.

In dem vorliegenden Fall waren thermodynamisch die erforderlichen Voraussetzungen vorhanden. Der Frühaufstieg von Erlangen (Abb. 11) besitzt, wie oben angezeigt, die stärkste Labilität mit einem durchschnittlichen Gradienten von 0,75°/100 m. Stückweise zeigt er noch größere Gradienten, so über der unteren Inversion bei 1000 m mit 1° und über der oberen Inversion bei 5000 m noch 0,85°/100 m. Labil ist der Aufstieg bis zur Tropopause. Die Gesamtlabilitätsenergie beträgt nach einer Auswertung des Erlanger Aufstieges von 3 Uhr auf Emagrammpapier 3358 Joule = 342 kpm pro Masseneinheit kg.

Eine Berechnung der Druckerniedrigung am Boden aus der Beschleunigung der aufschießenden Luftquanten, also letzten Endes aus der Temperaturverteilung nach dem Erlanger Aufstieg, erwies sich als nicht durchführbar, da im Falle trombenartiger Wirbelungen vertikale Druckgradienten auftreten, die nicht mehr durch die Schwerkraft kompensiert sind.

Die Tatsache, daß die größten Hagelstücke von 5 cm Durchmesser in unmittelbarer Nähe im Stadiongelände beobachtet wurden, zeigt, daß sich der der Autobahn von SW her nähernde Cumulonimbus im Zustand stärkster Entwicklung befand. Man kann also sehr wohl annehmen, daß größere überhitzte Luftpakete aus dem Autobahngelände unter einem Winkel von 50° — dies entspricht den räumlichen Verhältnissen — in die Vertikalströmung einbezogen wurden und nach dem Durchstoßen der unteren Inversion die Druckerniedrigung am Boden auslösten.

Aber auch die Vorbedingung einer Asymmetrie des Stromfeldes am Boden, die die Drehbewegung oder die Drehbewegungen einleitete, war durch die Autobahn gegeben. Von entscheidender Bedeutung war das Ansaugen der Warmluft im Moment der Annäherung des energispendenden Cumulonimbus. Die Autobahn wirkte für diesen verstärkten Warmluftstrom führend, wobei sich die Führung wohl nur auf Luftmassen innerhalb der Reibungsschicht erstreckt haben mag. Die angesaugte Warmluft erlangte eine besondere Wirksamkeit beim Auftreten der star-

ken Vertikalströmung im NW der Bahn im Felde des bodennahen Zusammenströmens. Hier wurde die erste Wirbelbildung veranlaßt — etwa Abteilung Brändlein, Nähe Fischbach — und immer wieder längs der Autobahn auf der nordwestlichen Seite verstärkt und auf diese Weise den Rotationen d. h. den gesamten Wirbelstößen die Bewegungsrichtung durch die Autobahn aufgeprägt. Die eigentliche Rotation mag jedoch vertikal viel mächtiger geworden sein und weit über die relativ flache durch die Autobahn geführte Strömung hinausgegriffen haben.

Obwohl also nach *Koschmieder* alle thermodynamischen Vorbedingungen für eine Trombe auch im vorliegenden Fall vorhanden waren, vermißt man doch das Bild einer einheitlichen breiten Trombenspur. Das Wirbelfeld an der Autobahn macht vielmehr einen recht turbulenten Eindruck.

Auf Grund experimenteller Wirbelforschungen<sup>17</sup> fand *Letzmann* das Zusammenwirken von Wirbelung und Vertikalstrom. Ein stabiler Wirbel entsteht, wenn eine allgemeine Wirbelung, von einem Vertikalstrom überlagert wird und besonders dann, wenn der Vertikalstrom zentriert angeordnet ist. *Letzmann* selbst würde von einer Koinzidenz- oder Zentrierungstheorie für atmosphärische Wirbel sprechen\*).

Er betrachtet die mächtige thermodynamische und die dynamische Wirbelkomponente in ihrer Zusammenwirkung. Diese Theorie wäre aufs engste verwandt mit der allgemeinen thermodynamischen Theorie.

Man kann sich eine vollkommene und unvollkommene Koinzidenz vorstellen. Mit dem letzten Begriff kann nun hier die Tatsache erklärt werden, daß keine einheitliche breite Bruchfläche als Spur einer voll ausgebildeten Trombe festgestellt werden konnte, ja vielfach eine Auflösung in viele Teilflächen oder Nester zu sehen ist und z. B. eine Konvergenzlinie im Gebiet des Zelch nur mit Unterbrechungen verfolgt werden kann. Bei der unvollkommenen Koinzidenz ist die beständige Komponente die Vertikale und mit ihr der Sog, die veränderliche — im vorliegenden Beispiel — die Rotation in der untersten Luftschicht. Allerdings legt uns wohl die Vorstellung einer unvollkommenen Koinzidenz die Beschränkung auf, daß eine solche unvollständige Trombe nicht bis in sehr große Höhen zur Entwicklung kommen konnte.

Eine ziemlich vollkommene, aber nur sehr kurz wirkende Koinzidenz ist beispielsweise bei dem fast stillstehenden Wirbel in Abteilung Hohenlinde a festzustellen. Hier lag verstärkte Vertikalbewegung durch die erwähnte mehrstufige Bodenerhebung vor und ein einleitendes Drehmoment konnte leicht durch den aus der Abteilung Schüsselstein weiter im Westen herankommenden Böenstoß und den Warmluftstrom der Autobahn gebildet werden.

In dem gesondert liegenden Falle dieser Untersuchung kam es zu mehr oder weniger unvollkommener Koinzidenz der durch die Temperaturasymmetrie der Autobahn begünstigten bodennahen Rotationserscheinungen mit der kräftigen Vertikalströmung, während u. E. in vielen anderen untersuchten und gut ausgebildeten Trombenfällen im Gegensatz dazu Koinzidenz zwischen einem Gleitwirbel in der Höhe — beispielsweise in einer Isentropenfläche durch Windschichtung entstanden oder als Grenzwirbel am Rande eines aufschießenden Gewitterturmes — und einer kräftigen Vertikalströmung wirksam gewesen sein mag. Vollkommene Koinzidenz und damit vollausgebildete Tromben scheinen jedenfalls leichter durch Rotationserscheinungen aus der freien Atmosphäre her angeregt zu werden, als durch solche des vielfach gestörten Bodenfeldes.

\*) Nach einer brieflichen Mitteilung.

Abschließend sei das Ergebnis der bisherigen Untersuchung noch einmal herausgestellt:

Die besonders kräftig ausgebildete Vertikalbewegung in einer Böenfront führte beim Zusammentreffen mit einer im vorliegenden Falle durch die Autobahn geführten Warmluftströmung zur Ausbildung von trombenartigen Wirbelstößen. Sie zeigen eine Auflösung ihrer Einheitlichkeit im Sinne einer zunehmenden Turbulenz.

#### VII. Versuch einer Anwendung der neueren Erkenntnisse der statistischen Turbulenztheorie insbesondere im Hinblick auf den Austausch als Maß der Turbulenzstärke.

Eine Reihe von Veröffentlichungen des In- und Auslandes, gerade der jüngsten Zeit, zeigen, daß das Turbulenzproblem durch eine statistische Behandlungsmethode eine gewisse Endlösung gefunden hat. Eine kurze, aber recht aufschlußreiche Einführung und einen Überblick über die Problemstellung findet man in einem Aufsatz von *Heisenberg* in der Zeitschrift für Naturforschung<sup>18</sup>. Im folgenden wird im wesentlichen auf die Ergebnisse zweier Arbeiten von *v. Weizsäcker*<sup>19</sup> und *Heisenberg*<sup>20</sup> zurückgegriffen.

In dem hier untersuchten Falle wurde, wie gezeigt, im Bereich der Autobahn durch einen Cumulonimbus der Böenfront ein recht turbulentes Feld erzeugt, das zum Teil der Ausmessung zugänglich war und über dessen Energieverhältnisse aus den Angaben des Erlanger Radiosondenaufstieges gewisse Rückschlüsse gezogen werden können.

Zunächst sei etwas über die Theorie selbst gesagt. Bei einem statistisch betrachteten Wirbelfeld fragt man nach der spektralen Verteilung der Energie auf die verschiedenen Wellenzahlbereiche des Wirbelfeldes. Es wird dabei die Größe eines Teilwirbels mit einem mittleren Durchmesser  $L$  in Analogie zur Optik durch die sog. Wellenzahl  $k$  charakterisiert, es ist

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Unter Umständen befindet sich nun das Wirbelfeld in einem stationären Zustand, d. h. man hat eine spektrale Gleichgewichtsverteilung der Energie. Dabei wird dauernd von einem Energiespender Energie an die Wirbel kleinster Wellenzahl abgegeben. Von diesen Wirbeln wandert die Energie in Wirbel immer größerer Wellenzahl und wird schließlich in Reibungswärme verwandelt. Dieser Energietransport bleibe zeitlich unverändert in Aktion.

Um das Wirbelfeld einer mathematisch-statistischen Behandlung zugänglich zu machen, muß es annähernd stationär sein. Gleichzeitig muß es auch noch eine andere Bedingung erfüllen, nämlich die Isotropie. Es muß also unabhängig von der räumlichen und zeitlichen Anordnung sein. Als isotrop in einem gewissen Wellenzahlenbereich wird das Wirbelfeld bezeichnet, wenn in diesem Bereich der quadratische Mittelwert einer Komponente der Geschwindigkeit unabhängig ist von der gewählten Koordinatenrichtung.

Das statistische Gleichgewicht wird im vorliegenden Falle durch einen Cumulonimbus der Böenfront herbeigeführt, der in einem relativ langen Zeitraum das umgebende Medium wie ein „Rührer“ umrührte und turbulent machte.

Im allgemeinen wird nun bei keinem durch einen Rührvorgang erzeugten Wirbelfeld im Bereich der kleinsten Wellenzahlen — also großen Wellenlängen — Isotropie vorhanden sein, weil hier die Geschwindigkeit bei großer Wellenlänge zu sehr von der Geometrie des Rührers abhängig ist. Die statistische Turbulenz-

theorie zeigt jedoch, daß von einer gewissen Wellenzahl ab das Wirbelfeld wieder isotrop wird. Es wird dann isotrop bleiben, bis zu jenen Wellenzahlen, bei denen die molekulare Zähigkeit des Mediums beginnt sich bemerkbar zu machen. Der eben erwähnte Bereich ist sozusagen von den Bereichen kleinster und größter Wellenzahlen statistisch entkoppelt.

Stellt man sich den als „Rührer“ wirkenden Turbulenzkörper des Cumulonimbus etwa als Zylinder mit einem Durchmesser von 10 km und einer Höhe von 10 km vor, so wird das erzeugte Wirbelfeld des Autobahngeländes in einem gewissen Bereich isotrop sein. Der Bereich dürfte durch die Grenzen einige hundert Meter bis wenige Zentimeter dargestellt sein. Die Durchmesser von etwa 250 m, 50 m und 10 m werden durch Waldschäden sichtbar, während die Annahme der Höhe des Cumulonimbus durch den Erlanger Temp eine gewisse Berechtigung erfährt.

Einige formelmäßige Ergebnisse der Arbeiten von Heisenberg und Weizsäcker ergeben sich wie folgt:

Beim Überschreiten einer gewissen, der sog. kritischen Geschwindigkeit der Strömung

$$(1) \quad v_s = \frac{R_s \mu}{\rho L_s}$$

— wobei  $R_s$  die kritische Reynoldssche Zahl,  $\mu$  die molekulare Zähigkeit und  $L_s$  die Grenzwellenlänge<sup>20</sup> (S. 638) bedeuten — wird die Strömung turbulent.

Für den Bereich sehr kleiner Reynoldsscher Zahlen hat Heisenberg das Spektralgesetz der Energieverteilung

$$(2) \quad F(k) \text{ prop. } k^{-7}$$

aufgestellt. Dabei ist  $F(k)$  eine Funktion der Geschwindigkeitsverteilung, die durch Entwicklung der Geschwindigkeit  $v$  in eine Fourierreihe gewonnen wird. Der Energieinhalt, der auf alle Turbulenzelemente übergeht, deren  $L$  kleiner als  $L_k$  ist, ist dann

$$(3) \quad E_k = \rho \int_k^\infty F(k) dk$$

Die Gültigkeit dieses Gesetzes ist nach kleinen Wellenlängen hin begrenzt. Die Grenze liegt dort, wo die sog. turbulente Zähigkeit<sup>18</sup> mit der molekularen Zähigkeit vergleichbar wird. Das tritt etwa ein für  $R = 20$  und  $L_s$  Größenordnung mm.

Für mittlere Wirbellängenbereiche  $k$  — d. h. solche, die klein sind gegen die größten und groß sind gegen die kleinsten, die also statistisch „entkoppelt“ sind — fand *v. Weizsäcker*<sup>19</sup> (S. 621) das Spektralgesetz

$$(4) \quad \frac{v_k}{v_0} = \left(\frac{L_k}{L_0}\right)^{1/3}$$

d. h. die mittlere Relativgeschwindigkeit eines Turbulenzelements variiert wie die dritte Wurzel aus seinem Durchmesser.

Heisenberg<sup>20</sup> (S. 629 ff) erhielt in etwas anderer Fassung

$$(5) \quad F(k) = \frac{v_0^2 k_0^{2/3}}{3 k^{5/3}}$$

d. h.  $F(k)$  prop.  $k^{-5/3}$

Diese Gesetze gelten für den Bereich der Reynoldsschen Zahlen.

$$(6) \quad R_k = \frac{\rho \cdot L_k v_k}{\eta_k}$$

Die molekulare Zähigkeit  $\mu$  kann in diesem Falle gegenüber der turbulenten Zähigkeit  $\eta$  vernachlässigt werden.

Die Schwierigkeit in der Anwendung dieser Gesetze auf das betrachtete Wirbelfeld besteht darin, daß die verwendeten Mittelwerte der Geschwindigkeiten nicht

ohne weiteres in der Natur gemessenen Geschwindigkeiten zugeordnet werden können. Die  $v_k$  der obigen Spektralgesetze sind Mittelwerte, die *v. Weizsäcker*<sup>19</sup> (S. 617) dadurch gewinnt, daß er ausgehend von einem Grundvolumen, mit der Geschwindigkeit  $v_0$  durch eine Intervallschachtelung bis zu den Volumina der Bereiche  $k$  mit den Geschwindigkeiten  $v_k$  vordringt und über alle Geschwindigkeiten erstens nach dem Ort und zweitens nach der Zeit mittelt.

Wir werden jedoch im folgenden im allgemeinen nicht die Geschwindigkeiten, sondern die Energien benutzen.

Die Energie des Grundvolumens wird von Heisenberg<sup>20</sup> (S. 629) wie folgt definiert

$$(7) \quad E_0 = \frac{\rho v^3}{2} = \frac{\rho v_0^3}{2} = \rho \int_{k_0}^{\infty} F(k) dk$$

dabei ist  $v_0 = \sqrt{v^2}$  ein Maß für die mittlere Geschwindigkeit des Grundvolumens.  $E_0$  ist der Gesamtenergieinhalt pro Masseneinheit, der auf alle Turbulenzelemente kleinerer Ordnung ( $k = k_0$  bis  $\infty$ ) übergeht.

Aus diesem Grunde wird zu Berechnungen später die gesamte für den Cumulonimbus ermittelte Energiemenge von etwa 340 kpm für  $E_0$  eingesetzt.

Der Energieinhalt  $E_k$ , der zur Mitteilung an alle Turbulenzelemente  $L$  kleiner als  $L_k$  verbleibt, ist entweder aus Gleichung (4) oder aus (3) und (5) zu erhalten und es wird

$$(8) \quad E_k = \frac{\rho v_0^2 (k_0)^{2/3}}{2} = E_0 \left(\frac{k_0}{k}\right)^{2/3} = E_0 \left(\frac{L_0}{L_k}\right)^{-2/3}$$

Der Begriff nun, der die meisten Möglichkeiten zu Vergleichen mit der Erfahrung bietet, ist der Begriff des Austausches. Er ist ein Maß für die Turbulenzstärke und vielfach gemessen worden, freilich meist nur für die normalen Ausmessungen eines Turbulenzkörpers von etwa 30—50 m und in der Regel nur seine vertikale Komponente, während die Bevorzugung einer bestimmten Richtung in der statistischen Theorie nicht zulässig ist.

Welche Möglichkeiten bietet nun die statistische Theorie zur Berechnung der Austauschgröße?

Der turbulente Austausch ist zunächst einmal vergleichbar mit der turbulenten Reibung  $\eta$  (bzw. turbulenten Zähigkeit). Eine genauere Zuordnung der beiden Begriffe soll weiter unten besprochen werden. Es gilt für jedes Mittelungsvolumen der Größe  $L_k$  die bekannte kinetische Austauschformel

$$(9) \quad \eta_k = \rho l_k w_k \quad (\eta_k \text{ Zeitmittelwert})$$

wobei  $w_k$  die „turbulente Zusatzgeschwindigkeit“ und  $l_k$  den Mischungsweg der Turbulenzelemente der Größe  $L_k$  bedeutet. Die Gesamtgeschwindigkeit  $v_k$  denkt man sich willkürlich eingeteilt in die „mittlere Geschwindigkeit“  $v_k$  und die „turbulente Zusatzgeschwindigkeit“  $w_k$ .  $v_k$  ist dabei nach *v. Weizsäcker*<sup>19</sup> (S. 619) die Geschwindigkeit, die bei der Mitteilung der Energie auf Turbulenzkörper kleinerer Ordnung von der Gesamtgeschwindigkeit übrig bleibt und  $w_k$  der verschwindende Anteil.

Der turbulente Austausch  $\eta_k$  mißt so den durch  $w_k$  vermittelten Impulsaustausch zwischen Gebieten mit verschiedenen  $v_k$ . Dabei ist nach *v. Weizsäcker*<sup>19</sup> (S. 620, Formel 19)

$$(10) \quad w_k = a \cdot v_k$$

wobei  $a < 1$  von  $k$  unabhängig ist, allerdings nicht unabhängig von der Feinheit der Intervallschachtelung. Es gilt also nach (4) auch für die turbulenten Zusatzgeschwindigkeiten

$$(11) \quad \frac{w_0}{w_k} = \left(\frac{L_0}{L_k}\right)^{-1/3}$$

Ohne Kenntnis von Mischungsweg und Zusatzgeschwindigkeit ist die Berechnung der Austauschgrößen möglich, durch den aus Dimensionsbetrachtungen gewonnenen Ansatz von Heisenberg<sup>20</sup> (S. 631)

$$(12) \quad \eta_k = K \cdot \rho \int_k^{\infty} \sqrt{\frac{F(k)}{k^3}} dk$$

K ist dabei eine Universalkonstante der Turbulenztheorie, die nach Heisenberg<sup>18</sup> etwa den Wert 0,8 hat.

Benutzt man den Ausdruck für F(k) aus (5) und führt die Integration durch, so erhält man

$$(13) \quad \eta_k = K \cdot \rho \frac{3^{1/2}}{4} v_0 k_0^{1/3} k^{-4/3}$$

Hier wird  $v_0$  mit (7) eliminiert und k mit Hilfe von  $k = \frac{2\pi}{L}$  durch L ersetzt. Es wird so

$$(14) \quad \eta_k = \frac{K}{2\pi} \sqrt{\frac{3\rho E_0}{8}} \frac{L_k^{4/3}}{L_0^{1/3}} = \frac{K}{2\pi} \sqrt{\frac{3\rho E_0}{8}} L_0 \left(\frac{L_0}{L_k}\right)^{-4/3}$$

$$(15) \quad \eta_k = \eta_0 \left(\frac{L_0}{L_k}\right)^{-4/3}$$

Damit wird der Austausch der Abschätzung zugänglich, wenn beispielsweise  $E_0$  bekannt ist, oder es ist möglich, aus den anderwärts bestimmten Austauschgrößen von kleineren Turbulenzelementen auf größere zu schließen und umgekehrt.

Schon Lettau<sup>21</sup> (S. 255) weist darauf hin, daß die Turbulenz in der Atmosphäre 12 Zehnerpotenzen der Austauschgrößen umfaßt, von dem Koeffizienten der molekularen Zähigkeit  $\mu = 10^{-4} \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$  bis zum Großaustausch  $A = 10^{-8} \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ .

Hier sollen zunächst die Verhältnisse der Austauschgrößen von Turbulenzkörpern von  $L = 10 \text{ km}$  bis  $30 \text{ m}$  untersucht werden. Als Grundvolumen wird, wie schon oben angedeutet, etwa ein Zylinder mit dem Durchmesser von  $10 \text{ km}$  und der Höhe von  $10 \text{ km}$  betrachtet. Die übrigen Turbulenzkörper denke man sich ähnlich, beispielsweise mit  $L = 250 \text{ m}$  (etwa Wirbelstoß „Abt. Zelch“).

Der Mangel an Isotropie ist übrigens in stark feuchtlabilen Turbulenzkörpern mit Konvektion sicherlich wesentlich kleiner als in stabilen Luftmassen, da hier der vertikale Austausch u. U. die Größenordnung des Horizontalaustausches erhält.

Lettau<sup>21</sup> (S. 190) schätzt die mittleren Mischungswege in einem Cumulonimbus größenordnungsmäßig auf  $10^3 \text{ m}$ , die mittleren vertikalen Zusatzgeschwindigkeiten auf  $1-10 \text{ m/sec}$ , den Austausch auf  $10^4-10^5 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ .

Aus Formel (15) der statistischen Theorie ergibt sich nun hier mit  $E_0 = 340 \text{ kpm}$  (s. Bemerkung Abschn. VI),  $K = 0,8$  und im Mittel  $\rho = 1 \text{ kp/m}^3$ .

$\eta_0 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ kp m}^{-1} \text{ sec}^{-1} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$  was den obigen Schätzungen entspricht.

Für den turbulenten Wirbelstoß in Zelch mit  $L_k = 250 \text{ m}$  ergibt sich

$$\eta_{250} = 1100 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

und für einen Wirbelstoß mit  $L_k = 50 \text{ m}$

$$\eta_{50} = 128 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

Zum Vergleich mit der Erfahrung soll aber der Austauschwert noch weiter „reduziert“ werden, und zwar auf  $L = 30 \text{ m}$ . In einer neueren Untersuchung von E. Frankenger<sup>22</sup> (S. 9) über den Austausch findet man für acht Fälle (Nr. 1, 2, 3, 6, 7, 13, 15, 16 mit negativem Temperatur-Gradienten) einen durchschnittlichen Turbulenzkörperdurchmesser von  $30 \text{ m}$  und einen durchschnittl. Vertikalaustausch von  $40 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ . Die Abschätzung mit Hilfe der statistischen Theorie gibt für Turbulenzkörper  $L_k = 30 \text{ m}$ .

$$\eta_{30} = 65 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

Dieser Vergleich kann nur größenordnungsmäßig befriedigen, da streng genommen die turbulente Reibung etwa fünfmal größer sein müßte als der entsprechende Vertikalaustausch. W. Johannessen hat in neueren Arbeiten (23 und 24) den Austausch (Eddy convectivity) als Tensor behandelt und den Zusammenhang von Austausch und Turbulenztensor oder Schubspannungskraft (Eddy stress) mit der turbulenten Reibung (Eddy viscosity) untersucht. Er zeigt, daß jedenfalls in Bodennähe gilt<sup>23</sup> (S. 495/496)

$$(16) \quad \eta = A_{zz} + K A_{yz}$$

Mit der Höhe ist der Wert von  $\eta$  etwas kleiner, als diesem Ausdruck entspricht. Es bedeuten dabei in bekannter Weise

$$(17) \quad \begin{aligned} A_{zz} &= \rho l_z w = \text{skalärer Vertikalaustausch} \\ A_{yz} &= \rho l_y w \quad w = v_z = \text{turb. vert. Zusatzgesch.} \\ K &= \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} / \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \quad \text{innerhalb der Reibungsschicht} \\ &\quad \text{etwa} = 10^{-4}. \end{aligned}$$

Für den Ausdruck  $\frac{A_{zz}}{K A_{yz}}$  findet Johannessen<sup>23</sup> (S. 497)

für eine labile Luftmasse nämlich maritim-polare Kaltluft (mPK) für die unteren  $500 \text{ m}$  im Durchschnitt  $0,26$ . Daraus ergäbe sich nach (16), daß  $\eta$  etwa fünfmal so groß sein müßte wie  $A_{zz}$ . In stabilen Luftmassen ist  $\eta$  z. T. erheblich größer als  $A_{zz}$ .

In einer Tabelle sind einige Ergebnisse der Arbeiten von Johannessen derart zusammengestellt, daß man die  $\eta$  und  $A_{zz}$ -Werte für verschiedene Luftmassen miteinander vergleichen kann (s. a. (23) Tabellen 1 u. 2 S. 473 u. Fig. 2 S. 493 für die  $\eta$ -Werte, sowie (24) Tab. 9 S. 50 u. Fig. 4 S. 49 für die  $A_{zz}$ -Werte).

Tabelle  $\eta/A_{zz}$

Höhe m	S t a b i l			L a b i l			L a b i l		
	DeBilt TW(S) $\eta$	Hannover TW $A_{zz}$	$\eta/A_{zz}$	DeBilt PW(S) $\eta$	Hannover mPW $A_{zz}$	$\eta/A_{zz}$	DeBilt AK(NNW) $\eta$	Hannover mPK $A_{zz}$	$\eta/A_{zz}$
20	120	29	4,1	169	34	5,0	235	45	5,2
100	300	35	8,6	380	70	5,4	561	200	2,8
200	395	40	9,9	429	25	17,0	674	138	4,9
300	385	25	15,4	341			766	115	6,7
400	375	15	25,0	180			641	100	6,4
500	281	8	35,0	95			570	100	5,7
600	260			105			510		5,3
<b>Mittelwerte:</b>			16,3			9,1			5,3

Turbulente Reibung und Austausch (Zusammengestellt nach Ergebnissen von Johannessen).

Auch hier zeigt sich, daß  $\eta$  für die labilste Luftmasse etwa fünfmal größer als  $A_{zz}$  ist, für eine stabile Luftmasse im Mittel in den unteren 500 m 16mal größer und im Maximum in 500 m 35mal größer.

Obwohl die Größe der Turbulenzkörper bzw. Mischungswege hier nicht bekannt ist, kann man doch unser  $\eta_{50} = 128$  etwa mit den bodennahen Werten der  $P_w$  in 50 m vergleichen.

Dabei erscheint der Wert  $\eta_{50}$ , ebenso wie der Wert  $\eta_{30}$  um das 2—3fache zu klein.  $\eta_{\max}$  der labilsten Luftmasse (AK) ist nach *Johannessen* in 300 m nahezu 800 und dieser Wert ist vergleichbar mit unserem  $\eta_{250} = 1100$ . Man sieht, daß das Verhältnis  $\eta/A_{zz}$  für labile Luftmassen am kleinsten ist.

Für die Größenordnungen des cb wird  $\eta/A_{zz}$  praktisch gleich 1. Aus den speziellen Windangaben des 22. 7. erhält man nämlich  $K$  etwa zu  $10^{-2}$ ,  $A_{yz}$  ist von der Größenordnung  $10^4$ ,  $A_{zz}$  von der Größenordnung  $10^5$ , woraus sich für  $\frac{A_{zz}}{K A_{yz}} \sim 10^3$  ergibt, d. h. das Zusatzglied der Gleichung

$$(18) \quad \eta_{A_{zz}} = 1 + \frac{K A_{yz}}{A_{zz}} \quad (\text{s. a. Gl. 16})$$

ist von der Größenordnung  $10^{-3}$ .

Zum Schluß soll versucht werden, sich auch noch auf anderem Wege Kenntnis über die Austauschgröße im Cumulonimbus einer Böenfront, wie sie hier vorliegt, zu verschaffen.

Sicherlich werden in einem Cumulonimbus mehrere Austauschvorgänge verschiedenster Größenordnung zusammenwirken, wobei sich der Gesamtaustausch nach dem größeren Austauschvorgang richtet.

Zunächst sollen Vertikal-Schwingungen im oberen Teil des cb als Austauschträger erfaßt werden. Die Schwingungsdauer solcher Schwingungen in Wolkenluft erhält man nach der Formel:

$$(19) \quad \tau = 2\pi \sqrt{\frac{\bar{T}}{g(\beta - \gamma)}}$$

Es bedeuten dabei  $\beta$  feucht adiabatischer Gradient (*Raethjen* S. 69, Tab. 4)  $\gamma$  Temperaturgradient der umgebenden Luft (Erlanger Aufstieg).

$\bar{T}$  mittlere Temperatur der schwingungsfähigen Schicht. Man sieht, daß der cb nur in den oberen Schichten schwingungsfähig ist, in den unteren ist in unserem Falle  $\beta = 0,5$ ,  $\gamma = 0,75$ . Erst in 430 mb wird  $\beta = 0,71$  und im Mittel zwischen 430 mb und 170 mb (7000 und 13000 m) ist  $\beta = 0,81$  und  $\gamma = 0,6$ . In dieser Schicht ist außerdem  $\bar{T} = 235$ . Es ergibt sich so

$$\tau = 666 \text{ sec. etwa } 11 \text{ min.}$$

Danach kann man  $A$  wie folgt abschätzen: Für die durchschnittliche sog. „Andauerzeit“  $t$  setzt man mit *Lettau* den 4. Teil von  $\tau$ , also  $t = 167$  sec, da nach *Lettau* <sup>21</sup> (S. 178 und 180)

$$(20) \quad \bar{w} \cdot t = 2 l$$

und

$$l \text{ etwa} = 0,25 \cdot L$$

wird die turbulente Zusatzgeschwindigkeit

$$\bar{w} = 0,5 L/t$$

oder

$$A = \varrho l w = \varrho \cdot 1,25 L^2/t$$

das ergibt mit  $L = 6000$  m (= gesamte Schwingungswerte) und einem durchschnittlichen  $\varrho$  für die betrachtete Schicht von 0,5:

$$A = 1,34 \cdot 10^4 \text{ kpm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \\ A = 1,3 \cdot 10^5 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ also etwa}$$

Andererseits sind auch in der unteren Hälfte des Cumulonimbus der Böenfront starke und wohl ausschlaggebende Austauschvorgänge wirksam, wenn sie

auch nicht als freie Schwingungen auftreten, sondern in diesem Falle ein komplizierter Mechanismus zu vertikalen Bewegungsschwankungen führt.

Am besten sind diese Vorgänge an dem von *Faust*<sup>25</sup> entwickelten Böenmodell zu studieren. Danach bildet sich etwas unterhalb der Nullgradgrenze — in unserem Falle 4000 m — durch Schmelzen von Eisteilchen ein Kaltluftkörper aus, der durch die kräftige Vertikalströmung getragen rasch anwächst bis er unter Freiwerden großer Energien zu Boden stürzt und in Bodennähe horizontal umgelenkt die Gewitterböe bewirkt. Bei seinem weiteren horizontalen Vorwärtsdringen (Zerfließvorgang) verliert er an Energie. Inzwischen hat sich aber in der Höhe ein neuer Kaltluftkörper gebildet. Sobald der erstbeschriebene Kaltluftkörper bei seinem Vordringen am Boden unter dem neuen angeht, wird die tragende Vertikalbewegung abgeschnürt oder doch wenigstens stark vermindert und es erfolgt ein weiterer Absturz. Wir erkennen auch hier einen periodischen — wenn auch diskontinuierlich vorschreitenden — Austausch von Bewegungsenergie unter Zwischenschaltung von thermodynamischen Vorgängen wie Kondensation und Schmelzvorgang. *Faust*\* berechnet nun die Böenstärke unmittelbar aus der beim Absturz des Kaltluftkörpers freiwerdenden Energie. Man kann daher mit einer gewissen Berechtigung die halbe Böenschwankung als turbulente Zusatzgeschwindigkeit des eben beschriebenen Austauschvorganges betrachten.

Sie ergibt sich in unserem Falle (s. Abb. 2) zu etwa 10 m/sec. Es wird dazu die stärkste registrierte Böe mit einer Gesamtstärke von 32 m/sec verwendet, da sie am ehesten einem Zeitmoment unmittelbar nach Auftreffen des Kaltluftkörpers am Erdboden entspricht, während die schwächeren Böen schon mehr der Zeit des Zerfließvorganges von Kaltluftkörpern oder seitlich in der Nähe des Beobachtungsortes abgestürzten Kaltluftkörpern zuzuschreiben sind.

Zwar erkennt man aus Abb. 3, daß in unserem Falle etwa alle sechs Minuten ein Böenstoß erfolgte, doch kann man daraus aus den eben angeführten Gründen nicht eindeutig auf die Periode und damit auf die entsprechenden Herkunftswege des Austauschvorganges schließen. Bei einer Höhe der Nullgradgrenze von 4000 m wird man aber berechtigt sein, diese zu 1000 bis 1500 m anzunehmen.

Mit  $\varrho = 1$  und  $w = 10$  ergibt sich so als Abschätzung

$$A = 1 - 1,5 \cdot 10^4 \text{ kpm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \quad \text{oder} \\ A = 1 - 1,5 \cdot 10^5 \text{ gcm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

Möglicherweise sind beide Austauschvorgänge miteinander gekoppelt.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß auch die Energieabgabe eines Turbulenzelementes auf alle kleineren Turbulenzelemente in der Zeiteinheit mit Hilfe der statistischen Theorie der Abschätzung zugänglich ist.

#### Literaturverzeichnis.

1. J. Letzmann. Das Bewegungsfeld im Fuß einer fortschreitenden Wind- oder Wasserhose. Dorpat (1923).
2. R. Scherhag. Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose. Berlin (1948).
3. E. Dinies. Entwicklung der Frontgewitterlage im Sommer. *Wetter*. 53, 199 (1936).
4. H. Faust. Untersuchungen von Forstschäden hinsichtlich der Windstruktur bei einer Böe. *Meteor. R.* 1, 290 (1948).

\* Eine ausführliche Darstellung der Böentheorie von Faust erscheint demnächst, s. a. (25) S. 156.

5. G. Seifert. Instabile Schichtungen der Atmosphäre und ihre Bedeutung für die Wetterentwicklung im Königsberger Gebiet. Veröff. Geophys. Inst. Leipzig 6, 223 (1935).
6. P. Raethjen. Zyklogenetische Probleme. Arch. f. Met., Geophys. u. Bioklim. Serie A 1, 296 (1949).
7. C. L. Godske. Meteor. Z. 53, 445 (1936).
8. P. Raethjen. Einführung in die Physik der Atmosphäre. Hamburg 2 (1942).
9. P. Raethjen. Einführung in die Physik der Atmosphäre. Hamburg 1 (1941).
10. R. Geiger. Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig (1942).
11. J. Letzmann. Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben. Graz (1944).
12. Grimsehl. Lehrbuch der Physik, Bd. 1. Leipzig (1938).
13. Hann-Süring. Lehrbuch der Meteorologie. Wien (1943).
14. Schuchardt und Schütte. Technisches Hilfsbuch, 6. Aufl. (1923).
15. A. Wegener. Wind- und Wasserhosen in Europa. Braunschweig (1917).
16. H. Koschmieder. Über Tromben. Wiss. Abh. R. f. W. 6 Nr. 3 (1940).
17. J. Letzmann. Einige Ergebnisse experimenteller Wirbelforschungen. Meteor. Z. 50, 462 (1933).
18. W. Heisenberg. Bemerkungen zum Turbulenzproblem. Z. f. Naturforschg. 3a, 434 (1948).
19. C. F. v. Weizsäcker. Das Spektrum der Turbulenz bei großen Reynoldsschen Zahlen. Z. f. Phys. 124, 614 (1948).
20. W. Heisenberg. Zur statistischen Theorie der Turbulenz. Z. f. Phys. 124, 628 (1948).
21. Lettau. Atmosphärische Turbulenz. Leipzig (1939).
22. E. Frankenberger. Über den Austauschmechanismus der Bodenschicht und die Abhängigkeit des vertikalen Massenaustausches vom Temperaturgefälle nach Untersuchungen an den 70 m hohen Funkmasten in Quickborn-Holstein. Ann. d. Met. 1 (Beiheft) 3 (1948).
23. W. Johannessen. On the Eddy Stress and Viscosity in Air Currents. Met. Annaler 2, Nr. 14 (1948).
24. W. Johannessen. Some Computations of the Atmospheric Turbulence. Met. Annaler 3, Nr. 2 (1949).
25. H. Faust. Über Gewitterstürme. Forsch. u. Fortschr. 25, 153 (1949).
26. G. Swoboda. Zur Thermodynamik der Trombenbildung. Experientia 1, 180 (1945).
27. F. H. Schmidt. Zur Thermodynamik der Trombenbildung. Experientia 2, 493 (1946).
28. F. Roßmann. Das Bewegungsgesetz der Wolkentromben. Naturw. Rdsch. 4, Heft 4 (1951) im Druck.
29. F. Roßmann. Über Wolkentromben. Ann. d. Met. Sonderheft, Tagung Met. Ges. Hamburg, Okt. 50 (1951) im Druck.

## B. Die synoptischen Bedingungen für das Entstehen der Unwetterfront vom 22. 7. 1948 über Nordbayern

Von Dr. H. Faust, Bad Kissingen

**Zusammenfassung.** Die Auswirkungen der Unwetterfront werden zu erklären versucht, wobei sich Zusammenhänge mit der Wetterwirksamkeit der am Vormittag durchgezogenen schwachen Kaltfront ergeben. Die Hauptfront erweist sich als „luftmasseneigene Umlagerungsfront“. Es wird versucht, die allgemeinen Bedingungen für das Entstehen dieser Kaltfrontart herzuleiten.

W. Müldner untersuchte die Unwetterfront vom 22. 7. 1948 hinsichtlich der Struktur des Windes in dem Hauptschadensgebiet um Nürnberg. In Ergänzung an die dort (s. Abschn. II, 3) gegebenen Bemerkungen, die mehr aus dem großräumigen Wettergeschehen (Eindringen in die Frontalzone usw.) erklärende Hinweise für die Wechselwirkung einer ersten und zweiten Kaltfront sowie für den Wellenvorgang an der Frontalzone geben, sollen im Folgenden die synoptischen, z. T. auch kleinräumigen Bedingungen für die Entstehung der viele Merkwürdigkeiten aufweisenden zweiten Front untersucht werden.

Als Material wurden in erster Linie die von Müldner entworfenen Karten benutzt. Weiter wurden die Klimabogen sämtlicher Klimastationen von Bayern, Württemberg-Baden und einem großen Teil von Südhessen herangezogen. Aus Südbaden und Württemberg-Hohenzollern wurden von Herrn Dr. Lößnitzer in dankenswerter Weise die Beobachtungsdaten der meisten Stationen übersandt, die Müldner nicht zur Verfügung standen. Von mehreren geeignet gelegenen Wetterdienststellen lagen ferner noch die Registrierungen der meteorologischen Instrumente vor.

Schon Müldner weist darauf hin, daß es sich bei den Erscheinungen des 22. 7. 48 um zwei verschiedene Kaltfronten handelte. Die erste, schwächere aber mehrere tausend Kilometer lange zog von 3 bis 16 Uhr MEZ über die US-Zone hinweg, wobei die frontsenkrechte Richtung von NW nach SE weist (geometrische Fortschreitungsrichtung). Die zweite Front, fast kreisförmig gebogen und mit starken Böen verbunden, zog zwischen 11 und 16 Uhr über Süddeutschland hinweg, die Fortpflanzungsrichtung war von WSW nach ENE. Da sich beide Kaltfronten schon in ihrem äußerlichen Erscheinungsbild grundsätzlich unterschieden, seien ihre Eigenschaften einander gegenübergestellt.

Geometrische Fortschrittingsrichtung	1. Front	2. Front
	NW — SE	WSW — ENE
Länge der Front	> 3000 km	< 200 km
Fortpflanzungsgeschwindigkeit	25 km/h	75 km/h
Gestalt der Front	fast gradlinig	kreisbogenförmig
Windstärke	schwach	sehr stark
Temperaturfall	sehr schwach	stark
Druckänderung	schwach	stark
über S-Hessen und Gebiet nordwestlich Nürnberg	Gewitter	keine Gewitter
übriges Bayern	keine Gewitter	Gewitter

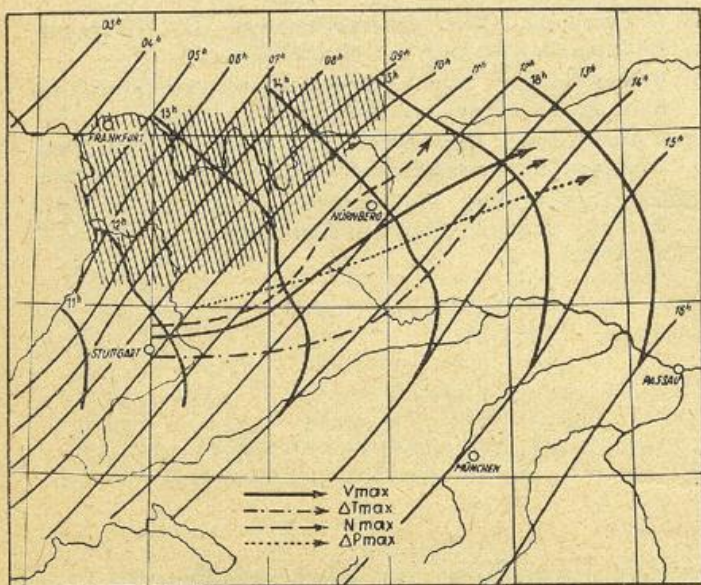


Abbildung 33:  
Isochronen der beiden Kaltfronten

Die Isochronen der beiden Fronten sind in der Abbildung 33 dargestellt. Sie wurden gewonnen aus den Zeitangaben des gesamten Materials, wobei diese leider ziemlich ungenau waren; die gezeichneten Kurven stellen eine vernünftige Glättung der Zeitangaben dar. Das Gebiet, in dem die erste Front wetterwirksam war, ist schraffiert. Der stark ausgezogene Pfeil gibt die Mitte des Streifens stärkster Böen ( $V_{max}$ ), der gestrichelte die der Streifen stärksten Niederschlags ( $N_{max}$ ), der strichpunktierte Pfeil die Mitte des Streifens stärksten Temperaturabfalls ( $\Delta t_{max}$ ) und schließlich der punktierte Pfeil die Wanderung des maximalen Druckanstiegs ( $\Delta P_{max}$ ) an. Alle Pfeile beziehen sich auf die zweite Front.

Folgende Tatsachen lassen sich aus der Abbildung ablesen:

1. Die Isochronen der zweiten Front laufen tangential in die der ersten Front ein. Die zweite Front überholt also in ihrem Südteil die erste nicht.

2. Die zweite Front wird im Norden dort diffus und verschwindet, wo die erste Front wetterwirksam war.

3. Die Gebiete stärkster Böen, stärksten Niederschlags, maximalen Temperaturfalls und maximalen Druckanstiegs an der zweiten Front ziehen sich in einem verhältnismäßig schmalen Streifen von WSW nach ENE. Dieser Streifen fällt mit den Stellen des stärksten Voreilens der zweiten Front zusammen.

4. Die kreisförmigen Bogenstücke der zweiten Front erwecken rein optisch den Eindruck eines örtlichen Entstehungszentrums, das zwischen Vogesen und Schwarzwald liegt.

Es sei daher die Annahme ausgesprochen und im folgenden zu beweisen versucht, daß die zweite Front, die die starken Unwetter brachte, entstanden war aus einer örtlichen wärmegewitterartigen labilen Umlagerung, die dann nach vorn und den Seiten weiter um sich griff. (Unter „vorn“ sei stets „in Richtung der Höhenströmung“ verstanden).

#### 1. Die Möglichkeit der Entstehung einer starken örtlichen Umlagerung im Raum Straßburg.

Da genaue Meldungen aus NE-Frankreich unzugänglich waren und die Unwetterfront nicht weiter zurückverfolgt werden konnte, bleibt nur die Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines starken labilen Umsturzes im Straßburger Raum zu bestimmen. Wie an anderer Stelle (!) gezeigt, ist zur Entstehung des größten Teils der örtlichen Gewitter gar kein trockendiabatischer Temperaturgradient unterhalb der Kondensationshöhe ( $H_c$ ) nötig, sondern meist geht solchen Gewittern eine advective oder konvektive Abkühlung in der Höhe voraus. Eine solche Abkühlung advectiver Art ist in dem hypothetischen Räume der Entstehung der Unwetterfront, etwa der Gegend von Straßburg, ohne weiteres gegeben durch den Durchzug der ersten Front. Sie reichte aber nicht aus zu einem heftigen labilen Umsturz mit abschließender Stabilisierung. Zu einem solchen mußten noch weitere gewitterbegünstigende Ursachen hinzukommen. Eine solche war die zusätzliche Erwärmung der unteren Schichten. Eine einfache Methode zur Abschätzung vertikaler Temperaturgradienten der bodennahen Schichten kurz vor dem labilen Umsturz ist gegeben durch die von dem Verfasser (?) angegebene Beziehung zwischen Stärke der Gewitterbö  $F_{max}$  (m/sec) und dem bei der Bö eingetretenen plötzlichen

Temperaturfall  $\Delta T$ . Liegt der Quotient  $\frac{F_{max}}{\Delta T}$  nahe dem

Wert 2, so ist der vertikale Temperaturgradient unterhalb  $H_c$  trockendiabatisch; je mehr er den Wert 2 überschreitet, desto stabiler ist die Schichtung unterhalb  $H_c$  vor dem Umsturz. Bilden wir für Freiburg, die am weitesten im SW gelegene Station, von der Registrierungen erhältlich waren, diesen Quotienten für die erste Front, so ergibt sich:

$$\frac{F_{max}}{\Delta T} = \frac{14}{6} = 2.3 \text{ (Spitzenbö in der ersten Front: } 14 \text{ m/sec, plötzl. Temperaturfall: } 6^\circ)$$

Wir sehen also, daß in Freiburg kurz vor Durchgang der ersten Front (10.25 Uhr) unterhalb  $H_c$  fast trocken-

adiabatischer Gradient herrschte. In der Oberrheinischen Tiefebene fand daher außer der advektiven Abkühlung in der Höhe durch die erste Front eine zusätzliche Labilisierung durch Erwärmung vom Erdboden aus statt; als dritter Faktor wirkte der Weststau am Schwarzwald. Die meteorologischen Voraussetzungen für das Zustandekommen eines heftigen labilen Umsturzes im Raume Straßburg waren also gegeben; die Annahme eines Entstehens unserer zweiten Front aus einem örtlichen labilen Umsturz im Raum zwischen Schwarzwald und Vogesen ist also zumindest meteorologisch sehr wahrscheinlich, da dort drei gewitterbegünstigende Faktoren zusammenwirkten.

## 2. Die Wettervorgänge im Staugebiet des Schwarzwaldes.

Die erste Front erreichte den Raum Karlsruhe gegen 6 Uhr MEZ, den Südschwarzwald gegen 10 Uhr. Am Nordschwarzwald brachte sie keine wesentlichen Wettererscheinungen, da zu dieser Tageszeit noch die Erwärmung durch den Erdboden fehlte.

Wie gezeigt, herrschte aber am Westabhang des Südschwarzwaldes (Freiburg) zur Zeit ihrer Ankunft bereits fast trockenadiabatischer Temperaturgradient unterhalb  $H_c$ , so daß es dort bereits bei Durchzug der ersten Front zu Gewittern kam, die eine Stabilisierung brachten. Im Raume um und westwärts Baden-Baden nahm jedoch nach Durchzug der Front die Labilisierung weiter zu, so daß der dort durch Stau- und Einstrahlungsstabilisierung entstandene postfrontale starke Umsturz rasch weiter um sich griff. Er folgte der Höhenströmung, wobei er bei der labilen Schichtung auch seitwärts weiter um sich griff. Kurz vor 11 Uhr erreichte er Baden-Baden.

Aus den Meldungen erkennt man deutlich ein Gebiet stärksten Niederschlags und stärkster Böen, das sich etwas südlich Freiburg bis in den Raum Villingen erstreckt. Diesem Gebiet folgt nach Norden eines mit schwachen Gewittern und keinen wesentlichen Niederschlägen. Im Raum von Baden-Baden wiederum treten Starkniederschläge mit heftigen Gewittern auf. Das südliche Gebiet starken Wettergeschehens ist Ausdruck der frontalen Wettererscheinungen, verstärkt durch Stau und Labilisierung vom Boden aus. Das nördliche, davon deutlich getrennte Gebiet zeigt die Wirkung des fortschreitenden postfrontalen labilen Umsturzes, der etwa 3 Stunden nach Frontdurchgang erstmals entstand. Im Zwischengebiet streuen die Uhrzeiten der gemeldeten schwachen Gewitter derart, daß sich eine Frontlinie nicht zeichnen läßt; die Gewitter in diesem Raume müssen gedeutet werden als postfrontale Umlagerungen im Staugebiet des Schwarzwaldes, die bedeutend schwächer sind als die im Nordschwarzwald, weil die sie erzeugenden Luftmassen bereits einen Teil ihrer Labilitätsenergie durch die Umlagerungen an der ersten Front verloren hatten. Dafür spricht auch die Tatsache, daß im Südschwarzwald, wo die stärksten frontalen Umlagerungen stattfinden, keine postfrontalen Gewitter mehr auftraten.

## 3. Die weitere Entwicklung der ersten Front über Süddeutschland.

Längs einer langgestreckten Kaltfront wird es immer Stellen geben, an denen der labile Umsturz heftiger ist als seitlich davon. Durch den heftigeren Umsturz wird in den Cumulonimben an jenen Stellen mehr Kaltluft produziert als in der Umgebung, die mächtigere Kaltluft an diesen Stellen wird außerdem tiefere Temperaturen aufweisen als die weiter seitlich produzierte Kaltluft. Dadurch werden an diesen Stellen beim Weiterwandern der Front wieder stärkere

Massengegensätze entstehen, die wiederum stärkere Umlagerungen zur Folge haben. Bei regional ziemlich einheitlich geschichteter Warmluft werden bei labilen Kaltfronten (<sup>2</sup>) Stellen stärkerer Wetterwirksamkeit mit der Front mitwandern, so daß in einer Karte, in der die Wetterwirksamkeit für jeden überstrichenen Ort eingetragen ist, sich Streifen stärkerer Wetterwirksamkeit zwischen solchen schwächerer Wirksamkeit in Richtung des Fortschreitens der Front hinziehen. Schon der Vergleich mehrerer aufeinanderfolgender Wetterkarten, die die Verlagerung einer labilen Kaltfront zeigen, läßt diese Erscheinung meist erkennen.

Über Hessen war die erste Front mit Gewittern verbunden. Da es sich hier um Nachtgewitter handelt, war die Labilität im Frontbereich (<sup>2</sup>) nicht bedingt durch die Einstrahlungsstabilität der Warmluft. Dieses Gebiet stärkerer Umlagerung wanderte mit der Front nach NE — die wahre Fortpflanzungsrichtung der Front war SW-NE — ab, so daß es in Nordbayern zu keinen Gewittern kam. Südlich von Hessen brachte die Front nur am Westschwarzwald labile Vorgänge, die aber an der Leeseite wieder weitgehend verschwanden. Daher zeigte die erste Front auch in dem Streifen, der sich nach NE an den Schwarzwald anschließt, keine Gewitter. Sogar die bis in die ersten Nachmittagsstunden wirksame Einstrahlung konnte im Gebiet westlich des Bayrischen Waldes keine ausreichende Labilität im Frontbereich hervorrufen.

## 4. Die weitere Entwicklung der zweiten Front über Süddeutschland.

Nachdem der starke labile Umsturz etwa im Raume Straßburg postfrontal entstanden war, griff er bei der vorhandenen Labilität rasch weiter um sich, bevorzugt natürlich in Richtung der Höhenströmung. Dieses Gebiet maximaler Umlagerung (Baden-Baden 30 mm Niederschlag) griff dann frontartig auf den Raum Pforzheim (Böen von 60 km/h) über. Seine Ausbreitung nach Süden war vorerst durch die Leewirkung der Nordschwarzwaldabhänge gehindert, diejenige nach Norden hin war aber deshalb nur abgeschwächt möglich, weil sich hier unmittelbar das Gebiet anschloß, in den die Umlagerungen der ersten Front Stabilisierung brachten. Noch in Öhringen z. B. verursachte die erste Front Niederschlag (10 Uhr 15). Beim Weitergreifen der Umlagerung auf den württembergischen Raum — nach Aufhören der Leewirkung — mußte daher das Ausgreifen nach Süden weit stärker erfolgen als das nach Norden. Der Streifen maximaler Wetterwirksamkeit der nunmehr zu einer richtigen Front erweiterten Umlagerung mußte also notwendigerweise hier nicht nach NE verlaufen sondern nach E, wie es die Abbildung zeigt. Erst als die Front ein Stück weitergezogen war, fand sie auch im Norden Gebiete mit höherer Labilität vor, denn dort brachte die erste Front keine Stabilisierung. Die maximale Wetterwirksamkeit konnte sich nunmehr in Richtung der Höhenströmung verlagern (NE).

Daß über Bayern die Böenstärke von West nach Ost zunimmt, erklärt sich zwanglos aus der zunehmenden Labilisierung der vorgelagerten Warmluft durch die nachmittägliche Sonneneinstrahlung. Die etwas stärkeren Böen und der stärkere Temperaturfall unmittelbar am Fuße der Alpen sind als Stauerscheinungen aufzufassen, denn die Böenrichtung hatte meist eine Komponente aus Nord.

## 5. Schlußbetrachtung.

Die Wettererscheinungen des 22. 7. 1948 über Süddeutschland zeigen also, daß es zur Entstehung einer Kaltfront aus einer örtlichen starken labilen Umlagerung kommen kann. Auch Byers<sup>1)</sup> weist auf diese Entstehungsmöglichkeit hin. Er schreibt: „Örtliche Ge-

witter verursachen bisweilen begrenzte, neue, nicht hochreichende, kurzlebige Fronten.“ Voraussetzung dabei ist erstens, daß in der Umgebung des Entstehungsherdens ein genügend großes Gebiet mit hinreichender Labilität vorhanden ist, damit der Umsturz nicht nur nach vorn, sondern auch nach der Seite weiter um sich greifen kann. Zweitens muß der primäre Umsturz der einzige in der weiteren Umgebung sein, was etwa durch orographische Einflüsse bedingt sein mag. Bei großer Labilität über einem ausgedehnten Gebiet kommt es allgemein durch die verschiedenen wirkenden Faktoren<sup>1)</sup> zur Ausbildung zahlreicher Einzelgewitter, die zu ungefähr gleicher Tageszeit an den verschiedensten Punkten entstehen. Jedes dieser Einzelgewitter bedingt eine gewisse Stabilisierung in dem von ihm durchzogenen Streifen. Infolgedessen kann sich „hinter“ diesen Gewittern keine zusammenhängende Umlagerung mehr ausbilden. Die Labilität im Entstehungsgebiet darf also andererseits nicht so groß sein, daß es zu weiteren selbständigen Umlagerungen kommt. Der für Freiberg oben bestimmte Quotient

$$\frac{F_{\max}}{T} = 2.3$$

zeigt, daß die Schichtung unterhalb der Kondensationshöhe dem trockenadiabatischen Gradienten sehr nahe kam, ihm aber nicht ganz entsprach, so daß noch der orographische Einfluß zum örtlichen Umsturz hinzukommen mußte.

Im untersuchten Falle haben wir also in den Stauwirkungen des Nordschwarzwaldes die letzte auslösende Ursache zur Entstehung des primären Umsturzes zu sehen. Vor der entstehenden Front kam es nirgends zu weiteren Umlagerungen. Nachdem sich so eine zunächst noch engbegrenzte Front gebildet hatte, entfernte sich der vertikale Temperaturgradient der vorgelagerten Luft unterhalb  $H_c$  beim Weiterwandern der Front wieder stärker vom trockenadiabatischen. Die entsprechenden Quotienten für Stuttgart und Nürnberg sind 3.4 bzw. 3.1. In Übereinstimmung hiermit steht die Tatsache, daß die Maximaltemperatur in Nürnberg von  $27^\circ$  um  $5^\circ$  unter der Auslösetemperatur blieb. Im Streifen stärkster Wetterwirksamkeit der Front trat daher nirgends ein präfrontales Gewitter auf. Das Anheben der vorgelagerten Luft bis zum labilen Umsturz besorgte also die in den Cumulonimben der Front erzeugte und im Böenkopf unten vorstoßende Kaltluft.

Es könnte nun die Frage auftauchen, wie die Wettererscheinungen im Nürnberger Raum abgelaufen wären, wenn dort die Temperatur vor der Unwetterfront noch um einige Grade höher gelegen hätte. Zweifellos wären die Böen dann dort noch stärker geworden, weil ja in Wirklichkeit ein Teil der Böenenergie zum Anheben der unten stabil geschichteten präfrontalen Luft aufgezehrt wurde. Bei Erreichen der Auslösetemperatur wäre es aber andererseits bereits vor der Front zu örtlichen Wärmegewittern gekommen, deren stabilisierende Wirkung eine Verminderung der Böenstärke im Gefolge gehabt hätte. Erfahrungsgemäß können auch Wärmegewitter in ein Gebiet hineinziehen, in dem un-

terhalb  $H_c$  stabile Schichtung herrscht, sofern nur in der Höhe feuchtindifferente Schichtung vorhanden ist. Aber die dabei auftretenden Böen sind dann weit schwächer, als wenn eine Kaltfront gegen dieselbe Warmluft vorstoßen würde. Es muß daher bei der Kaltfront noch ein Effekt hinzukommen, der die Umlagerung im Vergleich zu der bei einem treibenden Wärmegewitter intensiviert. Als diesen Effekt haben wir die sich im Gefolge der Massengegensätze ausbildende frontale Tiefdruckrinne anzusehen. Diese wirkt umlagerungsfördernd durch ihre Strömungskonvergenz und die Anhebung der vorgelagerten Luft auf ihrer Vorderseite<sup>5</sup>. Eine solche gut ausgeprägte Konvergenz fehlt aber bei einem einzelnen Gewitter.

Da die Unwetterfront vom 22. 7. 1948 auf den 6-Uhr-Karten noch nicht erkennbar war und auch keine weiteren Massengegensätze hinter der ersten Front auftraten, haben wir also hier ein Beispiel für die Entstehung einer stark wetterwirksamen Kaltfront innerhalb einer homogenen Luftmasse, einer „luftmasseneigenen Umlagerungsfront“.

Die Bedingungen für das Auftreten einer solchen Front seien noch einmal kurz zusammengestellt:

1. Im Entstehungsgebiet und dessen Umgebung muß die Labilität wenigstens so groß sein, daß ein zusätzlicher Anstoß — meist orographischer Einfluß — eine starke labile Umlagerung erzeugt.
2. Die Labilität darf aber andererseits nicht so verbreitet auftreten, daß an mehreren Stellen Wärmegewitter entstehen.
3. Auch in dem Gebiet, das sich in der Strömungsrichtung an das Entstehungsgebiet anschließt, müssen zur stärksten Wetterwirksamkeit der Front die Labilitätsverhältnisse so sein, daß es gerade noch nicht zur Ausbildung örtlicher Wärmegewitter kommt.

Da diese Bedingungen zusammen relativ selten auftreten, ergibt sich schon hieraus die geringe Häufigkeit des Auftretens der luftmasseneigenen Umlagerungsfronten. Ihr Vorkommen beschränkt sich auf die heißesten Monate des Jahres.

#### Schrifttum.

1. Faust, H.: Statistische Untersuchungen an Gewittern im frontfreien Raum; erscheint demnächst.
2. Faust, H.: Über einen Zusammenhang zwischen der Stärke der Spitzenböe bei Kaltfronten und den beim Böenvorgang auftretenden plötzlichen Temperatursturz, Meteor. Rdsch., 2, 217 (1949); Temperaturfall und Böenstärke bei Wärmegewittern, Meteor. Rdsch., 4, Heft 3/4 (1951).
3. Faust, H.: Labilität und Stabilität im Kaltfrontbereich, Geofisica pura e applicata, 15, 156 (1949).
4. Byers, R. H.: Nonfrontal Thunderstorms, Publ. Inst. Met., University Chicago, Miscellaneous Report, Nr. 3 (1943).
5. Faust, H.: Kaltfronten und Kaltfronttypen, Ber. Dtsch. W. D. US-Zone, 12, 151 (1950).

