

Berichte

des

Deutschen Wetterdienstes

Nr. 80
(Band 11)

DK 551.557.5

Die vertikale Struktur des Strahlstromkernes aus Forschungsflügen des Project Jet Stream

von

Elmar R. Reiter

(mit 4 Tabellen im Text und 83 Abbildungen im Anhang)

Offenbach a. M. 1962
Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	3
Abstract	4
1. Einleitung	5
1.1. Auswahl der Flüge	5
1.2. Die Messungen und ihre Genauigkeit	7
1.3. Auswerte- und Glättungsmethoden	8
2. Die Flugmessungen	9
2.1. Flug Nr. 1, am 10. August 1956	9
2.2. Flug Nr. 5, am 12. September 1956	10
2.3. Flug Nr. 7, am 14. September 1956	10
2.4. Flug Nr. 11, am 17. Januar 1957	11
2.5. Flug Nr. 12, am 18. Januar 1957	12
2.6. Flug Nr. 13, am 23. Januar 1957	12
2.7. Flug Nr. 17, am 5. Februar 1957	12
2.8. Flug Nr. 18, am 15. Februar 1957	12
2.9. Flug Nr. 19, am 16. Februar 1957	13
2.10. Flug Nr. 20, am 20. Februar 1957	13
2.11. Flug Nr. 21, am 27. Februar 1957	14
2.12. Flug Nr. 26, am 26. März 1957	14
2.13. Flug Nr. 27, am 29. März 1957	15
2.14. Flug Nr. 29, am 4. April 1957	16
2.15. Flug Nr. 30, am 8. April 1957	16
3. Statistische Bearbeitung des Materials	16
3.1. Modelle nach Endlich und Brundidge	16
3.2. Mittlere Position der vertikalen Strahlstromachse in einem kartesischen Koordinatensystem	17
3.3. Isentropenbuckel und -graben in einem kartesischen Koordi- natensystem	17
3.4. Mittelung in bezug auf die vertikale Strahlstromachse	18
3.5. Mittelung in bezug auf den Isentropenbuckel	27
3.6. Mittelung in bezug auf den Isentropengraben	28
3.7. Clear Air Turbulence (CAT)	28
4. Die Untersuchungsergebnisse in flugmeteorologischer Sicht ..	29
Literatur	30
Anhang: Abbildung 1 bis 83	

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag und mit Unterstützung des Bundesverkehrsministeriums (Mittel zur Förderung der Luftfahrtforschung, Deutsche Lufthansa) zusammengestellt. Der Verfasser ist den Herren R. M. Endlich, Dr. R. Shapiro und G. McLean, Geophysics Research Directorate, Air Force Cambridge Research Center, für die Überlassung des reichhaltigen Datenmaterials (26) zu großem Dank verpflichtet. Ferner sei Herrn Prof. Dr. H. Flohn, Offenbach a. M., und Herrn Dr. H.-J. Tank, Hamburg, für wertvolle Diskussionen und für ihre Hilfe bei der Erstellung dieses Forschungsprojektes gedankt. Herr G. Wendler half bei der Aufarbeitung der Beobachtungsdaten.

Anschrift des Verfassers:

Univ.-Dozent Dr. E. R. Reiter, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck, Schöpfstraße 41;
dz.: Assoc. Prof. of Atmosph. Sciences, Colorado State University,
Fort Collins, Colo., USA

Zusammenfassung

Der erste Teil dieses Berichtes enthält eine Aufstellung der Meßgenauigkeiten, die während der „Project-Jet-Stream“-Flüge 1956 — 1957 erreicht wurden. Es folgte eine Beschreibung der Analysemethoden, die im folgenden Abschnitt angewendet wurden.

Der zweite Teil gibt die Resultate von 15 Querschnittflügen durch den Strahlstrom. Die meisten dieser Flüge werden — falls nicht schon anderswo veröffentlicht — von einem Satz 250-mb-Karten, Bodenwetterkarten und Querschnittanalysen von Windgeschwindigkeit, potentieller Temperatur, Vertikalgeschwindigkeit (aus Fluggeschwindigkeit und Neigungswinkel des Flugzeuges abgeschätzt) und „Normalkomponente“ (definiert als die Geschwindigkeitskomponente normal zur Windrichtung im Punkt stärkster Windgeschwindigkeit während des betreffenden Fluges) begleitet.

Die Temperaturanalysen zeigen im Bereich des Strahlstromes einige gemeinsame Züge: Auf der antizyklonalen Seite des Strahlstromkernes trifft man eine Aufwölbung der Isentropenflächen an — den „Isentropenbuckel“. Auf der zyklonalen Seite der Jet-Achse wölben sich die Isentropenflächen für gewöhnlich nach unten. Es ist dies der „Isentropengraben“. Ersterer wird wahrscheinlich von Aufwärtsbewegungen, letzterer von Abwärtsbewegungen verursacht. Diese Vertikalbewegungen scheinen im Niveau des Jet-Kernes noch ziemlich stark zu sein. Unter den Voraussetzungen, daß die angewandte Methode der Abschätzung einigermaßen zutreffend ist (K u e t n e r und M c L e a n (9)) muß mit Vertikalgeschwindigkeiten bis zu etwa 2,5 m/sec gerechnet werden.

Teil 3 enthält eine statistische Zusammenfassung der Querschnittflüge. Zur Mittelbildung wurden 4 verschiedene Koordinatensysteme verwendet: a) kartesische Koordinaten mit dem Mittelpunkt im Jet-Kern (Abszisse: Entfernung vom Jet-Kern normal zur Windrichtung im Kern; Ordinate: Höhe über und unter dem Kern-Niveau). b) Koordinatensystem mit dem Zentrum im Jet-Kern. (Abszisse: Entfernung von der vertikalen Jet-Achse, normal zur Strömungsrichtung im Jet-Kern gemessen; Ordinate wie in a)). c) Koordinatensystem mit Mittelpunkt im „Isentropenbuckel“ (Abszisse: Entfernung von der vertikalen Achse des Isentropenbuckels, normal zur Strömungsrichtung im Jet-Kern gemessen; Ordinate wie in a)). d) Koordinatensystem mit Mittelpunkt im „Isentropengraben“ (Abszisse: Entfernung von der vertikalen Achse des Isentropengrabens, normal zur Strömungsrichtung im Jet-Kern gemessen; Ordinate wie in a)).

Werden die Parameter, welche in Abschnitt 2 analysiert wurden, in diesen Koordinatensystemen statistisch bearbeitet, so zeigt sich, daß die mittleren horizontalen Windscherungen in der Umgebung des Strahlstromkernes stärker sind als aus einer Mittelbildung in einem kartesischen Koordinatensystem hervorgehen würde. Die antizyklonale Scherung ist sogar im Mittel von der Größenordnung des Coriolis-Parameters. Dynamische Labilität ($Q < 0$) scheint daher etwa 40 bis 100 Seemeilen südlich der Strahlstromachse und etwas oberhalb des Kern-Niveaus relativ häufig aufzutreten.

Die Isentropentröge und -buckel sind wegen der darin auftretenden horizontalen Temperaturgradienten (2,5 bis 3,0° C pro Breitengrad) bei Flügen quer zur Strahlstromachse leicht feststellbar. Sie können daher, zusätzlich zu den beobachteten horizontalen Windscherungen, als navigatorisches Hilfsmittel betrachtet werden. Im Mittel scheint Aufwärtsbewegung auf der antizyklonalen Seite des Isentropenbuckels oberhalb des Kernniveaus und auf der zyklonalen Seite unterhalb des Kern-Niveaus vorzuherrschen. Die Isentropengräben sind im Mittel mit Abwärtsbewegung verbunden.

Im Teil 4, der eine Zusammenfassung der Ergebnisse in bezug auf ihre Anwendbarkeit für den Düsenflugverkehr gibt, wird auf eine zusätzliche Bedeutung der Isentropengräben hingewiesen: Sie scheinen nämlich be-

vorzugte Gebiete für mäßige und schwere Clear Air Turbulence zu sein. Leichte Turbulenz kann überall im Jet-Stream-Bereich auftreten. Diese Art der Turbulenz ist jedoch von geringerer Bedeutung, denn sie beunruhigt kaum die Passagiere und birgt auch keine Gefahren für den Flug. Aus früheren Untersuchungen und aus den Ergebnissen dieses Berichtes wird klar, daß leichte Turbulenz nicht vorhergesagt werden kann. In bezug auf mäßige und schwere Turbulenz kann jedoch auf Grund der hier vorgelegten Analysen der Schluß gezogen werden, daß die Wahrscheinlichkeit des Auftretens mit zunehmender Schärfe des Isentropengrabens zunimmt. Auch kleinere Isentropengräben können mäßige Turbulenz enthalten. Schwere Turbulenz kommt höchst selten vor und scheint an sehr stark entwickelte Isentropengräben gebunden zu sein.

Die Isentropenbuckel scheinen frei von mäßiger und starker Turbulenz zu sein. Passagierflüge sollten sich daher möglichst nahe der Zone tiefster Temperaturen in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre halten. Diese Zonen treten auch auf 250-mb-Karten in Erscheinung. Falls möglich sollten die Flugrouten den Warmluftzungen in der Nähe des Kern-Niveaus fernbleiben. Ist dies unmöglich, beispielsweise bei Flügen quer zum Strahlstrom, so sollten zumindest Vorbeugungsmaßnahmen getroffen werden, z. B. sollte das Anlegen der Sitzgurte angeraten werden. Eine Turbulenzwarnung sollte ausgegeben werden, sobald auf einem Horizontalflug quer zur Richtung starker Höhenwinde ein merklicher Anstieg der Außentemperaturen auf die Nähe eines Isentropengrabens hindeutet.

Die Bedeutung der vertikalen Luftbewegungen im Hinblick auf Treibstoffersparnis bedarf weiterer Untersuchungen. Aufwärtsbewegungen im Bereich der Isentropenbuckel kann u. U. einen Anstieg der „true air speed“ um 20 bis 30 Knoten bei konstanter Motorenleistung verursachen.

Abstract

The first part of this report contains an account of the accuracy of measurements obtained during "Project Jet Stream" Flights in 1956—57. A description of analysis techniques employed in the subsequent part is given.

Part No. 2 presents the results of 15 cross-sectional flights through the jet stream. Most of these flights — unless already published — are accompanied by a set of 250-mb-charts, surface charts, and cross-sections of wind speed, potential temperature, vertical velocities (estimated from "true air speeds" and "pitch" of the aircraft), and "normal component" (defined as the component of flow normal to the wind direction in the point of strongest wind encountered during the respective flight).

The temperature analyses show a rather common pattern in the vicinity of the jet core; somewhat to its anticyclonic side there is a rather well-established upward bulge of the isentropic surfaces — the "isentropen hump". To the cyclonic side of the jet axis usually a downward bulge of the isentropic surfaces can be found — the "isentropen trough". The former is probably caused by upward vertical motions, the latter by downward motions. These vertical motions seem to be still rather strong near the level of the jet core. If the estimating technique used in this report is not too far off. (cf. K u e t t n e r and M c L e a n (9)), vertical motions of about 2.5 m/sec are by no means a rarity near core level.

In part 3 a statistical summary is given of the cross-sectional flights. Four different co-ordinate systems have been adopted for averaging: a) Cartesian co-ordinates, centered in the jet core (abscissa: distance from jet core, normal to the direction of flow in the core; ordinate: height above and below core level). b) System centered in the jet core (abscissa: horizontal distance from the vertical jet axis, normal to the direction of flow in the core; ordinate: as in a). c) System centered on isentropen "hump" (abscissa: horizontal distance from vertical axis of isentropen "hump", measured normal to the direction of flow in the core; ordinate: as in a). d) System centered on isentropen "trough" (abscissa: horizontal distance from vertical axis of isentropen "trough", measured normal to the direction of flow in the jet core; ordinate: as in a).

Statistical treatment in these co-ordinate systems of the parameters analyzed in section 2 reveals strikingly, that the average horizontal wind shear near the jet core is stronger than may be deduced from mean cross-sections that make use of Cartesian co-ordinates. Anticyclonic shears — even on the average — are of the same order of magnitude as the Coriolis parameter. Dynamic instability ($Q < 0$), therefore, seems to be a rather common phenomenon 40 to 100 miles to the south of the jet axis and slightly above core level.

Owing to the average horizontal gradients of potential temperature (2.5 to 3.0° C per degree of latitude), the isentrope humps and troughs should be detectible during level flights across the jet axis. They may be considered, therefore, as navigational aids in addition to wind shear observations. Mean upward motions seem to be concentrated above core level on the anticyclonic side of the isentrope „humps“, below core level on the cyclonic side of the humps. The isentrope „troughs“, on the average, are associated with downward motion.

As pointed out in part 4, which gives a short summary of the applicability of the results to jet aviation, the isentrope „troughs“ still bear some additional significance, as they seem to contain all cases with moderate and severe turbulence. Light turbulence may occur anywhere near the jet stream. This type of turbulence, however, is not very disturbing, even to non-experienced passengers, and it hardly presents any flight hazards. From previous investigations as well as from this report, the conclusion may be drawn, that light CAT is a non-predictable phenomenon. As to moderate and severe turbulence one may arrive at the conclusion, that the likelihood of such turbulence to be encountered during a flight across the jet stream increases with increasing prominence of the isentrope „troughs“. While even minor troughs may contain moderate turbulence, severe turbulence — a rather rare phenomenon — seems to be confined to extremely well-developed „troughs“.

The isentrope „humps“ seem to be void of moderate and severe turbulence. Passenger flights, therefore, should try to keep near the zone of coldest temperatures in the upper troposphere and lower stratosphere. These zones are evident from 250-mb-charts as cold tongues south of the jet axis. If possible, flights should stay out of the warm tongues at levels near the jet core. If this cannot be done, as for instance when flights are conducted across the jet stream or under a rigid air-traffic control pattern, preventive measures should be taken (like having the passengers use their seat-belts). When flying normal to the direction of strong upper-level winds a turbulence warning should be issued as soon as the outside temperatures show a significant increase during level flight, indicating that an isentrope „trough“ is being approached.

Further investigations should be undertaken as to the significance of vertical motions in flight economy. Upward motions near the isentrope hump may mean better performance under constant power setting by as much as 20 to 30 knots of true air speed.

1. Einleitung

1.1. Auswahl der Flüge

Von August 1956 bis Mai 1957 wurden — vorwiegend über dem östlichen Teil der Vereinigten Staaten — mit einem speziell instrumentierten sechsmotorigen Düsenbomber des Typs B-47E insgesamt 36 Forschungsflüge durchgeführt, deren Ziel es war, die Detailstruktur der Atmosphäre im Bereich der Strahlströme zu vermessen (8). Von diesen Flügen wurden für den vorliegenden Bericht diejenigen ausgewählt, welche Querschnitte in Vertikalebene durch den Strahlstrom legten. Sie sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Teilergebnisse von etlichen dieser Flüge sind vom Verfasser (16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23) und von anderen Autoren (2, 3, 24, 25) schon früher veröffentlicht worden. Sie sollen in den folgenden Abschnitten an entsprechender Stelle kurz resümiert werden.

Da sich die Auswahl der hier bearbeiteten Flüge auf annähernd normal zur Strömung liegende Querschnitte

beschränkte, können nur Aussagen in bezug auf die vertikale Struktur des Strahlstromes gemacht werden. Es soll dabei teilweise auch auf ältere Forschungsergebnisse zurückgegriffen werden, die an Hand früherer Flüge gewonnen wurden (7) (10). Die Struktur der Strahlströmung entlang der Stromlinien muß einer anderen Studie vorbehalten bleiben.

Die im folgenden bearbeiteten Analysen umfassen nicht den gesamten Höhenbereich, der von der Strahlströmung erfaßt wird, sondern im Mittel nur die Höhen zwischen 30 000 und 39 000 Fuß (9—12 km), sowie eine laterale Erstreckung von etwa 5 Breitengrad (vgl. Tab. 1). Die hier gemachten Schlußfolgerungen sind also nur auf den Bereich in unmittelbarer Umgebung des Strahlstromkernes anwendbar.

Die klimatologische Eigenstellung, welche die Höhenströmungsverhältnisse über Nordamerika infolge des dynamischen Einflusses der Rocky Mountains besitzen, lassen eine Extrapolation der hier angetroffenen Verhältnisse auf andere Gebiet der Erde zunächst als frag-

Tab. 1
Übersicht über die Querschnittflüge des „Project Jet Stream“

Flug Nr.	Datum	Uhrzeit (GCT)		Position des Querschnittes			E = Einzugsgebiet D = Delta-gebiet des Jet-Max.	Winkel α zwischen Querschnitt und Meridian	Höhe (Fuß)	Jet-Maximum		β (Gl. (3))	
		von (Start)	bis (Landg.)	Höhe (1000 Fuß)	geogr. Breite \circ Nord	geogr. Länge \circ West				geogr. Breite Nord	Maximalgeschw. im Querschnitt (Knoten)		Windrichtung im Jet-Kern
1	10. 8. 56	15.35	20.28	30—38	38—42	84	E	8°	36 960	42° 12'	122	279°	1°
5	12. 9. 56	12.57	17.24	33—39	36—40	86½—84	E	26°	38 400	37° 12'	82	340°	-44°
7	14. 9. 56	13.20	17.55	34—41	38—42	88—86	D	18°	38 720	40° 37'	122	287,5°	0°
11	17./18.1.57	23.09	04.19	28—32	33—43	80—85	E	-24°	29 840	36° 02'	187	245°	-1°
12	18. 1. 57	14.34	20.05	28—36	33—37	80—83	E	-26°	33 470	33° 00'	148	246°	-2°
13	23. 1. 57	16.02	21.42	30—37	37—43	83½—85½	D	-10°	35 650	41° 33'	187	272°	12°
17	5. 2. 57	15.40	19.51	24—37	39—45	84½—85½	E	-8°	37 000	43° 38'	166	254°	8°
18	15. 2. 57	18.03	23.30	31—40	39—41	85—82	D	33°	36 900	39° 32'	131	266°	37°
19	16. 2. 57	15.09	21.38	26—37	38—41	84	D	5°	34 100	39° 37'	158	265°	38°
20	20. 2. 57	15.45	22.31	33—42	29½—38½	83½	E	0°	30 375	39° 17'	122	270°	5°
21	27. 2. 57	15.57	22.38	33—40	32—36½	81—86	D	-46°	33 625	38° 43'	138	265°	10°
26	26. 3. 57	15.34	21.47	27—38	39½—41½	75—82	D	-70°	35 550	31° 32'	187	240°	30°
27	29. 3. 57	13.50	21.01	34—42	29½—34°	83—84	E	-15°	38 050	33° 17'	137	220°	4°
29	4. 4. 57	15.37	22.11	26—42	41½—47	72½—71	E	14°	33 000	40° 15'	186	234°	-34°
30	8. 4. 57	17.24	22.38	32—40	41½—46½	73½—71	E	19°	36 600	31° 08'	186	237°	18°
									32 800	48° 06'	156	284°	8°
									33 470	46° 06'		266°	23°

würdig erscheinen. Vor allem unterliegt das Zusammenspiel zwischen subtropischem und Polarfront-Jet über Nordamerika anderen Gegebenheiten als etwa über Europa. Trotzdem liefern nach der Meinung des Verfassers die amerikanischen Strahlstromstudien besonders für den europäischen und atlantischen Flugverkehr wertvolle Erkenntnisse, zumal im Bereiche unseres Kontinents bislang derart detaillierte Messungen fehlen. Es wäre vom wissenschaftlichen Standpunkt aus zu begrüßen, würde man auch über dem atlantisch-europäischen Raum systematische Vermessungen der Strahlströmung anstellen.

1.2. Die Messungen und ihre Genauigkeit

Die in diesem Projekt eingesetzte B-47E war mit einem Doppler-Radargerät (APN-66) ausgerüstet, das die Absolutgeschwindigkeit über Grund (ground speed) und den Driftwinkel angibt (über die Wirkungsweise des Doppler-Radar vgl. (8) und (28)). Die Flugrichtung wird durch einen Kreiselkompaß angegeben, dessen Ablesung zusammen mit dem gemessenen Driftwinkel den wahren Kurs ergibt. Aus all diesen Größen wird automatisch über einen Analogrechner (analogue computer) die Position des Flugzeuges nach geographischer Länge und Breite berechnet. Die Windangaben, welche das APN-66-Gerät lieferte, stellen einen Mittelwert über die vorausgehenden 30—45 sec dar. Nach diesem Zeitintervall wurden daher die Meßwerte auch ausgewertet.

Die Registrierung der Daten erfolgte auf zweifache Weise: einerseits durch einen „Aerograph recorder“, ein Registriergerät, das die angezeigte Fluggeschwindigkeit (am Pitot-Rohr gemessen), die Staupunkttemperatur, die mittels Vortexthermometer gemessene „Vortex“-Temperatur und den Luftdruck aufzeichnete. Andererseits wurde das Instrumentenbrett mit einer Schmalfilmkamera gefilmt. Außerdem zeichnete ein VGH-Turbulenzregistrierer des National Advisory Committee of Aeronautics (NACA) feine Schwankungen im Staudruck auf, die sich auf Böigkeit während des Fluges zurückführen ließen.

Die Ergebnisse aller Messungen wurden — mit den notwendigen Instrumentenkorrekturen versehen — in einer „Datatron“-Elektronenrechenmaschine im Data Reduction Laboratory der University of Dayton, Ohio, reduziert und in Form handlicher Broschüren veröffentlicht (26). In zeitlichen Abständen von etwa 30 sec stehen folgende Daten in Tabellenform zur Verfügung:

1. Zeit der Messung (Sekunden, Greenwichzeit)
2. geogr. Länge } des Meßortes (Bogenminuten)
3. geogr. Breite }
4. Druckhöhe (pressure altitude) (Fuß, auf Zehner auf- oder abgerundet)
5. Vortextemperatur (Zehntelgrad)
6. Windrichtung (Grad)
7. Windgeschwindigkeit (Knoten)
8. Normalkomponente (Knoten), definiert als die Geschwindigkeitskomponente normal zur Windrichtung im Punkt größter Windgeschwindigkeit, der während des betreffenden Fluges angetroffen wurde (Südwindkomponente positiv)
9. Parallelkomponente (Knoten) (Westwind positiv, Definition analog zu Punkt 8)
10. Angezeigte Fluggeschwindigkeit (indicated air speed) (Knoten)
11. Wahre Fluggeschwindigkeit (true air speed) (Knoten)
12. Geschwindigkeit über Grund (ground speed) (Knoten)
13. Wahrer Kurs (Grad)
14. Abstand (Zehntelseemeilen) des Meßpunktes entlang eines Großkreises vom Punkt maximaler Windgeschwindigkeit
15. Signallampen, durch den Co-Piloten von Hand zu betätigen, mit folgender Bedeutung:
 - a) Kondensstreifenbildung
 - b) APN-66 berechnet keine neuen Winddaten, sondern arbeitet auf „memory“, d. h. es wird der letzte, tatsächlich gemessene Windwert gespeichert und daraus, zusammen mit wahrer Fluggeschwindigkeit und Kurswinkel, die Geschwindigkeit über Grund und die Abdrift errechnet. Die Speicherfunktion des APN-66 trat vor allem bei Kurvenflug und über ruhigem Wasser (ohne genügenden Radarreflex) in Tätigkeit
 - c) Turbulenz (subjektives Empfinden)
 - d) Eisbildung
 - e) Niederschlag
 - f) Flug in Wolken
16. Neigungswinkel des Flugzeuges (pitch) (Zehntelgrad, positiv für „Bug nach oben“; lediglich bei den Flügen 1 bis 7 erscheint das Vorzeichen umgekehrt)
17. Staupunkttemperatur (Zehntelgrad)

Über die Genauigkeit der Daten werden folgende Angaben gemacht (8):

	Absolute Genauigkeit	Auflösegenauigkeit bei Messung von Gradienten
Positionsbestimmung	0,7% des Abstandes von einem bekannten Fixpunkt	1 Meile
Windgeschwindigkeit	3 Knoten	1 Knoten
Windrichtung	Je nach Windgeschw.: z. B. bei 15 Knoten 12° Fehler, bei 200 Knoten 1° Fehler	1 Grad
Vortex-Temperatur	1° C	0,1° C
Staupunkttemperatur	1° C	0,1° C
Druckhöhe	200 Fuß	10 Fuß
Geschwindigkeit über Grund	0,5 Knoten	1 Knoten
Wahre Fluggeschwindigkeit	2 Knoten	1 Knoten

Begründeter Zweifel besteht bei den Angaben über die absolute Genauigkeit der Temperaturmessung. Besonders in Gegenwart von Wassertröpfchen, also bei der Durchfliegung von Wolken, ist die Staupunkttemperatur zu tief, die Vortextemperatur etwas zu hoch. Der Unterschied zwischen den beiden Messungen kann u. U. etliche Grad ausmachen. Außerdem spricht das Staupunktsthermometer stärker auf Turbulenz an als das Vortexthermometer und täuscht Temperaturschwankungen vor. Wegen dieser Turbulenzempfindlichkeit wurde auch auf die Mesostruktur in den Temperaturmessungen kein allzu großes Gewicht gelegt. Werden die Temperaturdaten einer doppelten Glättung unterworfen (vgl. Abschnitt 1.3.), so zeigen die mittels Stagnationsthermometers gemessenen Profile eine befriedigende Parallelität zu den Vortexthermometermessungen.

Da das Vortexthermometer während etlicher Flüge eine mechanische Sperre eingebaut hatte, welche eine Anzeige von Temperaturen tiefer als $-59,9^{\circ}\text{C}$ verhinderte, wurde in den Analysen der meisten Querschnitte den Staupunkttemperaturen der Vorzug eingeräumt (vgl. (19)). Bei etlichen Flügen fiel allerdings das Staupunktsthermometer aus, so daß auf die Vortextemperaturen zurückgegriffen werden mußte. Im Abschnitt 2 soll auf diese Fälle noch extra hingewiesen werden.

1.3. Auswerte- und Glättungsmethoden

In verschiedenen Veröffentlichungen (18, 19, 21) wurde die angewandte Glättungsmethode bereits eingehend geschildert. Es möge daher hier ein kurzes Resumé genügen.

Der zeitliche Abstand von 30 sec zwischen den einzelnen Meßpunkten entspricht bei einer Fluggeschwindigkeit von ca. 400—450 Knoten einem räumlichen Abstand von etwas über 6 km. Die einzelnen Meßwerte sind von geringfügigen, unregelmäßigen Schwankungen überlagert, die als „Meßungenauigkeit“ interpretiert wurden, obwohl es sich dabei z. T. um tatsächliche atmosphärische Feinstruktur handeln konnte. Diese Schwankungen wurden in einem ersten Glättungsprozeß eliminiert. „Trends“ in den Daten, die sich über mindestens 3 aufeinanderfolgende Meßpunkte verfolgen ließen, wurden dagegen als reell angesehen. Durch diese Glättung bleibt immer noch eine gewisse Feinstruktur im Strömungs- und Temperaturfeld erhalten, deren „Skalengröße“ größer als 20 km ist.

Durch einen zweiten Glättungsvorgang werden nun auch diese Schwankungen ausgeschieden. Aus Zweckmäßigkeitsgründen wurden beide Glättungen graphisch durchgeführt, letztere nach dem Prinzip der Flächen-gleichheit positiver und negativer Anomalien in den gemessenen Profilen (Abb. 1). Auf eine numerisch übergreifende Mittelbildung wurde nicht nur aus Gründen der Zeitersparnis verzichtet, sondern auch, um eine Glättung von Diskontinuitäten in der Windscherung und im horizontalen Temperaturgradienten zu vermeiden.

Die potentielle Temperatur, welche in den Querschnittsanalysen durchwegs verwendet wurde, konnte sehr einfach mit Hilfe von Bellamys (1) Pastagramm aus Druckhöhe und Temperatur berechnet werden.

Die Definitionsgleichung der potentiellen Temperatur in Bellamys Pastagramm lautet

$$\Theta = T \left(\frac{1013,25}{p} \right)^{0,288} \quad [1]$$

während in den übrigen Adiabatenpapieren die potentielle Temperatur als diejenige Temperatur definiert

ist, welche ein Luftteilchen einnehmen würde, wenn es adiabatisch auf einen Druck von 1000 mb gebracht würde. Wir wollen diese Temperatur mit Θ' bezeichnen.

Der Zusammenhang ergibt sich aus

$$\Theta = \left(\frac{1013,25}{1000} \right)^{0,288} \Theta' = 1,00380 \Theta' \quad [2]$$

Bei 340°K macht die Differenz $\Theta - \Theta'$ etwa $1,3^{\circ}$ aus. Dies wäre zu berücksichtigen, falls mit den in den Abschnitten 2 und 3 mitgeteilten Ergebnissen Vergleiche mit anderen Messungen angestellt werden sollten.

Bei der Berechnung horizontaler Gradienten normal zur Strömung, also $\frac{\partial}{\partial n} G$, wobei G eine beliebige Größe (Windgeschwindigkeit, Temperatur, Normalkomponente) sei, muß beachtet werden, daß die Flugquerschnitte zwar nach geographischer Breite, also nach der Koordinate y aufgetragen sind, daß sie aber tatsächlich weder genau normal zur Strömung noch in Nord-Süd-Richtung verlaufen. Um diesen Umständen Rechnung zu tragen, wird eine Korrektur angebracht

$$\Delta n = \Delta y \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad [3]$$

α ist der Winkel zwischen Meridian und tatsächlicher Flugroute (Abb. 2), β steht für den Winkel zwischen der Normalen zum Windvektor und der Flugroute.

Diese Korrektur wurde auch bei der statistischen Auswertung der verschiedenen Parameter im Abschnitt 3 berücksichtigt.

Es sei schließlich noch erwähnt, daß die Analysengenauigkeit, insbesondere in der Mesostruktur, für die horizontale und die vertikale Koordinate verschieden ist. Während in der Horizontalen die Feinstruktur der Strahlströme bis auf eine Größenordnung von 20 km auflösbar ist, liegen die einzelnen Traversierungen des Jet Stream in der Vertikalen oft mehr als 2000 Fuß (600 m) auseinander. Da die vertikalen Gradienten der horizontalen um etwa 2 Größenordnungen übertreffen (15, 22), ist die Auflösengenauigkeit der vorliegenden Meßflüge nach der z -Koordinate geringer als $\frac{1}{4}$ von der in der y -Richtung. Während die horizontalen Gradienten, besonders in unmittelbarer Nachbarschaft der Flugniveaus, aus den Messungen mit großer Zuverlässigkeit bestimmt werden können, sind die Berechnungen von vertikalen Gradienten und von Flächenneigungswinkeln u. U. mit subjektiven Interpretationsfehlern behaftet.

Dazu kommt noch, daß das Flugzeug die mesostrukturellen Details in der Horizontalen so rasch durchfliegt, daß die zeitliche Änderung dieser Strukturen kaum ins Gewicht fällt. Kehrt jedoch das Flugzeug im Laufe eines Zickzackfluges in einem anderen Niveau über den Ausgangsort zurück, so ist inzwischen so viel Zeit verflossen, daß sich nicht nur die Mesostruktur, sondern auch die makrostrukturelle Grundströmung verschoben hat. Dies geht deutlich aus Abb. 3 hervor. (Der aus dieser Abbildung ebenfalls ersichtliche Umstand, daß die Mesostruktur offenbar über längere Zeiträume erhalten bleibt, soll im Abschnitt 3 noch näher untersucht werden.)

Es handelt sich also hier um nicht-synoptische Daten, deren Gewinnung sich über mehrere Stunden erstreckt. In der Analyse mußten die Daten jedoch „quasisynoptisch“ dargestellt werden. Bei Strahlströmen, die einer raschen Verschiebung unterliegen, wird dies ohne Zweifel zu gewissen systematischen Fehlern, besonders in der Beobachtung vertikaler Gradienten, führen. Manche Flüge waren so angelegt, daß bestimmte Höhenbereiche mehrmals durchflogen wurden, so daß eine Abschätzung der oft sehr beträchtlichen Verschie-

bung des Jet Stream möglich war (vgl. beispielsweise die Flüge Nr. 1 und 19). Leider kann auch nicht angenommen werden, daß sich diese Fehler im Mittel aufheben werden, denn die Strahlströme weisen über dem Osten der USA im Durchschnitt eine Tendenz zur Südwärtsverlagerung auf. Da nun die meisten Flugpläne so angelegt waren, daß der Einflug in den Querschnitt in einem tiefen, der Ausflug in einem hohen Niveau erfolgte, muß man annehmen, daß gegenüber einem streng synoptischen Querschnitt die hier abgebildeten Achsen der Strahlstromkerne in größeren Höhen etwas weiter südlich liegen als in tieferen Niveaus.

Trotzdem erscheint die Annahme berechtigt, daß durch die Nicht-Gleichzeitigkeit der Messungen die statistischen Ergebnisse nicht allzu sehr gefährdet sind; denn erstens stützen sich die Analysen auf zeitlich benachbarte Flugniveaus, so daß die Verschiebung der analysierten Felder noch nicht so stark ins Gewicht fällt (wo räumlich benachbarte Niveaus nicht unmittelbar nacheinander durchflogen wurden, sondern erst nach Ablauf einer längeren Zeitspanne, wurde dies in der Analyse berücksichtigt), und zweitens erfolgte die Auswertung der verschiedenen in der Statistik (Abschnitt 3) verarbeiteten Parameter in verhältnismäßig kleinen Netzabständen. Die mittlere Verteilung der verschiedenen Parameter in bezug auf die vertikale Strahlstromachse kann daher als ziemlich gesichert betrachtet werden.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß manche Flugabschnitte, besonders während des An- und Abfluges, nicht genau in der Querschnittebene liegen. Da dadurch die horizontalen Gradienten der Windgeschwindigkeit und Temperatur störend in die Analyse der Querschnitte eingehen würden, blieben diese Teilstrecken der Flugrouten unberücksichtigt.

2. Die Flugmessungen

2.1. Flug Nr. 1, am 10. August 1956

Flug Nr. 1 startet am 10. August 1956 um 15.35 GCT und durchflog einen schwachen sommerlichen Strahlstrom, dessen Maximum im Gebiet der Großen Seen lag. Die maximalen Windgeschwindigkeiten betragen im 250-mb-Niveau etwas über 60 m/sec (Abb. 4). Dies steht in guter Übereinstimmung mit dem Geschwindigkeitsmaximum von 122 Knoten im Flugquerschnitt (vgl. Abb. 6). Etwas südlich der Position der Strahlstromachse verläuft eine — allerdings nicht sehr deutlich ausgeprägte — Kaltfront (Abb. 5), ein Anzeichen dafür, daß die barokline Zone unterhalb des Jet Streams bis in Bodennähe reicht. Es läge daher die Annahme nahe, daß es sich hier um den „Polarfront“-Typ des Jet Stream handelt. Dagegen spricht allerdings die große Höhe, in der das Jet-Maximum auftritt (37 000 Fuß oder ungefähr 220 mb, während dem Polarfront-Jet eine Durchschnittshöhe von etwa 300 mb oder 30 000 Fuß zugeschrieben wird). Es ist dies also wiederum einer der zahlreichen Fälle, bei dem die revisionsbedürftige Terminologie „Polarfront“-Jet und „Subtropen“-Jet versagt (vgl. (18, 19)).

Die Isotachenanalyse in Abb. 4 zeigt im Einzugsgebiet des durchflogenen Jetmaximums eine Aufspaltung der Höhenströmung in zwei Strahlstromäste, deren südlicher annähernd über der Hochdruckachse der Bodenwetterkarte verläuft. Aus den verschlüsselten Höhenwindmeldungen zu schließen, liegt das Niveau maximalen Windes entlang der südlicheren der beiden Jet-Achsen etwas unterhalb 12 km (39 000 Fuß), was in guter Übereinstimmung mit dem Flugquerschnitt (Abb. 6) steht. Entlang des nördlichen Astes liegt die Maximalwindfläche etwas tiefer, zwischen 9 und 11 km, also etwas oberhalb des 300-mb-Niveaus. Der nördlichere Ast kommt also eher diesem Charakteristikum eines

Polarfront-Jet nahe, zumal wenn man berücksichtigt, daß es sich um eine sommerliche Wetterlage handelt, bei der Tropopause und Jet-Kern an und für sich höher liegen als im Winter.

Abb. 6 und 7 enthalten die aus Flug Nr. 1 gewonnenen Verteilungen der Windgeschwindigkeit (Knoten) und der potentiellen Temperatur ($^{\circ}\text{K}$ *) im vertikalen Querschnitt. Wie aus der Anlage der Flugroute (lang strichlierte Linien mit Pfeilen) hervorgeht, wurde der Schnitt durch den Strahlstrom in je einem aufsteigenden und einem absteigenden Zickzack-Kurs vermessen. Zwischen den beiden Kursen ergeben sich beträchtliche Differenzen in Windgeschwindigkeit und Temperatur, was im vorliegenden Falle auf eine rasche Veränderlichkeit der Strahlstromstruktur schließen läßt. Die Analyse für die Messungen im aufsteigenden Ast ist durch volle, im absteigenden durch kurz strichlierte Linien wiedergegeben. Aus der schraffierten Fläche in Abb. 6, welche die Verschiebung der 100-Knoten-Isotache anzeigt, läßt sich eine deutliche Abschwächungstendenz des Jet Stream erkennen. Dies ist nicht verwunderlich, da der Querschnitt im Einzugsgebiet eines — offenbar rasch nach Osten abwandernden — Jet-Maximums liegt (vgl. Abb. 4). Die Strahlstromachse selbst (dick strichlierte bzw. punktierte Linie) erlitt in der Zeit, welche die Flugmessungen beanspruchten, nur geringfügige Verschiebungen. Allerdings ist die Position der Achse nicht mit allzu großer Sicherheit gegeben, da sie ganz am nördlichen Rand des Querschnittes verläuft.

Die Isothermen der potentiellen Temperatur lassen auf der antizyklonalen Seite des Strahlstromes das Vorhandensein einer tiefen, annähernd adiabatischen Schicht erkennen, die oben und unten von stabilen Zonen flankiert wird. Der „Isentropenbuckel“ (vgl. (16, 17)) erscheint bei etwa 38 000 Fuß und 39°N besonders deutlich ausgeprägt und wurde in der Analyse durch dicke strichpunktierte Linien bezeichnet. Weiter nördlich schließt sich daran eine markante Einsenkung der Isentropenflächen, der „Isentropengraben“, der eine Verlagerungstendenz nach Süden aufweist. In der 250-mb-Karte (Abb. 4) erscheinen diese Charakteristika als Kältezunge südlich der Jet-Achse und als Warmluftzunge nördlich davon.

Es ist anzunehmen, daß die Wölbungen in den Isentropenflächen durch Vertikalbewegungen hervorgerufen werden, die zu einer Verschiebung dieser Flächen führen. Eine Abschätzung des Vorzeichens dieser Bewegungen läßt sich nur schwer durchführen. Aus dem analysierten Querschnitt allein lassen sie sich nicht berechnen und die Höhenwindkarte (Abb. 4) ist von unzureichender Genauigkeit. K u e t t n e r und M c L e a n (9) geben ein Verfahren an, das sich die Tatsache zunutze macht, daß das Flugzeug seine Fluggeschwindigkeit (true air speed) erhöht, wenn es unter dem Einfluß eines Aufwindes seine Höhe beizubehalten sucht. Gleichzeitig „drückt“ der Pilot die Maschine. Bei Abwind verhält sich die Maschine entgegengesetzt. Somit kann aus einer Registrierung der „true air speed“ und des Neigungswinkels (pitch) ein grobes Maß für die Vertikalbewegung gewonnen werden. K u e t t n e r und M c L e a n fanden für eine Geschwindigkeitsänderung von 1 Knoten eine äquivalente Vertikalgeschwindigkeit von etwa 0,1 bis 0,2 m/sec. Das Verfahren ist viel zu grob und von einer Reihe unkontrollierbarer Faktoren abhängig (unter anderem von der Leistungsänderung der Motoren bei verschiedener Lufttemperatur), als daß den Ergebnissen allzu großes Gewicht beigemessen werden könnte. Trotzdem wurde unter starker Glättung aus den „true-air-speed“-Messungen in Abb. 8 versucht, eine Verteilung der Vertikal-

* Da die Staupunkttemperatur bei diesem Flug ausfiel, wurden die Abmessungen des Vortexthermometers verwendet.

geschwindigkeit zu erhalten, in der Annahme, daß bei den Traversierungen Auf- und Abwinde einander annähernd die Waage halten. Das Vorzeichen der Vertikalgeschwindigkeiten wird durch etliche Cirrenbeobachtungen bestätigt, die in Abb. 8 durch Rasten kenntlich gemacht wurden. Lediglich die durchflogene Cirrendecke bei 32 000 Fuß zwischen 39 und 40° N würde teilweise in eine Zone mit Absinkbewegung fallen.

Die geschätzte Verteilung der Vertikalbewegung würde mit der in Abb. 7 wiedergegebenen thermischen Struktur der Atmosphäre in gutem Einklang stehen. (Die Analyse wurde auf die aufsteigende Flugroute bezogen; Messungen während der absteigenden Route wurden entsprechend charakteristischer Verschiebungen im Temperaturfeld versetzt.) Zwischen Strahlstromachse und Hauptachse des Isentropenbuckels zeigen die Fluggeschwindigkeitsmessungen Anzeichen einer Absinkbewegung. Tatsächlich erleidet eine Ausbuchtung des Isentropenbuckels (in Abb. 7 ebenfalls durch eine dicke, strichpunktierte Linie markiert) einen raschen Abbau, wie einem Vergleich der strichliert und voll gezeichneten Analysen entnommen werden kann. Das Absinken in diesem Gebiet würde auch mit dem Vorrücken des Isentropengrabens nach Süden übereinstimmen. Eine aufsteigende Bewegung auf der Südflanke des Isentropenbuckels scheint ebenfalls deutlich gegeben zu sein.

Ein schmales Gebiet aufsteigender Bewegung innerhalb der „Jet-Stream-Front“ — also solche wollen wir die stabile und barokline Zone unterhalb des Strahlstromkernes bezeichnen — würde die häufig in diesem Gebiet auftretende hohe Bewölkung rechtfertigen (10). Nördlich davon scheint sich noch einmal ein Gebiet mit Absinkbewegung einzustellen. Unter Berücksichtigung der Vorticityadvektion wäre dieses Absinken wohl erklärbar, denn der Flugquerschnitt liegt im Einzugsgebiet eines Jet-Maximums, das im rechten rückwärtigen Quadranten Konvergenz im Strahlstromniveau erwarten ließe. In gutem Einklang damit stünde auch die am linken oberen Rand der Abb. 8 angedeutete und durch Cirrus-Beobachtungen belegte aufsteigende Bewegung. In den Wirksamkeitsbereich einer direkten Zirkulation mit aufsteigender Bewegung auf der antizyklonalen Seite des Jet Stream könnte auch die Aufwärtsbewegung im rechten oberen Teil von Abb. 8 fallen. Das Aufgleiten innerhalb der Jet Stream-Front und das Absinken rechts der Strahlstromachse läßt sich jedoch aus diesen makrometeorologischen Überlegungen nicht einsehen.

Eine Mesostruktur der Vertikalbewegung im Bereich des Jet Stream, von derselben Größenordnung der Ausdehnung mit Vertikalgeschwindigkeiten von etwa 1 m/sec, wurde auch von K u e t t n e r und M c L e a n (9) gefunden.

Abb. 9 enthält die Auswertung der Normalkomponente. Im unteren Teil des Querschnittes herrschen nördliche Strömungskomponenten vor. Aus der Isentropenanalyse (Abb. 7) läßt sich eine Verlagerungsgeschwindigkeit des Isentropengrabens nach Süden von etwa 20 Knoten und darüber abschätzen. Das Vorzeichen der Vertikalbewegung, das man aus einer oberflächlichen Betrachtung der Bewegungsrichtung in Abb. 9 und der Neigung der Isentropenfläche (Abb. 7) erhalten würde, müßte also gerade im oberen Bereich der Jet Stream-Front negativ sein. Die Isentropenflächen scheinen sich hier jedoch rascher nach Süden zu bewegen, als durch die Normalkomponente angegeben wird. Dadurch läßt sich der scheinbare Widerspruch, der sich gegenüber der (geschätzten) Verteilung der Vertikalbewegung (Abb. 8) einstellt, vorzeichenmäßig klären.

Die Betrachtungsweise in einem Querschnitt allein genügt allerdings nicht, denn die Hebung, die durch die

Südwärtsverlagerung der Isentropenflächen (ohne Berücksichtigung der Normalkomponente) bei etwa 32 000 Fuß und 41° 30' N verursacht würde, hätte nur die Größenordnung von etwa 0,05 m/sec, wäre also wesentlich geringer als die laut Abb. 8 aus den Fluggeschwindigkeitsänderungen geschätzte. Es müssen daher die Strömungsvorgänge entlang der Strahlstromachse eine wesentliche Rolle spielen, was ja von vornherein zu erwarten ist.

2.2. Flug Nr. 5, am 12. September 1956

Dieser Flug startete um 12.57 GCT, um einen schwachen Strahlstrom über Kentucky und Tennessee zu durchfliegen, der an der Westseite eines kräftigen Tiefdrucktroges verlief (Abb. 10). Eine schwach ausgeprägte Front (Abb. 11), die sich bei etwa 40° N quer durch die Vereinigten Staaten erstreckt, steht offensichtlich im Zusammenhang mit diesem Strahlstromast. Das Hauptsystem des Polarfront-Jet verläuft weiter nördlich und weist auch höhere Windgeschwindigkeiten auf (> 50 m/sec).

Im Bereich des ganzen Querschnittes von Dayton, Ohio, bis Nashville, Tenn., wurde Quellwolkenbildung beobachtet, die im Raume von Cincinnati, Ohio, — wohl an der in Abb. 11 eingezeichneten Front — in größere Cumulonimben überging.

Wie der Abb. 10 zu entnehmen ist, verläuft der Flugquerschnitt im Einzugsgebiet eines schwachen Jet-Maximums. Die größten Windgeschwindigkeiten treten nahe dem 200-mb-Niveau auf.

Die Konstanz des Windfeldes bleibt in den zweimal durchflogenen Niveaus annähernd gewahrt. Lediglich die Geschwindigkeiten im Jet-Kern scheinen einer leicht abnehmenden Tendenz zu unterliegen. (Die Analyse der Abb. 12 bezieht sich auf die aufsteigende Flugroute.)

Angaben über CAT, Kondensstreifen und Wolken durchfliegen fehlen bei diesem Flug. Aus den Auszeichnungen des Co-Piloten geht hervor, daß bei etwa 37° N die Cumuli congesti bis etwa 23 000 Fuß reichten und in Gewitter übergingen. Laut Abb. 13 herrschen in diesem Gebiet ausgeprägte barokline Verhältnisse im Strahlstrombereich. Aus der Analyse der Normalkomponente (Abb. 14) läßt sich außerdem in der oberen Troposphäre Divergenz — zumindest in dieser Komponente — erwarten.

Da der Querschnitt die antizyklonale Seite des Jet Stream nicht weit genug anschnidet, muß für diesen Flug eine Auswertung der verschiedenen Parameter in bezug auf den Isentropenbuckel als Koordinatenursprung fortfallen. Eine Andeutung des Buckels besteht am rechten Rand der Abb. 13.

In dieser Abbildung ist außerdem eine grobe Abschätzung der Vertikalbewegung aus den Registrierungen der „true air speed“ eingetragen (punktierte Linien). Die Gebiete mit Aufwärtsbewegung decken sich gut mit den Anzeichen eines Isentropenbuckels, während im Isentropengraben Absinkbewegung vorzuherrschen scheint.

2.3. Flug Nr. 7, am 14. September 1956

Der Start erfolgte um 13.20 GCT. Eine Böenlinie, offenbar assoziiert mit der in Abb. 16 angedeuteten Kaltfront, reichte zur Startzeit bis ins Gebiet des Wright-Patterson-Flugstützpunktes und wurde auch weiter westlich vom Querschnitt des Fluges Nr. 7 angeschnitten. Im Bereich dieser Böenlinie stießen die Cumulonimben bis zu einer Höhe von 40 000 Fuß vor.

Aus Abb. 15 läßt sich erkennen, daß der Querschnitt im Deltagebiet eines deutlich ausgeprägten Strahlstrommaximums liegt. Im Isotachenverlauf ist eine Spaltung des Jet Stream angedeutet. Flug Nr. 17 durchfließt den südlichen der beiden Strahlstromäste. Der nördliche Ast steht im Zusammenhang mit der in Abb. 16 gezeigten Front im Gebiet des Lorenz-Stromes und der Großen Seen, während der südliche Ast gegen den Schwerpunkt des Subtropenhochs hin abbiegt.

Abb. 17 enthält die Isotachen des Flugquerschnittes. Eine doppelte Struktur des Strahlstromkernes tritt deutlich in Erscheinung: Das obere Maximum liegt mit 122 Knoten bei 38 720 Fuß, während das untere mit nur um wenig geringerer Windgeschwindigkeit in die Nähe des 34 000-Fuß-Niveaus fällt.

Aus der Temperaturanalyse der Abb. 18 geht hervor, daß das obere Jet-Maximum an seiner antizyklonalen Seite von einem markanten Isentropenbuckel begleitet ist (dicke, strichpunktierte Linie), während das untere Maximum auf seiner zyklonalen Seite eine schwache Aufwölbung der Isentropenflächen aufweist.

In einer früheren Arbeit (23) wurde bereits darauf hingewiesen, daß eine doppelte Struktur des Jet-Kernes einen Übergangsmechanismus anzudeuten scheint, der eine Verlagerung des Strahlstromes in größere Höhe bewirkt. Wenn auch beim vorliegenden Flug dieser Mechanismus in den Windmessungen nicht direkt angedeutet ist (wie dies etwa bei Flug Nr. 19 der Fall ist), so läßt doch ein Vergleich zwischen Isotachen und Isentropen darauf schließen, daß die vertikalen Scherungsverhältnisse, besonders in der Übergangsschicht zwischen den beiden Jet-Maxima, nicht im geostrophischen Gleichgewicht stehen. Es sind also gerade hier Änderungen in der Struktur des Windfeldes zu erwarten.

In Abb. 18 ist außerdem eine Abschätzung der Vertikalgeschwindigkeit (aus „true air speed“ und „pitch“) eingetragen. Das Vorzeichen der Bewegung deckt sich gut mit den vom Co-Piloten angegebenen Beobachtungen über Wolkenbänke (langgestreckte „Fingerwolken“) und Böenlinien. Die Abschätzung wurde wieder unter den Voraussetzungen getroffen, daß bei den einzelnen Traversierungen des Jet Stream die Auf- und Abwärtsbewegungen einander annähernd das Gleichgewicht halten, und daß eine air-speed-Änderung von 1 Knoten einer vertikalen Windgeschwindigkeit von etwa 0,1 m/sec entspricht.

Eine positive Vertikalströmung wird wiederum auf der antizyklonalen Seite des Isentropenbuckels beobachtet, mit maximalen Werten von etwa 2 m/sec in der Nähe der Böenlinie. Absinkbewegungen herrschen dagegen hauptsächlich in der stabilen und baroklinen Jet-Stream-Front bei etwa 35 000 Fuß und 40,5° N und auf der Südseite des „Isentropengrabens“ vor.

Abb. 19 enthält eine Darstellung der Normalkomponente. Im Vergleich zur Windrichtung im Punkt maximalen Windes (der bei diesem Flug im oberen Strahlstromkern liegt) erfolgt im Bereich des unteren Jet-Kernes eine deutliche Winddrehung nach der antizyklonalen Seite hin.

Während in makrometeorologischer Betrachtungsweise in divergenzfreien Niveaus maximale Vertikalbewegung zu erwarten ist, scheint nach einem Vergleich zwischen Abb. 18 und 19 eine derartige Phasenbeziehung zwischen Vertikalgeschwindigkeit w und der Größe $\frac{\partial v}{\partial y}$ in der Mesostruktur nicht unbedingt vorhanden zu sein. Es muß allerdings dazu erwähnt werden, daß sich der Term $\frac{\partial u}{\partial x}$, der zur Berechnung der vollständigen horizontalen Divergenz notwendig ist, aus

den Flugquerschnitten nicht bestimmen läßt und aus der Höhenwetterkarte (Abb. 15) nicht mit genügend mesostruktureller Detailliertheit hervorgeht.

2.4. Flug Nr. 11, am 17. Januar 1957

Der Start erfolgte um 23.09 GCT vom Wright-Patterson-Flugstützpunkt Dayton, Ohio, aus und dauerte bis 18. Jan. 04.10 GCT. In Abb. 20 ist die 250-mb-Karte für 18. Jan. 03.00 GCT gezeigt. Demnach verläuft der Flugquerschnitt im Einzugsgebiet eines kräftig entwickelten Jet Stream, in dessen vorderem, linkem Quadranten im Raum von Neufundland eine okkludierende Bodenzyklone liegt. (Auf eine Reproduktion der Bodenwetterkarte wurde verzichtet, da nur eine Analyse von 06.30 GCT vom 17. Jan., also 20^{1/2} Stunden vor dem Termin der in Abb. 20 gezeigten Höhenkarte zur Verfügung stand.) Eine Kaltfront läuft von dieser Zyklone aus bis in den Raum von Florida. Offensichtlich handelt es sich bei dem durchflogenen Strahlstrommaximum um einen Polarfront-Jet (Jetkern liegt unter 30 000 Fuß), der eine bis zum Boden reichende barokline Zone besitzt. Der nördliche der drei Jetfinger, in die sich das Einzugsgebiet aufspaltet, steht im Zusammenhang mit einer neuen Front, die an der Ostflanke der kanadischen Rocky Mountains in Erscheinung tritt.

Abb. 21 enthält die Isotachen des Flugquerschnittes. Den vertikalen Gradienten im linken Teil dieser Analyse ist keine allzu große Bedeutung beizumessen, denn sie sind durch den Zeitunterschied zwischen den beiden Flugniveaus verfälscht.

Im mittleren Flugabschnitt, der zweimal durchflogen wurde, macht sich eine geringe Südwärtsverlagerung des Jet Stream bemerkbar: Innerhalb von 49 Minuten verschiebt sich die Jet-Achse von 36° 17' N auf 36° 03' N, also um 14 Seemeilen. Dies kommt einer Verlagerungsgeschwindigkeit von ca. 17 Knoten gleich. Die Geschwindigkeit im Jet-Kern bleibt dabei nahezu unverändert.

In der Analyse der Abb. 21 wurde auf das später durchflogene Niveau Bezug genommen, da es sich weiter gegen den linken Rand der Abbildung erstreckt. Dadurch erhielt jedoch die vertikale Jet-Achse eine Krümmung, die ihr bei einer synoptischen Betrachtungsweise nicht zukommen würde. Nimmt man mehr oder weniger willkürlich an, daß dieselbe Tendenz einer Südwärtsverlagerung der Jet-Achse auch in den anderen Flugniveaus vorherrscht, so würde die in Abb. 21 dick punktierte Anordnung der Strahlstromachse resultieren. Die Nicht-Synoptizität der Meßdaten führt somit zu erheblichen Fehlinterpretationen, besonders in den vertikalen Gradienten, die sich jedoch kaum vermeiden lassen, solange man nicht über den ganzen Querschnitt Messungen der Verlagerungsgeschwindigkeit besitzt. Daß diese Geschwindigkeit nicht als konstant angenommen werden darf, geht aus einer bereits früher veröffentlichten Analyse des Fluges Nr. 19 (23) hervor.

Die horizontalen Gradienten werden von diesem Mangel, der den nicht-synoptischen Messungen anhaftet, nur unwesentlich berührt.

Dieselben Einschränkungen gelten auch für die in Abb. 22 gezeigte Analyse der potentiellen Temperatur. Isentropenbuckel und -graben erscheinen deutlich ausgeprägt. Im untersten Flugniveau scheint links der Strahlstromachse eine stabile und barokline Schicht aus der Stratosphäre in die Troposphäre hinauszureichen. Wahrscheinlich handelt es sich hierbei um die Jet-Stream-Front. Die starke vertikale Windscherung, die man auf Grund von Radiosondenaufstiegen im Bereich dieser „Front“ erwarten würde, ist in Abb. 21 nicht vorhanden, wohl aber eine beachtliche horizon-

tale Scherung. Würde man die punktierte Strahlstromachse in Abb. 21 als reell ansehen und alle Meßpunkte im unteren Niveau entsprechend nach rechts verschieben, dann erhielte man auch entsprechende vertikale Scherungen in diesem Gebiet (strichlierte Analyse).

Die Analyse der Vertikalgeschwindigkeiten bereitete einige Schwierigkeiten, da die beiden mittleren Niveaus schlecht miteinander in Einklang zu bringen waren. Die Messungen entlang der Nord-Süd gerichteten, kurzen Flugstrecke fügen sich besser an die Ergebnisse vom obersten und untersten Niveau und wurden daher in Abb. 22 bevorzugt.

Der Co-Pilot meldete bei 35°52'N dünnen Altostratus in 28 000 Fuß Höhe (in Abb. 22 durch Raster angedeutet). Südlich von 34°21'N wurde bei etwa 20 000 Fuß eine geschlossene Stratocumulusdecke beobachtet. Nördlich der Jet-Achse schien klares Wetter vorzuherrschen.

Abb. 23 enthält die Normalkomponente, die im wesentlichen von der Verteilung der Windrichtung im Querschnitt beherrscht wird. Die beiden mittleren Flugstrecken zeigen wiederum gute Übereinstimmung der Meßwerte.

2.5. Flug Nr. 12, am 18. Januar 1957

Dieser Flug wurde bereits in einer früheren Veröffentlichung (23) einer eingehenden Analyse unterzogen. Die Traversierung erfolgte im Einzugsgebiet desselben Jet Stream, der auch von Flug Nr. 11 angefliegen wurde. Die Querschnittsanalysen umfassen das Gebiet zwischen zwei Jet-Fingern und lassen einen Isentropenbuckel, der wohl dem nördlichen Jet-Ast angehört, sowie ausgeprägte stabile und barokline Zonen im Bereich des südlichen Astes erkennen.

2.6. Flug Nr. 13, am 23. Januar 1957

Im Deltagebiet eines wohlausgeprägten Strahlstromes gelegen, läßt auch dieser Flug deutlich eine Aufgliederung der thermischen Struktur in mehr oder weniger stabile Zonen erkennen. Eine ausführliche Analyse erfolgte bereits in einer früheren Publikation (19).

2.7. Flug Nr. 17, am 5. Februar 1957

Der Start erfolgte um 15.40 GCT von Dayton, Ohio, aus. In 4 Traversierungen wurde im Raum der Großen Seen das Einzugsgebiet eines kräftigen Strahlstrommaximums durchmessen. Abb. 24 läßt im Bereich des Meßfluges die Fusion zweier Strahlströme erkennen, deren südlicher mit einer flachen, stationären Front in Zusammenhang steht (Abb. 25), während der rückwärtige Ausläufer des nördlichen Astes mit einer Frontalzone im Nordwesten der USA assoziiert ist. Ein kräftiges Bodenhoch im Gebiet der Großen Seen kann mit der Konvergenz und Absinkbewegung im rückwärtigen linken Quadranten des nördlichen (langgestreckten) Jet-Maximums in Einklang gebracht werden.

Der Schwerpunkt des Bodenhochs liegt bei etwa 42°N. Dies steht in guter Übereinstimmung mit der relativ kräftigen Absinkbewegung, die in Abb. 27 im untersten Flugniveau in dieser geographischen Breite angedeutet erscheint.

Die Analyse der Flugmessungen bereitete bei diesem Fluge einige Schwierigkeiten. Die einzelnen Traversierungen des Jet Stream lagen so weit auseinander, daß der Höhenmaßstab in den Abb. 26 bis 28 verkleinert werden mußte. Entsprechend wurde die Zuverlässigkeit der Analysen, besonders was die vertikalen Gradienten anbelangt, stark in Mitleidenschaft gezogen, da der Interpretation der Meßdaten verhältnismäßig viel Spielraum gelassen wird. Dazu kommt noch, daß

im obersten Niveau das Vortexthermometer ausgefallen war, so daß keine Kontrollmöglichkeit der für die Analyse in Abb. 27 verwendeten Stagnationstemperatur bestand. Leider stellte sich heraus, daß die unkorrigierten Temperaturangaben für diesen Flug zwischen dem vorletzten und dem obersten Flugniveau beträchtliche superadiabatische Temperaturgradienten anzeigen würden. Aus den Kondensstreifenbeobachtungen (in Abb. 27 durch eine dicke Linie entlang der Flugroute angedeutet) und dem Flug durch eine Cirrenschicht (schraffierte Zone) läßt sich erkennen, daß im Bereich des obersten Niveaus die Luftmassen relativ feucht waren. Nach E n d l i c h und R a d o s (8) können die Stau-punkttemperaturen bei Wolkenflug um etliche Grad zu kalt angegeben sein, da sie nur für trockenadiabatische Zustandsänderungen auf den dynamischen Einfluß der Fluggeschwindigkeit korrigiert worden sind.

Wie groß der Meßfehler in den Temperaturen des obersten Niveaus tatsächlich ist, läßt sich bei fehlenden Vortextemperaturen schwer abschätzen. In Abb. 27 wurde in diesem Niveau eine Korrektur von +4° C angebracht, die jedoch noch immer die Möglichkeit größerer Fehler offenläßt. Die horizontalen Temperaturgradienten sowie die Position von Isentropenbuckel und Isentropengraben können jedoch auch auf der obersten Flugroute als gesichert angesehen werden.

Die zwei in Abb. 24 nebeneinander liegenden Strahlstromkerne lassen sich in der Isotachenanalyse der Abb. 26 nur undeutlich erkennen. Lediglich am rechten unteren Rand dieser Abbildung ist ein zweites Geschwindigkeitsmaximum angedeutet, doch läßt sich aus den Flugmessungen nicht feststellen, ob es sich auch in große Höhen erstreckt, wie aus den Radiosondenanalysen der Abb. 24 hervorzugehen scheint. Es wäre wohl auch möglich, daß die Fusion der beiden Strahlströme im Bereich von Flug Nr. 17 nur durch die relativ geringe antizyklonale Scherung in der Höhe des Strahlstromkernes zum Ausdruck kommt.

In Abb. 28 ist in der gewohnten Weise die Normalkomponente dargestellt.

2.8. Flug Nr. 18, am 15. Februar 1957

Der Flug startete um 18.03 GCT vom Wright-Patterson-Flugstützpunkt. Aus Abb. 29 ist ersichtlich, daß ein schwach antizyklonal gekrümmtes Jet-Maximum angeschnitten wurde. Berücksichtigt man die mehr als drei Stunden Zeitunterschied, die zwischen den Radiosondenaufstiegen und den Flugmessungen liegen, so kann man wohl annehmen, daß der Schnitt in der Nähe des Jet-Maximums lag. Die Bodenwetterverhältnisse sind in Abb. 30 wiedergegeben.

Die Auswertung der Flugmessungen bereitete einige Schwierigkeiten, da der Flugplan einige Überschneidungen aufwies, denen beträchtliche Zeitunterschiede zugrunde lagen. In der Geschwindigkeitsmessung traten diese Unterschiede besonders zwischen Niveau 4 (auf dessen Werte sich die strichlierten Isotachen in Abb. 31 beziehen) und Niveau 1 auf (voll gezeichnete Isotachen in Abb. 31). Sie lassen auf eine Abschwächungstendenz im unteren der beiden Jet-Kerne schließen. Eine ähnliche Tendenz läßt sich auch aus einem Vergleich der Meßwerte entlang Niveau 2 und 6 erkennen, denn der letztere der beiden Abschnitte zeigt besonders im Bereich der Jet-Achse etwa um 5 Knoten geringere Geschwindigkeiten als die Analyse in Abb. 31, welche sich auf das Niveau 2 stützt.

Die potentiellen Temperaturen, die aus den Messungen des Stagnationsthermometers berechnet wurden, zeigen im Niveau 1 nördlich von 38½ Grad Nord einen Abfall von 326° K auf 323° K und lassen somit die

Existenz einer stabilen Schicht in diesem Niveau vermuten. In der Analyse der Abb. 32, welche auf das Niveau 4 bezug nimmt, ist eine Stabilität in diesem Gebiet nur mehr schwach angedeutet. Die Verfallstendenz, der das untere Jet-Maximum — aus den Windmessungen zu schließen — unterliegt, scheint sich somit auch in den Temperaturmessungen zu bestätigen.

Ein Isentropenbuckel ist in Abb. 32 bei etwa 39° N angedeutet. Sein vertikaler Verlauf kann aus der Analyse nicht festgestellt werden. Wohl aber tritt der Isentropengraben deutlich in Erscheinung.

Die Vertikalbewegung — ebenfalls in Abb. 32 in m/sec eingetragen — wurde wiederum größenordnungsmäßig aus "true air speed" und "pitch" abgeschätzt. Im oberen Teil des Querschnittes ist der Isentropengraben mit Absinkbewegung, der Buckel, jedoch mit aufsteigender Bewegung korreliert. In etwa 34 000 Fuß Höhe und bei 38—39° Breite fällt dagegen die positive Vertikalbewegung in das Gebiet des Grabens. Es ist das wiederum der Bereich, in dem auf Grund der Temperatur- und Windmessungen eine Auflösung der stabilen Schicht und des Windmaximums vermutet wurde. Die verhältnismäßig kräftige Vertikalbewegung würde somit ebenfalls diese unterstützen.

Wolkenbeobachtungen des Co-Piloten zeigen dünnen Cirrostratus bei etwa 34 000 Fuß und eine geschlossene Cirrocumulusdecke bei etwa 33 000 Fuß auf der antizyklonalen Seite des Jet Stream. Die Beobachtungen wurden in Abb. 32 jedoch nicht eingetragen, da die Ausdehnung der Wolkendecke in den Aufzeichnungen nicht genau angegeben ist. Abb. 33 enthält eine Analyse der Normalkomponente.

2.9. Flug Nr. 19, am 16. Februar 1957

Flug Nr. 19, im Deltagebiet eines gut ausgeprägten Strahlstromes geflogen, zeichnete sich vor allem durch die doppelte Struktur des Strahlstromkernes aus. Mit Hilfe von mehrfach durchflogenen Niveaus konnte die Geschwindigkeit der Südwärtsverlagerung der Isotachen berechnet und dabei festgestellt werden, daß der untere der beiden Strahlstromkerne einer auflösenden, der obere Kern dagegen einer verstärkenden Tendenz unterlag. Es wurde die Vermutung ausgesprochen, daß darin der Mechanismus einer diskontinuierlichen Verlagerung des Jet-Kernes gegen größere Höhen und gegen höhere potentielle Temperaturen, verbunden mit einer gleichzeitigen Südwärtsverlagerung der Jet-Achse, verborgen liegt. Ausführliche Beschreibungen dieses Fluges wurden bereits veröffentlicht (23).

2.10. Flug Nr. 20, am 20. Februar 1957

Die Maschine startete um 15.45 GCT vom Wright-Patterson-Flugstützpunkt, um einen entlang der amerikanischen Golfküste verlaufenden schwachen Strahlstrom zu erkunden (Abb. 34). Vom Flugquerschnitt, der im wesentlichen zwischen Cross City, Florida, und Athens, Georgia, verlief, wurde das Einzugsgebiet des südlichen Strahlstromastes erfaßt, der mit einer flachen Kaltfront (Abb. 35) in Zusammenhang stand. (Der Isotachenverlauf über dem Atlantik ist nur durch wenige Beobachtungen belegt und kann daher nicht als gesichert gelten). Ein nördlich davon verlaufender Ast erstreckt sich bis an die Nordwestküste der Vereinigten Staaten, wo er ausgedehnte Niederschlagsgebiete im Gefolge hat. Beide Äste tangieren einander östlich der amerikanischen Atlantikküste im Bereich einer ausgeprägten Bodenzyklone.

Die Windmessungen der Radiosonden und die in Abb. 36 analysierten Isotachen zeigen gute Überein-

stimmung. Der nördliche Strahlstromast, dessen antizyklonale Flanke im Gebiet von Dayton (Wright-Patterson-Flugstützpunkt) auftritt, läßt sich auch am linken Rand der Abb. 36 erkennen. Der Höhenlage nach (240 mb) müßte man den bei 31° N durchflogenen Strahlstrom als Subtropen-Jet ansehen, jedoch die Tatsache, daß er im Raum von Florida von einer Kaltfront begleitet ist, ließe ihn eher als Polarfront-Jet erscheinen. Eine Differenzierung zwischen Subtropen-Jet und Polarfront-Jet ist besonders über dem amerikanischen Kontinent schwierig, worauf schon öfter verwiesen wurde.

Ob das bei etwa 39 000 Fuß in Abb. 36 angedeutete sekundäre Jet-Maximum einem diskontinuierlichen Verlagerungsprozeß entspricht, wie er bei Flug Nr. 19 festgestellt wurde, kann an Hand der vorliegenden Flugmessungen nicht mit Sicherheit ausgesagt werden. Das untere Strahlstrommaximum bei 35 550 Fuß zeigt allerdings eine deutliche Abschwächungstendenz: Innerhalb der drei Stunden, die zwischen den beiden Durchfliegen des Windmaximums in diesem Niveau liegen, verschiebt sich das Maximum von 31° 32' N auf 30° 55' N und verliert gleichzeitig um 26 Knoten an Intensität.

Die Isothermen der potentiellen Temperatur sind für denselben Querschnitt in Abb. 37 dargestellt. Der zum südlichen Strahlstromast gehörige Isentropenbuckel wird bei 30° N nurmehr undeutlich angeschnitten. Ein zweiter Buckel bei 37° N scheint mit dem nördlichen Ast in Verbindung zu stehen. Er ist jedoch wegen des großen Zeitunterschiedes (5½ Stunden) zwischen den beiden Flugniveaus in diesem Teil des Querschnittes nicht mehr analysierbar. Dafür geht die Position des Isentropengrabens um so deutlicher aus Abb. 37 hervor.

Zwischen den beiden Flügen bei etwa 35 700 Fuß bestehen wiederum beachtliche Unterschiede. Die Isothermen beziehen sich auf den zuerst durchflogenen Abschnitt. Zum Vergleich wurden auf dem letzten Flugniveau die Stellen markiert, an denen die potentielle Temperatur 350° K gemessen wurde. Innerhalb von drei Stunden hat sich hier die Atmosphäre um nahezu 4 bis 9° K erwärmt. Ein Großteil dieser Erwärmung muß wohl auf die Advektion des in Abb. 34 über Texas liegenden warmen Gebietes zurückgeführt werden. Aus der Art, wie Stromlinien und Isothermen in Abb. 34 einander schneiden, müßte man aufsteigende Luftbewegungen im Bereich des Querschnittes und im 250-mb-Niveau vermuten. Die Abschätzung der Vertikalgeschwindigkeit aus den Schwankungen der "true air speed", die in Abb. 37 wiederum punktiert eingetragen sind, bestätigen dies. Man könnte also diese Übereinstimmung zumindest dem qualitativen Wert der Schätzungen aus den Flugmessungen zugute halten.

Bei etwa 35 700 Fuß geht die Erwärmung, besonders südlich von 32½° N, nicht mehr allein auf das Konto horizontaler Advektion. Es treten hier starke Absinkbewegungen auf (größenordnungsmäßig auf über 2,5 m/sec geschätzt), die vermutlich eine Südwärtsverlagerung des Isentropengrabens bedingen dürften. Zwischen den beiden Flugabschnitten in diesem Niveau treten wiederum durch den Zeitunterschied bedingte Diskrepanzen auf. So zeigt der zuletzt durchflogene Abschnitt Absinkbewegungen südlich 33° N, mit einem Maximum bei etwa 32° 10', während beim früher durchflogenen Niveau das Gebiet mit negativer Vertikalbewegung weiter nach Süden verschoben erscheint.

Bemerkenswert ist die gute Übereinstimmung zwischen Gebieten mit aufsteigender Luftbewegung und den beiden Isentropenbuckeln. In Abb. 37 sind Kondensstreifenbeobachtungen durch dicke Linienführung der Flugroute gekennzeichnet. Mit Ausnahme von

zwei kleinen Teilstrecken bei 35 700 und bei 41 600 Fuß fügen sich diese subjektiven Beobachtungen des Co-Piloten gut in die Folge von Gebieten positiver und negativer Vertikalbewegung ein.

Abb. 38 enthält die Analyse der Normalkomponente. Im rechten Teil der Abbildung wurde versucht, charakteristische mesostrukturelle Details, die sich parallel zu der in Abb. 37 gezeigten stabilen Zone erstrecken, in ihrer vertikalen Erstreckung zu analysieren. Es scheinen isentrop gelagerte Schichten mit positiven und negativen Anomalien der Normalkomponente nebeneinander zu liegen. Vergleicht man die Mesostruktur in der Normalkomponente mit den Anomalien in der Abschätzung der Vertikalbewegung aus "pitch" und "true air speed", so erhält man das in Abb. 39 angedeutete Schema einer mesostrukturellen Zirkulation, die der Grundströmung überlagert ist.

Aus Grundströmung und Mesostruktur zusammen läßt sich das Bild helikaler (schraubenförmiger) Wirbel mit horizontalen Achsen rekonstruieren, das auch aus Wolkenbeobachtungen (vgl. (22)) gegeben zu sein scheint. Die Wirbelbildung kommt durch eine Phasenverschiebung zwischen den Extremen der Normalkomponente (strichliert) und denen der Vertikalbewegung (dünne volle Linien in Abb. 39) zustande, die nicht in allen Niveaus gleich ist. Während beim Flugniveau Nr. 3 in 37 500 Fuß Höhe die Maxima der Aufwärtsbewegung etwas rechts von den Maxima der Normalkomponente (stärkste Südwinde) liegen, scheinen bei 35 500 Fuß im Niveau Nr. 2 Extreme der Südwindkomponente mit Abwindextremen zusammenzufallen. Die maximalen Vertikalbewegungen in Abb. 39 besitzen — geschätzt aus Schwankungen der "true air speed" — die Größenordnung von etwa 0,5 m/sec.

Eine Korrelation zwischen Aufwinden und negativen Temperaturanomalien scheint im vorliegenden Fall angedeutet.

2.11. Flug Nr. 21, am 27. Februar 1957

Nach dem Start um 15.57 GCT vom Wright-Patterson Flugstützpunkt folgte die Maschine zunächst einem westlichen Kurs bis Springfield, Ill., von da einem Südostkurs bis Chattanooga, Tenn. Der eigentliche Querschnitt, auf dem die folgenden Analysen basieren, wurde zwischen Chattanooga und Savannah, Georgia, geflogen (Abb. 40). Dabei wurde ein kräftiger Strahlstrom aus südwestlicher Richtung durchfolgen, der im Zusammenhang mit einem ausgeprägten Frontensystem stand und in seinem divergenten Vorderquadranten eine Bodenzyklone mit sich führte (Abb. 41).

Laut Abb. 42 liegt der Kern des Jet-Maximums nur wenig unterhalb des 38 000-Fuß-Niveaus. Trotzdem müßte man diesen Strahlstrom wegen seiner zyklonogenetischen Aktivität in der unteren Troposphäre als Polarfront-Jet ansprechen. Sein Einzugsgebiet über dem Golf von Mexiko ist mit Radiosondendaten nur schlecht belegt. Es handelt sich offensichtlich um einen intensiv zyklonal gekrümmten Jet Stream, der einen ausgeprägten Tiefdrucktrog umströmt. Der Flugquerschnitt liegt allerdings in der Nähe des Wendepunktes, so daß hier die Stromlinienkrümmung kaum ins Gewicht fällt.

Die Geschwindigkeitsanalyse der Abb. 42 weist eine bemerkenswerte Elongation des Strahlstromkernes auf, die besonders durch die 105-Knoten-Isotache ausgeprägt erscheint. Es könnte sich dabei mutmaßlich um den Rest eines alten Jet-Kernes handeln, der einem diskontinuierlichen Verlagerungsmechanismus — ähnlich wie bei Flug Nr. 19 — unterlegen ist. Zur Beweisführung müßten Radiosondenquerschnitte früherer Aufstiegstermine herangezogen werden. Dies würde je-

doch den Rahmen der gegenwärtigen Untersuchung übersteigen.

Die thermische Struktur (Abb. 43), welche aus den Aufzeichnungen des Vortexthermometers gewonnen wurde, da das Staupunktthermometer ausgefallen war, weist in dieselbe Richtung, wenn man die stabile Zone negativer Baroklinität bei etwa 35 000 Fuß und 34,5° Breite als den Überrest einer stratosphärischen Frontalzone auffaßt, der offensichtlich in den Strömungsverhältnissen der Abb. 42 starke ageostrophische Komponenten vermuten läßt. Die positive Baroklinität, in welche diese Zone bei 33,5° N übergeht, könnte als Anzeichen einer neuformierten „Jet-Stream-Front“ gedeutet werden.

Isentropengraben und -buckel weisen eine Unterbrechung bzw. starke Verschiebung auf. Vermutlich handelt es sich bei dem Buckel 35°N und 37 500 Fuß um ein Phänomen untergeordneter Bedeutung.

Die punktierten Linien in Abb. 43 geben wiederum die größenordnungsmäßige Verteilung der Vertikalbewegung an, allerdings ohne Berücksichtigung des Neigungswinkels (pitch), der bei diesem Flug nicht registriert wurde. Die Maxima und Minima dieser Bewegung zeigen gegenüber den Positionen von Isentropenbuckel und -graben eine geringfügige Phasenverschiebung. Dieser Umstand zeigt, daß der Temperatureffekt in der Leistungszunahme der Motoren nicht dominiert. In vertikaler Richtung scheinen die Abschätzungen bemerkenswert konsistent zu sein.

Die Wolkenbeobachtungen des Co-Piloten zeigen entlang des ganzen Querschnittes stellenweise bei etwa 34 000 Fuß dünnen Cirrostratus an. Darüber herrscht klares Wetter. Bei etwa 34°31'N werden auch Alto-cumuli und Cumuli congesti gemeldet. Kondensstreifen traten während dieses Fluges durchgehend auf, mit Ausnahme des Flugniveaus bei 37 500 Fuß. Bemerkenswerte Korrelationen mit der Vertikalbewegung lassen sich aus diesen Beobachtungen also nicht erkennen.

Die Verteilung der Normalkomponente geht aus Abb. 44 hervor.

2.12. Flug Nr. 26, am 26. März 1957

Der Start erfolgte um 15.34 GCT vom Wright-Patterson-Flugstützpunkt aus. Die Traversierungen wurden zwischen Cleveland, Ohio und Philadelphia im Delta-gebiet eines stark ausgeprägten südwestlichen Jet Stream geflogen. Aus den Radiosondenberichten (Abb. 45) lassen sich Spitzengeschwindigkeiten von über 90 m/sec entnehmen. Im linken Vorderquadranten dieses Strahlstromes läßt die Bodenwetterkarte (Abb. 46) eine okkludierende Zyklone erkennen, von der aus sich eine Kaltfront bis in den karibischen Raum erstreckt. Die Achse des Jet Stream geht über den Schwerpunkt des Zwischenhochs hinweg, das im Begriff ist, sich dem subtropischen Hochdruckgürtel einzugliedern.

Die Querschnittanalysen mußten in einem veränderten Maßstab aufgetragen werden, da die Flugroute (vgl. Abb. 45) in spitzem Winkel gegen die Breitenkreise verlief. Durch die komplizierte Anordnung des Flugplanes im Bereich des Jet-Kernes (Abb. 47) ließ sich wiederum eine Tendenz der Südwärtsverlagerung der Jet-Achse in der Größenordnung von etwa 9 Knoten feststellen. Da die Flugniveaus zum Teil sehr großen vertikalen Abstand voneinander haben, läßt die Zuverlässigkeit der Analyse im vorliegenden Fall etwas zu wünschen übrig.

Die Analyse der Abb. 47 bezieht sich auf den aufsteigenden Teil der Flugroute. Die Ausbuchtungen der vertikalen Jet-Achse sind wohl zum Teil durch die nicht-

synoptischen Messungen bedingt. Nimmt man an, daß die bei 33 000 Fuß beobachtete Südwärtsverlagerung der Jet-Achse im ganzen Höhenbereich des Querschnittes konstant sei, so würde — bezogen auf den Zeitpunkt der Durchfliegung der Jet-Achse im untersten Flugniveau (1635 GCT) — die in Abb. 47 punktiert eingetragene Jet-Achse resultieren. Die Ausbuchtung der Achse im 31 000-Fuß-Niveau würde also durch eine „quasi-synoptische“ Betrachtungsweise erheblich begründet.

Abb. 48 läßt einen deutlich ausgeprägten Isentropenbuckel erkennen, der unterhalb des Jet-Kernes auf die zyklonale Seite überwechselt. Dies stünde im Einklang mit der im Deltagebiet eines ausgeprägten Strahlstromes zu erwartenden indirekten Zirkulation. Unterhalb des Kern-Niveaus wäre mit Hebungsvorgängen — und daher mit einem Isentropenbuckel — in der Kaltluft zu rechnen, während oberhalb des Kern-Niveaus die Hebungsvorgänge auf der antizyklonalen Seite konzentriert sind.

Die Verteilung der aus der „true air speed“ geschätzten Vertikalbewegung (Abb. 48), punktiert, ist ebenfalls mit einiger Unsicherheit behaftet, stimmt jedoch in groben Zügen mit dem oben Gesagten überein.

Vom Co-Piloten wird bei 40°10' N und bei 39°59' N cirrus filus („Pferdeschwanz-Cirren“) zwischen 31 000 und 34 000 Fuß gemeldet. Die Position dieser Cirren würde sich einigermaßen mit dem Gebiet aufsteigender Luftbewegung decken.

Die Verteilung der Normalkomponente (Abb. 49) läßt besonders in den unteren Niveaus die Richtungsdivergenz der Strahlströmung deutlich erkennen.

2.13. Flug Nr. 27, am 29. März 1957

Nach dem Start um 13.50 GCT vom Wright-Patterson-Flugstützpunkt aus wurde mit südlichem Kurs das Einzugsgebiet eines mäßig starken Strahlstromes durchflogen. Die Existenz der beiden Jet-Finger, die in Abb. 50 aufscheinen, wird auch durch die Flugmessungen bestätigt (vgl. Abb. 51). Die Achse des südlichen Jet-Astes liegt allerdings in Abb. 50 nicht dort, wo sie die Flugmessungen vermuten ließen, doch handelte es sich im vorliegenden Fall um ein rasch nach Osten abwanderndes Jet-Maximum. Der Zeitunterschied zwischen Radiosonden- und Flugmessungen vermag die Diskrepanz wohl zum Großteil zu erklären. Die Flugmessungen lassen übrigens auch eine Aufgliederung in drei Jet-Finger erkennen, was aus den Radiosondenmessungen nicht hervorgeht.

Eine Bodenwetterkarte war den Daten dieses Fluges nicht beigegeben (26), auf eine Wiedergabe muß also hier verzichtet werden. Aus den Wetterkarten des Deutschen Wetterdienstes (6) läßt sich entnehmen, daß der südliche der beiden Strahlstromäste über einer Hochdruckbrücke verläuft, also subtropischen Charakter besitzt. Auch die Flugbeschreibung (26) teilt mit, daß im Zusammenhang mit diesem Jet Stream keine Fronten beobachtet wurden.

Dieser Flugbeschreibung sind etliche interessante Angaben zu entnehmen, die im folgenden in Übersetzung angeführt sind:

„... In der Nähe von Macon, Georgia, wurde der Trog durchflogen. Die Windrichtung wechselte schnell von 290° auf 250°, während die Windgeschwindigkeit nur wenig zunahm (vgl. Abb. 51 unterstes Flugniveau bei etwa 33—34°N). Starke CAT trat hier auf und das Flugzeug wurde in einem starken Aufwind etwa 2000 Fuß gehoben, trotz der Bemühungen des Piloten, es auf konstanter Höhe zu halten (vgl. Abb. 52). Das Flugzeug setzte seinen Südkurs in einem höheren Niveau

fort. Nach etlichen Minuten wurde eine horizontale Windscherung von 35 Knoten innerhalb 7 Flugmeilen angetroffen. Dies ist der extremste Scherungswert, der während einer großen Anzahl von Flügen auftrat. (In Abb. 51 wurde durch die Ausfilterung der Mesostruktur diese Scherung etwas abgemindert). Mäßige Turbulenz trat innerhalb und im Süden dieser Scherungszone auf. Der Jet-Kern wurde mit Windgeschwindigkeiten von 146 Knoten und einer Windrichtung von 236 Grad in 36 000 Fuß Höhe bei Valdosta durchflogen. In Anbetracht der Einmaligkeit der eben gemachten Messungen beschloß die Flugzeugbesatzung, trotz eines gewissen Risikos für die eigene Sicherheit, den zurückgelegten Abschnitt in umgekehrter Richtung zu durchfliegen. Es wurde daher ein nördlicher Kurs eingeschlagen und dieselben Phänomene wiederholten sich in umgekehrter Reihenfolge. Über Atlanta stieg das Flugzeug von 37 000 auf 36 000 Fuß ab. Es wurde wiederum ein Südkurs durch den Jet Stream verfolgt und dieselben Phänomene konnten zum drittenmal beobachtet werden. Über Cross City, Florida, stieg das Flugzeug auf 38 000 Fuß und flog dann nordwärts. Während dieser Traversierung — etwas oberhalb des Jet-Kernes — wurde mäßige Turbulenz gemessen. Über Macon stieg das Flugzeug dann auf 40 000 Fuß und flog nach Cross City. Die Rückkehr zum Wright Flugstützpunkt erfolgte bei 42 000 Fuß. Um 21.01 GCT landete das Flugzeug. Auf den beiden letzten Flugabschnitten wurden große Temperaturgradienten beobachtet. (Vgl. Abb. 52.) Die sehr ungewöhnlichen Scherungsverhältnisse und die Turbulenz, die während dieses Fluges beobachtet wurden, sind umso bemerkenswerter, als die synoptischen Wetterkarten keine frontalen oder konvektiven Wetterabläufe in diesem Gebiet vermuten lassen und da die Geländeeinflüsse wahrscheinlich vernachlässigbar sind . . .“.

Diese Aussagen, die an Hand der unverarbeiteten Daten gewonnen wurden, decken sich gut mit den in Abb. 51 und 52 gezeigten Analysen. Bemerkenswert erscheint, daß die starken Aufwinde, verbunden mit CAT (Böengeschwindigkeiten bis zu 32 Fuß/sec) zum Teil auf der antizyklonalen Seite eines schwachen Jet-Fingers auftraten (Abb. 51). Hier scheinen starke Umlagerungen im Gange zu sein, da die maximalen Aufwärtsbewegungen im Isentropengraben anzutreffen sind. Auch das geostrophische Gleichgewicht der Strömung scheint in diesem Gebiet empfindlich gestört zu sein.

Die enormen horizontalen Windscherungen, von denen oben berichtet wurde, scheinen dagegen zu dem weiter südlich gelegenen Hauptast des Jet Stream zu gehören, in dessen Bereich Isentropenbuckel und -graben wiederum die gewohnte Korrelation mit der Vertikalbewegung aufweisen.

Kondensstreifen wurden von 38° 05' N, im untersten Niveau angefangen, im ganzen Querschnitt beobachtet. Über Wolken fehlen diesmal die Angaben mittels Kontrolllicht (vgl. Abschnitt 1.2). Dafür geht aus den schriftlichen Aufzeichnungen der Besatzung hervor, daß im Bereich, der in Abb. 52 schraffiert eingetragen ist, Wolken angetroffen wurden.

Außer der Bemerkung, daß südlich von 33° 11' N im 35 000-Fuß-Niveau schwere Turbulenz angetroffen wurde und das Flugzeug von hier bis etwa 32° 37' N unter konstanter Motorenleistung 2000 Fuß gehoben wurde, findet man im Logbuch noch eine interessante Eintragung bei 31° 42' N und bei etwa 36 100 Fuß, wonach das Flugzeug beim Eintritt in Wolken an Höhe gewann — ebenfalls im Einklang mit der in Abb. 52 gezeigten Analyse der Vertikalbewegung. Eine weitere Eintragung bei 30° 33' N und 36 300 Fuß besagt, daß die Maschine bei konstanter Motorenleistung an Höhe

verlor — wiederum in qualitativer Übereinstimmung mit der aus "pitch" und "true air speed" geschätzten Vertikalgeschwindigkeit.

Aus der Verteilung der Normalkomponente (Abb. 53) ist ersichtlich, daß das oben beschriebene Gebiet starker Turbulenz und Vertikalbewegung gleichzeitig von einer erheblichen Stromlinienkonvergenz begleitet ist.

2.14. Flug Nr. 29, am 4. April 1957

Dieser Flug erkundete das Einzugsgebiet eines wohl ausgeprägten Jet-Maximums (Maximalgeschwindigkeiten > 90 m/sec). Die Flugroute erstreckte sich auf der antizyklonalen Seite des Jet-Kernes, wobei lediglich ein Ausläufer des Geschwindigkeitsmaximums durchquert wurde, nicht jedoch der Kern selbst. Eine ausführliche Beschreibung des Fluges wurde bereits früher veröffentlicht (18).

2.15. Flug Nr. 30, am 8. April 1957

Auch dieser Flug ist bereits früher bearbeitet worden (20). Der Querschnitt liegt ebenfalls im Einzugsgebiet eines Jet-Maximums, das eine antizyklonale Krümmung aufweist. In der Beschreibung dieses Fluges wurde besonderes Augenmerk auf die Unterschiede zwischen geostrophischer und tatsächlicher vertikaler Windscherung gerichtet.

3. Statistische Bearbeitung des Materials

3.1. Modelle nach Endlich und Brundidge

Im vorangehenden Abschnitt wurde eine Anzahl von Forschungsflügen in der Fülle ihrer Einzelheiten dargestellt, um zusammen mit früheren Veröffentlichungen (16, 17, 18, 19, 20, 21, 23) einen Überblick über die Vielzahl der Möglichkeiten zu geben, welche die atmosphärische Struktur im Bereich des Jet Stream kennt. Für die Praxis der Luftfahrt sind jedoch Einzelbeschreibungen nur von mäßigem Wert, wenn sie nicht an eine Modellvorstellung über den Aufbau der Atmosphäre anknüpfen können. Es soll daher im folgenden versucht werden, durch Mittelung der vorhin beschriebenen Querschnittflüge nach verschiedenen Gesichtspunkten Richtlinien für den Aufbau eines „mittleren“ Jet Stream zu gewinnen. Es muß jedoch dabei betont werden, daß das verwendete Kollektiv von 15 Forschungsflügen bei weitem nicht ausreicht, um den so gewonnenen Mittelwerten statistische Signifikanz zu verleihen. Zu viele Faktoren — sei es Stromlinienkrümmung, Position und Höhe der Strahlstromachse, Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Kern — mußten in Anbetracht der Beschränktheit der Zahl der Fälle unberücksichtigt bleiben und können daher das Ergebnis beeinflussen. Da jedoch das vorhandene Material sowohl seiner Meßgenauigkeit als auch seinem Umfang nach nicht so bald antiquiert sein dürfte, soll trotz dieser Einschränkungen eine „statistische“ Bearbeitung versucht werden.

Die „klassische“ Arbeitsweise bedient sich in der Regel eines kartesischen Koordinatensystems, dessen y- und z-Achse im Strahlstromzentrum ihren Ursprung haben. Abb. 54 zeigt ein Strahlstrommodell, das durch eine derartige Betrachtungsweise von Endlich und McLean (7) gewonnen wurde. Saucier (25) gelangt auf Grund einer Auswertung von Forschungsflügen des Project Jet Stream zu einer ähnlichen Geschwindigkeitsverteilung. Im besonderen konnte er bei einer 150fachen Überhöhung der vertikalen Skala die Isotachen rings um den Jet-Kern durch nicht-konzentrische Kreise annähern.

Wie aus den Abbildungen im vorangehenden Abschnitt zu entnehmen ist, lassen sich etliche Merkmale

des Endlich'schen Jet-Stream-Modells durchaus verallgemeinern. Vor allem sind es die beiden stabilen Zonen unter- und oberhalb des Strahlstromkernes — die untere und obere „Jet-Stream-Front“, letztere mit negativer Baroklinität — welche bei geeigneter Wahl des Flugquerschnittes regelmäßig festgestellt werden können. Besonders die troposphärische Jet-Stream-Front zeichnet sich dabei in vielen Fällen durch einen blättrigen Charakter aus, d. h. sie besteht nicht aus einer einzigen Schicht mit konstantem vertikalem Temperaturgradienten, sondern aus mehreren übereinander gelagerten Schichten mit größerer und geringerer thermischer Stabilität.

Die hier wiedergegebenen Querschnittflüge beschränken sich in der Hauptsache auf die unmittelbare Umgebung des Strahlstromkernes. Die möglichen Übergänge zwischen Jet-Stream-Front und Polarfront in der oberen und mittleren Troposphäre können daher nicht Gegenstand dieser Studie sein.

Es wurde bereits früher darauf hingewiesen (17), daß als „Tropopausenbruch“ eigentlich nur die relativ kleine Öffnung der Jet-Stream-Frontalzone in die Stratosphäre bezeichnet werden kann, denn nur hier scheinen umfangreiche und rasch wirksame Austauschvorgänge stratosphärischer und troposphärischer Luftmassen vorsichzugehen. Somit scheint das „Wasserhosen“-Modell der Tropopause (13) die größte Berechtigung zu besitzen.

Brundidge und Goldman (3) weisen — ebenfalls unter Benützung von „Project-Jet-Stream“-Daten — auf feinere Unterschiede in der atmosphärischen Struktur im Bereich des Strahlstromes hin. Abb. 56 zeigt die drei Jet-Stream-Modelle, in welche auch einige der im vorigen Abschnitt beschriebenen Querschnittflüge eingegangen sind. Die Mittelung erfolgte ebenfalls in einem kartesischen Koordinatensystem, dessen Ursprung im Strahlstromzentrum lag, nachdem zunächst die Differenzen der gemessenen Geschwindigkeitswerte zur Geschwindigkeit im Strahlstromkern berechnet wurden. Außerdem wurden in die Analysen der Abb. 56 auch Radiosonden- und Pilotballonmessungen eingebaut.

Brundidge und Goldman gelangen zu der Ansicht, daß das Modell I für die Vorderseite, das Modell II für die Rückseite von Langwellentrögen charakteristisch sei. In ersterem Fall ist mit einer wohl ausgeprägten Frontalzone in der oberen und mittleren Troposphäre zu rechnen, während im letzteren Fall, durch Absinkvorgänge innerhalb der Kaltluft, die Baroklinität der mittleren Troposphäre weitgehend zerstört wurde.

Über Modell III sprechen Brundidge und Goldman die nicht näher untersuchte Vermutung aus, daß es sich um eine Übergangserscheinung zwischen Modell I und II handeln könnte. Diese Vermutung wurde durch Detailuntersuchungen des Fluges Nr. 19 bestätigt (16, 17, 23). Es konnte dort nachgewiesen werden, daß im Zuge einer Südwärtsverlagerung des Strahlstromes der obere Kern eine Verstärkung, der untere eine Abschwächung erfährt. Dieser Nachweis gelang dadurch, daß die jeweiligen Zeiten, zu denen die einzelnen Flugniveaus durchflogen wurden, in der Analyse berücksichtigt wurden. Es konnte auf diese Weise in einem beschränkten Raum des Feld der Verlagerungsgeschwindigkeit der Isotachen gewonnen werden (Abb. 57).

Wir wollen nach herkömmlicher Weise mit „Polarfront-Jet“ einen Strahlstrom bezeichnen, der über einer, die ganze Troposphäre durchmessenden, stabilen und baroklinen Frontalzone liegt, und mit „Subtropen-Jet“ einen solchen, bei dem zwar die Troposphäre ein gewisses Maß an Baroklinität besitzt, die jedoch diffuser

Natur ist, und der unterhalb des 500-mb-Niveaus lediglich eine oder mehrere — den Absinkinversionen ähnliche — stabile Zonen aufweisen möge. Durch die Analyse des Fluges Nr. 19 und durch das Brundidge-Goldman'sche Modell III wird somit ein gewisser Übergangsmechanismus zwischen Polarfront-Jet und Subtropen-Jet nahegelegt und damit eine schon öfter ausgesprochene Vermutung bestätigt (22). Allerdings muß hinzugefügt werden, daß derartige Übergänge hauptsächlich im Bereich von quasistationären Langwellentrögen zu erwarten sind und nicht als genereller Entstehungsmechanismus des Subtropen-Jet angesehen werden dürfen. (Durch andere Studien (vgl. 11) kann nachgewiesen werden, daß der Subtropen-Jet durch Impulstransporte aus den Subtropenraum verstanden werden kann, die hauptsächlich auf der Vorderseite von Trögen und im Bereich von Hochdruckrücken wirksam sind). Gerade aus diesen Ergebnissen wird deutlich, daß die Forschungsflüge des Project Jet Stream wegen der orographisch bedingten Form der Höhenströmung über Nordamerika nicht zu sehr verallgemeinert werden dürfen. Ähnliche Flüge über Europa und Asien würden hier eine äußerst wertvolle Ergänzung darstellen.

3.2. Mittlere Position der vertikalen Strahlstromachse in einem kartesischen Koordinatensystem

Um die im vorigen Abschnitt enthaltenen Meßflüge vergleichbar zu machen, wurde die Koordinate y (Nordrichtung) in die Koordinate n (Normale zur Strömung im Punkt maximaler Windgeschwindigkeit innerhalb des betreffenden Querschnittes) umgerechnet. Diese Art der Transformation wurde in Abb. 2 beschrieben.

In Abb. 58 sind die Positionen der vertikalen Strahlstromachse (darunter sei die Verbindungslinie der in einer Folge von horizontalen Schnittebenen gelegenen Punkte maximaler Windgeschwindigkeit verstanden) in bezug auf den Strahlstromkern als Koordinatenursprung aufgetragen. Die Ordinate zeigt Höheneinheiten in Fuß, die Abszisse Abstände in Breitengraden entlang einer Normalen zur Strömungsrichtung im Jet-Kern. Flüge im Einzugsgebiet eines Jet-Maximums (vgl. Tab. 1) wurden durch volle Linien, solche im Deltagebiet durch strichlierte Linien wiedergegeben.

Aus Abb. 58 ist eine starke Streuung der Jet-Achsen um eine mittlere Position unverkennbar. Diese wurde durch eine etwas dickere, volle Linie mit freier Hand approximiert. Eine Berechnung der Mittelposition schien in Anbetracht des kleinen Kollektivs und der großen Streuung wenig sinnvoll.

Diese Streuung bringt es auch mit sich, daß die horizontalen und vertikalen Windscherungen im Bereich des Strahlstrom-Kernes im Endlich'schen Modell wie auch in den Modellen von Brundidge und Goldman stark geglättet erscheinen.

Dazu kommt noch ein weiterer Umstand, der von Davis (5) hervorgehoben wurde: In den meisten Strahlströmen überwiegt die zyklonale Scherung die antizyklonale. Werden daher Strahlströme mit verschiedener Achsenposition relativ zu einem geographisch fixierten Koordinatensystem gemittelt, so entspricht die so erhaltene „mittlere“ Jet-Stream-Achse eher der südlichsten als der häufigsten Lage der Achsen der in dem Kollektiv vertretenen Strahlströme. Diese Verfälschung der Statistik wird durch die höheren Windgeschwindigkeiten hervorgerufen, die infolge der geringeren Scherungen auf der Südseite des Jet Stream herrschen. Gleichzeitig konnte Davis zeigen, daß die horizontalen Scherungen im Bereich der mittleren Strahlstromachse durch eben diese Asymmetrie in den Scherungen und durch die Streuung der einzelnen Achsenpositionen stark vermindert erscheinen.

Nun handelt es sich zwar bei dem Endlich'schen Modell nicht um ein geographisch fixiertes Koordinatensystem, sondern um ein System, dessen Ursprung jeweils im Jet-Kern liegt. Trotzdem stellt sich mit zunehmender vertikaler Entfernung vom Kern — wegen der in Abb. 58 gezeigten Streuung — derselbe Effekt ein. Abb. 55 zeigt deutlich das Überwiegen der zyklonalen Scherung in einzelnen Höhenklassen im Jet-Stream-Bereich. Es ist also anzunehmen, daß sowohl das Endlich'sche Modell, als auch die Brundidge'schen Modelle eine stärkere Südwärtskrümmung der vertikalen Strahlstromachse aufweisen, als dies die mittlere Position in Abb. 58 zeigt. Aus einem Vergleich mit Abb. 54 geht dies besonders oberhalb des Strahlstromkernes deutlich hervor. (Um die Maßstäbe der Abb. 54 und 58 miteinander vergleichbar zu machen, möge man bedenken, daß die 200- und 150-mb-Fläche im Mittel etwa 6000 Fuß voneinander entfernt sind.) Auch die horizontalen Scherungen in Abb. 54 sind gegenüber denen in Abb. 62 bedeutend geringer.

Abb. 58 läßt keinen signifikanten Unterschied zwischen vertikalen Strahlstromachsen im Einzugs- oder im Deltagebiet erkennen. Wohl scheint jedoch eine etwas stärkere Südwärtskrümmung der mittleren Achsenposition oberhalb des Strahlstromkernes angedeutet. Dieser Umstand kann jedoch sehr wohl durch die Nicht-Synoptizität der Beobachtungen vorgetäuscht sein. Die meisten der in Abschnitt 2 angeführten Querschnittflüge starten in tieferen Niveaus und schreiten — einem Zickzackkurs folgend — gegen höhere Niveaus fort. In fast allen Fällen, in denen ein Niveau zweimal durchflogen wurde, konnte eine deutliche Südwärtsverlagerung der Strahlstromachse festgestellt werden. Würde man dieses Ergebnis für die Mehrzahl der in Abb. 58 enthaltenen Flüge verallgemeinern, und würde man sämtliche Flugniveaus auf die Zeit reduzieren, in der der Strahlstromkern durchflogen wurde, so müßte man annehmen, daß in den tieferen Niveaus die Strahlstromachse früher und daher zu weit nördlich, in den höheren Niveaus dagegen später und daher zu weit südlich angetroffen wurde. Durch eine derartige Reduktion würde die Krümmung der mittleren vertikalen Strahlstromachse in Abb. 58 unterhalb des Kernes etwas verstärkt, oberhalb des Kernes dagegen etwas abgeschwächt. Im Endeffekt könnte dann wohl die mittlere vertikale Achse im Bereich des Strahlstromkernes in erster Annäherung als symmetrisch zum Kernniveau betrachtet werden.

Einige der beschriebenen Flüge weisen 2 Ausbuchtungen der vertikalen Strahlstromachse nach Norden auf. Dazu gehört unter anderen auch der Flug Nr. 19. Manche dieser Flüge können dem Übergangsmodell III (Abb. 56) nach Brundidge und Goldman eingeordnet werden, doch ist nicht bei allen diesen Fällen mit doppelter Ausbuchtung der Achse auch eine zweifache Kernstruktur vorhanden, wie sie das Modell III fordert.

3.3. Isentropenbuckel und -graben in einem kartesischen Koordinatensystem

Durch die Vorticityverteilung rings um ein Jet-Maximum wird ein Divergenzfeld und damit eine bestimmte großräumige Verteilung der Vertikalbewegung gesteuert. Es ist anzunehmen, daß diese Vertikalbewegungen nicht ohne Wirkung auf das Temperaturfeld im Strahlstrombereich bleiben.

Aus den 250-mb-Analysen im Abschnitt 2 geht deutlich hervor, daß auf der zyklonalen Seite eines ausgeprägten Strahlstrommaximums meist ein warmes Gebiet anzutreffen ist, das den Einbruch von Stratosphärenluft in tiefere Niveaus kennzeichnet. In älterer

Literatur ist dieses Gebiet auch vielfach als „Tropopausentrichter“ bezeichnet worden. Südlich des Jet-Maximums erstreckt sich im 250-mb-Niveau meist eine Kaltluftzunge, die auf aufsteigende Luftbewegungen hindeutet.

In den Querschnitten, die in Abschnitt 2 reproduziert sind, äußert sich das warme Gebiet als grabenförmiger Einbruch in den Isentropenflächen, dem sogenannten „Isentropengraben“. Die Kaltluftzunge manifestiert sich dagegen in einer Aufwölbung der Linien konstanter potentieller Temperatur, dem sogenannten „Isentropenbuckel“. Beide Phänomene scheinen für die Umgebung des Strahlstromkernes — manchmal stärker, manchmal schwächer ausgeprägt — charakteristisch zu sein.

Abb. 59 enthält die Verteilung der Isentropengräben der einzelnen Querschnittflüge in einem kartesischen Koordinatensystem, das wiederum im Jet-Kern zentriert ist. Flüge im Einzugsgebiet sind wiederum durch volle Linien, solche im Deltagebiet durch strichlierte Linien wiedergegeben. Die Streuung ist so groß, daß sich in mittleren Jet-Stream-Modellen, welche dieses Koordinatensystem verwenden (vgl. Abb. 54 und 56 sowie Palmén und Newton (12)) nur eine äußerst mangelhafte Wiedergabe dieses Phänomens erwarten läßt.

Eine gewisse Differenzierung nach Einzugs- und Deltagebiet erscheint hier gerechtfertigt. Bei letzteren Flügen scheinen die Isentropengräben besonders unterhalb des Kernniveaus die antizyklonale Seite des Strahlstromes zu bevorzugen.

Eine fast ebenso große Streuung weisen die in Abb. 60 in bezug auf ein kartesisches Koordinatensystem aufgetragenen Isentropenbuckel auf. Auch hier scheint ein gewisser Unterschied zwischen Einzugs- und Deltagebiet zu bestehen. In letzterem sind — wohl durch die indirekte Zirkulation und das Aufsteigen der Kaltluft bedingt — die vertikalen Achsen aus dem unteren, zyklonalen Quadranten gegen den oberen, antizyklonalen Quadranten geneigt. Im Einzugsgebiet halten sich im Mittel, besonders in tieferen Niveaus — bedingt durch die in direkter Zirkulation aufsteigende Warmluft — die „Buckel“ weiter rechts. Eine Ausnahme bildet der Flug Nr. 12, doch besitzt dieser weiter nördlich noch einen zweiten Strahlstromast, der vermutlich für die abnormale Position dieses Isentropenbuckels verantwortlich ist.

Die Lage der Isentropenbuckel in bezug auf die Gräben wird aus Abb. 61 deutlich. Der Koordinatenursprung liegt hier im Niveau des Jet-Kerns, jedoch nicht im Punkt maximaler Windgeschwindigkeit, sondern im jeweils beobachteten Isentropengraben. Die horizontale Achse mißt den Abstand vom Graben entlang einer Normalen zur Strömungsrichtung im Jet-Kern, die vertikale Achse gibt die Höhe in Fuß über dem Koordinatenursprung an und stellt selbst die Achse der Isentropengräben dar.

Aus dieser Abbildung geht deutlich hervor, daß sämtliche Isentropenbuckel rechts der Isentropengräben verlaufen, wenn der Blick stromabwärts gerichtet ist. Dies schließt allerdings nicht aus, daß zufolge mehrfacher Jet-Finger sich in Einzelfällen mehrere Buckel und Gräben seitlich aneinanderschließen können. Die mittlere Verteilung der Buckel in bezug auf die Gräben läßt sich durch eine Gerade annähern. Oberhalb des Kernniveaus scheinen die Buckel im Mittel weiter von den Gräben entfernt zu sein als unterhalb dieses Niveaus.

Sowohl dieses Ergebnis als auch die vorangehenden Betrachtungen über die mittlere Lage der Gräben und

Buckel in bezug auf die mittlere Position der Strahlstromachse läßt das sogenannte „Wasserhosenmodell“ der Frontalzone im Tropopausenbereich (13) als zutreffend erscheinen.

3.4. Mittelung in bezug auf die vertikale Strahlstromachse

Wählt man für die Mittelbildung ein Koordinatensystem, dessen Ursprung im Jet-Kern liegt, dessen Abszisse den Normalenabstand von der vertikalen Jet-Achse und dessen Ordinate die Höhe über oder unter dem Kernniveau mißt und mit der vertikalen Jet-Achse zusammenfällt, so erscheint zwar das Bild des resultierenden „mittleren“ Strahlstromes stark verzerrt; durch dieses Koordinatensystem wird nämlich die an sich gekrümmte Jet-Achse „geradegebogen“. Dennoch bietet diese Betrachtungsweise große Vorteile. Es werden nämlich hier die tatsächlichen mittleren horizontalen Scherungsverhältnisse auch in der unmittelbaren Umgebung der Jet-Achse reell abgebildet und nicht durch die in Abb. 58 gezeigte starke Streuung der Achsen und die unsymmetrischen Scherungsverhältnisse verfälscht. Die vertikalen Scherungen leiden allerdings durch die „Geradebiegung“ der Jet-Achsen erheblich.

Abb. 62 zeigt in vollen Linien die Geschwindigkeitsverhältnisse in einem derartigen, auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem. Die dieser Abbildung zugrunde liegenden Mittelwerte sind in Tab. 2 angeführt, welche mittlere Geschwindigkeit und Zahl der Beobachtungen in den Punkten eines Netzes enthält, das auf dasselbe Koordinatensystem bezogen ist. Der Abstand der Netzpunkte beträgt in vertikaler Richtung 400 Fuß, in horizontaler Richtung 20 Seemeilen, gemessen normal zur Windrichtung im Jet-Kern. In dieser Tabelle, wie auch in Abb. 62 sind die Geschwindigkeitswerte als mittlere Differenzen zwischen Windgeschwindigkeit im Jet-Kern und jeweils gemessener Geschwindigkeit aufgetragen, also

$$\Delta \bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{0i} - V_i) \quad [4]$$

worin V_0 die Geschwindigkeit im Kern bedeutet. Ein ähnliches Normalisierungsverfahren wird auch von Brundidge und Goldman (3) in einem kartesischen Koordinatensystem vorgeschlagen.

Besonders in den Außenbezirken von Abb. 62, wo die Zahl der verfügbaren Beobachtungen bereits sehr gering ist, waren drastische Glättungsmaßnahmen erforderlich. Zu diesem Zwecke wurden in allen 11 Niveaus dieser Abbildung zunächst aus den Mittelwerten der Tab. 2 horizontale Windprofile konstruiert. In Abb. 63 ist als Beispiel ein derartiges Windprofil eingetragen. Es wurde dabei angenommen, daß in der unmittelbaren Umgebung des Strahlstromkernes die einzelnen Meßpunkte repräsentative Profile wiedergeben. Gegen den Rand der Abbildung hin werden besonders dort Sprünge in den Mittelwerten beobachtet, wo sich die Zahl der Beobachtungen ändert, d. h. wo ein oder mehrere Querschnittflüge ausfallen. Bei der Konstruktion der mittleren Profile wurde nun so vorgegangen, daß die Segmente, die sich aus geringerem Beobachtungsmaterial ergaben, parallel verschoben wurden, bis sie an das aus dem Bereich der Jet-Achse kommende Kurvenstück angeschlossen. Diesem Verfahren liegt die Annahme zugrunde, daß durch den Ausfall des einen oder anderen Querschnittfluges bei der Mittelbildung zwar der Absolutwert der mittleren Windgeschwindigkeit beeinträchtigt wird, nicht jedoch die horizontale Scherung.

Ein Vergleich der Abb. 62 mit Abb. 54 läßt erkennen, daß die horizontalen Scherungen wie erwartet in dem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinaten-

system größer sind. Auch gegenüber den in Abb. 56 angedeuteten Verhältnissen zeigt Abb. 62 im Durchschnitt größere horizontale Geschwindigkeitsgradienten.

Um ein für die Luftfahrt brauchbares Modell des Strahlstromkernes zu entwerfen, kann man die mittlere Lage der Jet-Achse aus Abb. 58 und die horizontalen Scherungsverhältnisse der Abb. 62 kombinieren. Man erhält dann die Geschwindigkeitsverteilung, die in Abb. 62 dünn strichliert eingetragen ist. Aus dieser Verteilung können nunmehr — größenordnungsmäßig — auch die mittleren vertikalen Geschwindigkeitsgradienten entnommen werden. Es zeigt sich dabei die merkwürdige Tatsache, daß das Niveau maximalen Windes sowohl auf der zyklonalen als auch auf der antizyklonalen Seite nach unten abfällt. Ein sekundäres Maximalwindniveau ist zu beiden Seiten des Kernes in größeren Höhen angedeutet.

Dieses Ergebnis stimmt nicht mit dem überein, was über die Schicht maximalen Windes (SMW) aus Rawinsondenaufstiegen bekannt ist (14). Dort zeigte sich im Mittel etwa 100 km nördlich der Jet-Achse eine Rinne tiefster Erhebung der SMW, an die sich nach beiden Seiten hin ein Anstieg anschließt (Abb. 64). Endlich und McLean (7) sowie Saucier (25) finden bei Mittelung in einem kartesischen Koordinatensystem einen Anstieg des Niveaus maximalen Windes von Norden nach Süden.

Es könnte wohl sein, daß die eigentümliche Struktur des Geschwindigkeitsfeldes in Abb. 62 infolge des kleinen Kollektivs durch das Überwiegen des einen oder anderen Querschnittfluges vorgetäuscht wird. Die starke Südwärtsneigung der vertikalen Strahlstromachse in den hohen Niveaus der Abb. 58 legt den Schluß nahe, daß das in Abb. 62 rechts oben angedeutete Maximalwindniveau in noch größeren Höhen die primäre Rolle übernimmt. Dadurch würde die in dieser Abbildung eingetragene Fläche maximalen Windes auf der antizyklonalen Seite des Kernes, die durch Messungen gut belegt ist, nur eine mesostrukturelle Rolle spielen, die in stark geglätteten Rawinsondenaufstiegen, wie sie der Abb. 64 zugrunde liegen, gar nicht zum Ausdruck käme. Auf der zyklonalen Seite dürfte wohl das obere Maximalwindniveau sekundäre, mesostrukturelle Bedeutung besitzen.

In Abb. 65 wird eine Betrachtung der Unterschiede in den normalisierten Windgeschwindigkeiten zwischen Einzugs- und Deltagebiet gezeigt. Wir wollen mit

$$\bar{E}_v = \frac{1}{n} \sum_i^n (V_{oi} - V_i) \quad [5]$$

die mittleren Differenzen der Windgeschwindigkeiten zur Geschwindigkeit im Jet-Kern für die Flüge bezeichnen, welche im Einzugsgebiet eines Strahlstrommaximums durchgeführt wurden (vgl. Tab. 1) und mit

$$\bar{D}_v = \frac{1}{m} \sum_i^m (V_{oi} - V_i) \quad [6]$$

die analogen mittleren Differenzen für Flüge im Deltagebiet. Die Größe $(\bar{E}_v - \bar{D}_v)$ ist in Abb. 65 in Knoten angegeben. Auf die Details dieser Abbildung soll kein allzu großes Gewicht gelegt werden, denn insgesamt wurden im Einzugsgebiet nur 9 Flüge, im Deltagebiet nur 6 Flüge durchgeführt. Für weitreichende Schlußfolgerungen sind diese Kollektive viel zu gering.

Laut Tabelle 1 beträgt $\bar{V}_{oE} = 145$ Knoten, $\bar{V}_{oD} = 154$ Knoten (die Indices E und D beziehen sich auf Einzugs- und Deltagebiet). Der mittlere Unterschied von 9 Knoten macht sich wegen der „Normierung“ der Windprofile im Kern selbst nicht bemerkbar. (Die Kerngeschwindigkeit wird ja in beiden Fällen mit Null

angenommen.) Er dürfte jedoch in geringfügigem Maße außerhalb des Jet-Kernes zur Geltung kommen, wenn man annimmt, daß höhere Kerngeschwindigkeiten mit größeren horizontalen Scherungen gekoppelt sind.

Abb. 65 läßt im Mittel auf der zyklonalen Seite der Jet-Achse zwei Zentren mit stark negativer Differenz $\bar{E}_v - \bar{D}_v$ erkennen. Führen wir diese Differenz hauptsächlich auf $\bar{V}_D - \bar{V}_E$ zurück, so weist die zyklonale Seite bis etwa 2° Breite nördlich des Kernes durchschnittlich im Deltagebiet stärkere horizontale Windscherungen auf als im Einzugsgebiet. Ein Teil dieses Unterschiedes mag wohl auf den oben beschriebenen Effekt $\bar{V}_{oD} > \bar{V}_{oE}$ zurückzuführen sein. Ansonsten ließe sich jedoch die in Abb. 65 gezeigte Verteilung von $\bar{E}_v - \bar{D}_v$ mit der Zirkulation im Bereich eines Jet-Maximums gut in Einklang bringen: Im Deltagebiet läßt die indirekte Zirkulation eine Verstärkung der Frontalzone und damit auch der horizontalen Geschwindigkeitsgradienten vermuten, während im Einzugsgebiet die direkte Zirkulation die isobar-isotheren Solenoide abbaut.

Betrachtet man die thermische Struktur der Atmosphäre in einem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem, so ergibt sich eine wesentlich größere Differenziertheit, als dies in den Abb. 54 und 56 der Fall war. Abb. 66 enthält die Werte der potentiellen Temperatur, gemittelt über alle 15 Querschnittflüge und „normiert“ in bezug auf die potentielle Temperatur in den jeweiligen Strahlstromkernen. Es wurde also in

dieser Abbildung die Größe $\frac{1}{n} \sum_i^n \theta_i - \theta_{io}$ aufgetragen.

wobei der Index o die Verhältnisse im Jet-Kern charakterisiert. Eine gewisse Glättung gegenüber den tabellierten Werten (Tab. 3) war wiederum, besonders in den Außenbezirken der Abbildung erforderlich. Dieser Abbildung läßt sich sehr deutlich die Existenz eines Isentropengrabens auf der zyklonalen und eines Isentropenbuckels auf der antizyklonalen Seite entnehmen, obwohl im einzelnen die Positionen der Gräben und Buckel relativ zur Jet-Achse erheblichen Schwankungen unterworfen sind, wie die Abb. 67 und 68 zeigen. Im besonderen läßt Abb. 68 eine Unterscheidung nach Einzugs- und Deltagebiet erkennen. In letzterem scheinen sich die Buckel unterhalb des Kern-Niveaus mehr auf die zyklonale Seite hinzuziehen, während sie im ersteren Fall im Mittel auf der antizyklonalen Seite anzutreffen sind. (Flug Nr. 12 fällt — wie bereits früher erwähnt — aus dem Rahmen, da er weiter nördlich einen zweiten Strahlstromast aufweist.) Vermutlich zeigen diese Unterschiede in der mittleren Position der Isentropenbuckel im Einzugsgebiet das Aufsteigen der Warmluft an, das auf der antizyklonalen Seite des Jet Stream erfolgt, im Deltagebiet dagegen die Hebungsvorgänge innerhalb der Kaltluft unter dem Einfluß einer indirekten Zirkulation.

Daß trotz der großen Streuung von Buckeln und Gräben eine derart distinkte Verteilung der potentiellen Temperaturen, wie in Abb. 66 resultiert, ist bemerkenswert. Im einzelnen lassen sich aus dieser Abbildung die Ansätze der stratosphärischen Jet-Stream-Front im linken oberen Quadranten gut erkennen. Die troposphärische Jet-Stream-Front ist weniger markant ausgeprägt, wohl deshalb, weil die Position ihrer stabilen Zone von Fall zu Fall schwankt und in der Mittelbildung durch die umgebenden Schichten geringerer Stabilität eine gewisse Abschwächung eintritt. Eine Zone relativ geringer Stabilität auf der antizyklonalen Seite ist durch Raster kenntlich gemacht. Den Details ist jedoch in diesem Bereich wegen der geringen Zahl der Fälle keine große Bedeutung mehr beizumessen (vgl. Tab. 3).

Abb. 69 enthält wiederum die Differenz $\bar{E}_\theta - \bar{D}_\theta$, wobei $\bar{E}_\theta = \frac{1}{n} \sum_i^n (\theta_i - \theta_{oi})$ das Mittel der Flüge im Einzugsgebiet und $\bar{D}_\theta = \frac{1}{m} \sum_i^m (\theta_i - \theta_{oi})$ das der Flüge im Delta-gebiet ist. Betrachten wir wiederum — ähnlich wie bei der Geschwindigkeit — die Differenz $\bar{\theta}_E - \bar{\theta}_D$ als für diese Verteilung maßgeblich, so läßt sich für das Delta-gebiet im Mittel in der Stratosphäre eine Verstärkung des horizontalen Temperaturgradienten im linken oberen Quadranten erkennen. Es scheint sich hier die stratosphärische Jet-Stream-Front verstärkt auszuprägen. Eine Zone positiver Differenzen etwas rechts unterhalb des Kernes ist wohl auf die Verschiedenheit in den Buckel-Positionen zwischen Einzugs- und Delta-gebiet zurückzuführen (vgl. Abb. 68). Den Details in den Außenbezirken der Abb. 69 ist keine zu große Bedeutung beizumessen.

Da in Abb. 62 die Windgeschwindigkeiten in bezug auf die Jet-Achse gemittelt wurde, sind darin die mittleren horizontalen Scherungsverhältnisse unverfälscht enthalten. Abb. 71 zeigt die Größe $\frac{\partial \bar{v}}{\partial n}$ in Einheiten 10^{-4}sec^{-1} , bezogen auf das Koordinatensystem der Abb. 62. Zum Vergleich sind die mittleren Positionen von Isentropengraben und -buckel aus Abb. 66 eingetragen. Ein Gebiet maximaler positiver Scherungsvorticity erstreckt sich entlang der Achse des Isentropengrabens und ist gegenüber diesem etwas nach rechts verschoben. Die stärksten positiven horizontalen Scherungen liegen etwas oberhalb des Niveaus des Strahlstromkernes und stehen in gutem Zusammenhang mit der thermischen Struktur der Atmosphäre in diesem Bereich.

Von großem Interesse erscheint ein Gebiet stark negativer Scherungsvorticity, das sich annähernd entlang der Achse des Isentropenbuckels ausdehnt. Etwa 1600 Fuß oberhalb des Kern-Niveaus werden dabei Scherungswerte erreicht, die zusammen mit Werten des Coriolisparameters in mittleren Breiten und bei annähernd geradlinigem Strömungsverlauf bereits dynamische Labilität erreichen können. Es bestätigt sich somit im Mittel die an Hand eines Einzelfalles ausgesprochene Vermutung (17, 18), daß Vorticityminima in engem Zusammenhang mit den Isentropenbuckeln zu stehen scheinen. Es wurde bereits bei der Bearbeitung des betreffenden Einzelfalles angedeutet, daß nichtadiabatische Vorgänge, Reibung und Vertikalbewegung beim Zustandekommen der Gebiete mit negativer absoluter Vorticity eine Rolle spielen können. Ähnliches geht auch aus einem Aufsatz St a l e y s (27) hervor. Leider können an Hand der vorliegenden Flugdaten die Beiträge der einzelnen Faktoren zur Änderung der absoluten und auch der potentiellen Vorticity nicht abgeschätzt werden, da nur zweidimensionale Analysen möglich waren. Aus der Vorticitygleichung in der Form

$$\frac{d}{dt} Q_D = -Q_D \nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} \quad [7]$$

(Q_D ist die absolute Vorticity auf einer Isobarenfläche, u, v, ω sind die Komponenten des Windvektors in einem Koordinatensystem mit p als vertikaler Koordinate) ist jedoch ersichtlich, daß die horizontalen Gradienten der Vertikalbewegung durchaus einen Beitrag liefern können.

Eine Analyse der mittleren Verteilung der Normalkomponente (Definition vgl. Abschnitt 1) für sämtliche Querschnittflüge, bezogen auf die Jet-Achse, ist in Abb. 72 enthalten. Bei diesem Parameter waren gegenüber den in Tab. 4 angegebenen Werten erhebliche

Glättungen notwendig. Den Details dieser Abbildung kann wegen der großen Streuung der Meßwerte bei den einzelnen Flügen keine allzu große Bedeutung beigemessen werden (vgl. Abschnitt 2). So ist z. B. das ausgeprägte Minimum bei -800 Fuß und 3° nördlich der Jet-Achse auf das nördliche Jet-Minimum des Fluges Nr. 27 zurückzuführen, während die weiter nördlich anschließenden positiven Werte auf das Konto des Fluges Nr. 12 gehen. Als bemerkenswertes Charakteristikum dieser Abbildung kann das Vorwiegen negativer Strömungskomponenten (der Definition der Normalkomponente nach von der zyklonalen zur antizyklonalen Seite des Strahlstromes gerichtet) auf der zyklonalen Seite der Achse angesehen werden. Ein „Nullschichteffekt“ (= Ausströmen der Luft im Niveau maximalen Windes gegen die antizyklonale Seite hin) läßt sich dieser Darstellungsweise nicht entnehmen, da die Normalkomponente nur relativ zur Windrichtung im Jet-Kern definiert ist und diese selbst bereits eine ageostrophische Komponente besitzen kann. Hingegen würde die Abb. 72 rechts der dick strichlierten Linie Strömungskonvergenz innerhalb der Normalkomponente andeuten. In diesem Bereich liegen — wie dem Abschnitt 2 entnommen werden kann — häufig Ausläufer der troposphärischen Jet-Stream-Front, die auch in verschiedenen Einzelfällen durch starke Konvergenz ausgezeichnet war.

Abb. 70 zeigt die Differenz der Normalkomponenten zwischen Einzugs- und Deltagebiet. Das Minimum im Strahlstromkern ist allein auf das nördliche Jet-Maximum im Querschnittflug Nr. 27 zurückzuführen. Ohne dieses würde der Mittelwert hier etwa $-5,8$ Knoten betragen, also immerhin noch einen negativen Wert besitzen. $\bar{E}_N - \bar{D}_N < 0$ deutet an, daß im Einzugsgebiet nördlichere Windkomponenten vorherrschen als im Deltagebiet (\bar{E}_N sei der Mittelwert der Normalkomponenten über sämtliche im Einzugsgebiet von Jet-Maxima geflogenen Querschnitte, \bar{D}_N der anloger Mittelwert für Flüge im Deltagebiet). Abb. 70 gibt somit in großen Zügen das bekannte Schema der Stromlinienkrümmung im Bereich eines Jet-Maximums wieder: Oberhalb des Strahlstromkernes weist auf der zyklonalen Seite der Achse das Einzugsgebiet im Mittel nördlichere Komponenten, auf der antizyklonalen Seite südlichere Komponenten auf als das Deltagebiet. Dies steht im Einklang mit der Stromlinienkonvergenz auf der Rückseite und mit der Divergenz auf der Vorderseite eines Jet-Maximums, die Strömungsverhältnisse scheinen jedoch nicht symmetrisch zur Jet-Achse zu verlaufen. Sehr deutlich tritt die Asymmetrie unterhalb des Kernniveaus in Erscheinung. Es wäre jedoch möglich, daß bei einem größeren Kollektiv diese Details noch einige Verschiebungen erleiden würden.

Um den Einfluß der Absolutbeträge der Normalkomponenten einzelner Flüge auf die in den Abb. 72 und 70 wiedergegebenen Verteilungen zu eliminieren, ist in Abb. 73 das Überwiegen der negativen über die positiven Vorzeichen dieser Strömungskomponente in einem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem dargestellt. Den Randgebieten dieser Abbildung kann wiederum keine allzu große Bedeutung beigemessen werden, da hier die Zahl der Fälle stark abnimmt (vgl. Tab. 4). Schrägstriche und Kreuze bezeichnen Netzpunkte, an denen negative Vorzeichen gleich oft bzw. häufiger auftreten als positive Vorzeichen, an denen also vorwiegend die Normalkomponenten von der zyklonalen zur antizyklonalen Seite des Jet Stream gerichtet sind. In großen Zügen läßt sich daraus die Berechtigung der in Abb. 72 gezeigten Verteilung erkennen. Auf der zyklonalen Seite scheint sich allerdings laut Abb. 73 das Gebiet negativer Komponenten weiter nach links zu erstrecken, als dies aus Abb. 72 — infolge der störenden Wirkung des Flu-

Tab. 4
Mittlere Normalkomponenten (Knoten) und Anzahl der Beobachtungen (kursiv) in einem auf die vertikale Strahlstromachse bezogenen Koordinatensystem

Vertikal- abstand von Niveau (Fuss)	Horizontalabstand von der Jet-Achse (Einheit 20 Seemeilen)																																		
	5°	4°	3°	2°	1°	Jet-Achse	-1°	-2°	-3°	-4°	-5°	-6°																							
+2000	20,0	23,0	26,0	31,0	35,0	6,5	1,2	1,6	1,8	1,0	0,7	0,6	2,3	4,8	7,0	6,3	8,8	25,5	25,0	24,5	24,0	23,0	22,5	22,0	21,5	19,0	24,0	24,0	24,0	21,0	18,0	15,0			
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>7</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>			
+1600	26,0	31,0	35,0	40,0	43,0	25,5	5,7	3,3	2,0	3,3	-0,9	-0,6	0,2	0,1	-1,4	-0,2	0,7	1,0	0,6	2,9	7,0	7,5	7,5	7,8	8,5	22,5	21,5	19,0	23,0	23,0	22,0	20,0	17,0	14,0	
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>9</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	
+1200	40,0	45,0	50,0	51,0	-0,7	-0,3	2,0	0,9	-2,1	-4,0	-4,3	-2,4	-1,7	-0,3	-0,5	-0,7	-0,1	0,2	-0,7	0,2	1,8	1,5	0,7	2,3	3,2	3,2	15,0	15,7	19,0	23,0	24,0	23,0	22,0	19,0	16,0
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>7</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>11</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>9</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
+800	47,0	51,0	52,0	52,0	45,0	5,0	-2,7	-3,8	-2,5	-1,5	-3,9	-4,1	-3,2	-0,8	-0,7	0,3	-3,6	-4,7	-1,6	-0,5	-0,6	0,1	0,8	1,7	1,3	2,2	15,0	16,3	20,0	23,0	24,0	24,0	21,0	18,0	
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>11</i>	<i>11</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	
+400	53,0	8,5	7,0	5,0	4,0	-3,0	-3,7	-5,6	-5,0	-3,3	-3,1	-3,0	-2,0	-0,9	-3,6	-2,4	-3,0	-1,9	-0,5	1,5	1,0	2,8	3,6	2,7	5,4	18,3	16,3	21,0	18,5	23,0	24,0	25,0	25,0		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>7</i>	<i>7</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>14</i>	<i>12</i>	<i>11</i>	<i>11</i>	<i>10</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<i>7</i>	<i>5</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>		
0	12,0	11,5	10,0	7,0	0,5	-0,3	-1,3	-1,2	-4,7	-2,9	-2,4	-1,4	-0,6	-0,5	-2,0	-1,7	-2,2	-1,3	0,6	2,8	3,1	4,6	4,2	5,4	5,3	8,0	9,0	9,0	8,7	4,0	24,0	25,0	25,0		
	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>15</i>	<i>15</i>	<i>14</i>	<i>12</i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>		
-400	59,0	56,0	49,0	2,7	-0,8	-13,0	-15,1	-10,3	-8,7	-3,2	-2,6	-1,0	1,2	0,3	-1,7	-1,3	-1,2	-2,2	-0,4	0,7	0,9	1,1	1,4	0,2	0,8	5,3	4,0	3,0	5,5	4,0	23,0	24,0	25,0	26,0	
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>15</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>12</i>	<i>10</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>6</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>		
-800	-29,0	-28,0	16,0	13,0	3,7	2,3	1,0	-15,3	-9,9	-9,8	-8,6	-4,4	-2,1	-0,8	1,5	2,8	-0,8	-0,2	-0,2	-2,8	3,6	4,9	5,3	5,5	3,5	4,0	10,5	9,0	7,5	6,5	4,0	23,0	23,0	24,0	25,0
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>14</i>	<i>12</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>8</i>	<i>7</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	
-1200	-28,0	-27,0	15,5	13,5	4,3	2,3	-14,0	-9,6	-9,6	8,7	4,5	-1,6	0,2	2,3	3,4	4,2	4,3	5,3	4,9	4,8	5,9	5,3	5,3	2,6	8,0	5,3	11,5	10,0	8,5	7,0	5,5	22,0	23,0	24,0	25,0
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>12</i>	<i>11</i>	<i>10</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	
-1600	-28,0	-25,0	17,5	15,0	4,7	2,3	1,3	4,3	1,8	2,0	2,6	1,4	2,4	2,8	4,0	4,7	5,3	6,3	5,4	2,8	4,9	4,1	4,6	6,5	9,0	6,7	12,5	11,0	9,0	8,0	6,0	3,0	27,0	24,0	25,0
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>11</i>	<i>11</i>	<i>10</i>	<i>7</i>	<i>7</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
-2000	59,0	20,5	16,5	13,0	12,0	11,0	8,5	8,1	9,0	6,8	5,2	7,8	5,5	3,7	5,5	5,6	5,5	5,5	2,5	1,8	1,7	8,5	8,5	10,0	8,3	6,0	12,5	10,0	8,5	6,5	3,5	23,0	24,0	25,0	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>12</i>	<i>11</i>	<i>10</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>

ges Nr. 12 — hervorgehen würde. Im unmittelbaren Bereich des Jet-Kernes scheint somit im Mittel über sämtliche Flüge (Einzugs- und Deltagebiete zusammengekommen) eine direkte Zirkulation vorzuherrschen, mit nördlichen Komponenten oberhalb, und südlichen Komponenten unterhalb des Kernniveaus.

Die kleinen und großen Kreise in Abb. 73 geben Netzpunkte an, die im Einzugsgebiet ein stärkeres Überwiegen der negativen Vorzeichen (Nordkomponenten) aufweisen, als im Deltagebiet. Die in Abb. 70 gezeigte Verteilung wird somit auch häufigkeitsmäßig bestätigt. Auffallend ist wiederum die starke Asymmetrie der Gruppierung vorwiegend negativer und vorwiegend positiver Fälle unterhalb des Kernniveaus. Hier besitzt auch südlich der Strahlstromachse das Einzugsgebiet nördlichere Strömungskomponenten als das Deltagebiet. Inwieweit hier der störende Einfluß von Forschungsflügen innerhalb von Tiefdrucktrögen zum Ausdruck kommt, kann wegen der beschränkten Anzahl der Flüge schwer abgeschätzt werden.

Die Vertikalbewegung wurde, wie in Abschnitt 2.1. mitgeteilt, aus Fluggeschwindigkeit und Neigungswinkel ermittelt. Den Resultaten kommt lediglich eine größenordnungsmäßige Verlässlichkeit zu, da eine Anzahl von unkontrollierbaren Faktoren ihren Einfluß geltend machen kann.

Abb. 74 enthält die Mittelwerte der Vertikalgeschwindigkeit in m/sec, gemittelt über sämtliche Querschnittflüge. Die Verteilung ist, wie auch bei den anderen Parametern, durch die Abnahme der Zahl der Fälle gegen die Ränder der Abbildung hin verfälscht. Als markantes Charakteristikum kann jedoch eine Zone mit Abwärtsbewegung angesehen werden, die den in der Abb. 67 gezeigten Isentropengraben parallel läuft. Wegen der großen Streuung der in Abschnitt 2 gezeigten Einzelfälle ist dieses Ergebnis bemerkenswert. Die Zone aufsteigender Luftbewegung, die auf der antizyklonalen Seite des Jet-Stream zutage tritt, ist wohl für die Bildung der Isentropenbuckel maßgeblich (vgl. Abb. 68).

3.5. Mittelung in bezug auf den Isentropenbuckel

In der mittleren Temperaturverteilung der Abb. 66 war deutlich auf der antizyklonalen Seite der Strahlstromachse eine Aufwölbung der Isentropenflächen zu erkennen, obwohl laut Abb. 68 die Positionen der Isentropenbuckel in bezug auf die Jet-Achse sehr stark streuten. Es entspricht völlig den Erwartungen, wenn bei einer Mittelung der potentiellen Temperaturen der einzelnen Querschnittflüge (wiederum als Abweichung der potentiellen Temperatur von dem im Jet-Kern gemessenen Wert aufgetragen) in bezug auf die Achse des Isentropenbuckels dieser wesentlich prominenter in Erscheinung tritt, als dies in Abb. 66 der Fall war. Abb. 75 gibt — zumindest in der Nähe des Zentrums der Darstellung — ein Bild der mittleren Struktur des Isentropenbuckels. Dieser zeigt demnach auf seiner antizyklonalen Seite und etwas oberhalb des Niveaus des Strahlstromkernes die größten horizontalen Temperaturgradienten (ca. 2,5° C pro Breitengrad). Auf der zyklonalen Seite sind die mittleren horizontalen Temperaturgradienten etwas schwächer, erreichen aber auch immerhin 2° C pro Breitengrad.

Wegen des kleinen Kollektivs, das in dieser Statistik Verwendung findet, kann der sekundäre Isentropengraben, der oberhalb des Kernniveaus etwa 1 Breitengrad nördlich der Achse des Isentropenbuckels auftritt, nicht als sehr signifikant betrachtet werden. Der Hauptgraben scheint in dieser Darstellung weiter nördlich zu liegen. Allerdings ist hier die Zahl der verwendeten Fälle bereits stark reduziert. Ein Vergleich mit

Abb. 61 lehrt, daß die tatsächliche mittlere Position des Grabens in bezug auf den Isentropenbuckel — ohne Rücksicht auf dessen Ausprägtheit und die darin vorkommenden horizontalen Temperaturgradienten — zwischen den beiden Gräben in Abb. 75 liegen müßte. Damit wäre wohl der sekundäre Buckel, der etwa zwei Breitengrad nördlich des Hauptbuckels liegt und der auch nur oberhalb des Jet-Kernes in Erscheinung tritt, auf die Beschränktheit des Kollektivs zurückzuführen.

Abb. 76 enthält die normierten mittleren Windgeschwindigkeiten in bezug auf den Isentropenbuckel als vertikale Koordinate. Daß in der Jet-Achse dieser Darstellung Werte <15 Knoten auftreten, zeigt an, daß die Relation zwischen Isentropenbuckel und Jet-Achse durchaus signifikant ist und am stabilsten etwas oberhalb des Kern-Niveaus ausgeprägt erscheint. (Dem zweiten Gebiet mit Werten <15 Knoten etwa 2000 Fuß oberhalb des Kernniveaus kann wegen der geringeren Zahl der Fälle keine so große Bedeutung beigemessen werden.) Da der Abstand zwischen Jet-Achse und Isentropenbuckel von Fall zu Fall immerhin einigen Schwankungen unterliegt, weist die Abb. 76 in der Umgebung der Strahlstromachse wesentlich geringere horizontale Scherungen auf, als sie die Abb. 62 erkennen läßt. Eine Zone stärkster zyklonaler Scherung stellt sich in den Mittelwerten der Abb. 76 etwa 2½ Breitengrad nördlich des Isentropenbuckels ein. Laut Abb. 68 ist dies etwa die Entfernung, bis zu der die Abstände der Jet-Achsen von den Isentropenbuckeln in den Fällen streuen, in denen letztere rechts von den ersteren gelegen sind.

Die Verteilung der Normalkomponente in einem auf den Isentropenbuckel bezogenen Koordinatensystem (Abb. 77) zeigt gegenüber Abb. 72 signifikante Abweichungen. Die Aufwölbung der Isentropenflächen scheint im Mittel von Strömungskomponenten begleitet zu sein, die, von der antizyklonalen Seite des Jet-Stream kommend, gegen die zyklonale Seite hin gerichtet sind (positives Vorzeichen der Normalkomponente).

Die mittlere Vertikalbewegung in Abb. 78 zeigt eine ausgeprägt unterschiedliche Anordnung in den Räumen ober- und unterhalb des Kern-Niveaus. Oberhalb dieses Niveaus liegt das Schwergewicht der Aufwärtsbewegung etwas auf die antizyklonale Seite der Achse des Isentropenbuckels verschoben. Selbst bei der Mittelbildung treten noch Werte bis zu 0,6 m/sec auf. Auf der zyklonalen Seite, dort wo laut Abb. 75 der sekundäre Isentropengraben liegt, herrscht im Mittel Absinkbewegung. Daß die Maxima und Minima der Vertikalbewegung in Abb. 78 wesentlich schärfer ausgeprägt sind als in Abb. 74, bestätigt die schon früher ausgesprochene Vermutung, daß die Aufwölbungen der Isentropenflächen im Jet-Stream-Bereich auf die Wirksamkeit von vertikalen Bewegungsvorgängen zurückgehen.

Unterhalb des Kern-Niveaus liegen die Verhältnisse nahezu spiegelbildlich zu denen oberhalb dieses Niveaus. Hier sind, wie aus den Analysen des Abschnittes 2, aber auch aus den Mittelwerten in Abb. 75 hervorgeht, die Isentropenbuckel meist weniger deutlich ausgeprägt. Die Interpretation der Ergebnisse ist daher etwas schwieriger. Zudem besteht laut Abb. 68 besonders bei Querschnitten im Deltagebiet eine Tendenz zur Verschiebung der Buckelachsen auf die zyklonale Seite des Strahlstromes. Die mittleren Abwärtsbewegungen auf der antizyklonalen Seite des Buckels könnten daher vielleicht darauf zurückgeführt werden, daß bei manchen Fällen der Buckel auf die kalte Seite der Jet-Stream-Front überwechselt, in der nach Reed und Danielsen (13) die Hauptabsinkbewegung erfolgt. Flug Nr. 19 (23) bietet ein eklatantes Beispiel

dieser Art, das auch zu den negativen Werten im rechten unteren Quadranten der Abb. 78 wesentlich beitrug.

3.6. Mittelung in bezug auf den Isentropengraben

Abb. 79 zeigt die „normierten“ potentiellen Temperaturen in einem Koordinatensystem, das die Achse des Isentropengrabens als Ordinate besitzt. Dieser kommt auch dementsprechend deutlich zum Ausdruck. Die horizontalen Temperaturgradienten sind besonders stark auf der zyklonalen Seite oberhalb des Kern-Niveaus ausgeprägt und erreichen Werte von 3° C pro Breitengrad. Der Isentropenbuckel, welcher als Basis der im vorangehenden Kapitel angegebenen Statistik diente, verläuft im rechten unteren Quadranten der Abb. 79. Auf der zyklonalen Seite des mittleren Isentropengrabens schließt sich noch einmal ein Buckel an, dessen Verlauf und Ausgeprägtheit jedoch durch die abnehmende Zahl der Beobachtungen gegen die Ränder der Darstellung hin nicht mehr sehr zuverlässig ist.

Abb. 80 enthält die mittleren normierten Windgeschwindigkeiten in bezug auf den Isentropengraben. Dieser verläuft im Mittel links der Jet-Achse, wie auch der Abb. 67 entnommen werden kann. Durch die Streuung der Abstände zwischen Isentropengraben und Jet-Achsen bei den einzelnen Flügen sind gegenüber Abb. 62 die horizontalen Scherungen im Bereich der Strahlstromachse stark herabgesetzt. Ähnlich wie in Abb. 76 treten in der mittleren Jet-Achse Werte <15 Knoten auf, was wiederum für die Signifikanz der Einbuchtung der Isentropenflächen und ihrer Relation zur Jet-Achse spricht. Im Mittel scheint der Isentropengraben etwa um 1 Breitengrad weiter von der Strahlstromachse entfernt zu sein als der Isentropenbuckel auf der rechten Seite derselben, was auch in Abb. 66 bereits zum Ausdruck gebracht wurde.

Die Normalkomponente (Abb. 81) läßt oberhalb des Kern-Niveaus im Isentropengraben ein Überwiegen nördlicher Strömungskomponenten erkennen. Unterhalb dieses Niveaus scheinen dagegen im Graben, ähnlich wie im Isentropenbuckel (Abb. 77) positive Vorzeichen der Normalkomponente den Ausschlag zu geben. Betrachtet man dagegen nur die Zahl der Fälle mit positiven und negativen Vorzeichen ohne Rücksicht auf die Größe des Absolutbetrages der Normalkomponente, so überwiegt unterhalb des Kern-Niveaus in der Achse des Grabens die Gruppe mit negativen Vorzeichen in den Höhen —400, —800 und —1600 Fuß. Bei —1200 und —2000 Fuß halten sich beide Gruppen anzahlmäßig die Waage.

Die mittlere Verteilung der Vertikalkomponente (Abb. 82) zeigt erwartungsgemäß das Überwiegen von Abwärtsbewegungen auf der rechten Seite der Grabenachse. Dadurch kommt wohl eine gewisse Verlagerungstendenz der Isentropengraben nach Süden zum Ausdruck, auf die auch schon in Abschnitt 2 hingewiesen wurde. Die Mittelwerte an den Rändern dieser Darstellung besitzen wegen der geringen Zahl der Beobachtungen keine große Zuverlässigkeit.

3.7. Clear Air Turbulence (CAT)

Die CAT bei Project-Jet-Stream-Flügen wurde schon mehrmals eingehenden Untersuchungen unterzogen (2, 15, 19, 24), denn das Flugprogramm war ja in erster Linie dazu angelegt, der zivilen und militärischen Luftfahrt neue Erkenntnisse über die Flugverhältnisse im Bereich des Strahlstromes zu bringen. Es soll daher an dieser Stelle nur über einige bemerkenswerte Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung resümiert werden.

Aus Detailstudien einzelner Flüge (18, 19, 20, 23) war hervorgegangen, daß CAT-Beobachtungen häufig in der Umgebung relativ dünner, stabiler und barokliner Schichten in der Atmosphäre auftreten. Da derartige Schichten auch auf der antizyklonalen Seite des Strahlstromes vorkommen, ist von vornherein zu erwarten, daß es keinen „turbulenzfreien“ Sektor im Bereich des Jet-Stream gibt.

Abb. 83 enthält eine Summierung der subjektiven und objektiven Turbulenzbeobachtungen sämtlicher Querschnittflüge mit Ausnahme der Flüge Nr. 5 (keine Turbulenzangaben), 7 und 26 (Co-Pilot registrierte fast durchgehend leichte Turbulenz). Außerdem konnten bei Flug Nr. 20 im Niveau des Jet-Kernes einige Turbulenzangaben nicht berücksichtigt werden.

Dieser Abbildung kann folgendes entnommen werden:

1. Leichte Turbulenz ist in allen Sektoren rings um den Strahlstromkern sehr häufig anzutreffen.

2. Mäßige Turbulenz ist vorwiegend auf die zyklonale Seite des Strahlstromes beschränkt und tritt hauptsächlich oberhalb des Niveaus des Jet-Kernes auf, also in der Nähe der stratosphärischen Jet-Stream-Front. Zwei kurze Turbulenzzonen mit mäßiger Intensität werden auch im rechten unteren Quadranten berichtet, aus einem Raum, der mitunter stabile und barokline Zonen enthält. Die tieferliegende der beiden Zonen tritt bei Flug Nr. 17 im Gebiet eines schwachen Isentropengrabens auf. Die zweite Zone gehört dem Flug Nr. 13 an und liegt ebenfalls in einem schwach ausgeprägten Isentropengraben. Auch alle übrigen Zonen mit mäßiger CAT auf der zyklonalen Seite der Strahlstromachse (Flüge Nr. 11, 12, 20, 27, 29 und 30) treten entweder im Zentrum eines Isentropengrabens auf oder sind weniger als 60 Seemeilen von diesem entfernt, liegen aber dann in einer stark baroklinen Zone, die sich gegen den Graben hin absenkt und somit dessen unmittelbarem Einflußbereich angehört. Wie bereits erwähnt, sind manche dieser Isentropengraben mit mäßiger Turbulenz nur schwach ausgeprägt.

Die beiden Flugstrecken des Fluges Nr. 27, auf denen schwere Turbulenz verspürt wurde, liegen in einem äußerst scharf ausgeprägten Isentropengraben (vgl. Abb. 52).

Betrachten wir die Isentropengraben als bevorzugte Orte für Absinkbewegungen, so mag die stärkere Turbulenz in diesen Gebieten u. U. auf die einsetzende Stabilisierung in dünnen Schichten und auf die Ausbildung von Scherungs-Stabilitätswellen zurückzuführen sein.

3. Die Isentropenbuckel weisen zwar manche Fälle leichter Turbulenz auf, doch scheinen sie frei von mäßiger und schwerer Turbulenz zu sein.

4. Die objektiven Turbulenzmessungen, die mittels eines empfindlichen Fluggeschwindigkeitsmessers durchgeführt wurden (vgl. Abschnitt 1.2), reagieren besonders auf horizontale Böen, während die subjektiven Beobachtungen in erster Linie auf vertikale Beschleunigungen des Flugzeuges ansprechen. Eine genaue Trennung der beiden Böenkomponenten ist nicht möglich, da Horizontalböen durch zusätzlichen Auftrieb an den Tragflächen auch vertikale Beschleunigungen am Flugzeug hervorrufen und, umgekehrt, vertikale Böen zu Schwankungen in der Fluggeschwindigkeit führen können (15). Trotz dieser Unschärfe in der Unterscheidung der beiden Beschleunigungskomponenten scheint dem Umstand, daß die größte Zahl der objektiv beobachteten Turbulenzfälle im linken oberen Quadranten der Abb. 83 — also in der Stratosphäre — auftritt, einige Bedeutung zuzukommen, wie auch von Clodman und Ball (4) gefunden wurde. Die stabilen Schichtungsverhältnisse der Stratosphäre scheinen so-

mit die Ausbildung horizontaler Böen zu begünstigen. Die größten Böengeschwindigkeiten treten wiederum nahe den Isentropengräben auf.

4. Die Untersuchungsergebnisse in flugmeteorologischer Sicht

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung verdienen besonders die folgenden für den praktischen Gebrauch des Flugwetterdienstes hervorgehoben zu werden:

1. Aus den im synoptischen Teil dieser Arbeit abgebildeten Analysen geht, zusammen mit früheren Veröffentlichungen (16 — 23) hervor, daß jeder Querschnitt durch den Strahlstrom eine Besonderheit darstellt. Mittlere Querschnitte durch den Jet-Stream dürfen daher nur dahingehend interpretiert werden, daß sie von den jeweils dargestellten Parametern (Windgeschwindigkeit, Temperatur, etc.) ein stark geglättetes Bild vermitteln; sie dürfen dagegen nicht als „häufigster“ Jet-Stream-Typ angesehen werden. Ganz im Gegenteil: Ein „mittlerer Strahlstrom“, wie er in den verschiedenen Koordinatensystemen des Abschnittes 3 abgebildet ist, besitzt nur geringe Wahrscheinlichkeit, jemals in dieser Form in der Natur aufzutreten. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung vermögen jedoch die verschiedenen Strahlstrommodelle wertvolle Hinweise zu geben.

2. Die horizontalen Windscherungen sind — wenn sie in bezug auf die Jet-Achse gemittelt werden und so die tatsächlichen mittleren Scherungsverhältnisse wiedergeben — stärker als auf Grund von Mittelbildungen in kartesischen Koordinaten mit der Höhe z als vertikale Achse bisher anzunehmen war. Auf der antizyklonalen Seite ausgeprägter Strahlströme kann im Mittel mit Scherungswerten gerechnet werden, die größer als der Coriolisparameter sind, also etwa $1 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ oder 0,36 Knoten pro Seemeile (quer zur Strömung gemessen) ausmachen (vgl. Abb. 71). Auf der zyklonalen Seite ist in der Höhe des Jet-Kernes im Mittel mit horizontalen Scherungen bis zu $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$, also mit 0,43 Knoten pro Seemeile (quer zur Strömung) zu rechnen.

3. Selbst im Niveau des Strahlstromkernes, in dem unter geostrophischen Strömungsbedingungen der horizontale Temperaturgradient quer zur Strömungsrichtung verschwinden müßte, lassen sich wegen des Vorhandenseins starker ageostrophischer Strömungskomponenten (vgl. 20) charakteristische Temperaturgänge registrieren. Auf der antizyklonalen Seite der Strahlstromachse findet man eine Aufwölbung der Isentropenflächen („Isentropenbuckel“) mit mittleren horizontalen Temperaturgradienten normal zur Strömungsrichtung im Kern-Niveau von etwa $2^{\circ} \text{ C} / \text{ Breitengrad}$. Bei einem horizontalen Flug quer zur Strahlstromachse äußert sich dieser Isentropenbuckel als Gebiet minimaler Außentemperaturen.

Links des Jet-Kernes ist meist ein deutlich ausgeprägter „Isentropengraben“ anzutreffen, der sich in maximalen Außentemperaturen bei Horizontalflug äußert und im Mittel im Kern-Niveau, bzw. etwas darüber, horizontale Gradienten normal zur Strömungs-

richtung von etwa $3^{\circ} \text{ C} / \text{ Breitengrad}$ aufweist. Bei Flügen im und über dem Niveau des Jet-Kernes liegt der Isentropengraben bereits in der Stratosphäre. Hier ist zwischen Isentropengräben und Isentropenbuckel die „stratosphärische Jet-Stream-Front“ mit sehr starken horizontalen Temperaturgradienten und großer thermischer Stabilität gelegen.

4. Die Isentropengräben sind als Zonen erhöhter Turbulenzgefahr anzusehen. Selbst schwach ausgeprägte Gräben können mitunter mäßige CAT mit sich führen. Bei einem Horizontalflug quer zur Jet-Achse in der Umgebung des Kern-Niveaus bedeuten also steigende Temperaturen zunehmende Turbulenzgefahr.* Schwere Turbulenz wird nach den vorliegenden Untersuchungen in äußerst markanten Isentropengräben angetroffen, die durch laufende Beobachtung der Außentemperaturen leicht festzustellen wären und vermieden werden könnten. Effektvolle Turbulenzwarnungen könnten bei den Flugberatungen an Hand sorgfältiger Analysen der 250- oder 200-mb-Temperaturen ausgegeben werden, indem vor dem Befliegen eines schmalen Bandes, das in der Achse der Warmluftzungen nördlich der Jet-Achse in diesen Druckniveau liegt, abgeraten wird.

Die Isentropenbuckel scheinen dagegen frei von stärkerer Turbulenz zu sein. Schwache CAT ist im Strahlstrombereich ein sehr häufiges Phänomen und läßt sich kaum vorhersagen.

Ist die Durchfliegung eines ausgeprägten Isentropengrabens in der Umgebung eines Strahlstromes unerläßlich, so können, wenn die Position dieses Grabens auf Grund von Höhenwindvorhersagen und von Temperaturbeobachtungen während des Fluges abzuschätzen ist, schon im voraus geeignete Maßnahmen für Passagierkomfort und -sicherheit getroffen werden. Abb. 83 läßt erkennen, daß nicht jeder Graben mit stärkerer Turbulenz verbunden sein muß. Es ist hier lediglich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens größer.

5. Im Bereich der Strahlströme ist mit höheren Vertikalgeschwindigkeiten zu rechnen, als gemeinhin angenommen wird. Auf- und Abgleitbewegungen bis zu 2,5 m/sec erscheinen selbst im Niveau des Jet-Kernes durchaus möglich (vgl. Analysen im Abschnitt 2). Die antizyklonale Flanke der Isentropenbuckel scheint im Mittel ein bevorzugtes Gebiet für aufwärtsgerichtete Luftbewegungen zu sein. Diese äußern sich bei Horizontalflug in einer zusätzlichen „true air speed“ von ca. 20 — 25 Knoten. Es bedürfte weiterer Untersuchungen, ob diese verbesserten Flugleistungen signifikanten Charakter besitzen.

Zusätzlich zur erhöhten Turbulenzgefahr zeichnen sich die Isentropengräben durch Absinkbewegungen und dadurch durch verminderte Flugleistungen bei gleichbleibender Motorenleistung aus.

Da die Vertikalbewegungen nur größenordnungsmäßig aus „pitch“ und „true air speed“ abgeschätzt werden können, würden auf diesem Sektor Erfahrungsberichte und detaillierte Messungen von größtem Wert sein.

* Orographisch bedingte, mäßige und starke CAT ist unter diesen Gesichtspunkten nicht berücksichtigt. Sie kann auch in anderen Bereichen des Jet-Stream auftreten, vorzugsweise jedoch an stabilen Schichten.

Literatur

- (1) Bellamy, C. J.: The use of pressure altitude and altimeter corrections in meteorology. *J. Meteor.* **2**, 1—79 (1945)
- (2) Brundidge, K. C.: A preliminary study of eleven Project Jet Stream Flights: 1956—1957 phase. A & M College of Texas, Final Rep. Contr. AF 19(604)—1565, 86—108 (1958)
- (3) Brundidge, K. C. and Goldman, J. L.: Some new jet stream models. A & M College of Texas, Final Rep. Contr. AF 19(604)—1565, 109—126 (1958)
- (4) Clodman, J. and Ball, J. T.: Clear air turbulence. New York Univ., College of Engineering, Res. Div., Final Rep. Contr. AF 19(604)—3068 (1959)
- (5) Davis, N. E.: The mean position of the jet stream. Great Britain, Meteor. Res. Comm., M. R. P., 615 (1951)
- (6) Deutscher Wetterdienst: Tägl. Wetterber. **82** Nr. 88 (1957)
- (7) Endlich, R. M. and McLean, G. S.: The structure of the jet stream core. *J. Meteor.* **14**, 543—552 (1957)
- (8) Endlich, R. M. and Rados, R. M.: The meteorological measurements and field program of Project Jet Stream from 1956 to 1958. Geophys. Res. Pap. No. 64, Boston (1959)
- (9) Kuettner, J. and McLean, G. S.: Vertical motions in the jet stream. Schweiz. Aero-Rev. 1960
- (10) McLean, G. S.: Cloud distribution in the vicinity of jet streams. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **38**, 579—583 (1957)
- (11) Palmén, E.: Über die atmosphärischen Strahlströme. *Meteor. Abh. Freie Univ. Berlin*, **2**, H. 3, 35—50 (1954)
- (12) Palmén, E. and Newton, C. W.: A study of the mean wind and temperature distribution in the vicinity of the polar front in winter. *J. Meteor.* **5**, 220—226 (1948)
- (13) Reed, R. J. and Danielsen, E. F.: Fronts in the vicinity of the tropopause. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. A* **11**, 1—17 (1959)
- (14) Reiter, E. R.: The layer of maximum wind. *J. Meteor.* **15**, 27—43 (1958)
- (15) Reiter, E. R.: Turbulenz im wolkenfreien Raum (Clear-Air Turbulence). *Ber. Dt. Wetterd. Nr.* **61** (1960)
- (16) Reiter, E. R.: The detailed structure of the atmosphere near jet streams. Publ. No. 102, Inst. f. Meteor. u. Geophys. Univ. Innsbruck (1960)
- (17) Reiter, E. R.: The detailed structure of the atmosphere near jet streams. *Geofis. pura e appl.* **46**, 193—200 (1960)
- (18) Reiter, E. R.: The detailed structure of the wind field near the jet stream. *J. Meteor.* **18**, 9—30 (1961)
- (19) Reiter, E. R.: Die nordamerikanische Strahlstromwetterlage vom 23. bis 27. Januar 1957 an Hand von Forschungsflügen des Project Jet Stream. *Beitr. Phys. Atm.* **33**, 244—279 (1961)
- (20) Reiter, E. R.: Project Jet Stream Research Flight No. 30, April 1957. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **87**, 332 (1961)
- (21) Reiter, E. R.: The meso-structure of jet streams. *Erscheint Schweiz. Aero-Rev.*
- (22) Reiter, E. R.: *Meteorologie der Strahlströme (Jet Streams)*. Wien 1961
- (23) Reiter, E. R., Lang, H., Mook, R., u. Wendler, G.: Analyse dreier Forschungsflüge des Project Jet Stream. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. A* **12**, 183—224 (1961)
- (24) Sasaki, Y.: A theory and analysis of clear air turbulence. A & M College of Texas, Dep. of Oceanogr. and Meteor. Sci. Rep. No. 1, Contr. No. AF 19(604)—1565 (1958)
- (25) Saucier, W. J.: A summary of wind distributions in the jet streams of the Southeast United States investigated by Project Jet Stream. A & M College of Texas, Department of Oceanogr. and Meteor., Final Rep. Contr. AF 19(604)—1565, 6—57 (1958)
- (26) Staff Members: Flight data pertaining to jet streams. Project Jet Stream, Geophys. Res. Dir., Air Force Cambridge Res. Center, and Data Reduction Laboratory, Univ. of Dayton, Ohio (1958/1959)
- (27) Staley, D. O.: Evaluation of potential vorticity changes near the tropopause and the related vertical motions, vertical advection of vorticity, and transfer of radioactive debris from stratosphere to troposphere. *J. Meteor.* **17**, 591—620 (1960)
- (28) Tull, W. J.: Doppler navigation. *Navigation. J. of the Inst. of Navig., Los Angeles*, **5**, 290—298 (1957)

Berichtigung zu den Abbildungen

Bei Abb. 37 füge hinzu: Dicke Flugroutenlinien: Kondensstreifen.

Bei Abb. 63 lies: .. Gl. [4] anstatt .. Gl. (1)

Bei Abb. 65 lies: .. in Breitengrad anstatt .. im Breitengrad

Abbildungen

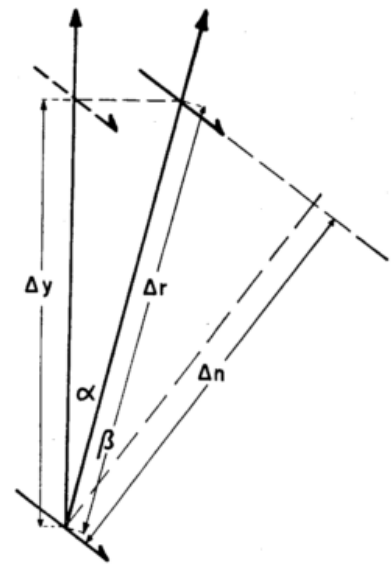
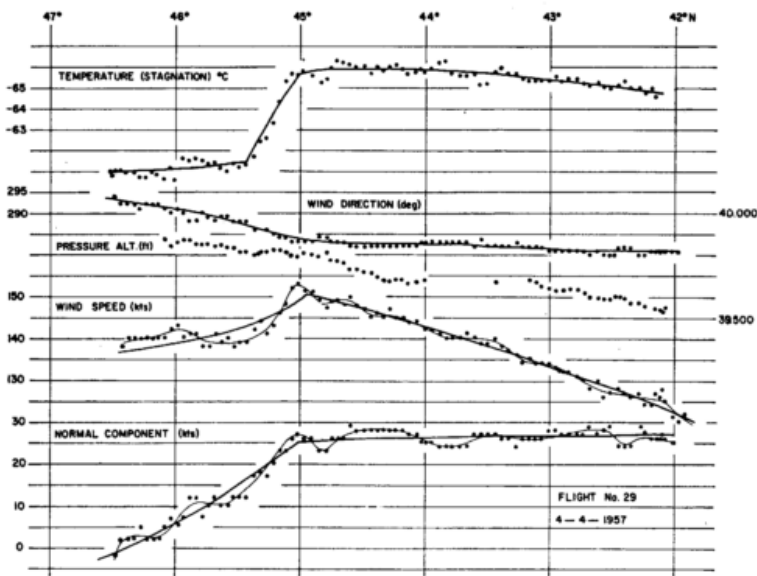


Abb. 1
 Meßwerte für Staupunkttemperatur (°C), Windrichtung (Grad), Druckhöhe (Fuß), Windgeschwindigkeit (Knoten) und Normalkomponente (Knoten) entlang eines Abschnittes des Fluges Nr. 29, vom 4. April 1957. Die erste Glättung ist durch dünne, die zweite durch dicke Linien gekennzeichnet.

Abb. 2
 Reduktion der meridionalen Windprofile auf eine strömungsnormale Ebene. y = Meridianrichtung, r = Richtung der Flugroute, n = Richtung der Strömungsnormalen.

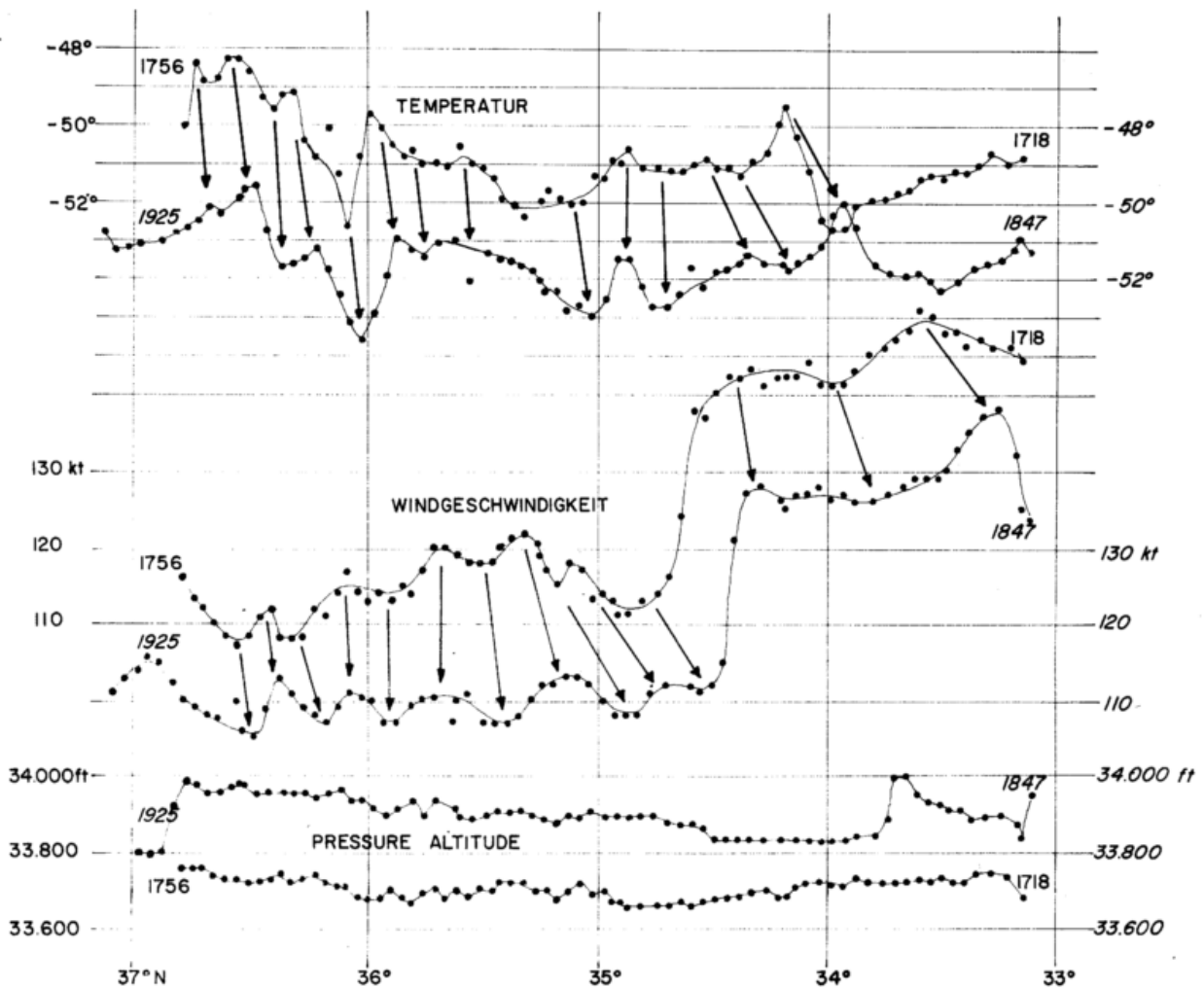


Abb. 3
 Zeitliche Verschiebung der Makro- und Mesostruktur in den Temperatur- und Windgeschwindigkeitsmessungen eines Abschnittes des Fluges Nr. 12, 18. Januar 1957. Die Zahlen am Anfang und Ende der Meßreihen geben die Uhrzeit (GCT) an, zu der diese Route befliegen wurde. Die jeweiligen Meßskalen sind an den Rändern der Abbildung angegeben.

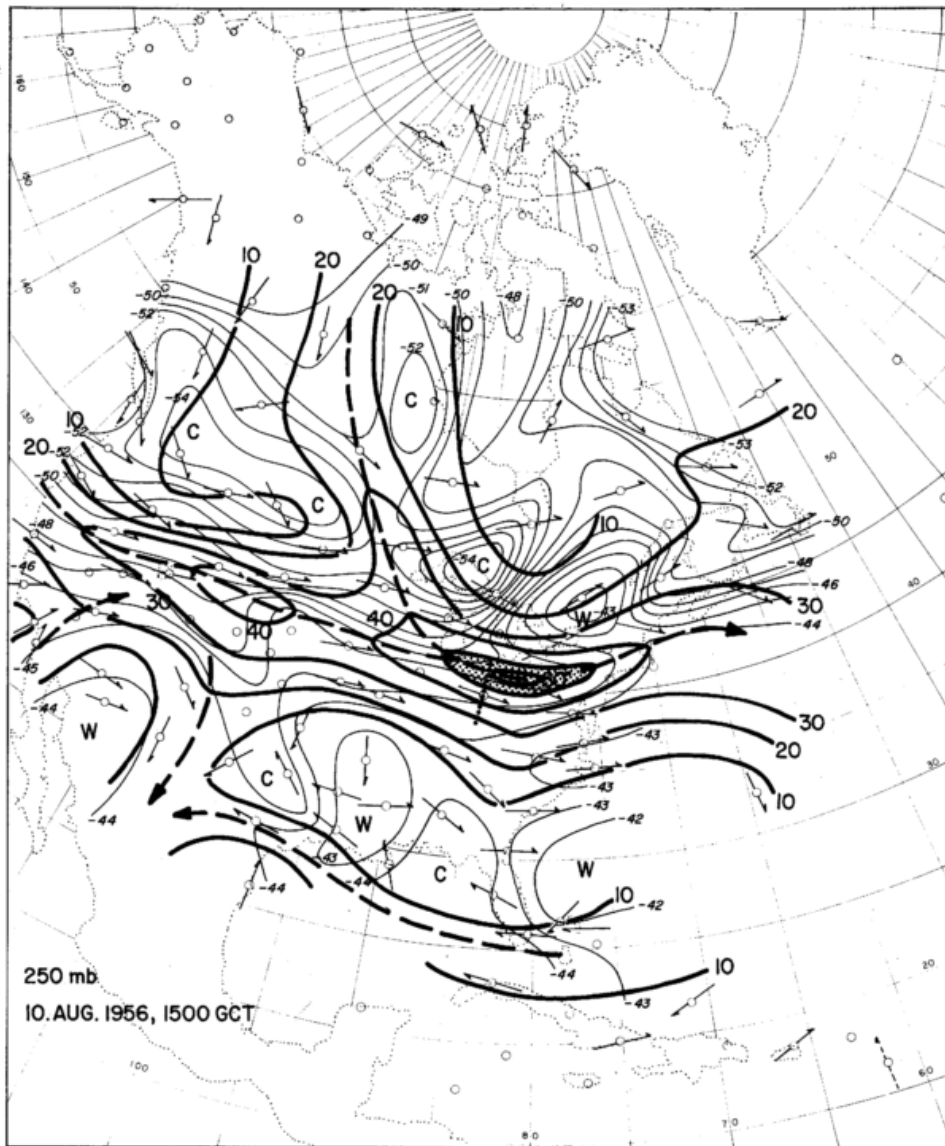


Abb. 4
Isotachen (dicke Linien, m/sec) und Isothermen (dünne Linien, °C) der 250-mb-Fläche, 10. August 1956, 1500 GCT. Die Jet-Achsen sind durch dicke strichlierte Linien, Gebiete mit Windgeschwindigkeiten > 50 m/sec durch Raster markiert. W = warme Gebiete, C = kalte Gebiete. Die Flugroute des Fluges Nr. 1 ist punktiert eingetragen.

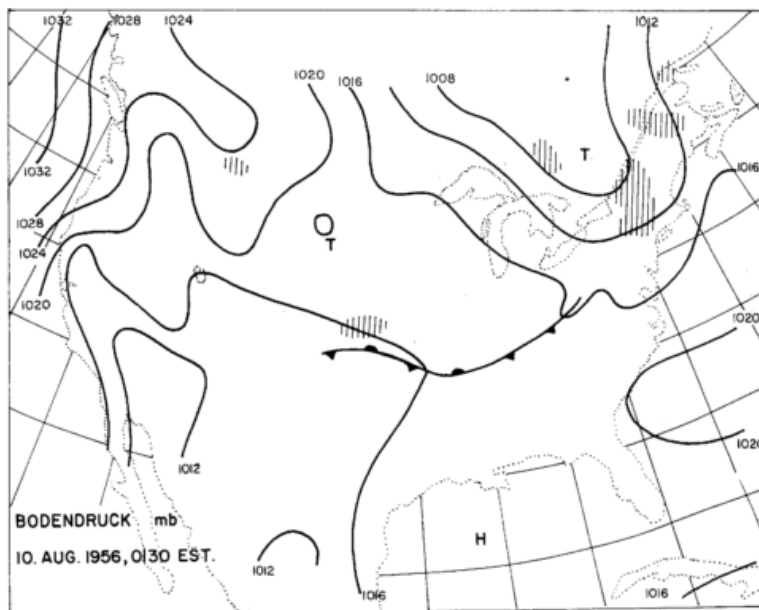


Abb. 5
Bodendruckverteilung (mb) am 10. August 1956, 0130 EST. Niederschlagsgebiete sind schraffiert eingetragen (26).

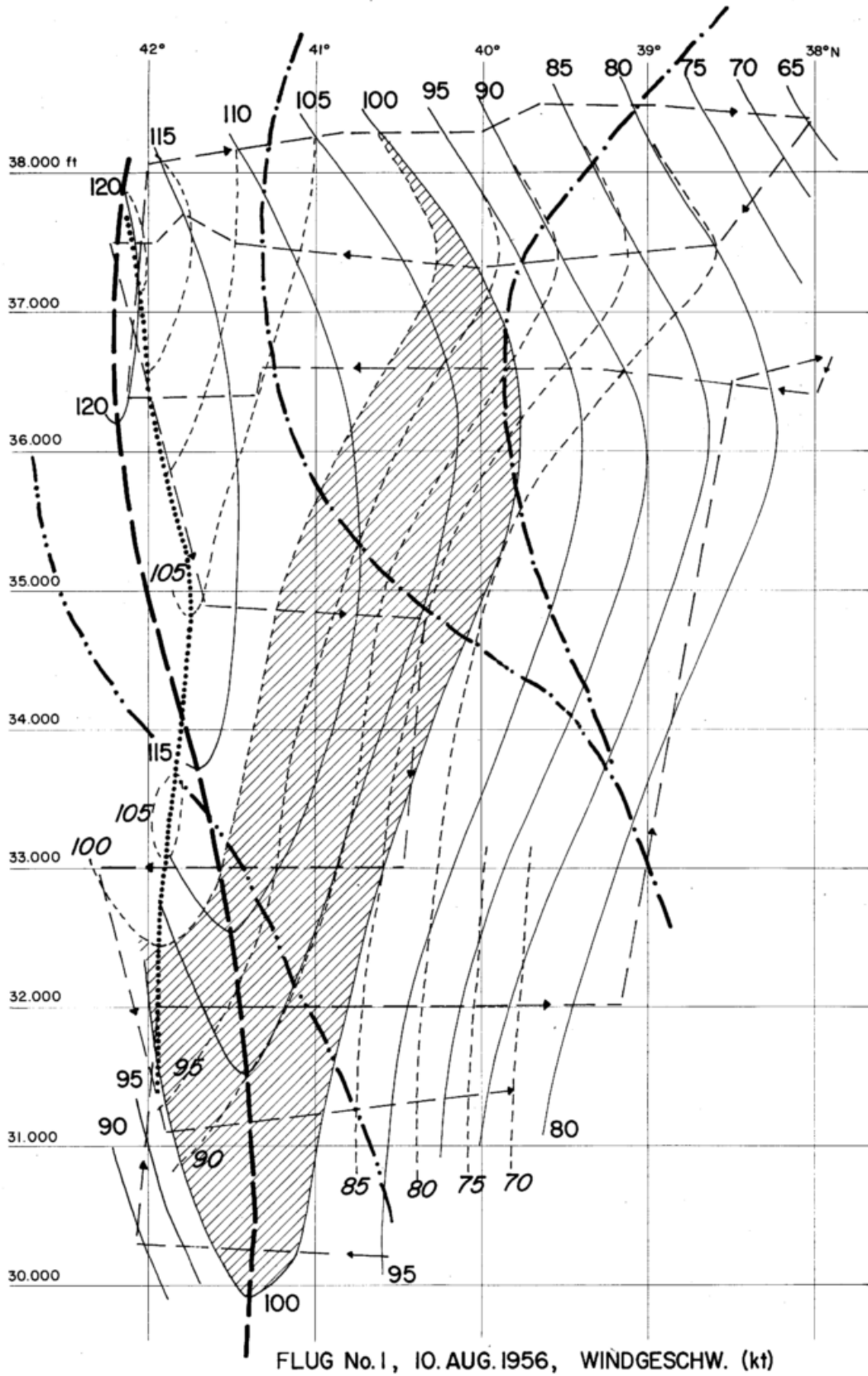


Abb. 6
Isotachen (Knoten) der doppelt geglätteten Windgeschwindigkeit des Fluges Nr. 1, 10. August 1956. Die vollen Linien geben die Analyse für die aufsteigende Flugroute, die kurz strichlierten Linien für die absteigende Route an. Die Verschiebung der 100-Knoten-Isotache ist durch die schraffierte Fläche angedeutet. Flugrouten: dünn strichliert, mit Pfeilen; Jet-Achsen für die Analyse der aufsteigenden und absteigenden Flugrouten: dick strichliert und punktiert; Isentropenbuckel: strichpunktiert; Isentropengraben: strich-doppelpunktiert.

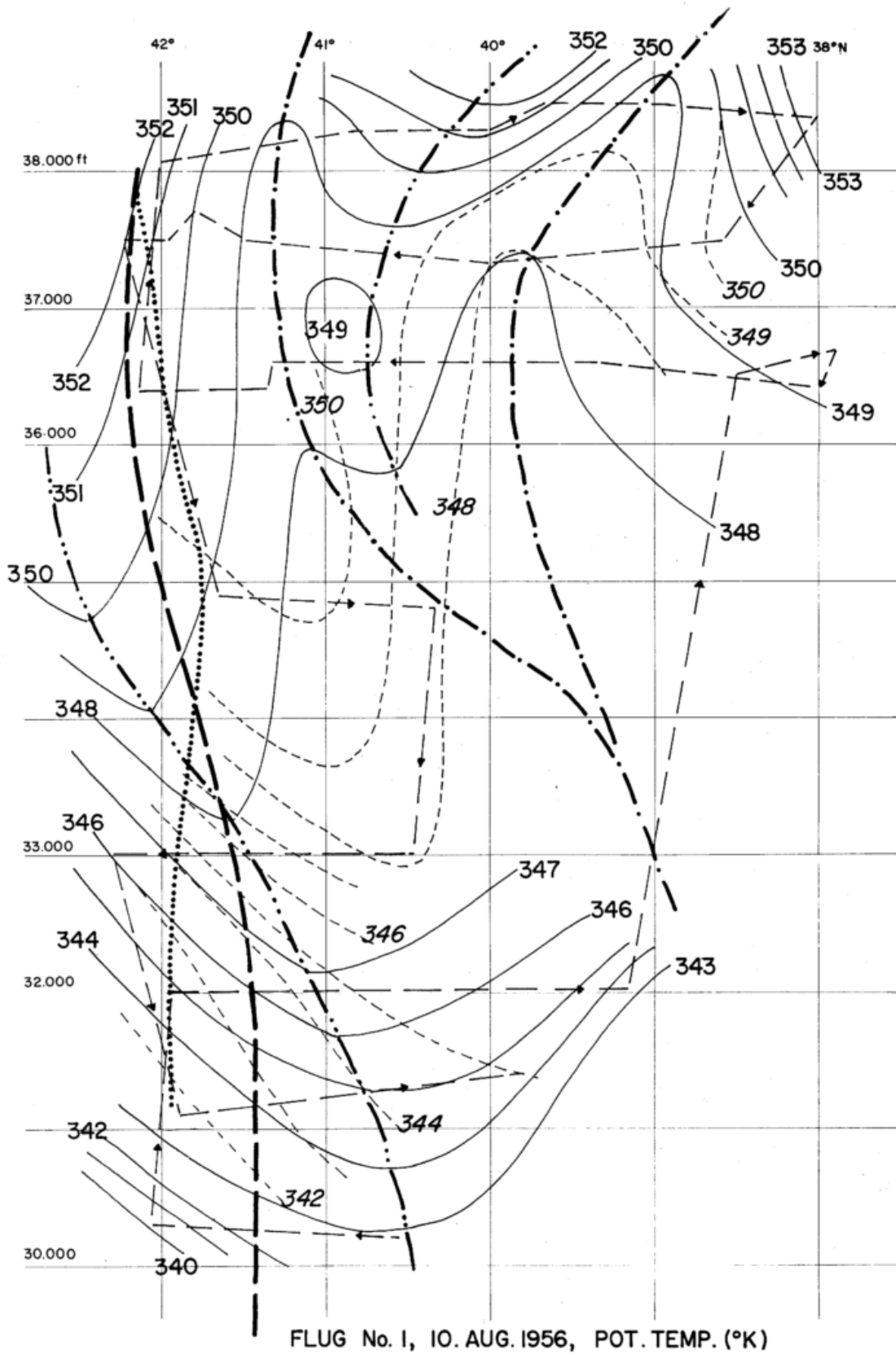


Abb. 7
Isothermen (°K) der doppelt geglätteten potentiellen Temperatur, Flug Nr. 1, 10. August 1956. Volle und kurz strichlierte Analyse für aufsteigende bzw. absteigende Flugrouten. Jet-Achsen sind aus Abb. 6 übernommen. Flugrouten, Isentropenbuckel und Isentropengraben wie in Abb. 6.

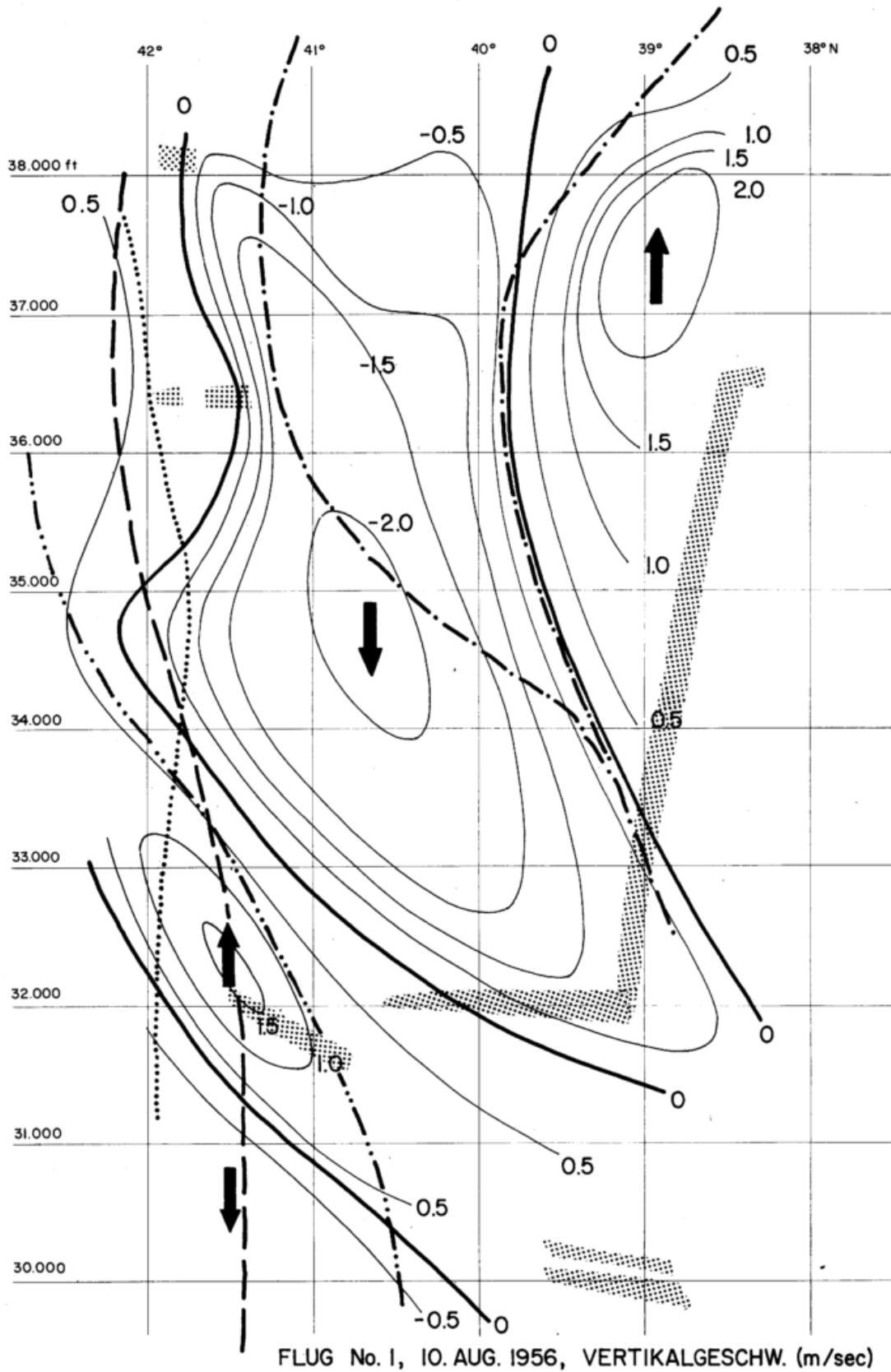


Abb. 8
Vertikalbewegung (m/sec), Flug Nr. 1, 10. August 1956, aus den
Registrierungen der "true air speed" und des Neigungswinkels
abgeschätzt. Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in
Abb. 6.

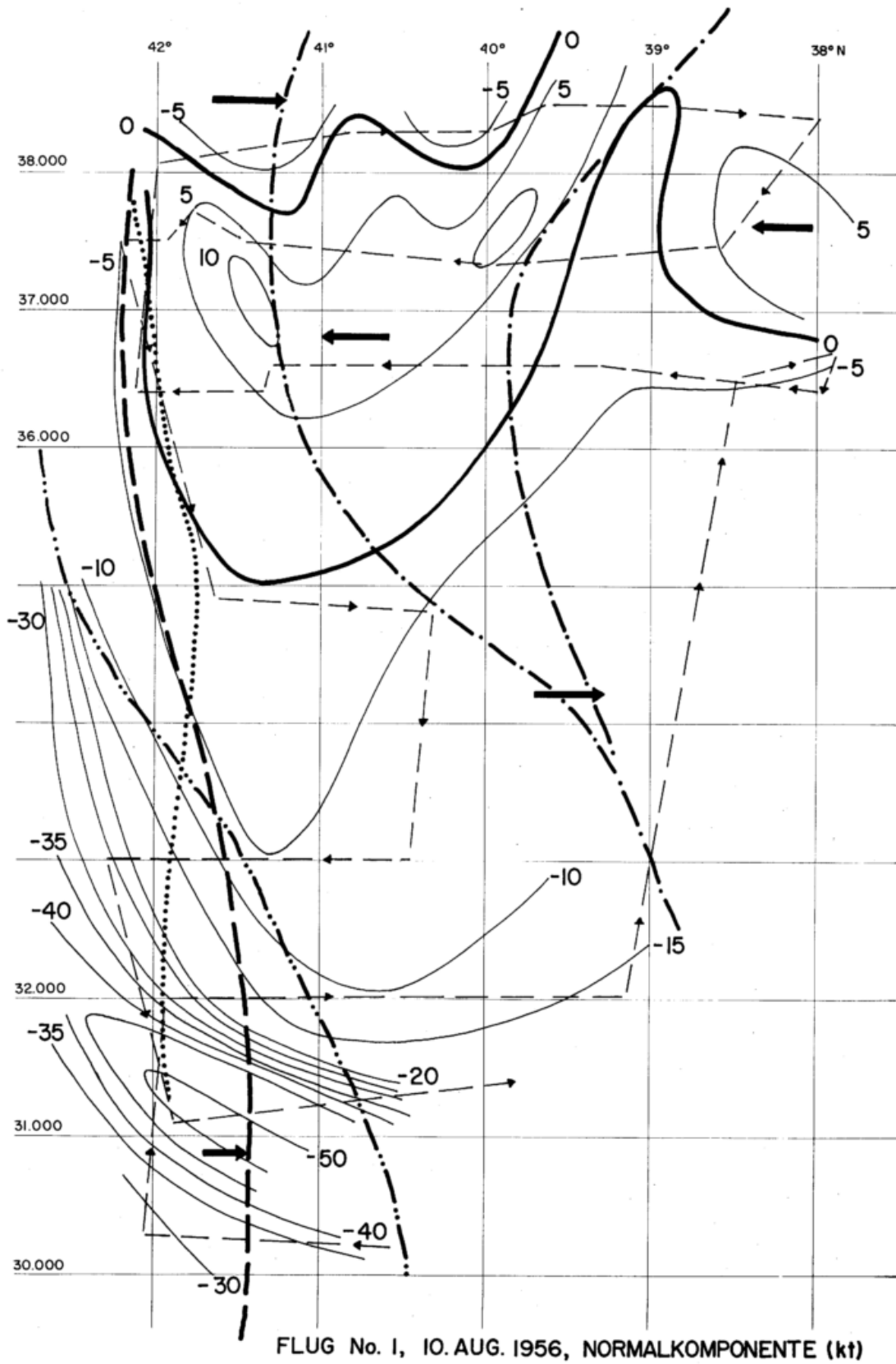
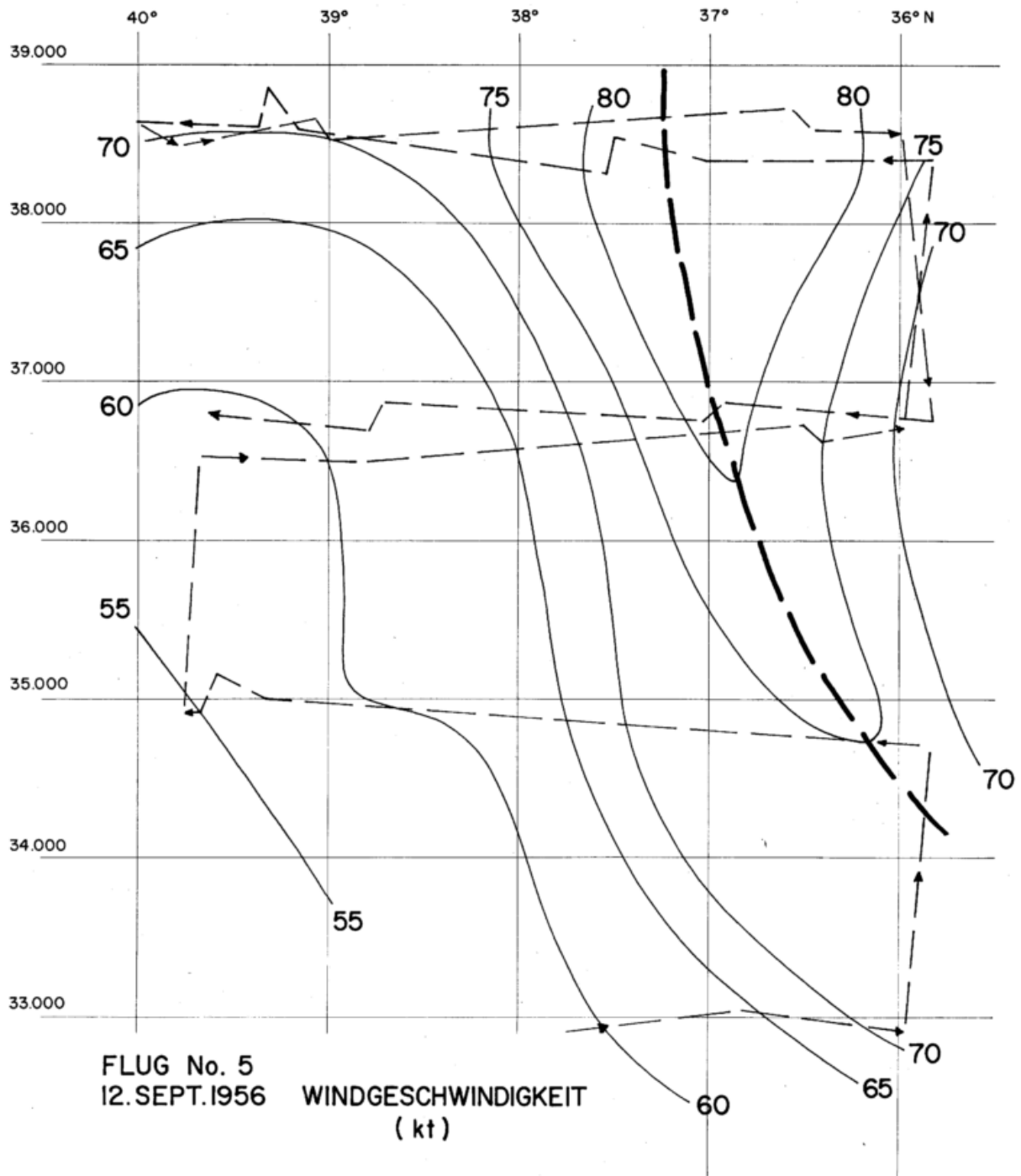


Abb. 9
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 1, 10. August 1956.
Strömungskomponenten von der antizyklonalen zur zyklonalen
Seite besitzen positives Vorzeichen. Jet-Achse, Isentropenbuckel
und -graben wie in Abb. 6.



FLUG No. 5
12. SEPT. 1956 WINDGESCHWINDIGKEIT
(kt)

Abb. 12
Isotachen (Knoten). Flug Nr. 5, 12. September 1956. (Siehe Leg.
zu Abb. 6).

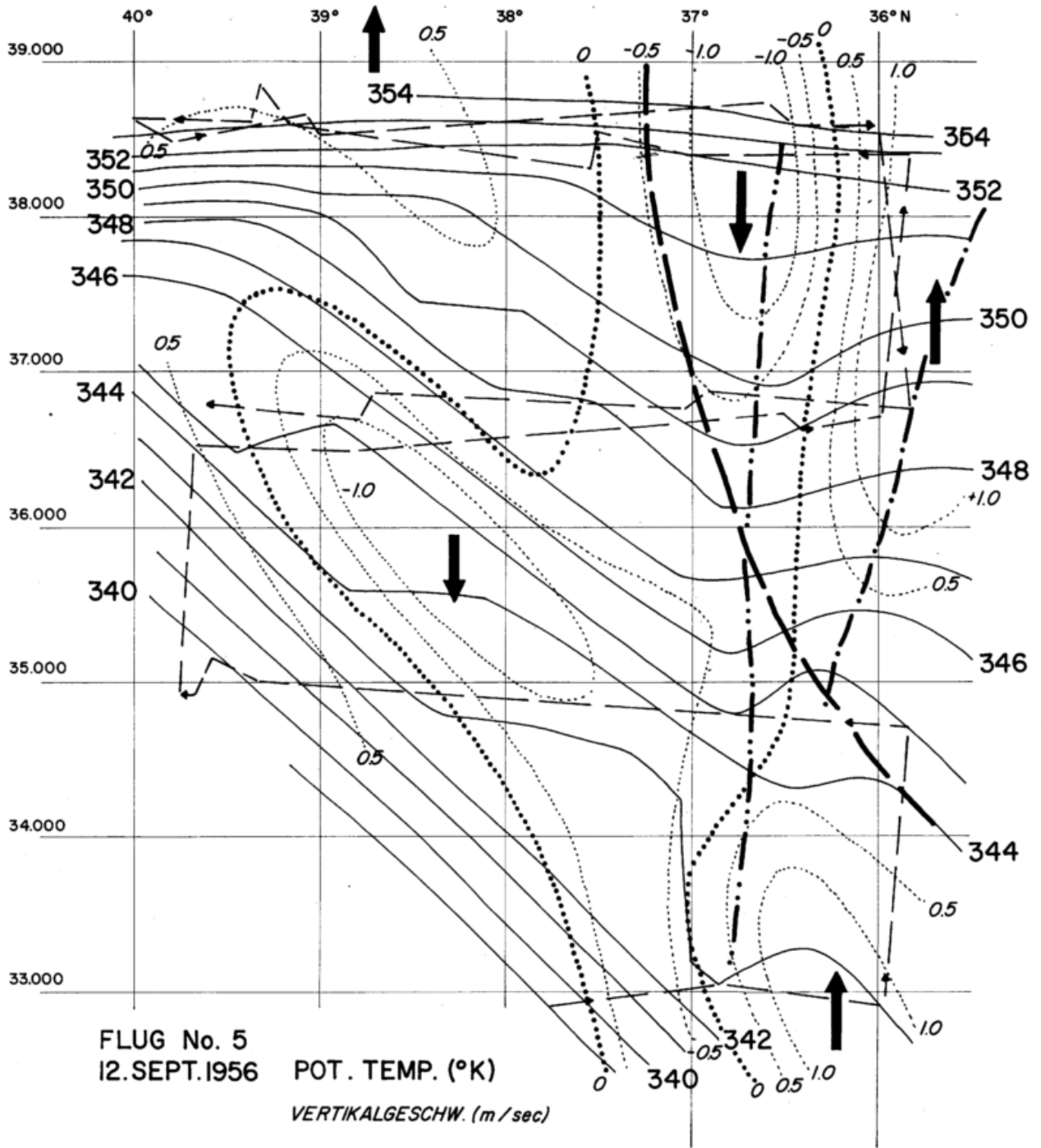


Abb. 13
Isothermen (°K) der potentiellen Temperatur (volle Linien) und
Isotachen (m/sec) der Vertikalgeschwindigkeit (dünn punktiert,
Nulllinien dick punktiert), Flug Nr. 5, 12. September 1956.
Jet-Achse wie in Abb. 12. (Vgl. Leg. zu Abb. 6, 7 und 8).

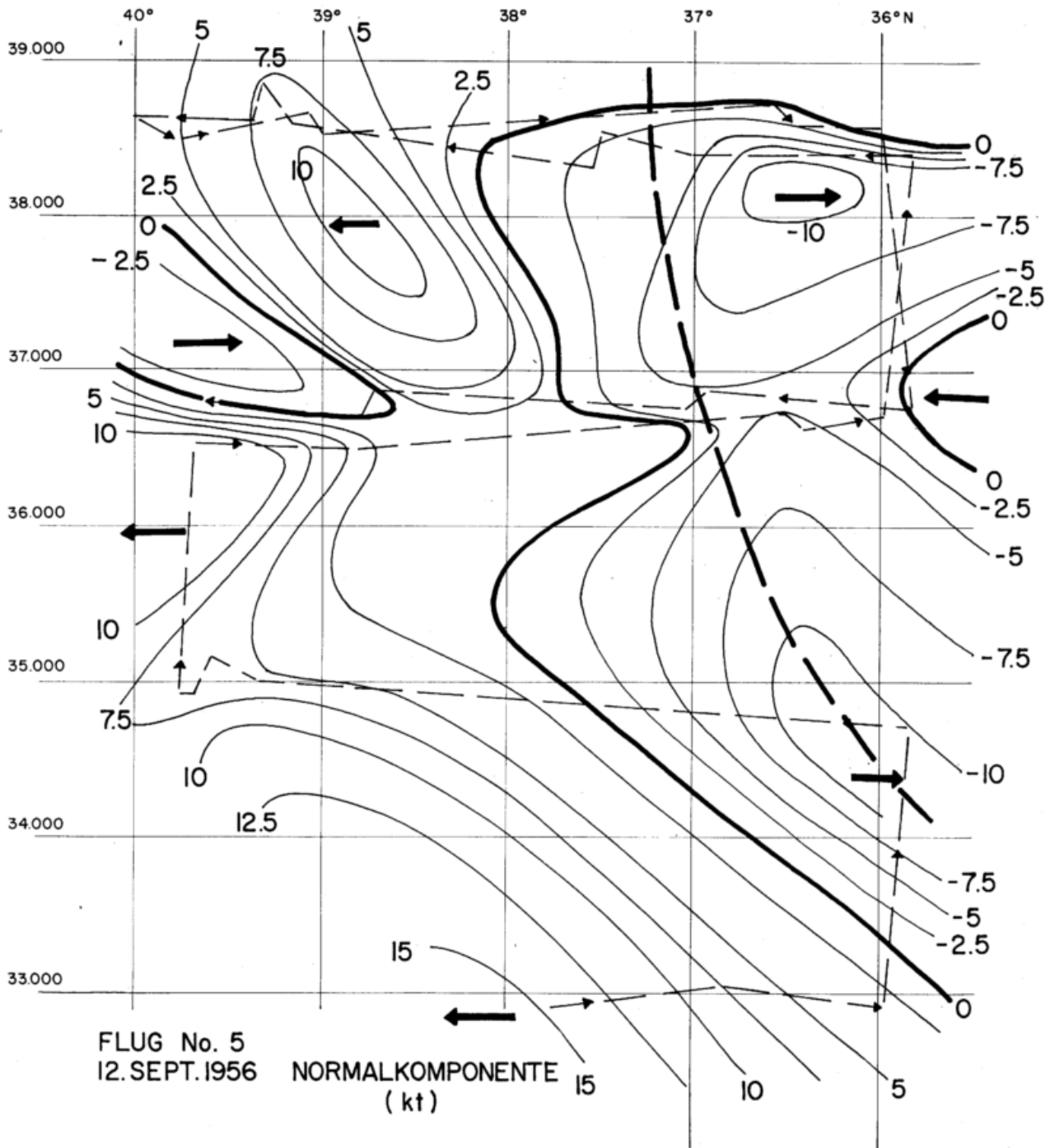


Abb. 14
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 5, 12. September 1956.
(Vgl. Leg. zu Abb. 9). Jet-Achse wie in Abb. 12.

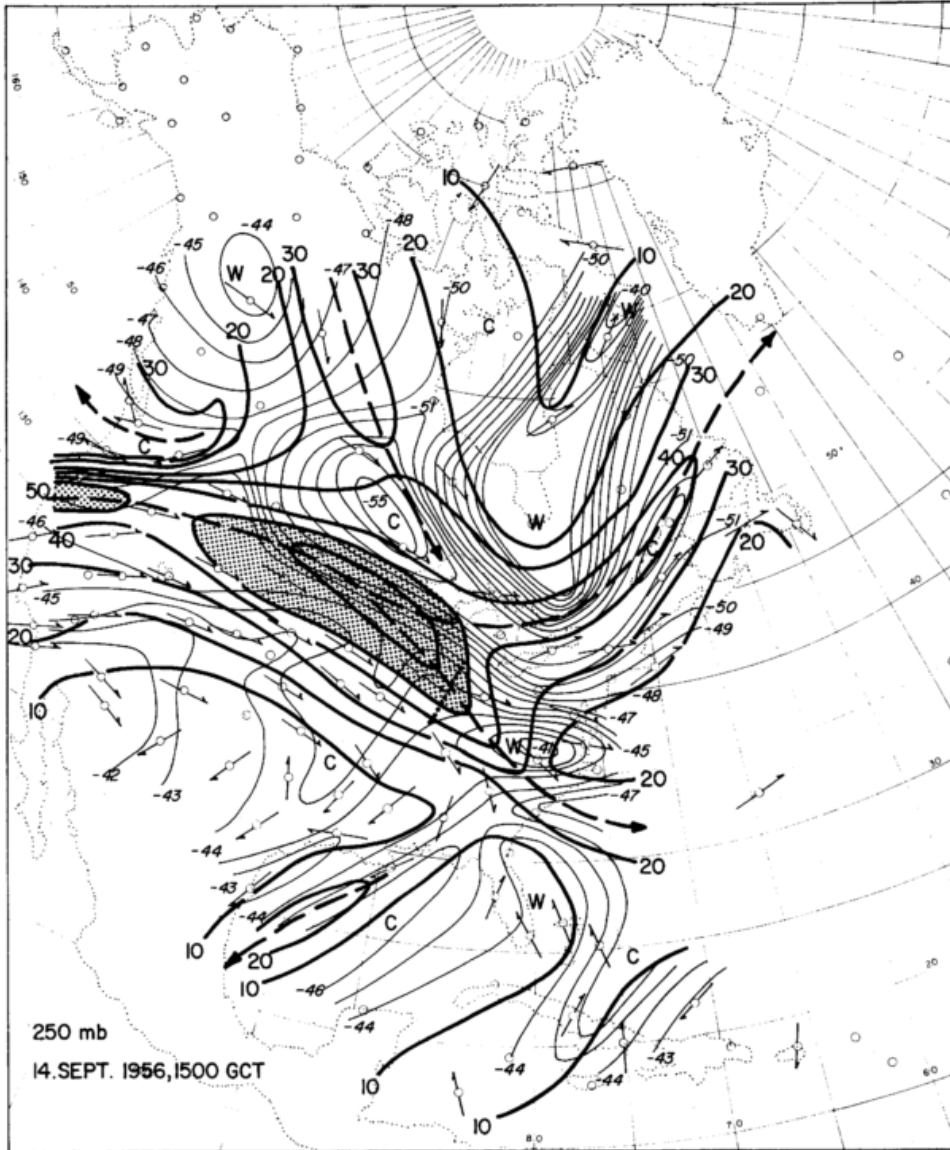


Abb. 15
Isotachen und Isothermen der 250-mb-Fläche, 14. Sept. 1956,
1500 GCT, Flug Nr. 7. (Siehe Leg. zu Abb. 4).

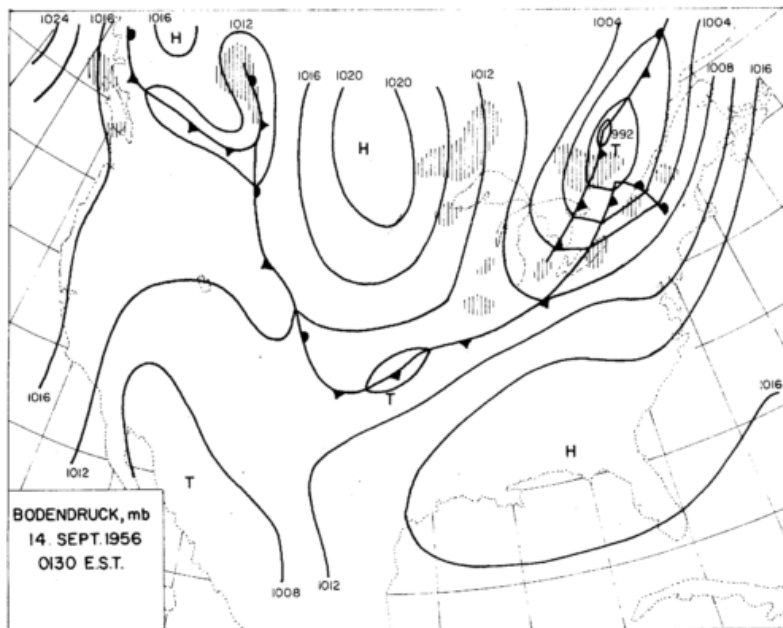
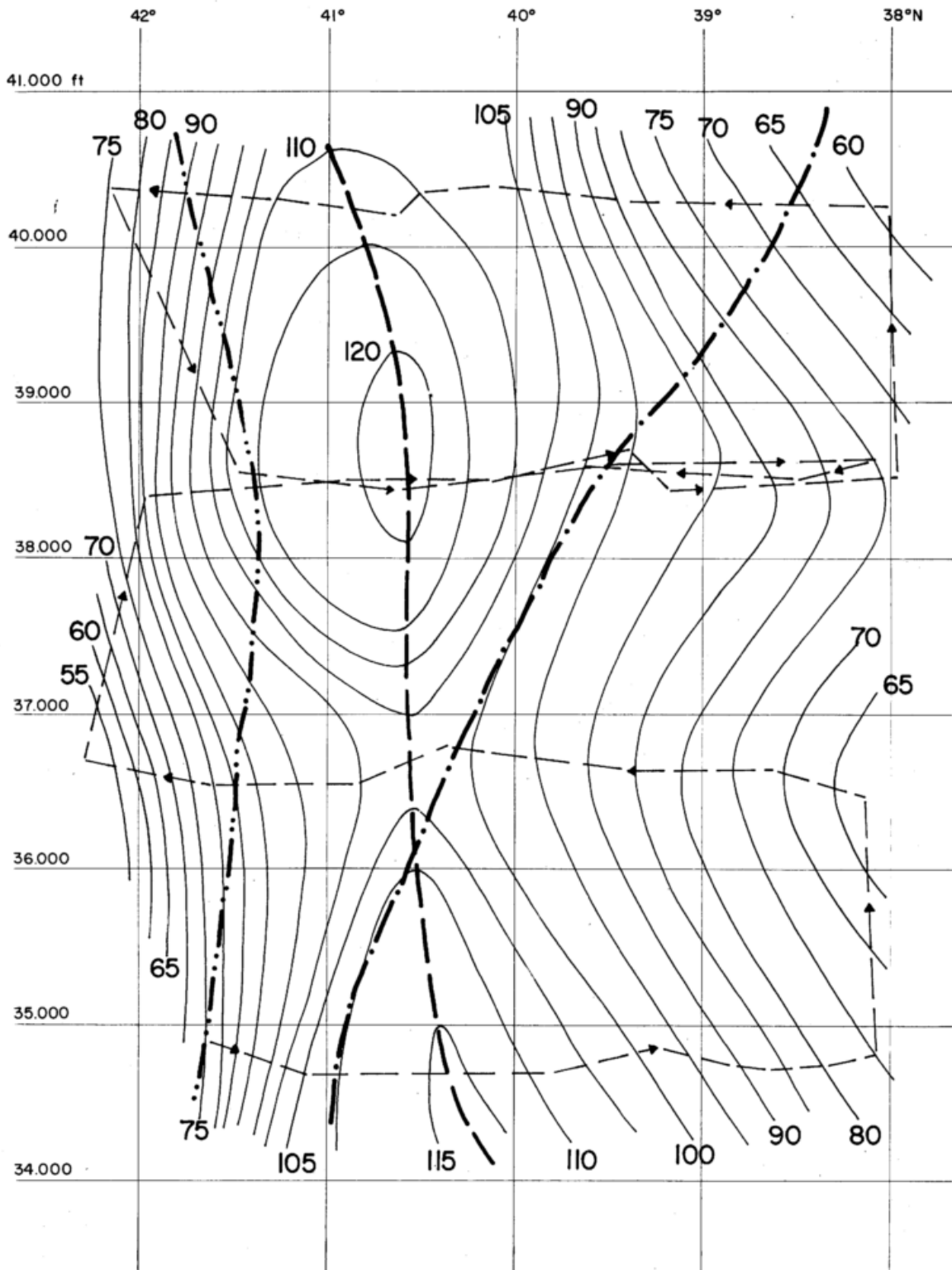
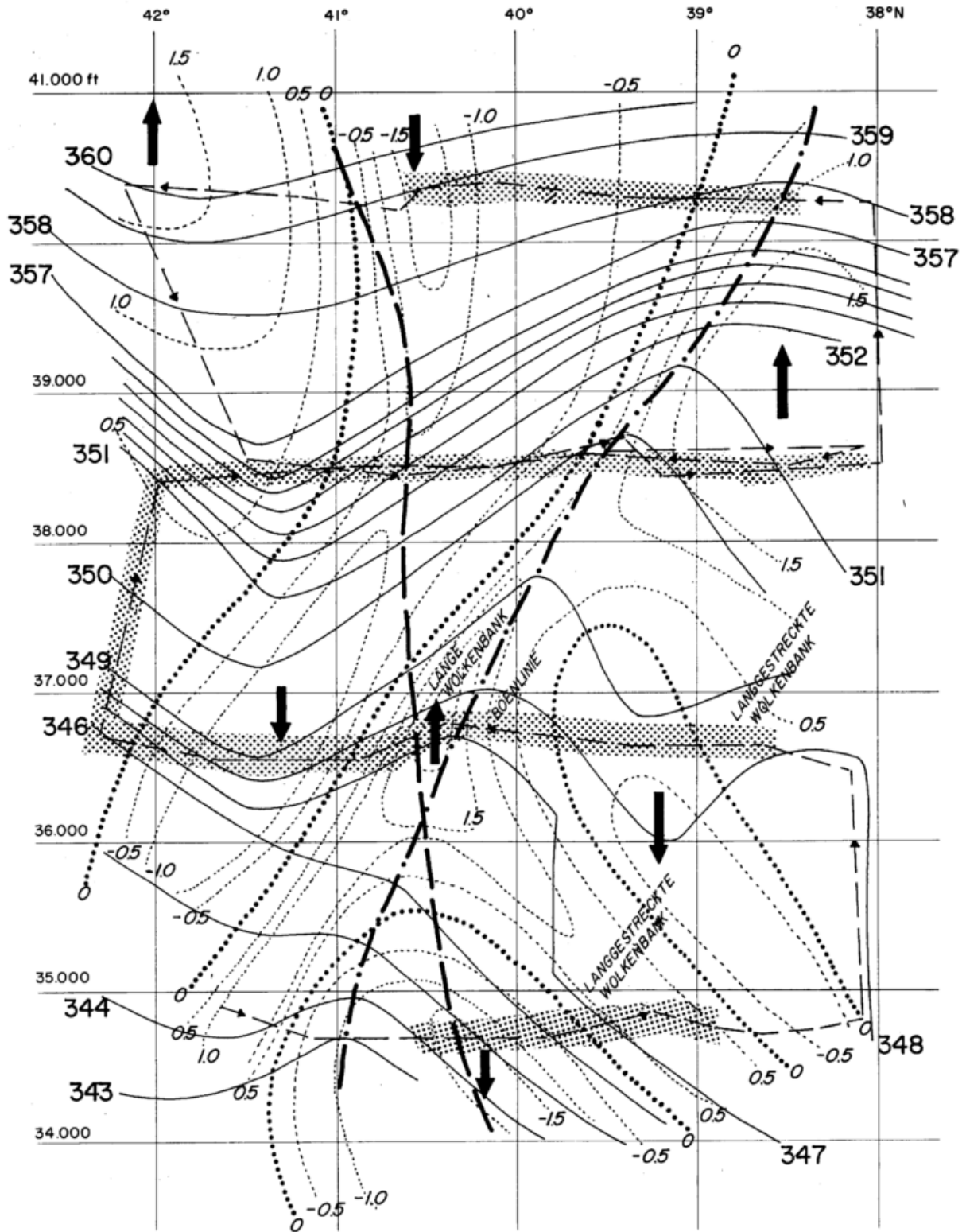


Abb. 16
Bodendruckverteilung (mb) und Niederschlag, 14. Sept. 1956,
0130 EST (26).



FLUG No. 7, 14. SEPT. 1956, WINDGESCHW. (kt)

Abb. 17
Isotachen (Knoten), Flug Nr. 7, 14. September 1956. (Siehe Leg.
zu Abb. 6).

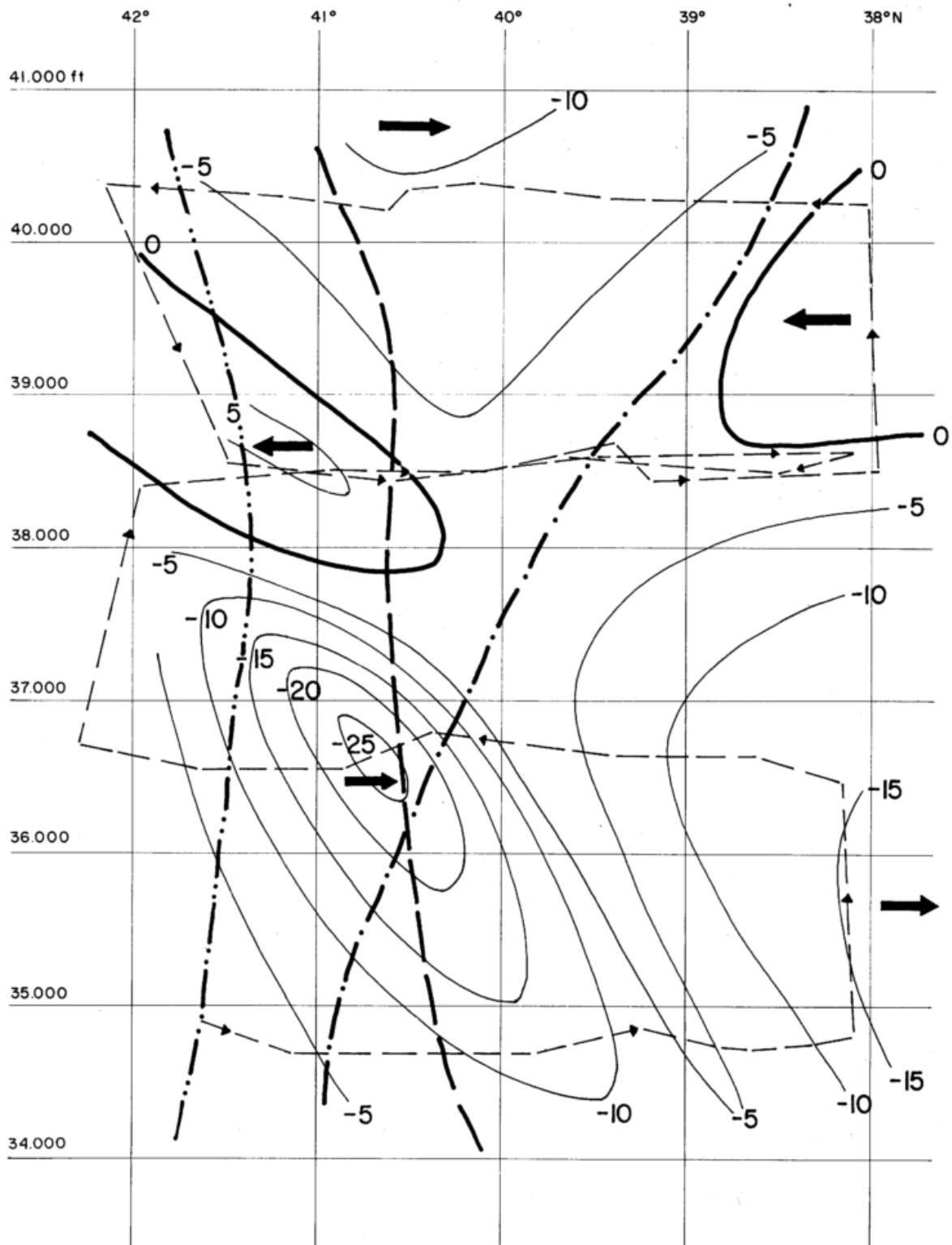


Cu humilis bei
8-10.000ft

FLUG No. 7, 14. SEPT. 1956, POT. TEMP. (°K)

VERTIKALGESCHW. (m/sec)

Abb. 18
Isothermen (°K) der potentiellen Temperatur (volle Linien) und
Isotachen der Vertikalgeschwindigkeit (punktiert), Flug Nr. 7,
14. September 1956. Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben
wie in Abb. 17. Wolkenflug durch Raster angedeutet. (Vgl. Leg.
zu Abb. 6, 7 und 8).



FLUG No. 7, 14. SEPT. 1956, NORMALKOMPONENTE (kt)

Abb. 19
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 7, 14. September 1956.
(Vgl. Legende zu Abb. 9). Jet-Achse, Isentropenbuckel und
-graben wie in Abb. 17).

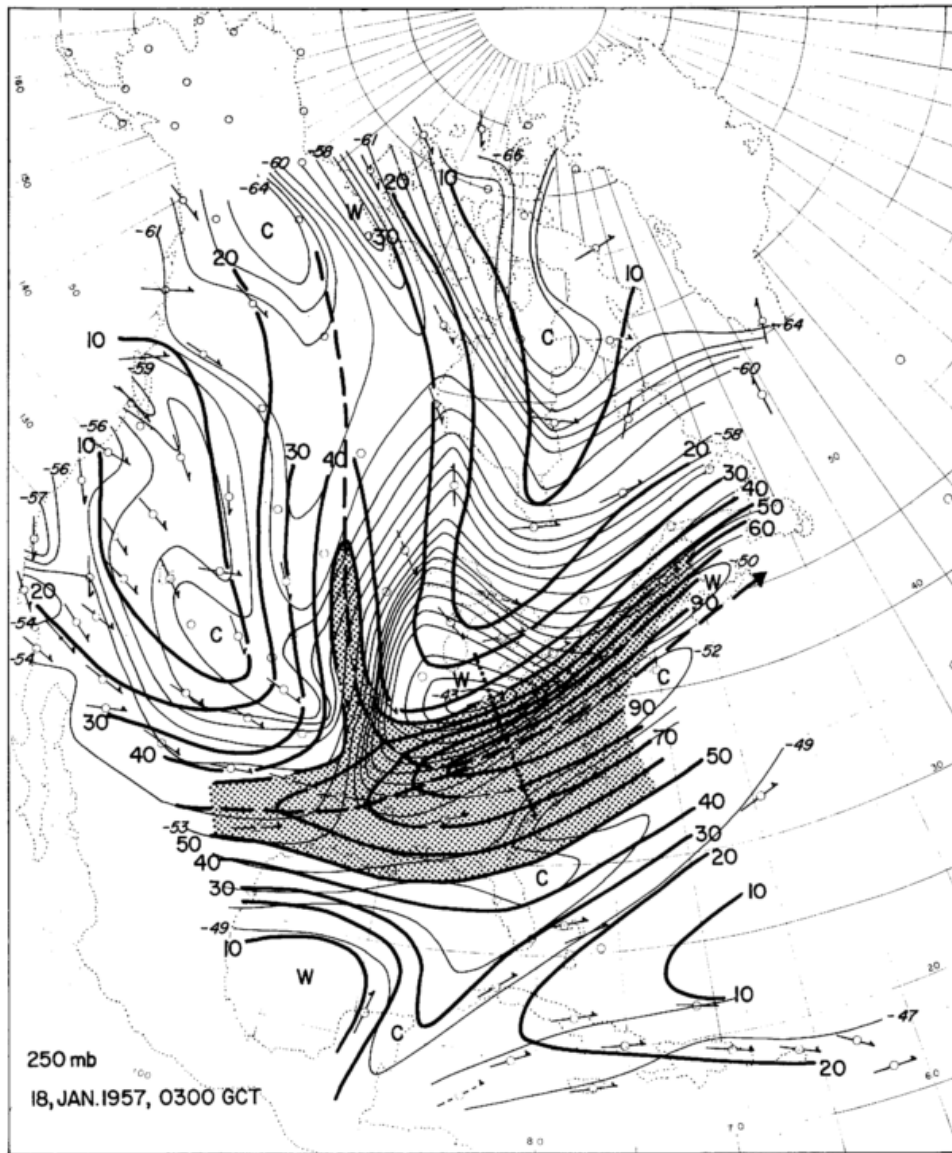


Abb. 20
Isotachen und Isothermen der 250-mb-Fläche, 18. Januar 1957,
0300 GCT, Flug Nr. 11. (Vgl. Leg. zu Abb. 4).

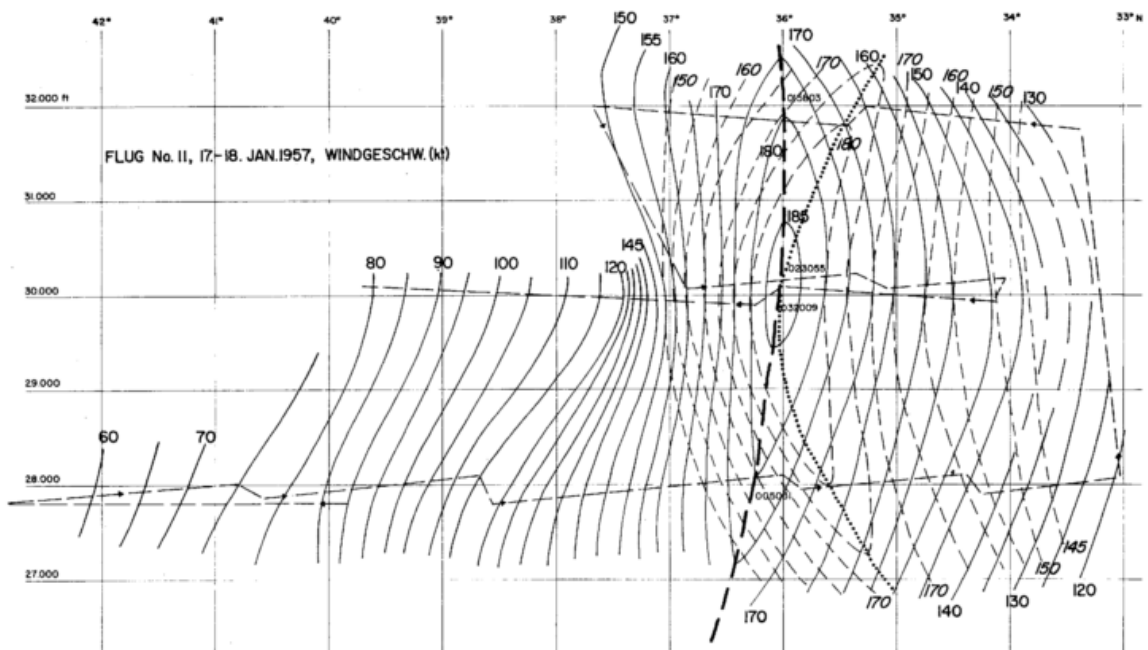


Abb. 21
Isotachen (Knoten), Flug Nr. 11, 17. Januar 1957. (Siehe Leg. zu Abb. 6). Punktiert =
„quasi-synoptische“ Strahlstromachse unter Berücksichtigung der Südwärtsverlagerung
des Jet Stream. Die strichlierte Analyse bezieht sich auf die quasi-synoptisch
korrigierten Meßdaten.

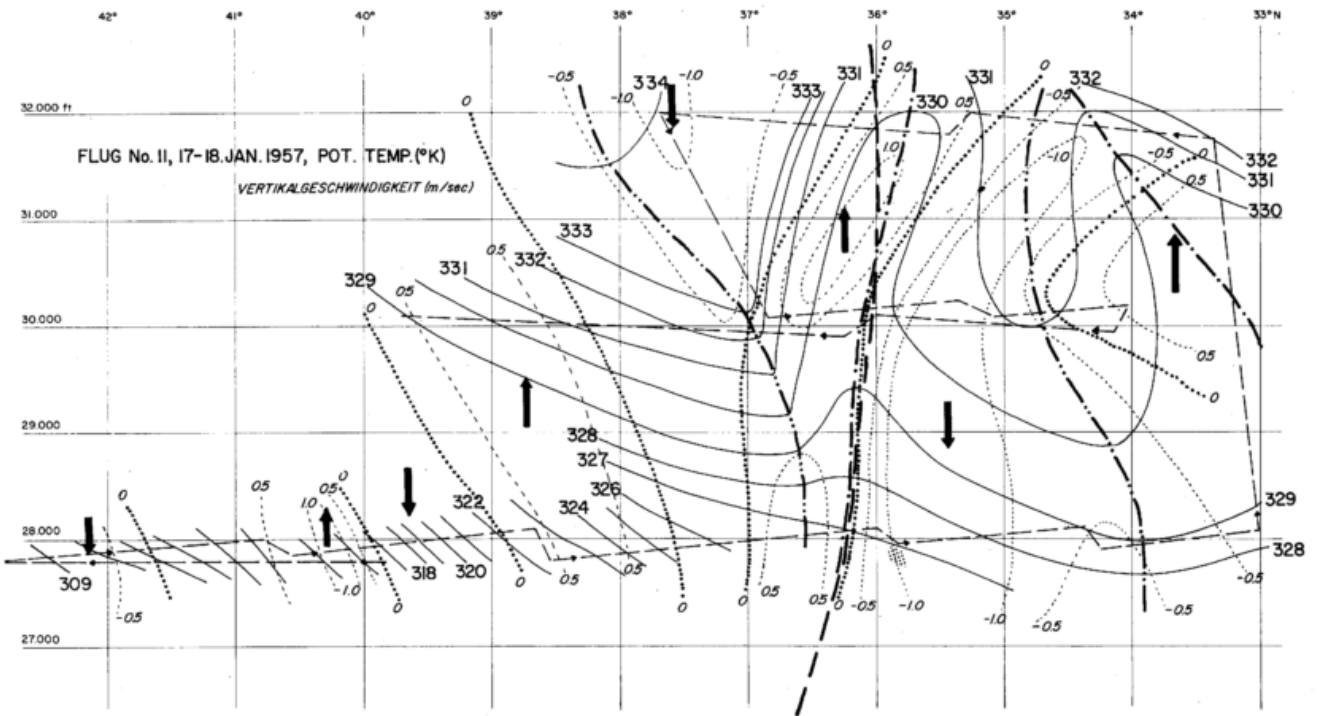


Abb. 22
Isothermen (°K) der potentiellen Temperatur (volle Linien) und Isotachen (m/sec) der Vertikalgeschwindigkeit (punktiert) ohne Berücksichtigung einer Südwärtsverlagerung des Strahlstromsystemes während der Flugzeit, Flug Nr. 11, 17. Januar 1957. Jet-Achse (dick strichliert) aus Abb. 21 übernommen. (Vgl. Leg. zu Abb. 6, 7 und 8).

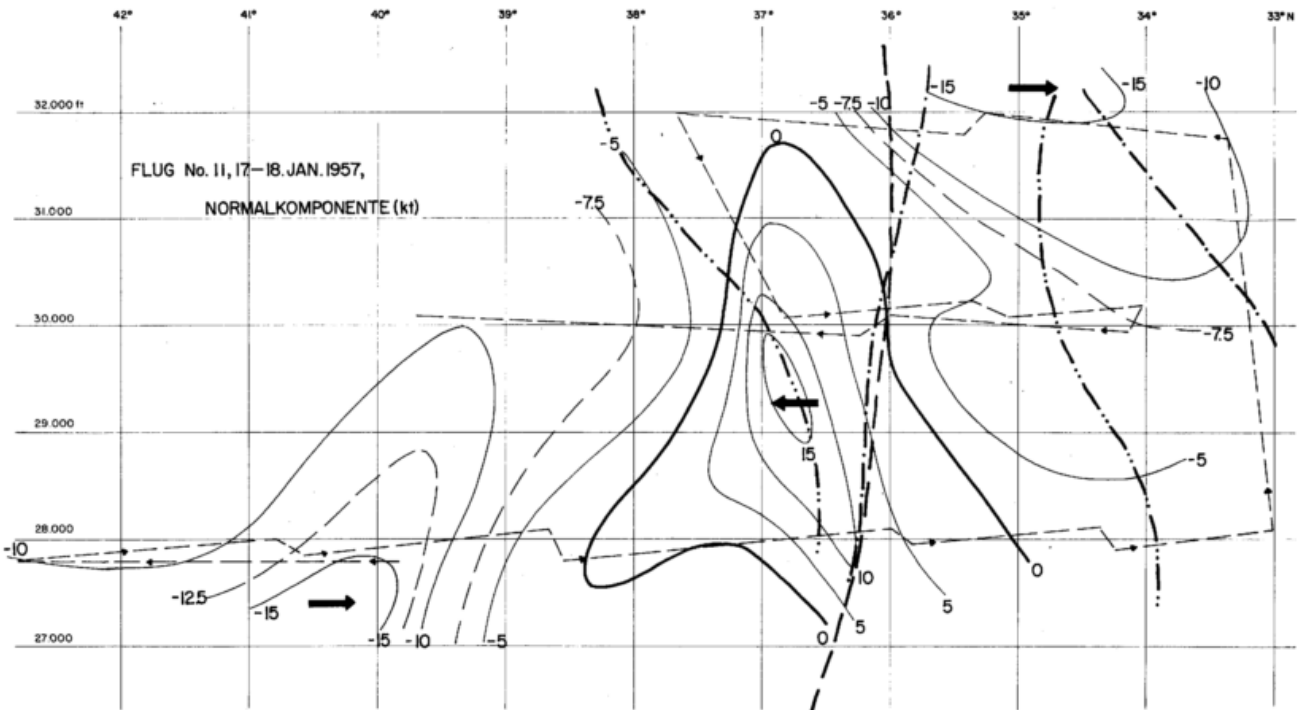
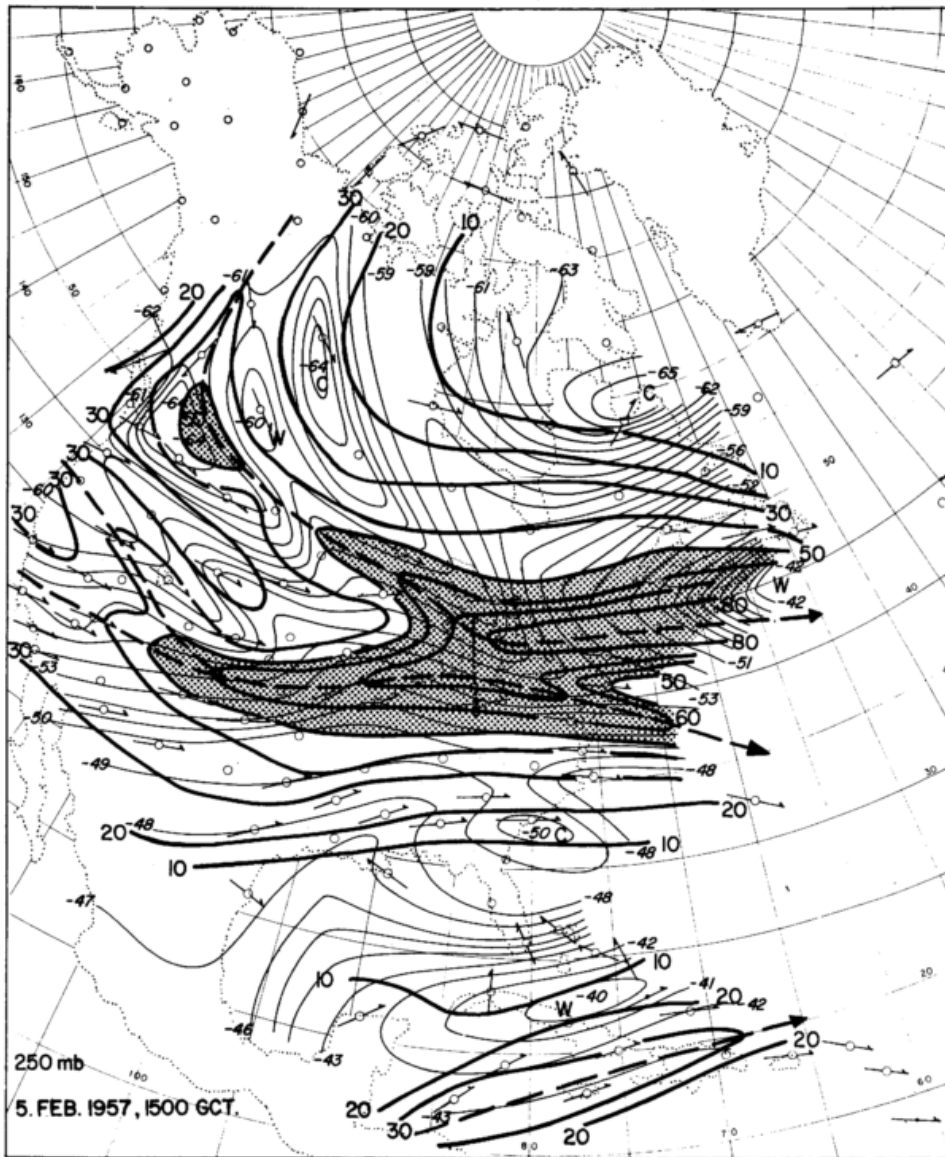
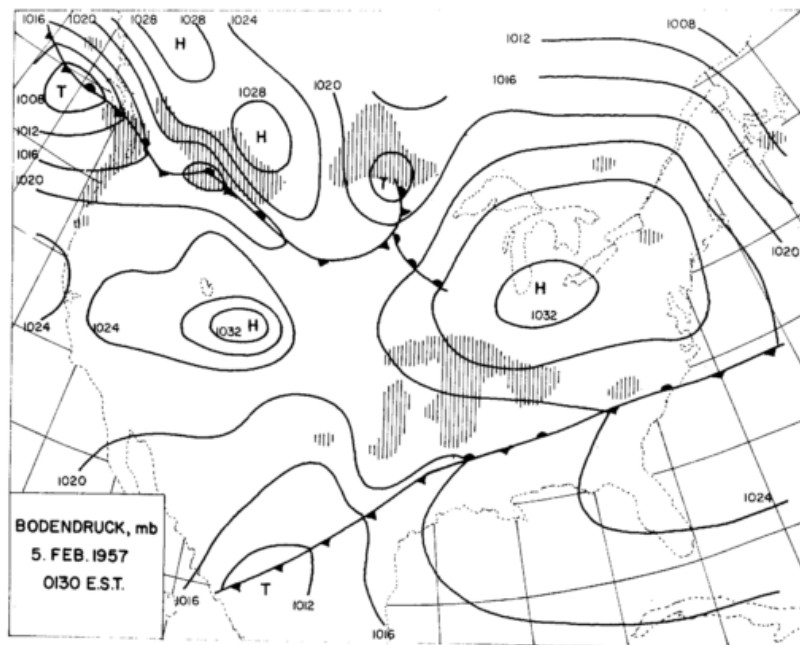


Abb. 23
Normalkomponente (Knoten) ohne Berücksichtigung einer Südwärtsverlagerung des Strahlstromsystemes, Flug Nr. 11, 17. Januar 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 9). Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 21.



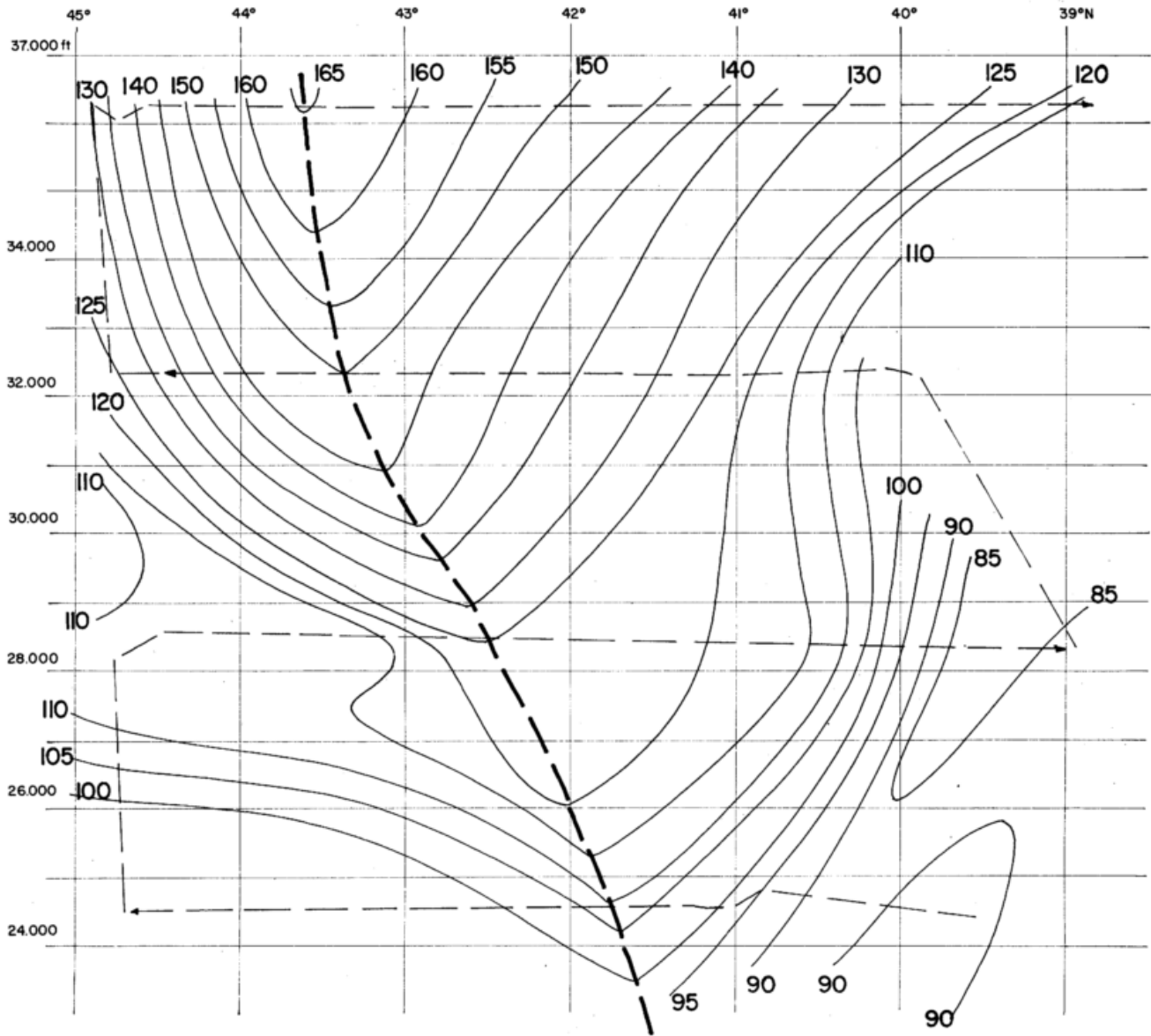
250 mb
5. FEB. 1957, 1500 GCT.

Abb. 24
Isotachen und Isothermen der 250-mb-Fläche, 5. Februar 1957,
1500 GCT, Flug Nr. 17. (Vgl. Leg. zu Abb. 4).



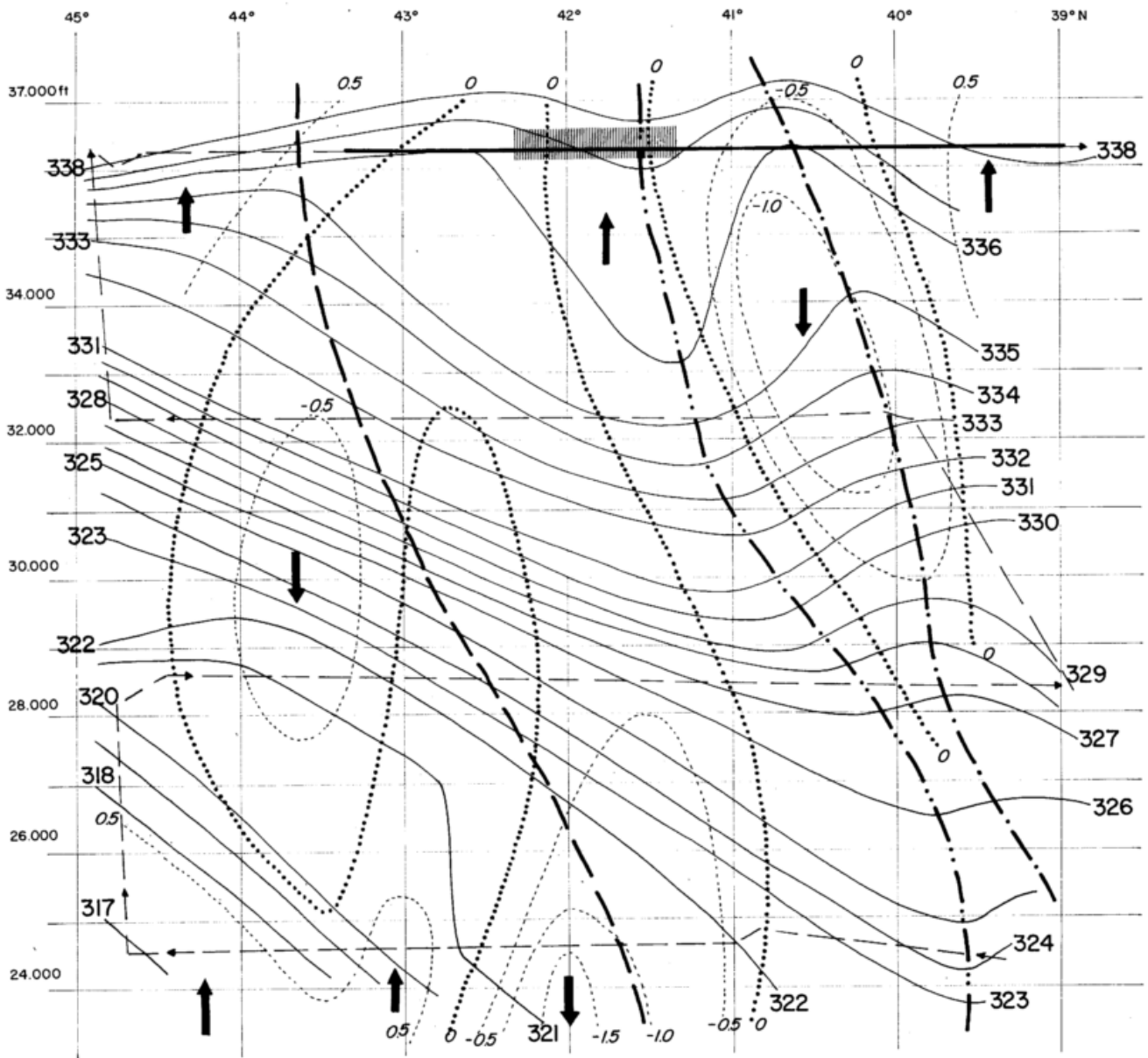
BODENDRUCK, mb
5. FEB. 1957
0130 E.S.T.

Abb. 25
Bodendruckverteilung (mb) und Niederschlag, 5. Februar 1957,
0130 EST (26).



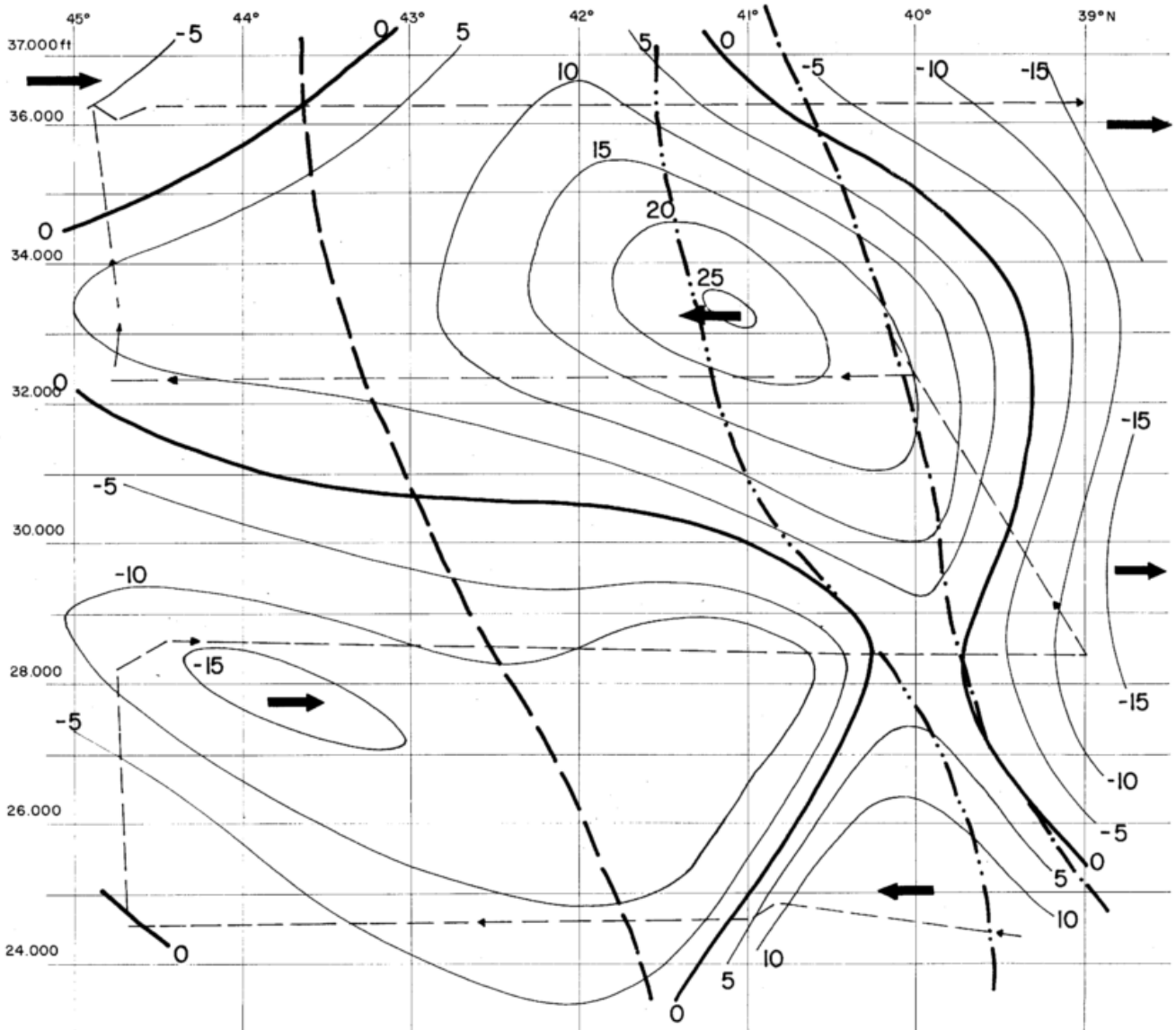
FLUG No. 17, 5.FEB.1957, WINDGESCHWINDIGKEIT (kt)

Abb. 26
Isotachen (Knoten), Flug Nr. 17, 5. Februar 1957. (Siehe Leg.
zu Abb. 6).



FLUG No. 17, 5. FEB. 1957, POT. TEMPERATUR (°K)
VERTIKALGESCHW. (m/sec)

Abb. 27
Isothermen (°K) der potentiellen Temperatur (volle Linien) und Isotachen (m/sec) der Vertikalgeschwindigkeit (punktiert), Flug Nr. 17, 5. Februar 1957. Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 26. Die dick ausgezogene Flugroutenlinie bei 36 200 Fuß deutet Kondensstreifenbildung an. Wolkenflug durch Raster wiedergegeben. (Vgl. auch Leg. zu Abb. 6, 7 und 8).



FLUG No. 17, 5. FEB. 1957, NORMALKOMPONENTE (kt)

Abb. 28
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 17, 5. Februar 1957.
(Vgl. Leg. zu Abb. 9). Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben
wie in Abb. 26.

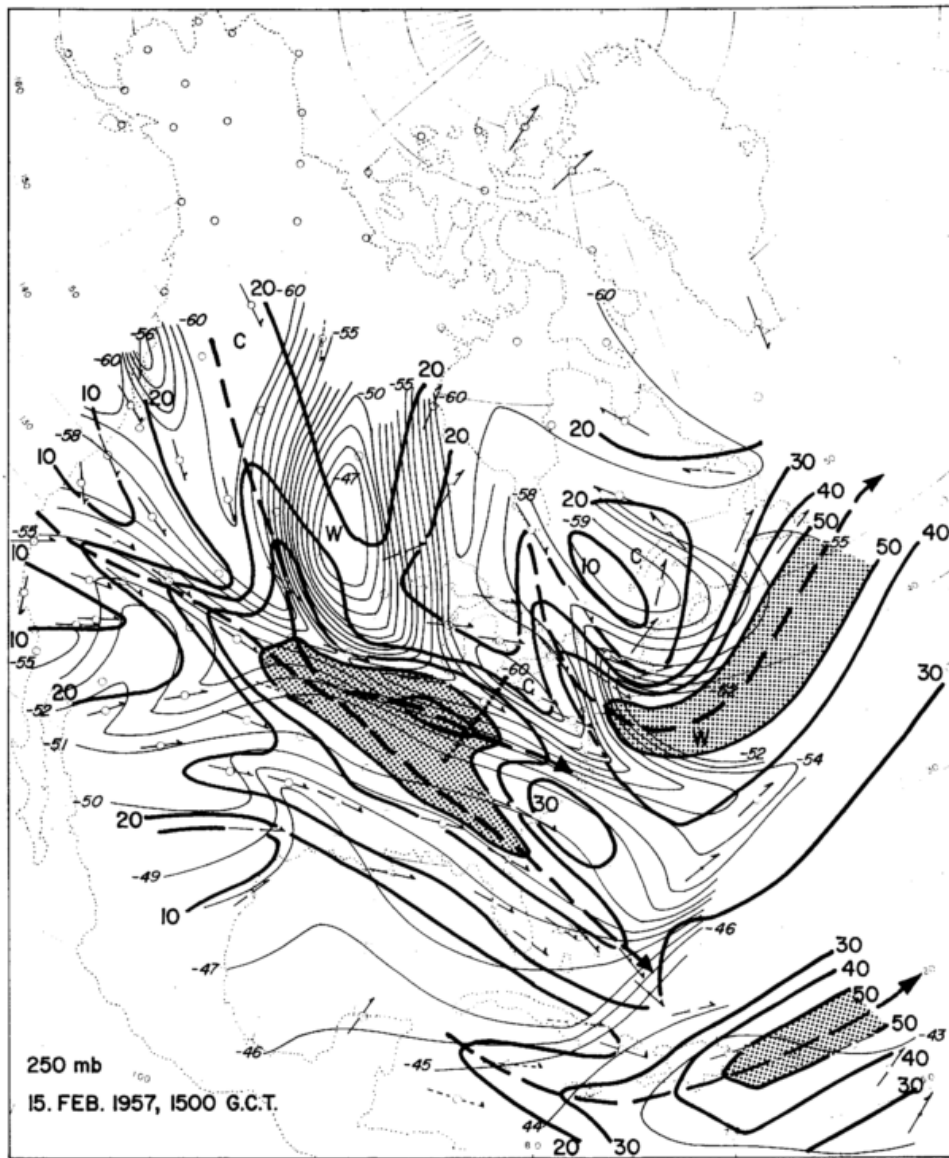


Abb. 29
Isotachen und Isothermen der 250-mb-Fläche, 15. Februar 1957,
1500 GCT, Flug Nr. 18. (Vgl. Leg. zu Abb. 4).

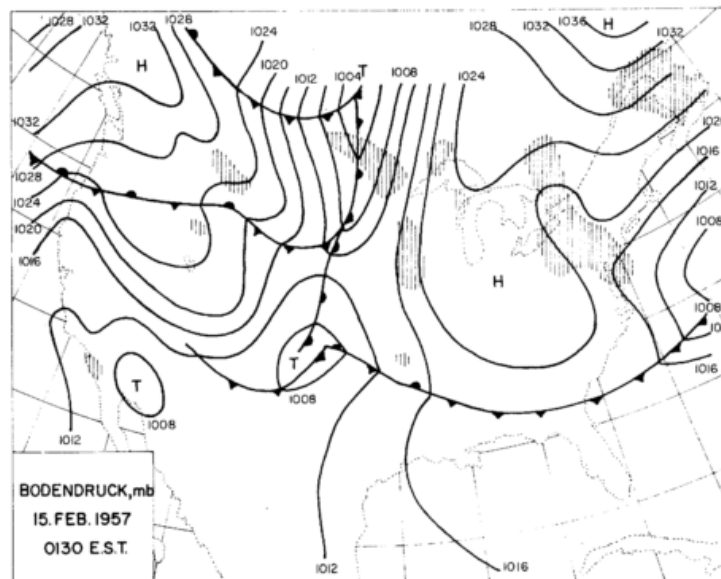


Abb. 30
Bodendruckverteilung (mb) und Niederschlag, 15. Februar 1957,
0130 EST (26).

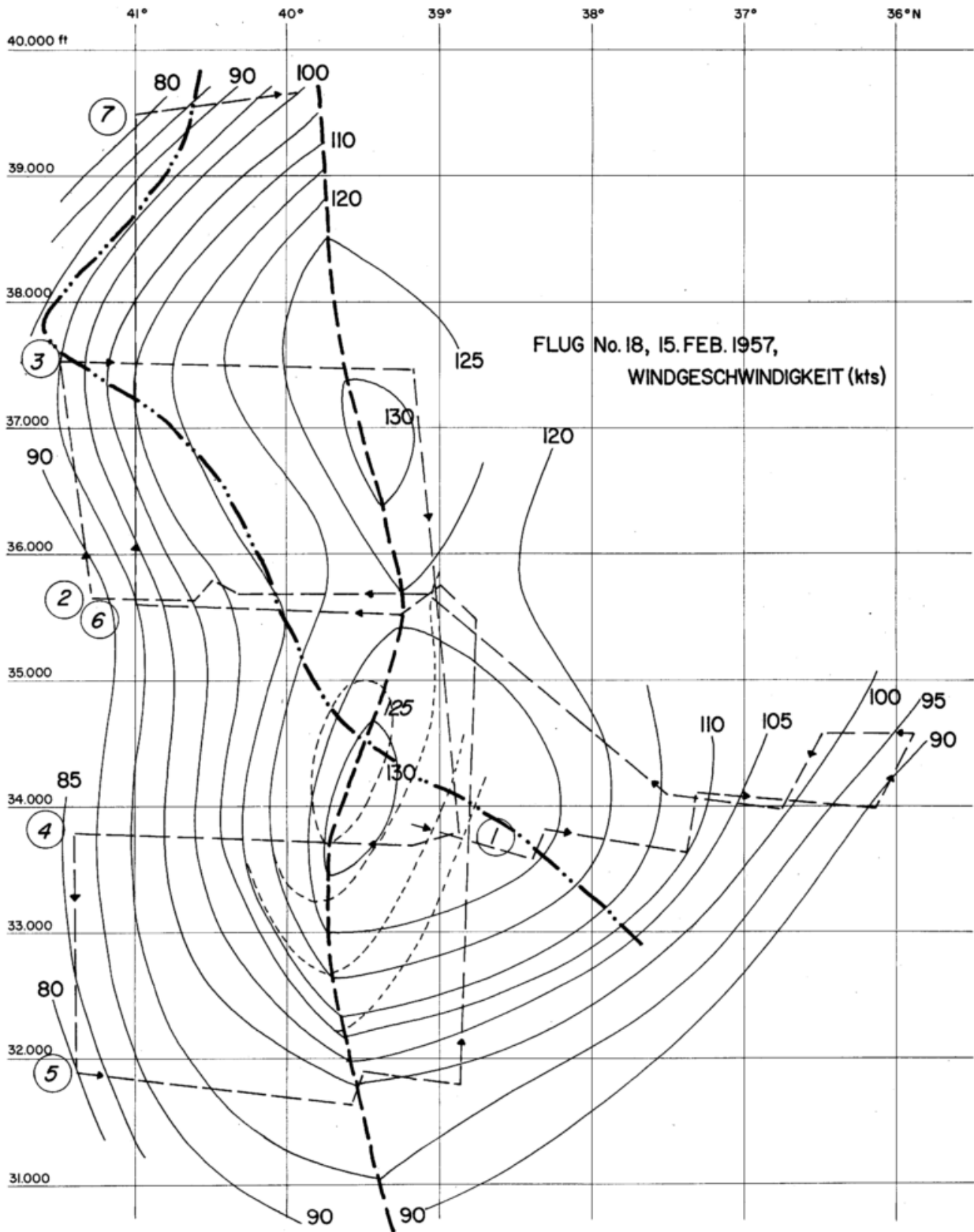


Abb. 31
Isotachen (Knoten), Flug Nr. 18, 15. Februar 1957 (Siehe Leg. zu Abb. 6). Die volle Analyse bezieht sich auf der antizyklonalen Seite des unteren Jet-Maximums auf das Niveau Nr. 1, die strichlierte Analyse auf das Niveau Nr. 4.

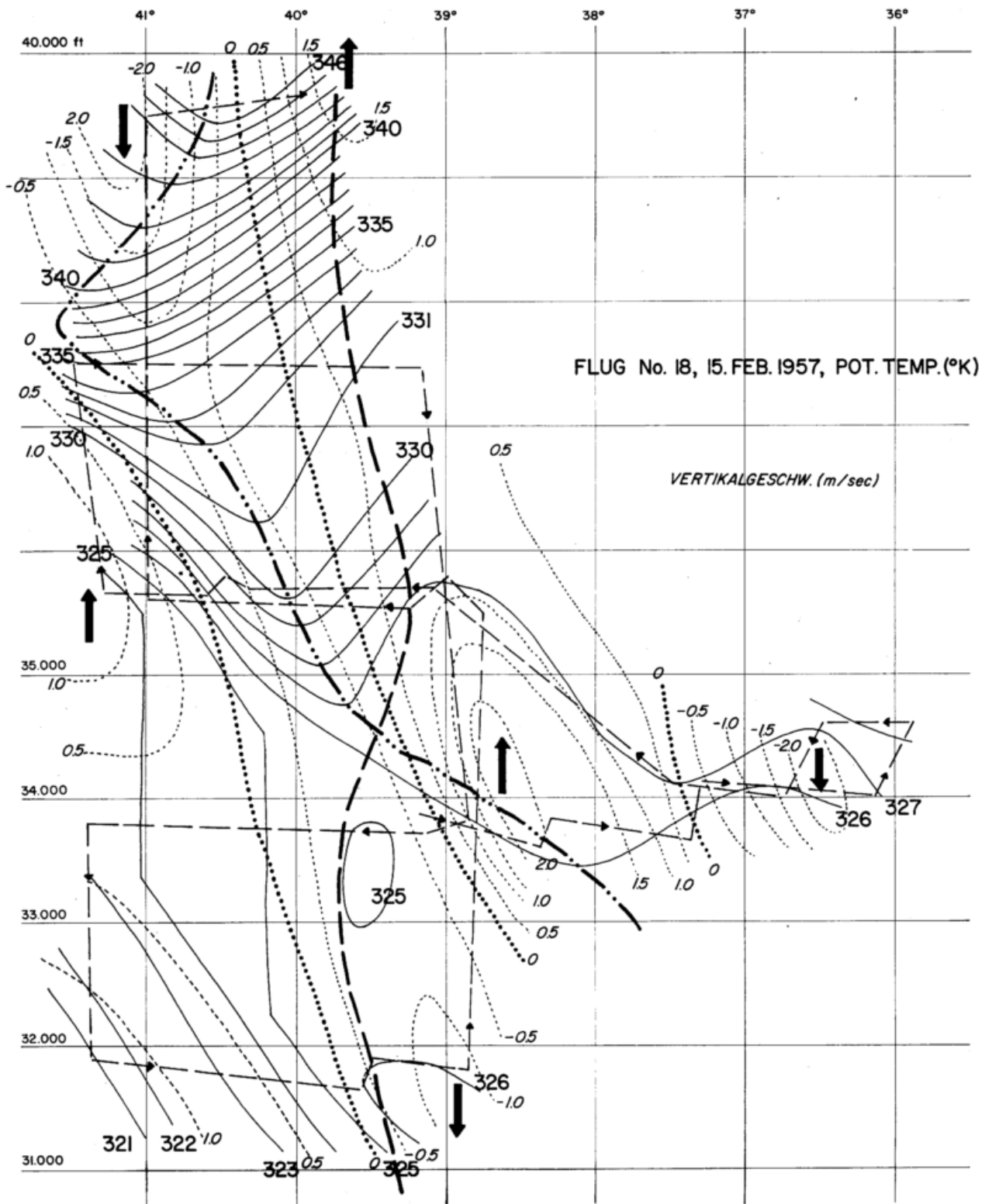


Abb. 32
Isothermen (°K) der potentiellen Temperatur (volle Linien) und
Isotachen (m/sec) der Vertikalgeschwindigkeit (punktiert), Flug
Nr. 18, 15. Februar 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 6, 7 und 8).
Jet-Achse und Isentropengraben wie in Abb. 31.

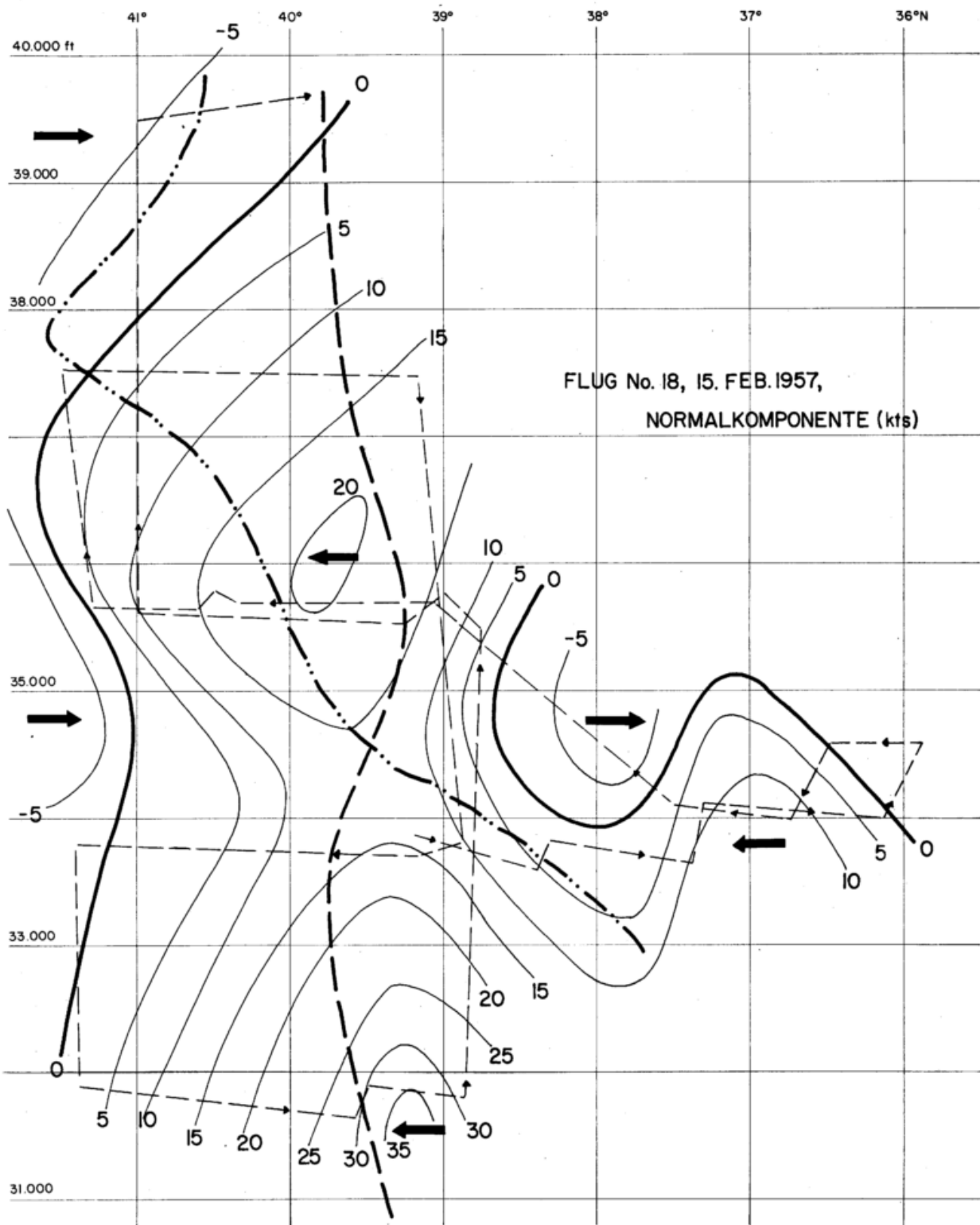
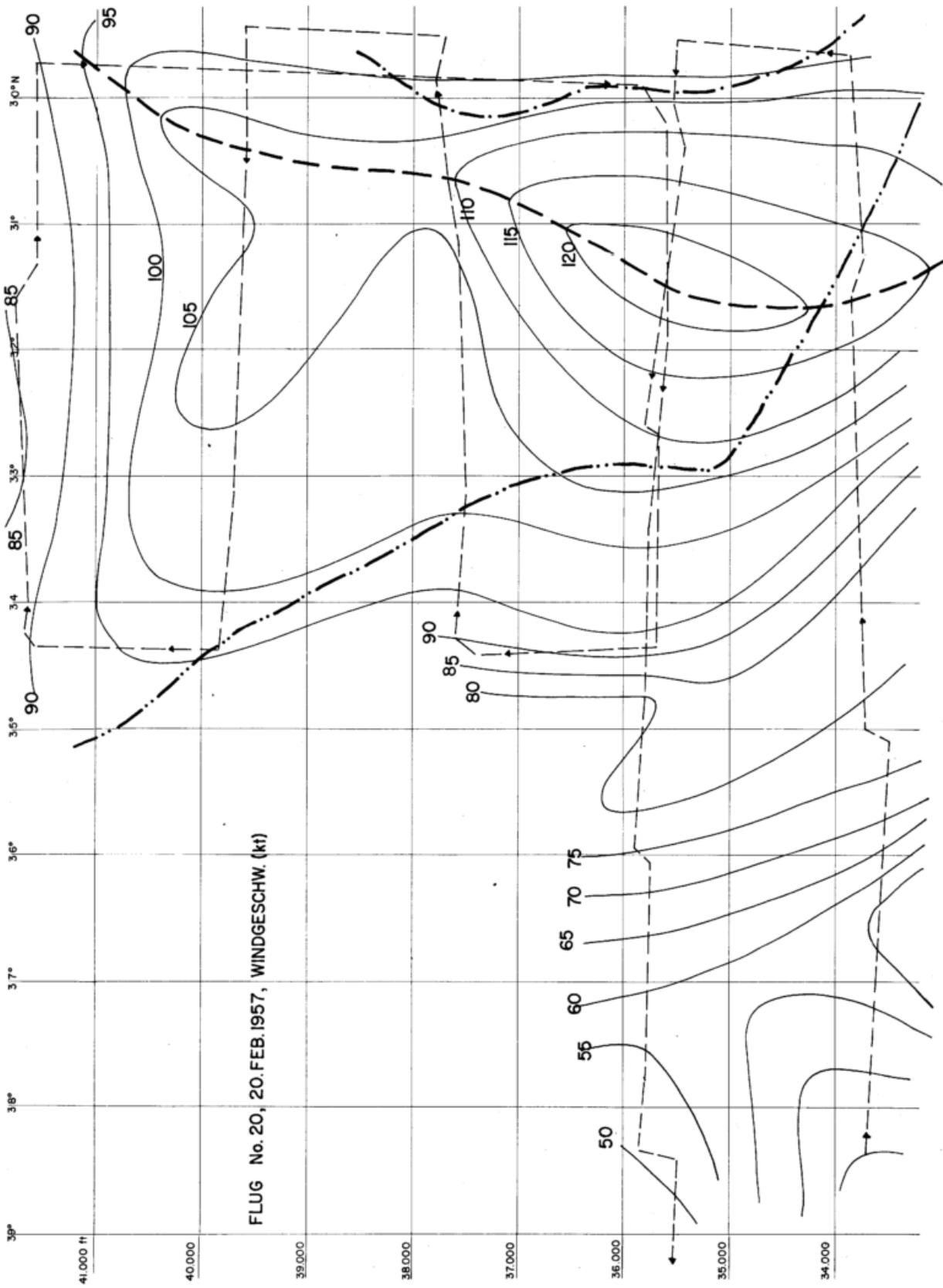


Abb. 33
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 18, 15. Februar 1957.
(Vgl. Leg. zu Abb. 9). Jet-Achse und Isentropengraben wie in
Abb. 31.



FLUG No. 20, 20. FEB. 1957, WINDGESCHW. (kt)

Abb. 36
Isotachen (Knoten), Flug Nr. 20, 20. Februar 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 6).

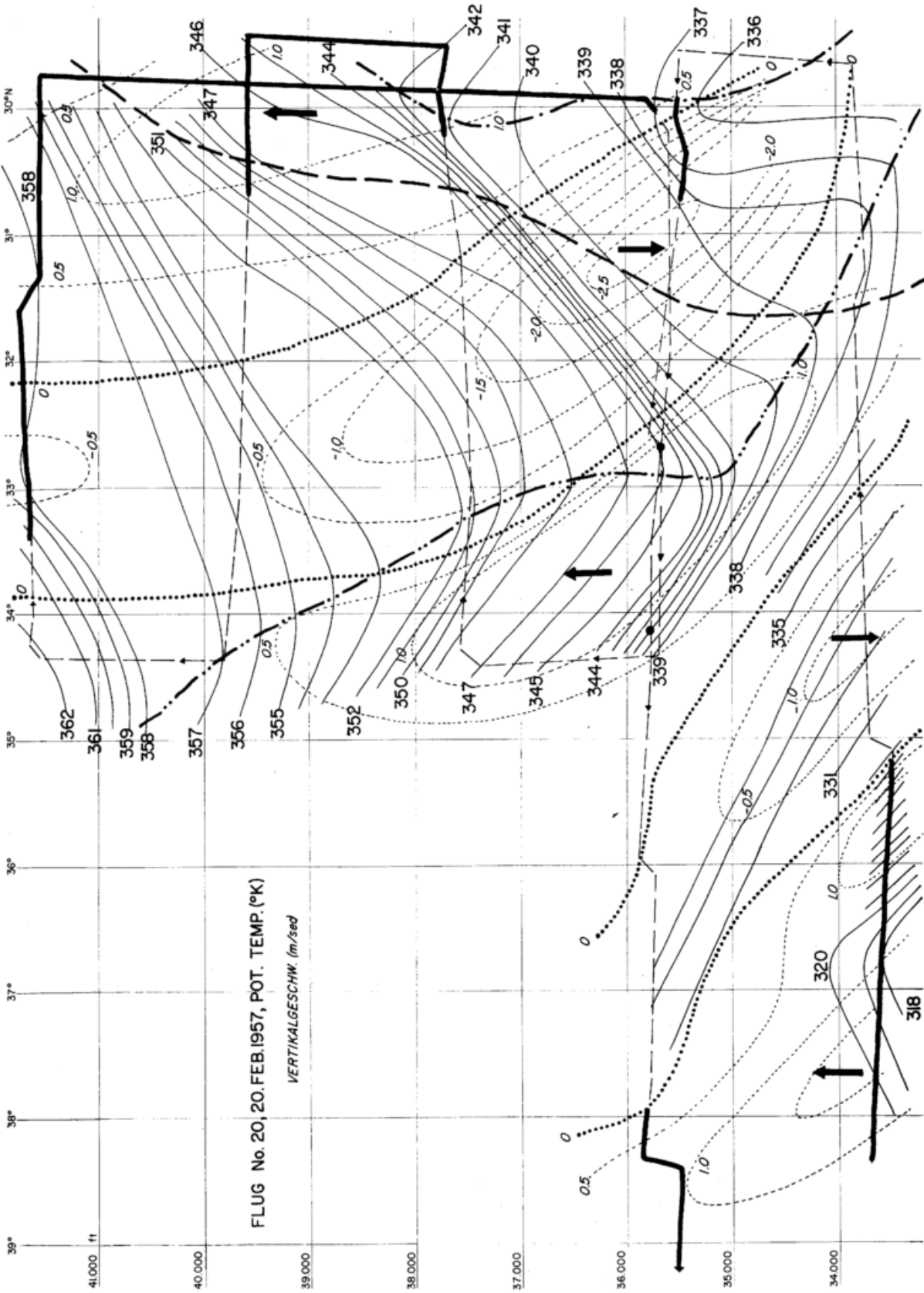


Abb. 37
Isothermen (°K) der potentiellen Temperatur (volle Linien) und Isobaren (m/sec) der Vertikalgeschwindigkeit (punktierter) Flug Nr. 20. Februar 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 6, 7 und 8). Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 36. Die beiden Punkte im letzten Flugniveau bei etwa 35 800 Fuß geben die Stellen an, bei denen die 350°K-Isotherme dieses Niveau schneidet.

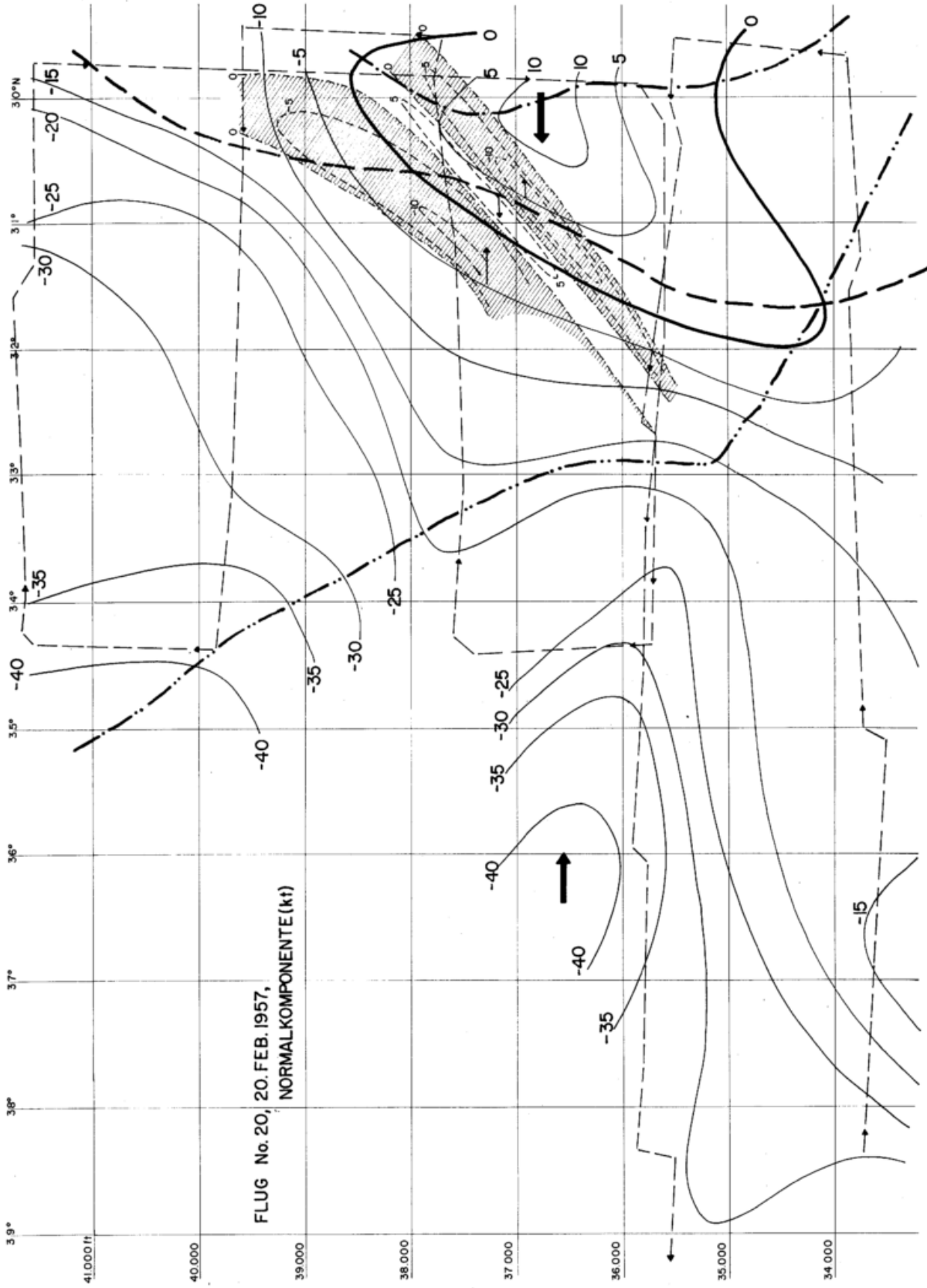


Abb. 38
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 20, 20. Februar 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 9).
Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 36. Mesostrukturelle Anomalien
der Normalkomponente gegenüber der Hauptanalyse sind durch strichlierte Linien
angegeben (Nulllinie strichpunktliert), negative Anomalien sind schraffiert.

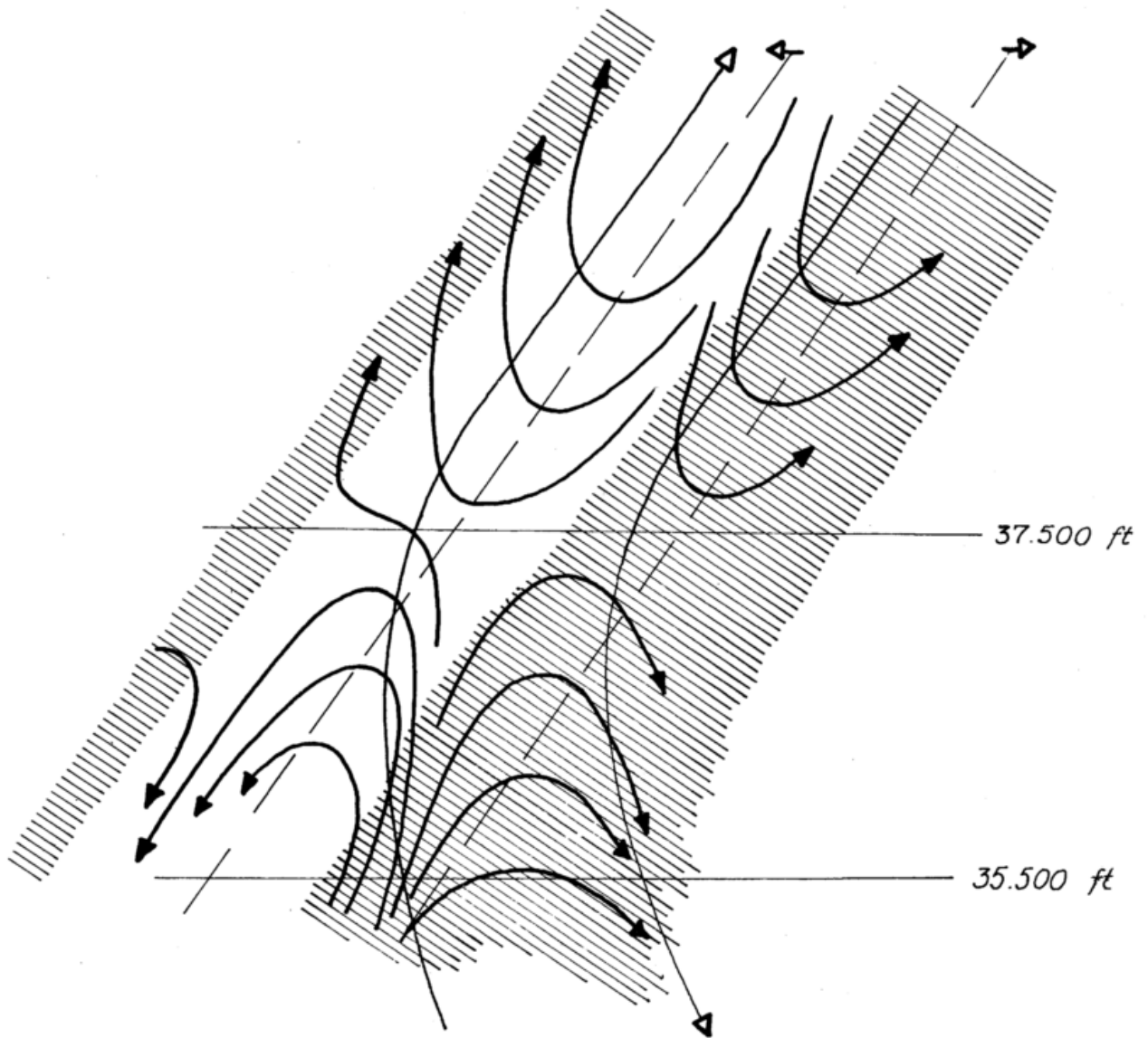


Abb. 39

Schematische Darstellungen der mesostrukturellen Stromlinien (dicke Linien mit vollen Pfeilen), die der Grundströmung überlagert sind. Gebiete mit negativer Normalkomponente sind schraffiert und entsprechen etwa den in Abb. 38 gezeigten Verhältnissen. Die dünn strichlierten Linien mit horizontalen, offenen Pfeilen an den Enden geben die Position der Extreme der Normalkomponente an, die dünnen vollen Linien mit offenen Pfeilen an den Enden zeigen die Position der Extreme der Vertikalkomponente an.

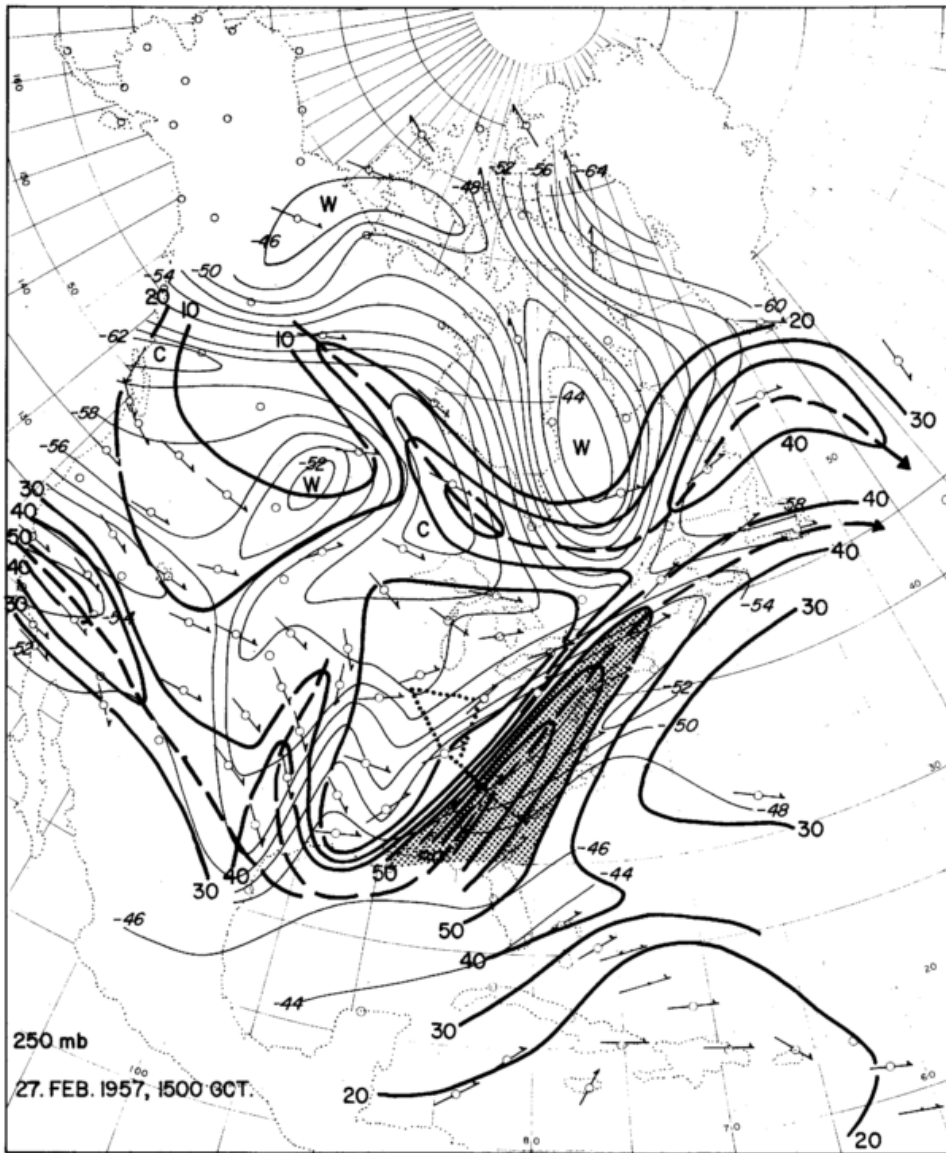


Abb. 40
Isotachen und Isothermen der 250-mb-Fläche, 27. Februar 1957,
1500 GCT, Flug Nr. 21. (Vgl. Leg. zu Abb. 4).

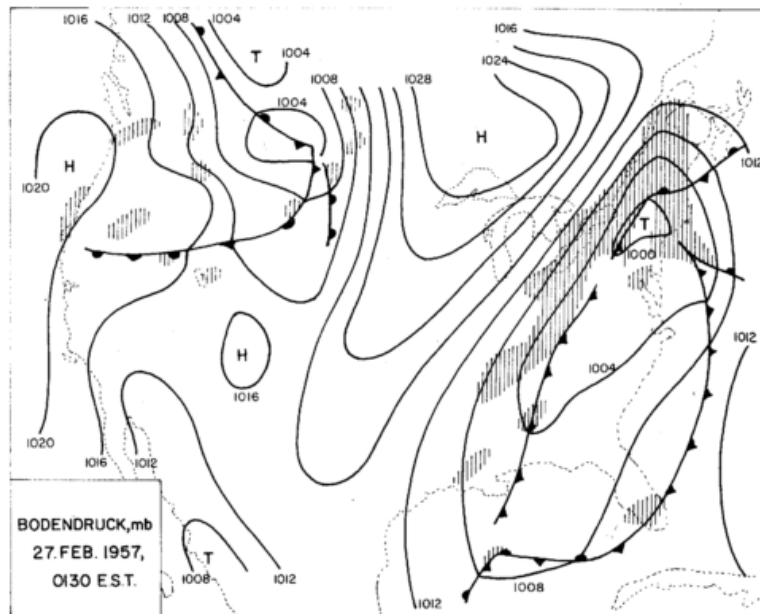


Abb. 41
Bodendruckverteilung (mb) und Niederschlag, 27. Februar 1957,
0130 EST (26).

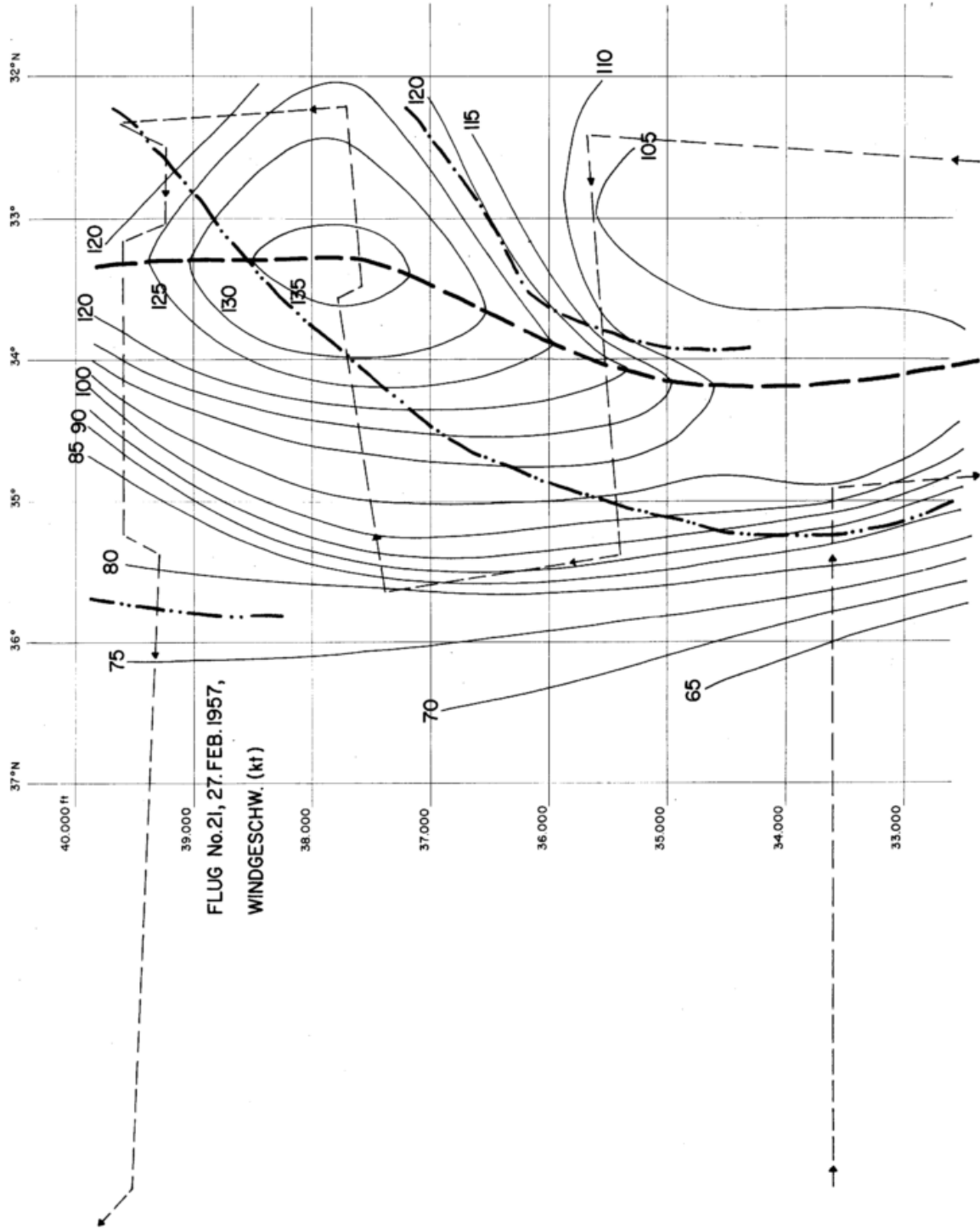


Abb. 42
Isotachen (Knoten), Flug Nr. 21, 27. Februar 1957 (Vgl. Leg. zu Abb. 6).

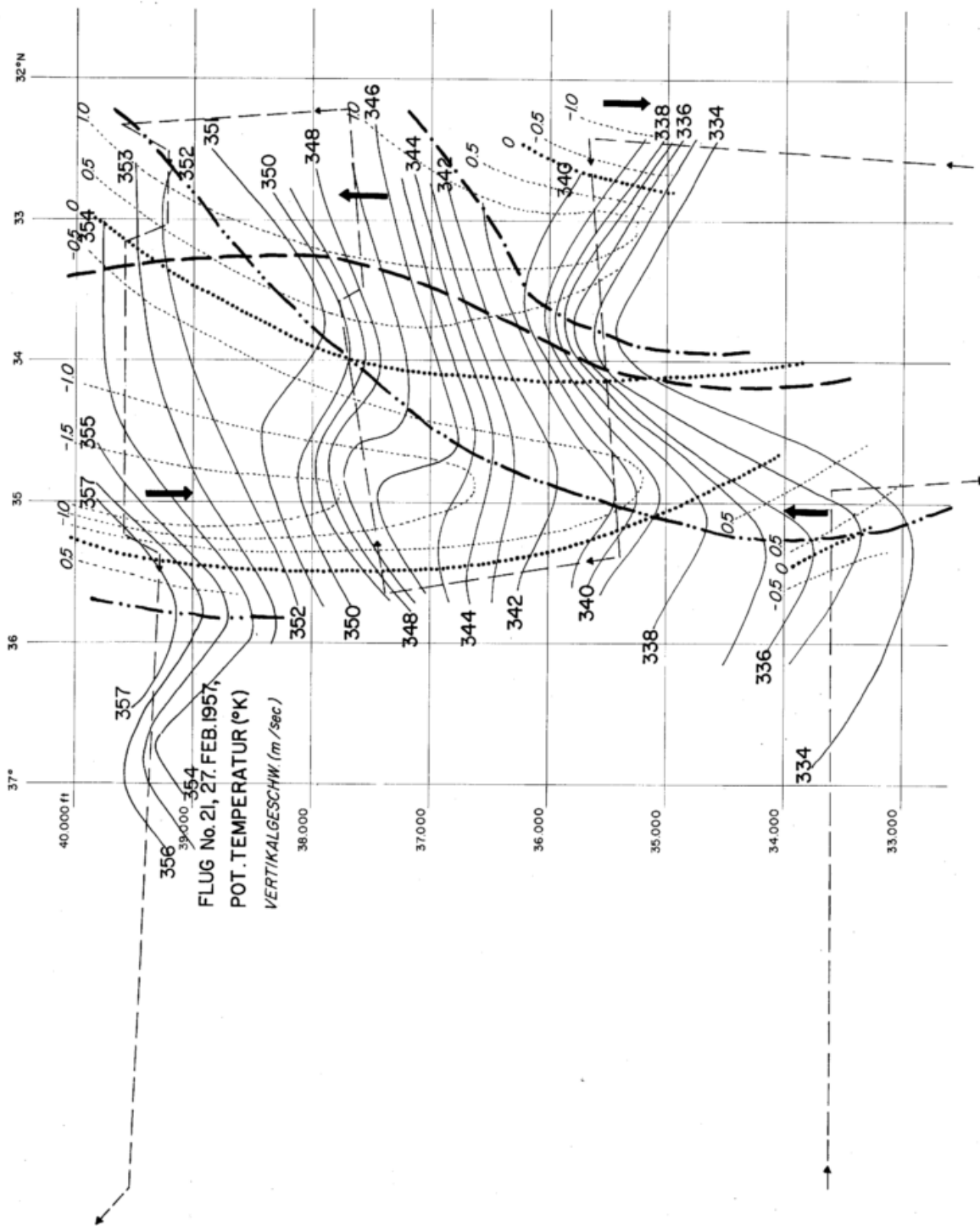


Abb. 43 Isothermen (°K) der potentiellen Temperatur (volle Linien) und Isotachen (m/sec) der Vertikalkomponente (punktirt), Flug Nr. 21, 27. Februar 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 6, 7 und 8). Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 42.

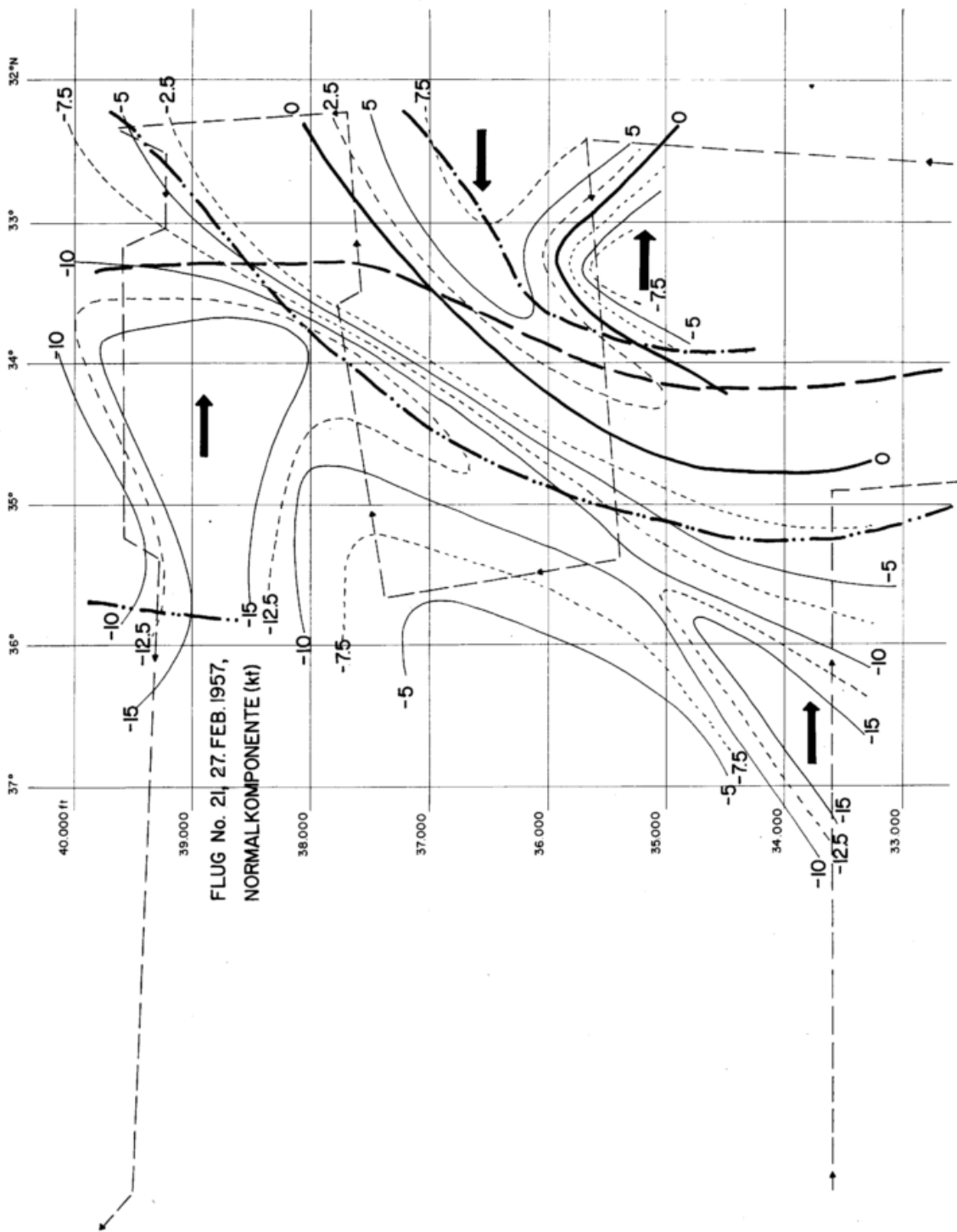
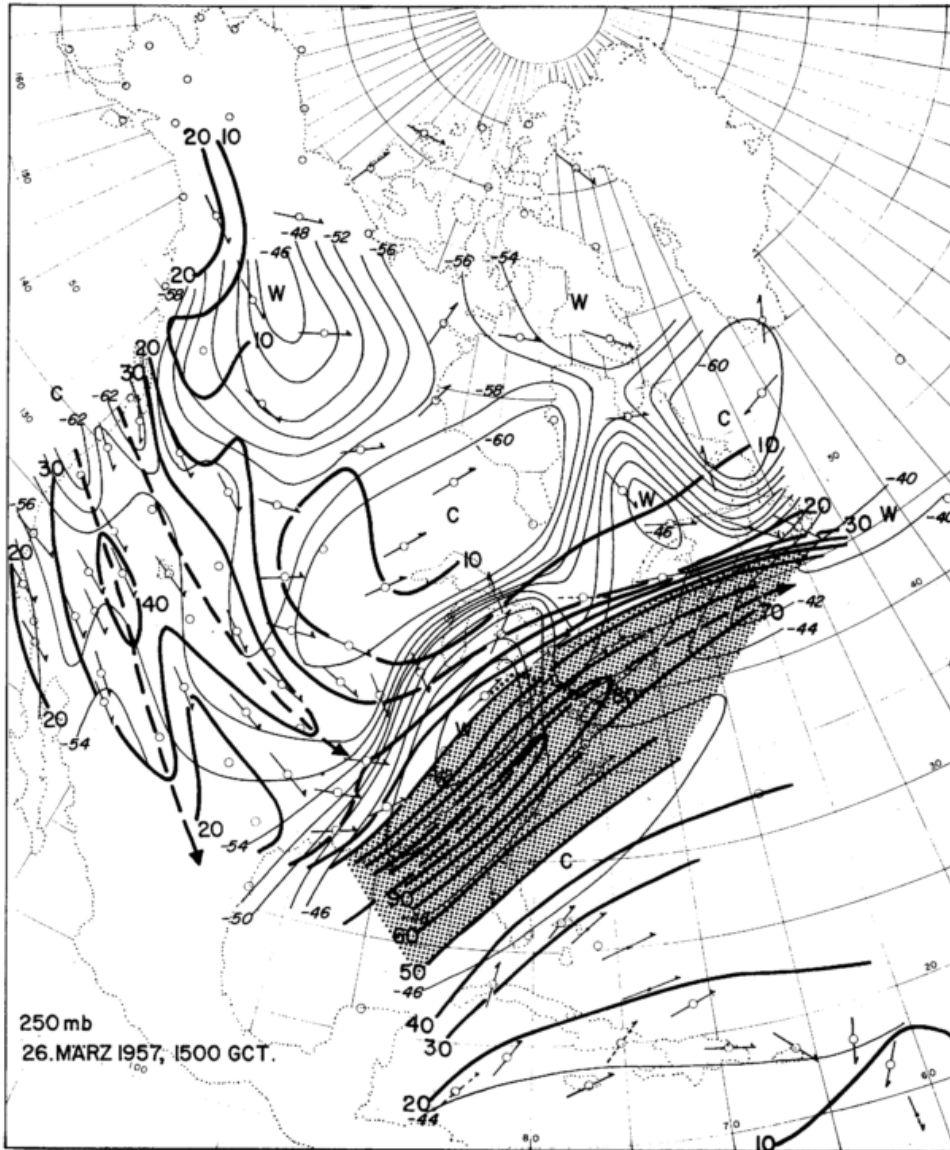
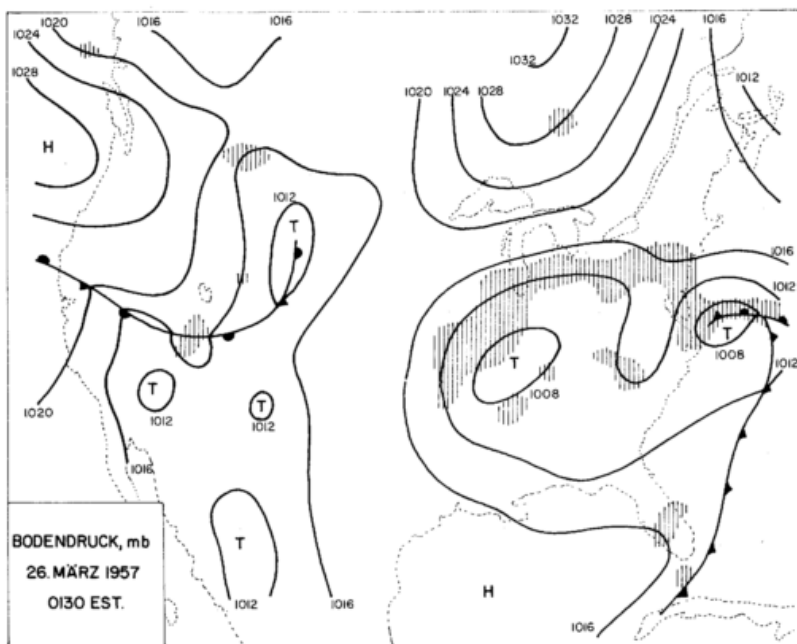


Abb. 44
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 21, 27. Februar 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 9).
Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 42.



250 mb
26. MÄRZ 1957, 1500 GCT.

Abb. 45
Isotachen und Isothermen der 250-mb-Fläche, 26. März 1957.
1500 GCT, Flug Nr. 26 (Vgl. Leg. zu Abb. 4).



BODENDRUCK, mb
26. MÄRZ 1957
0130 EST.

Abb. 46
Bodendruckverteilung (mb) und Niederschlag, 26. März 1957,
0130 EST (26).

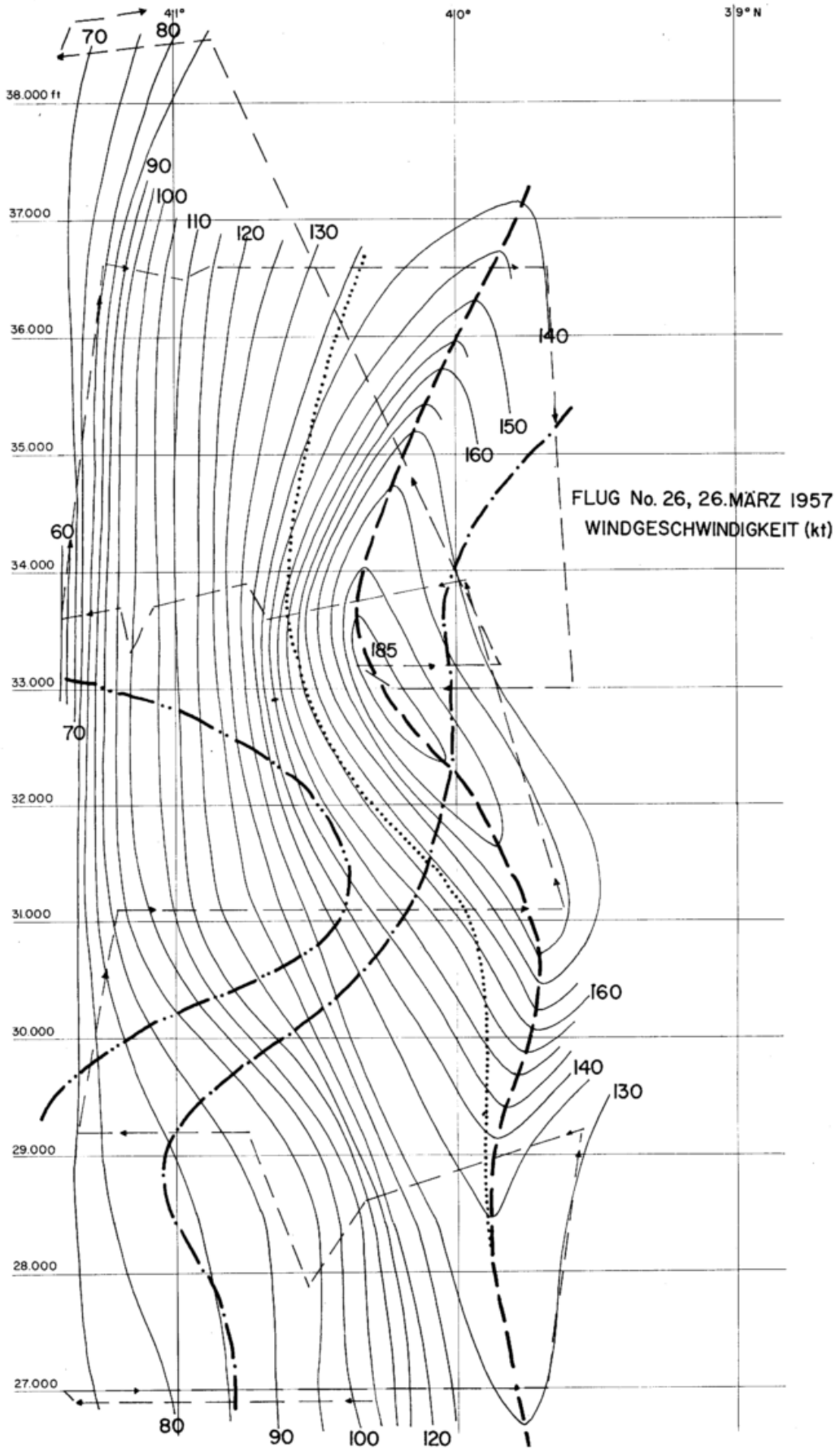


Abb. 47
Isotachen (Knoten), Flug Nr. 26, 26. März 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 6). Die punktierte Linie gibt die Lage der vertikalen Jet-Achse unter Berücksichtigung einer über die ganze vertikale Erstreckung des Querschnittes konstanten Südwärtsverlagerung des Jet-Stream an, bezogen auf den Zeitpunkt der Durchquerung der Jet-Achse im Flugniveau 27 000 Fuß.

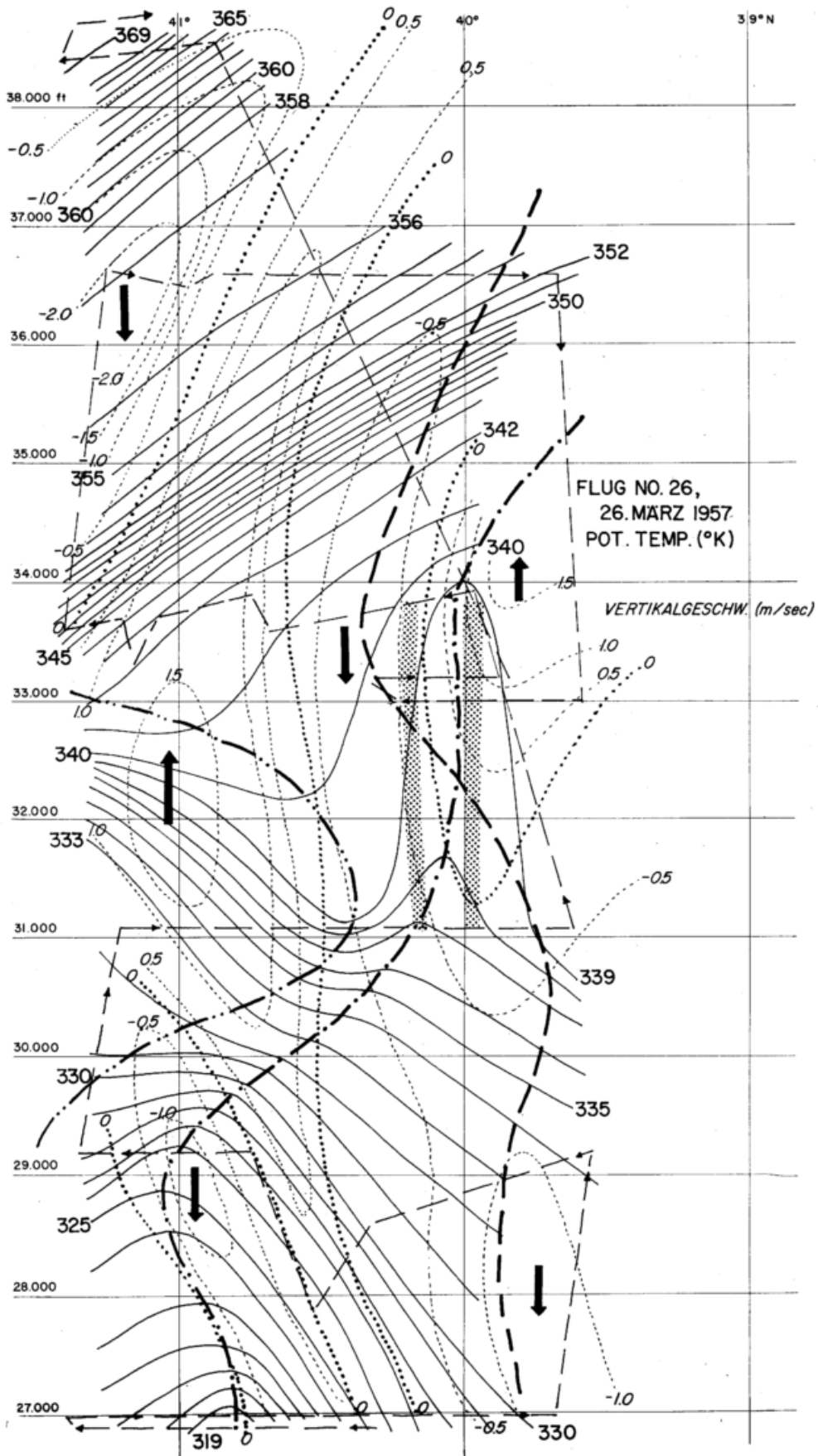


Abb. 48
Isothermen (°K) der potentiellen Temperatur (volle Linien) und Isotachen (m/sec) der Vertikalgeschwindigkeit (punktiert). Flug Nr. 26, 26. März 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 6, 7 und 8). Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 47. Die mit Raster versehenen Gebiete deuten Cirrus filiformis an.

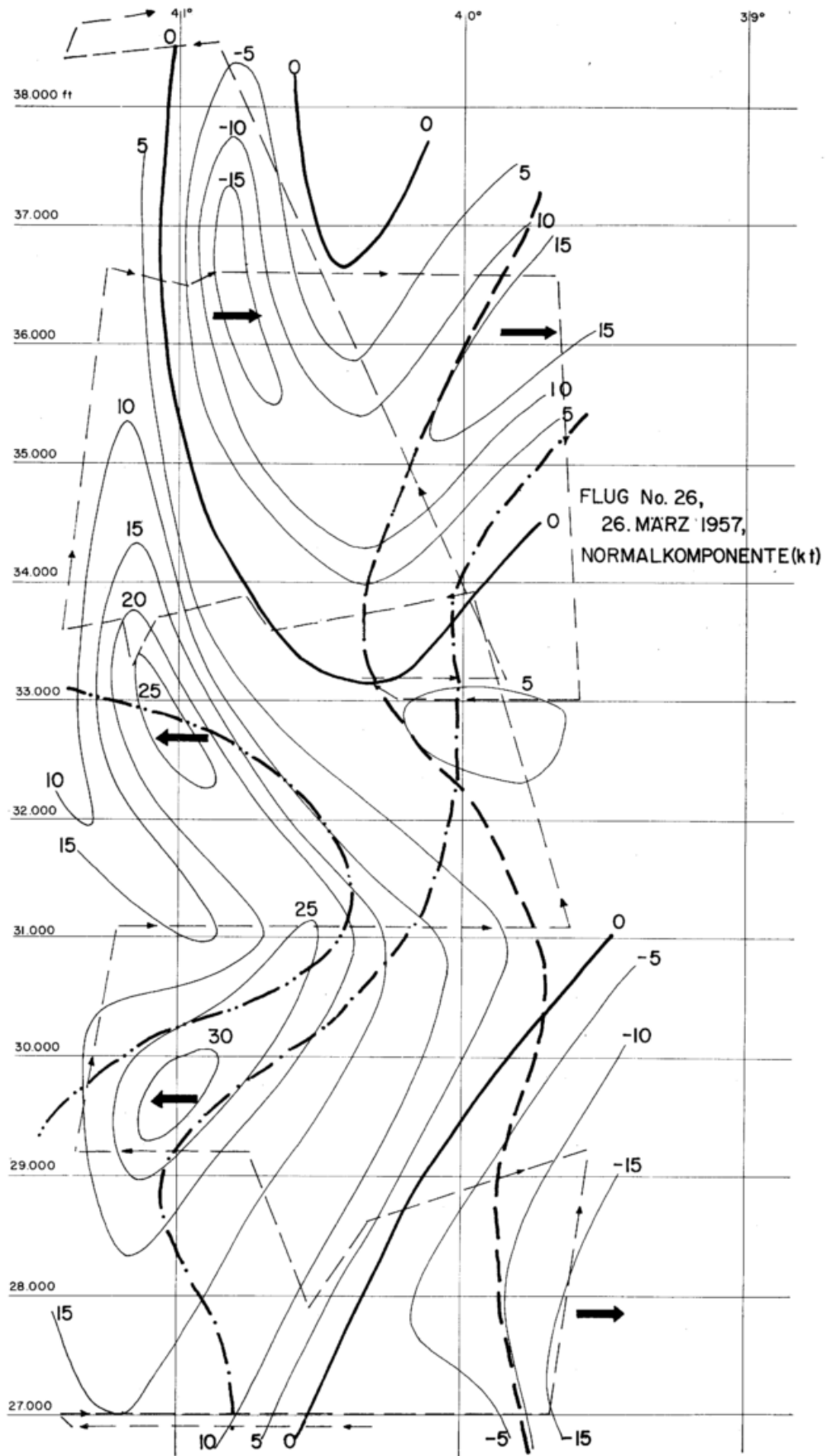


Abb. 49
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 26, 26. März 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 9). Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 47.

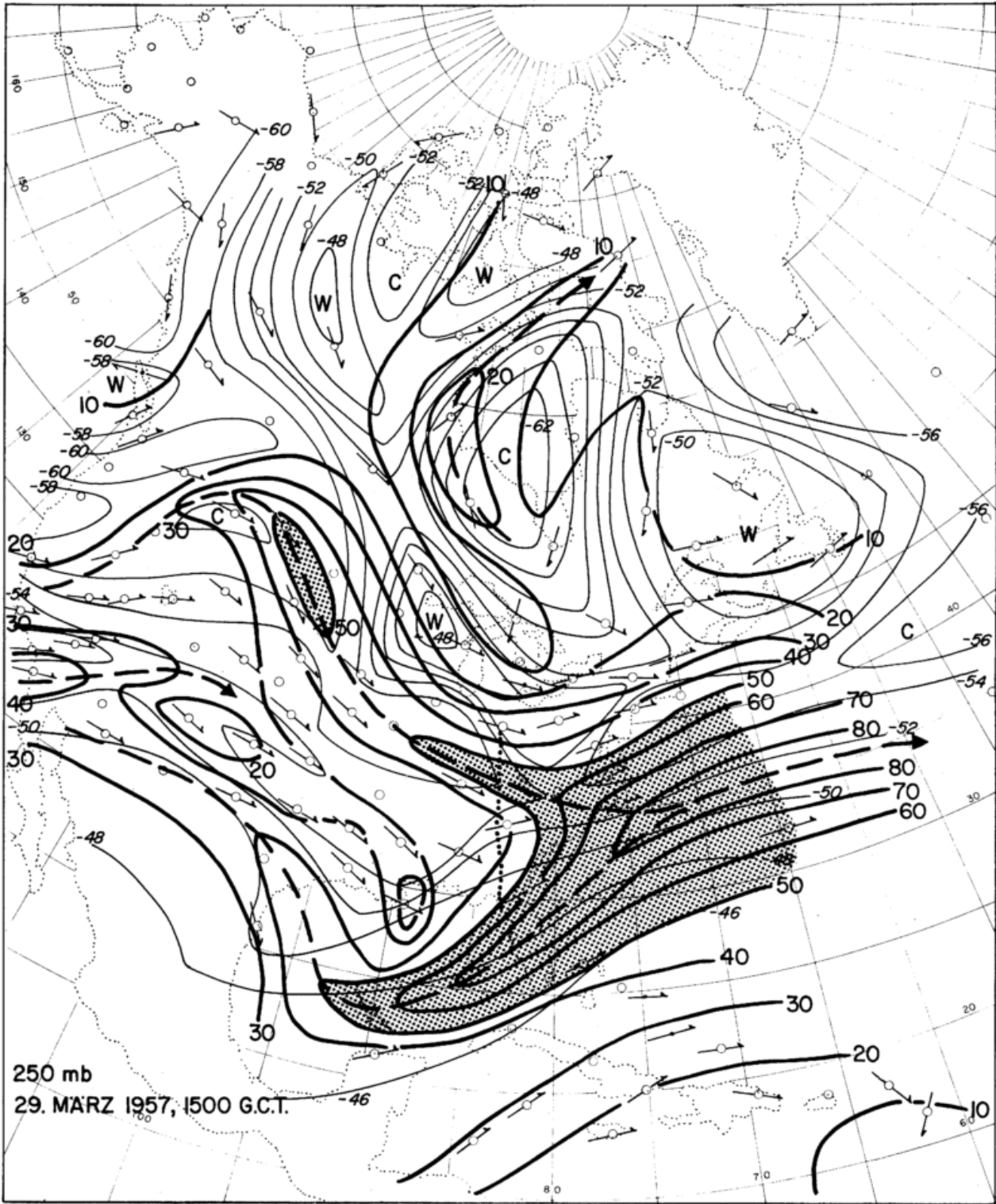


Abb. 50
Isotachen und Isothermen der 250-mb-Fläche, 29. März 1957,
1500 GCT, Flug Nr. 27. (Vgl. Leg. zu Abb. 4).

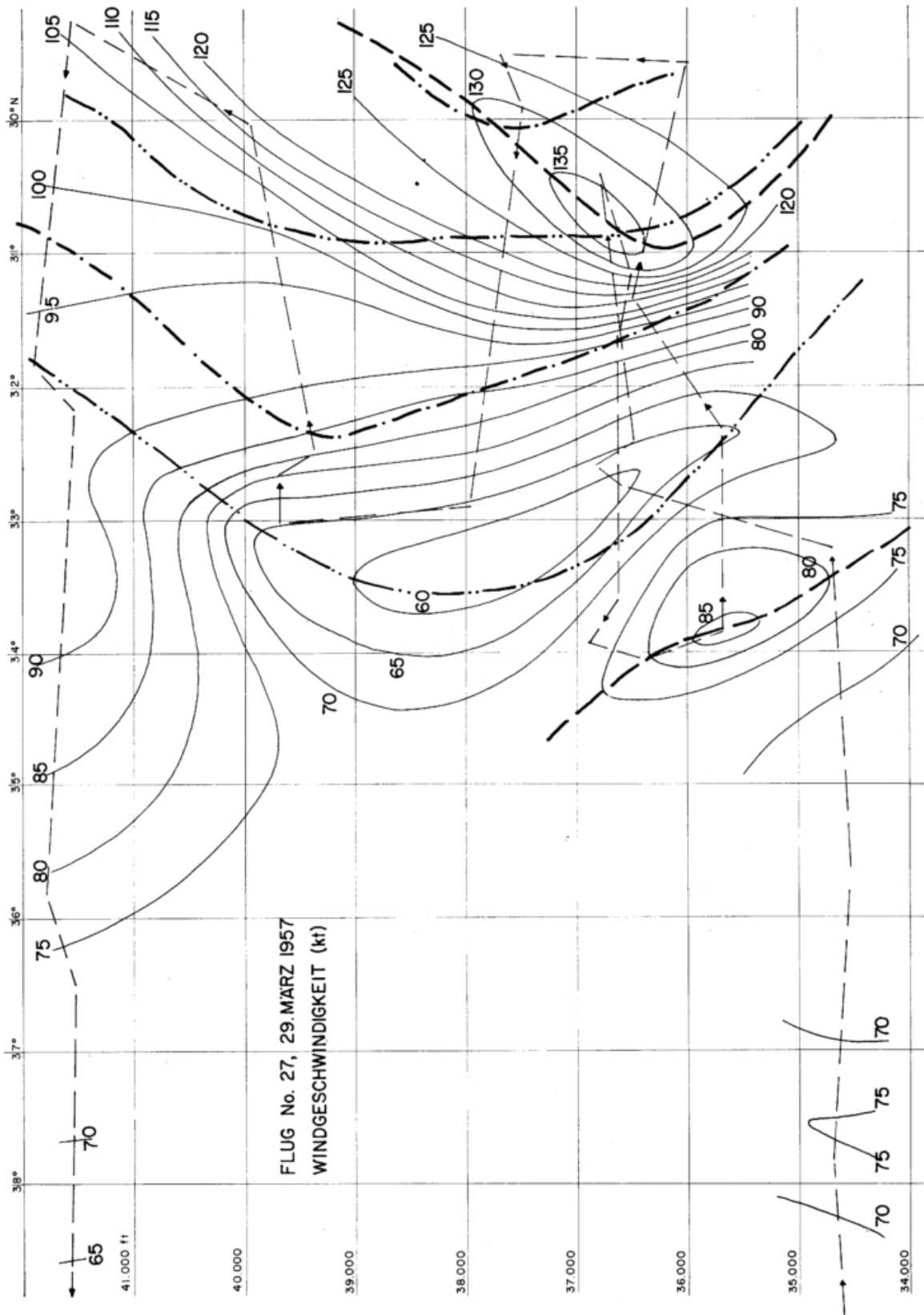


Abb. 51
Isotachen (Knoten), Flug Nr. 27, 29. März 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 6).

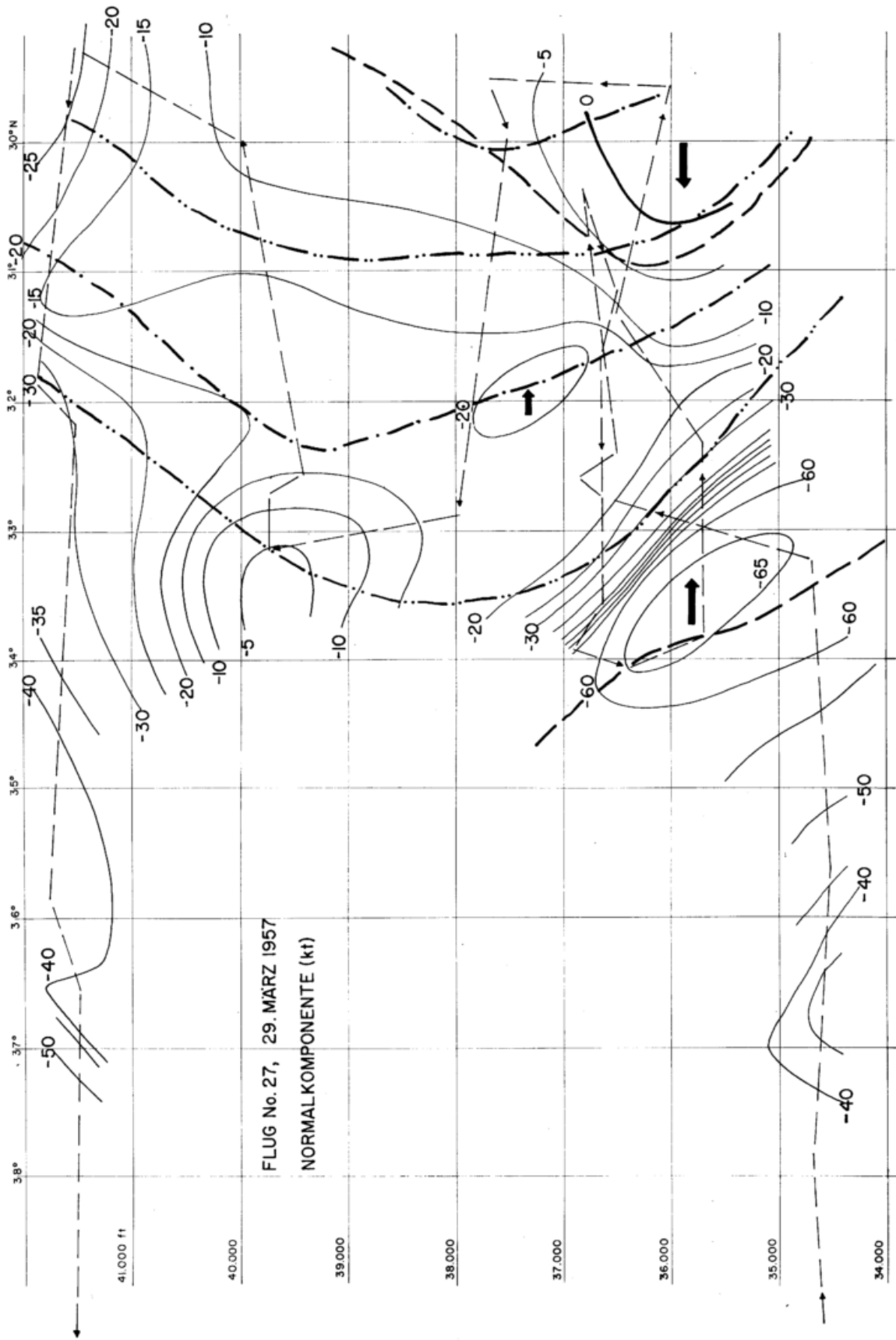


Abb. 53
Normalkomponente (Knoten), Flug Nr. 27, 29. März 1957. (Vgl. Leg. zu Abb. 9).
Jet-Achse, Isentropenbuckel und -graben wie in Abb. 51.

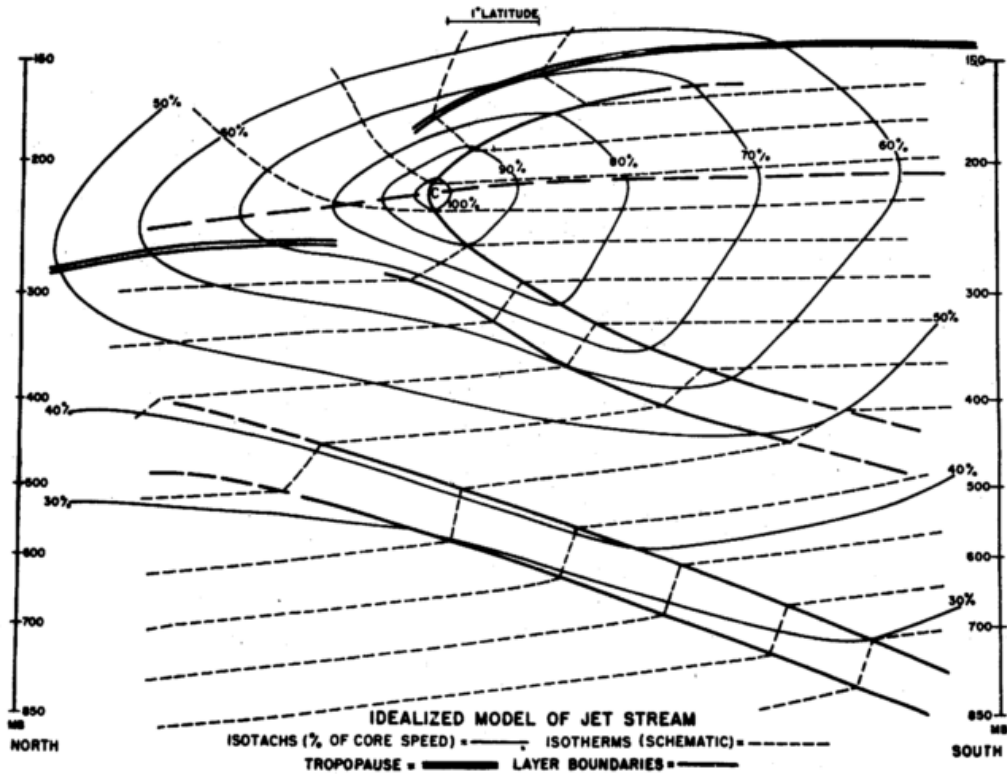


Abb. 54
 Idealisertes Strahlstrommodell nach Endlich und McLean.
 Isotachen in Prozent der Kerngeschwindigkeit (volle Linien).
 Isothermen (strichliert). Die Begrenzung stabiler Schichten ist
 durch dicke Linien angedeutet. Doppellinien = polare und
 subtropische Tropopause. Lang strichliert = Niveau maximalen
 Windes (7).

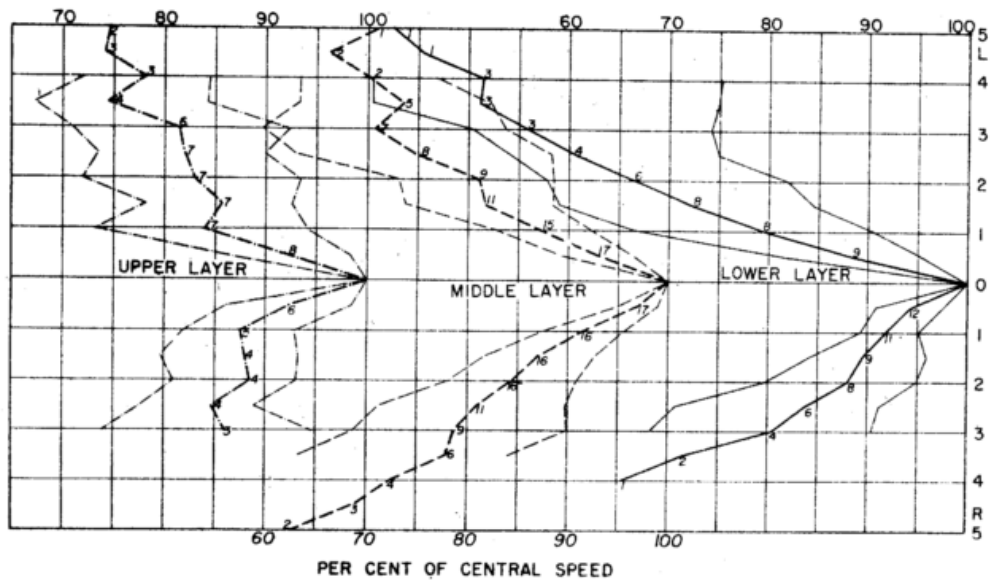


Abb. 55
 Mittlere Verteilung und „standard deviation“ der Windgeschwin-
 digkeit ausgedrückt in Prozent der Geschwindigkeit in der
 Jet-Achse, für die drei Höhenklassen 28 000 - 32 000 Fuß,
 34 000 - 36 000 Fuß und 37 000 - 40 000 Fuß. Die Ordinate enthält
 Breitengrade links und rechts der Jet-Achse. Die Anzahl der
 Beobachtungen, die zur Verfügung standen, ist entlang der
 mittleren Windprofile angeschrieben (25).

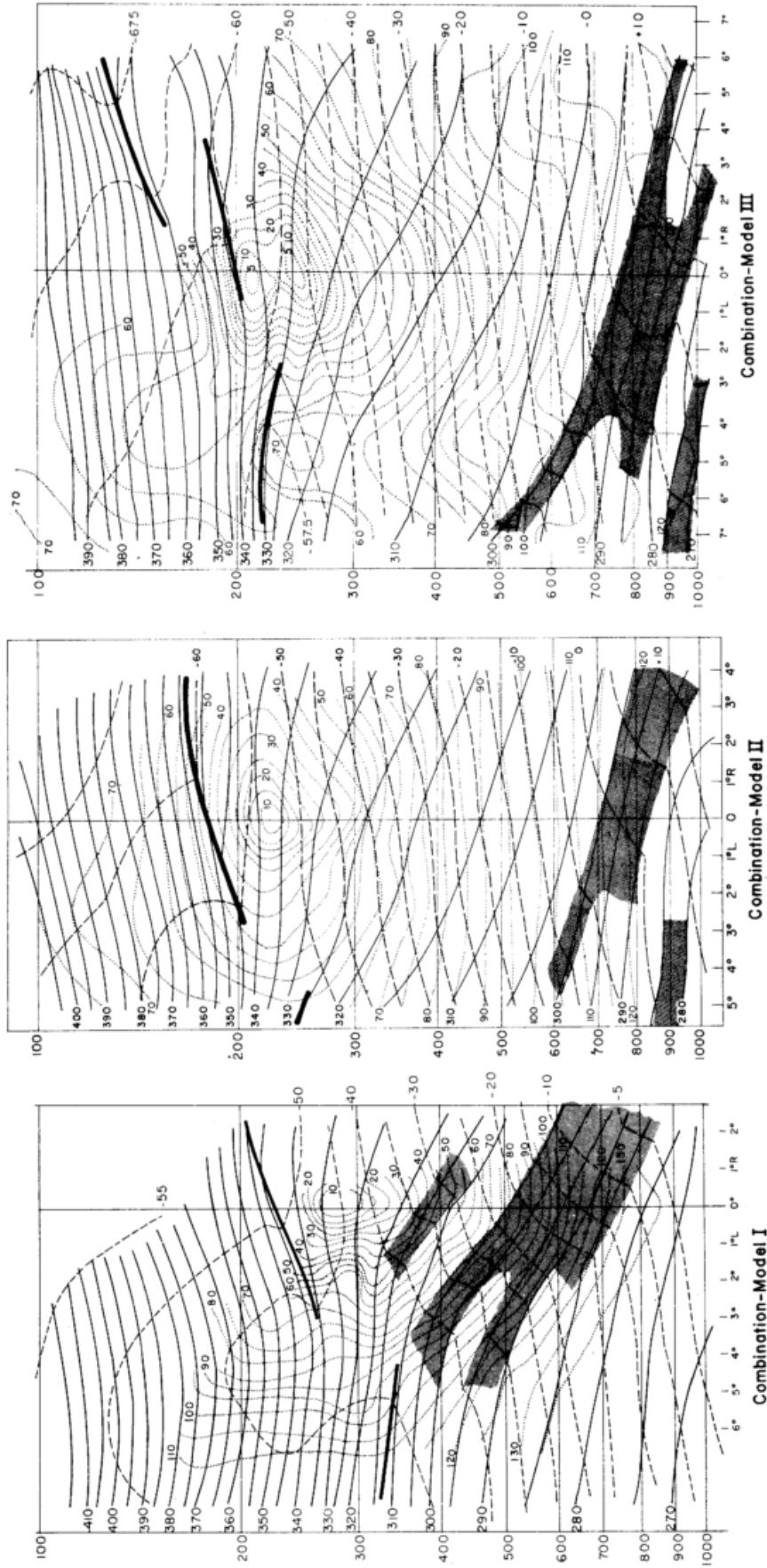


Abb. 56
Jet-Stream-Modelle nach Brundage und Goldman. Isothermen als Differenz zur Geschwindigkeit im Jet-Kern aufgetragen (punktirt). Isothermen der aktuellen Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) strichliert, der potentiellen Temperatur ($^{\circ}\text{K}$) in vollen Linien. Stabile Schichten sind durch Raster gekennzeichnet (3).

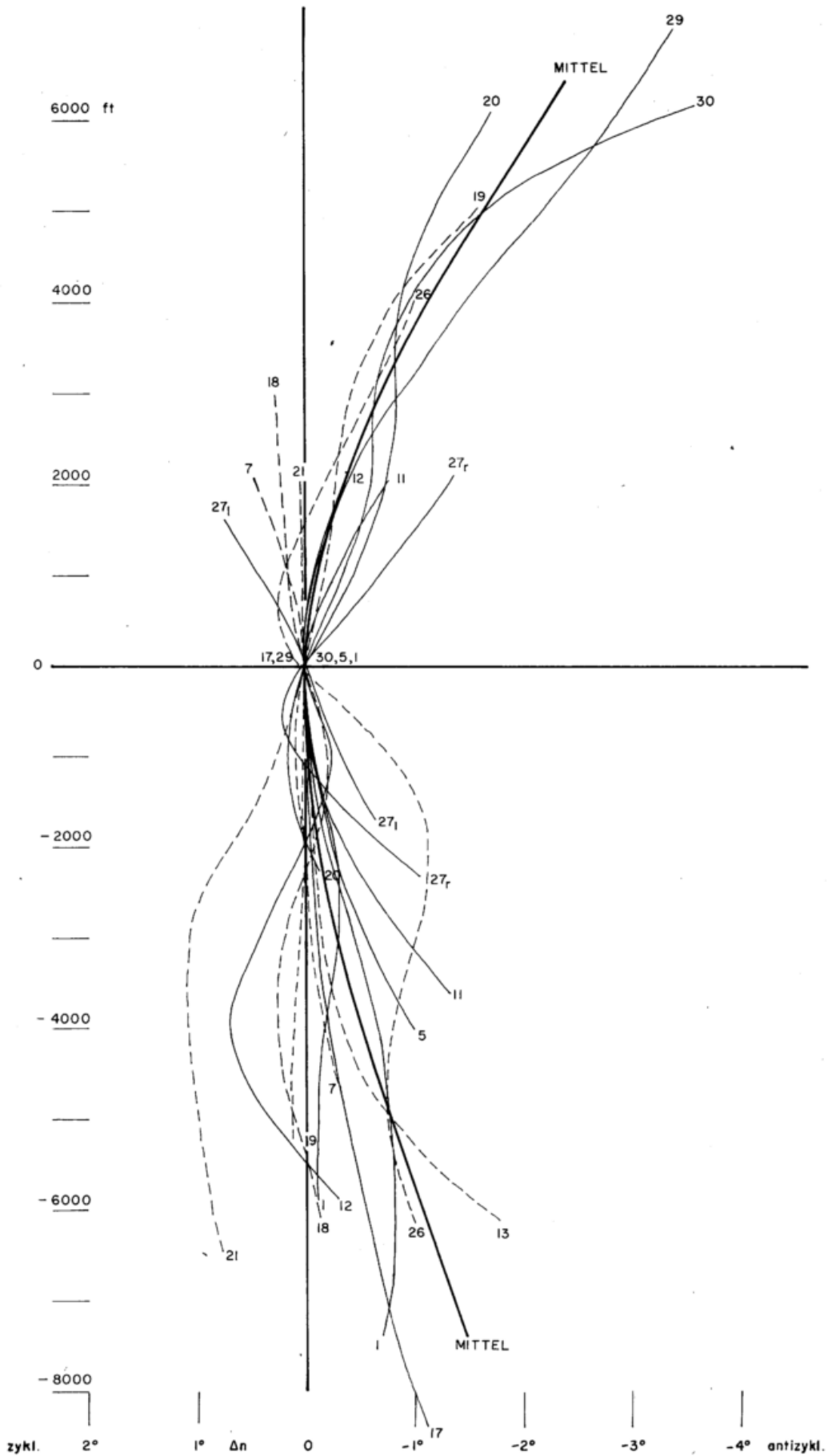


Abb. 58
 Position der vertikalen Strahlstromachsen in einem kartesischen System, das im jeweiligen Jet-Kern fixiert ist. Volle Linien: Flüge im Einzugsgebiet eines Jet-Maximums; strichliert: Flüge im Deltagebiet. Die Zahlen geben die Flugnummer an. Abszisse: Horizontale Entfernung vom Jet-Kern in Breitengrad; Ordinate: Vertikale Entfernung vom Jet-Kern in Fuß.

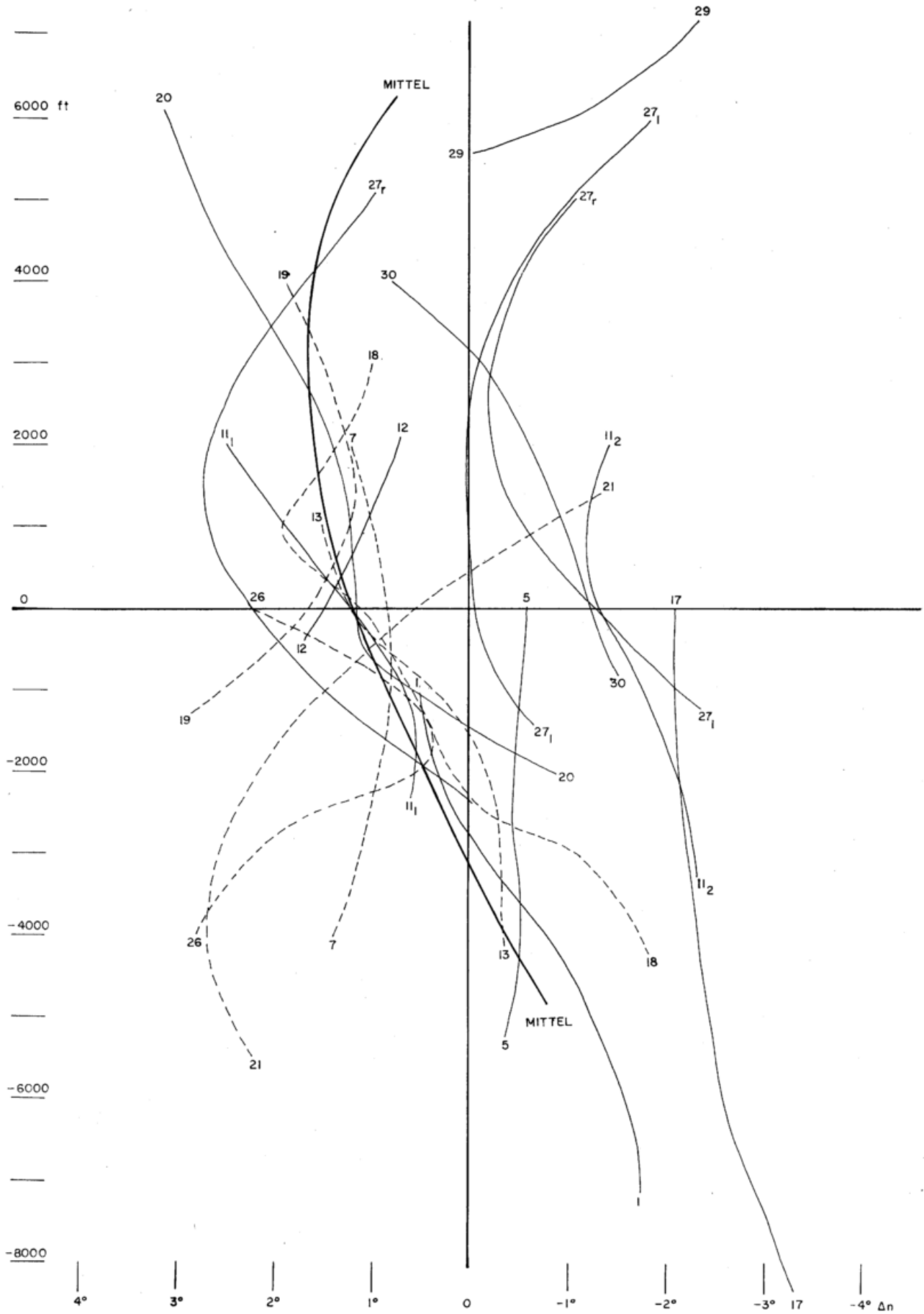


Abb. 59
Position der Isentropengraben (s. Text) in einem kartesischen Koordinatensystem mit Ursprung im Jet-Kern. (Vgl. Leg. zu Abb. 58).

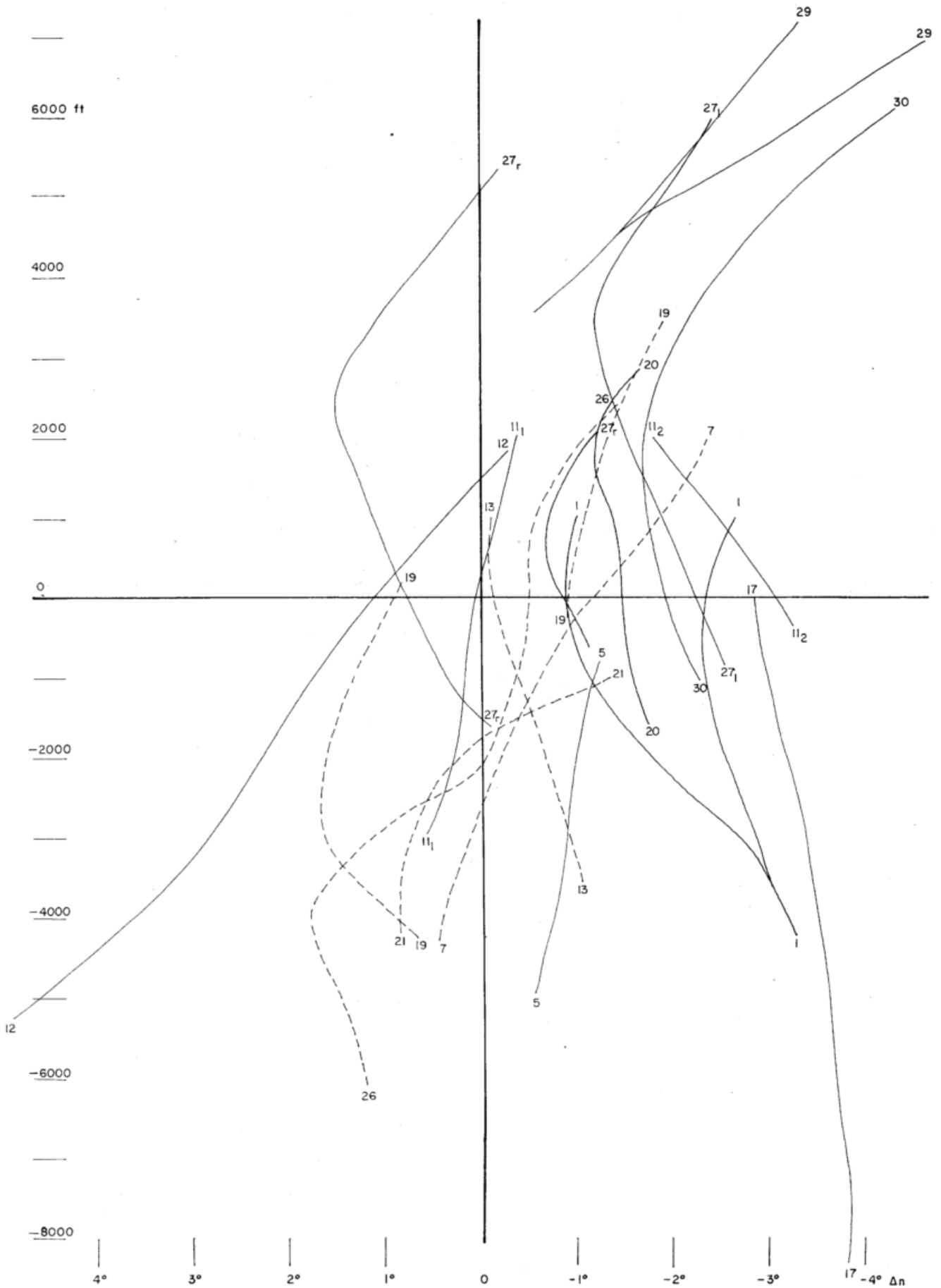


Abb. 60
Position der Isentropenbuckel in einem kartesischen Koordinatensystem mit Ursprung im Jet-Kern. (Vgl. Leg. zu Abb. 58).

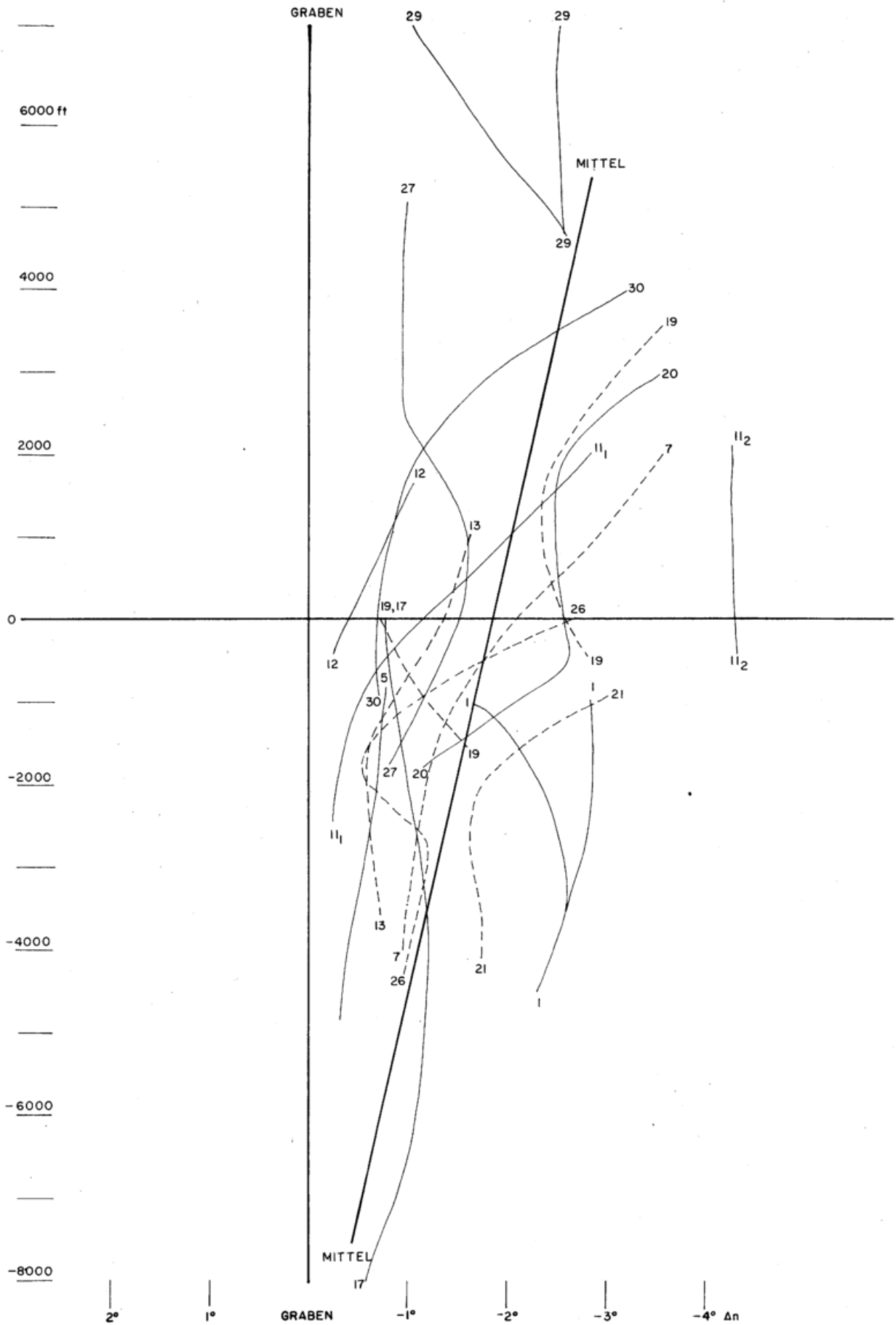


Abb. 61
Position der Isentropenbuckel in bezug auf die Isentropen-
gräben. Die Abszisse gibt den Abstand in Breitengrad (normal
zur Strömungsrichtung im Jet-Kern) der „Buckel“ von den
„Gräben“ an; die Ordinate mißt den vertikalen Abstand in Fuß
vom Kern-Niveau. (Symbole wie in Abb. 58).

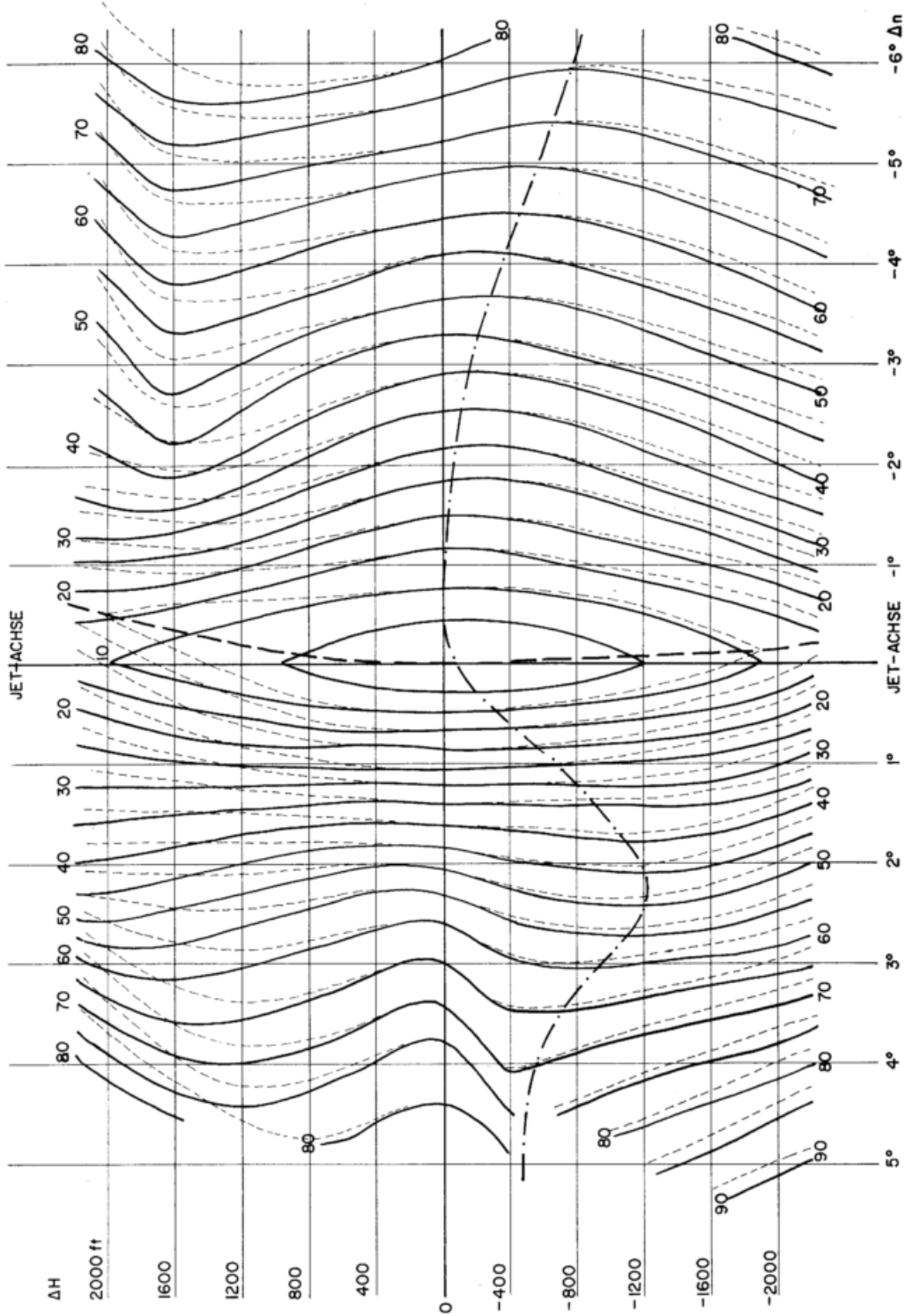


Abb. 62
 Isotachen der mittleren normierten Windgeschwindigkeit (= mittlere Differenz der Geschwindigkeiten zur Geschwindigkeit im Jet-Kern) in Knoten in einem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem (volle Linien). Strichliert: Mittlere Geschwindigkeitsverteilung unter Berücksichtigung der mittleren Krümmung der vertikalen Strahlstromachsen laut Abb. 58. Strichpunktliert: Niveau maximalen Windes. Abszisse: Horizontaler Abstand in Breitengrad von der vertikalen Jet-Achse, normal zur Windrichtung im Kern. Ordinate: Höhe (Fuß) über bzw. unter dem Kern-Niveau. (Für die strichlierte Analyse müssen die Koordinaten als kartesisches System wie in Abb. 58 interpretiert werden.)

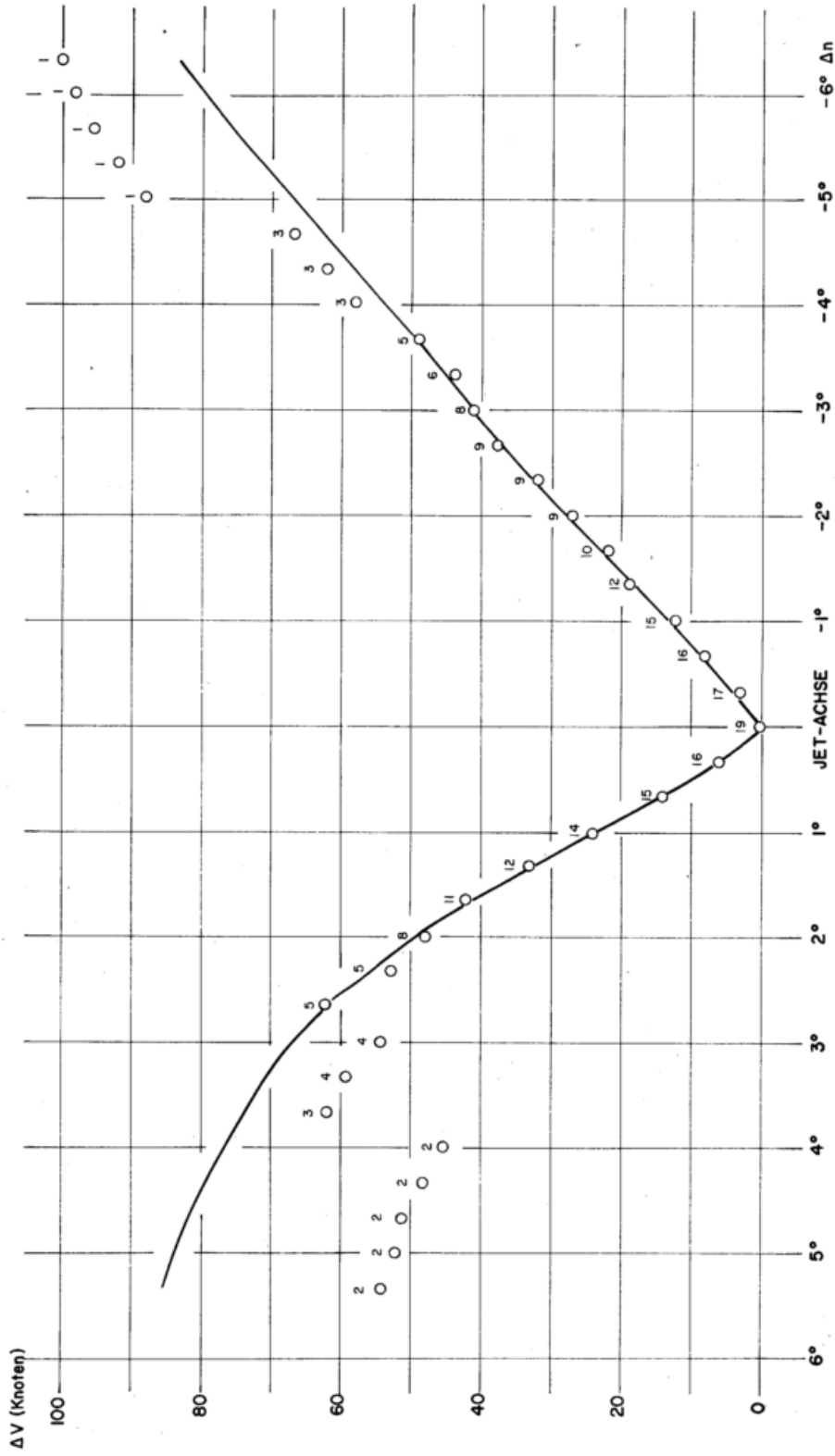


Abb. 63
Horizontales Windprofil im Niveau des Jet-Kernes (vgl. Tabelle 2). In der Abszisse sind die Entfernungen in Breitengrad normal zur Windrichtung im Jet-Kern, in der Ordinate die Differenzen ΔV laut Gl. (1) aufgetragen. An den einzelnen Meßpunkten ist die Zahl der Beobachtungen angegeben.

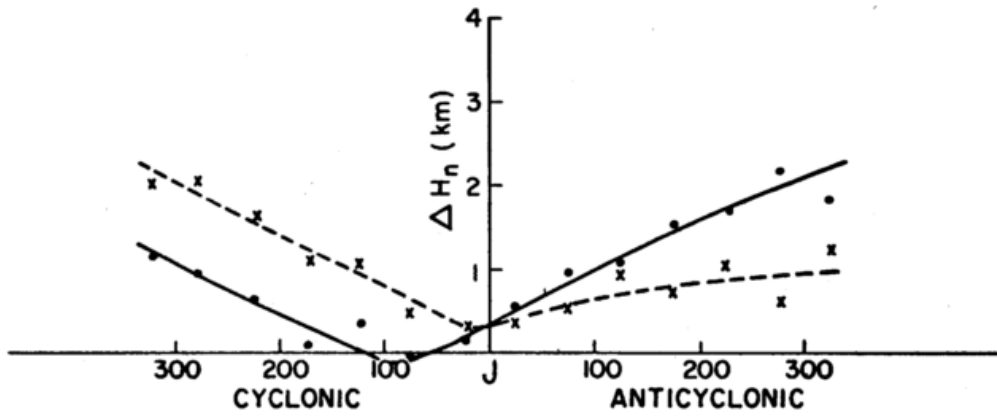


Abb. 64
 Mittlere Höhenunterschiede der Schicht maximalen Windes nach Rawinsondendaten gegenüber der Höhe dieser Schicht im Jet-Kern (volle Linie, Punkte) und mittlere Abweichung vom Mittelwert (strichliert, Kreuze). Die Abszisse enthält die Entfernung (km) normal zur Jet-Achse.

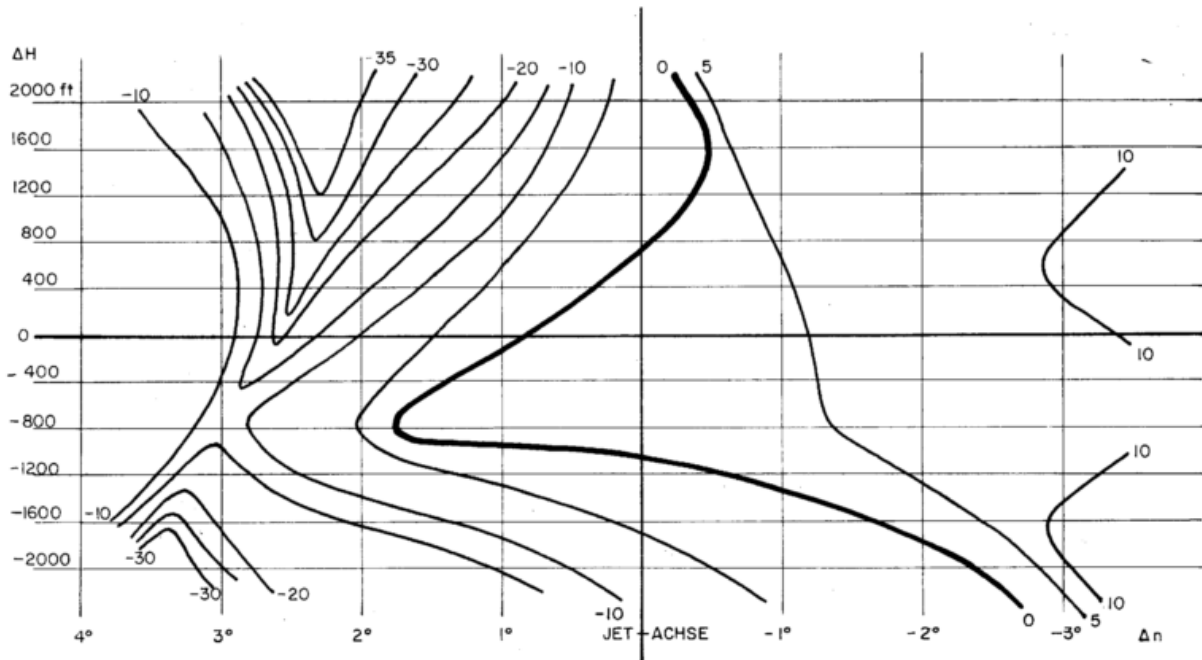


Abb. 65
 Unterschied der normierten Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Einzugs- und Deltagebiet in Knoten (s. Text). Abszisse: Entfernung im Breitengrad von der vertikalen Jet-Achse, normal zur Strömungsrichtung im Jet-Kern. Ordinate: Höhe (Fuß) über und unter dem Kern-Niveau.

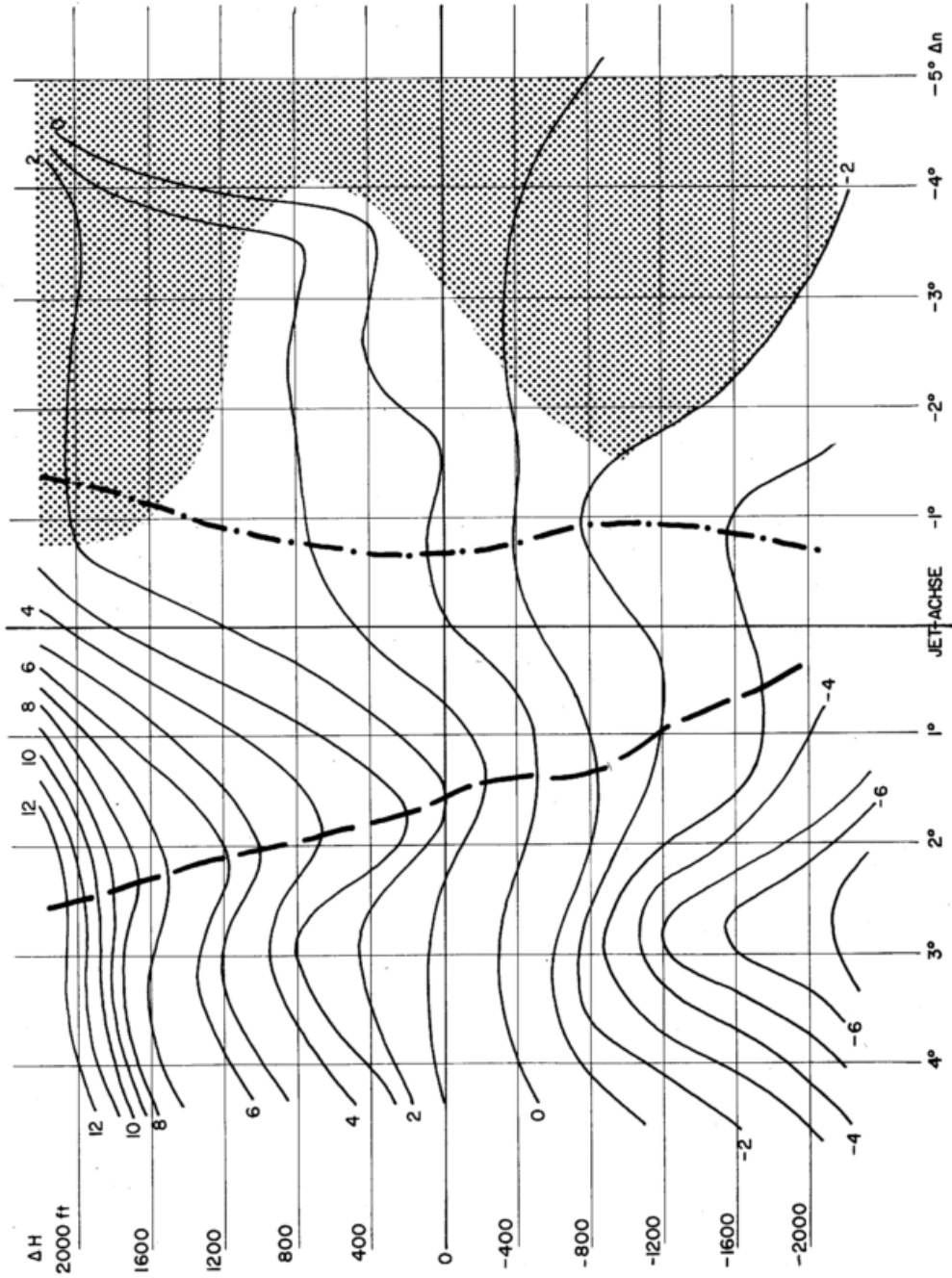


Abb. 66
Mittlere Verteilung der normierten potentiellen Temperaturen (= mittlere Differenzen zur potentiellen Temperatur im Jet-Kern) in einem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem. Koordinaten wie in Abb. 62. Strichliert: mittlerer Isentropengraben; strichpunktliert: mittlerer Isentropenbuckel. Gebiete mit annähernd adiabatischer Schichtung sind mit Raster versehen.

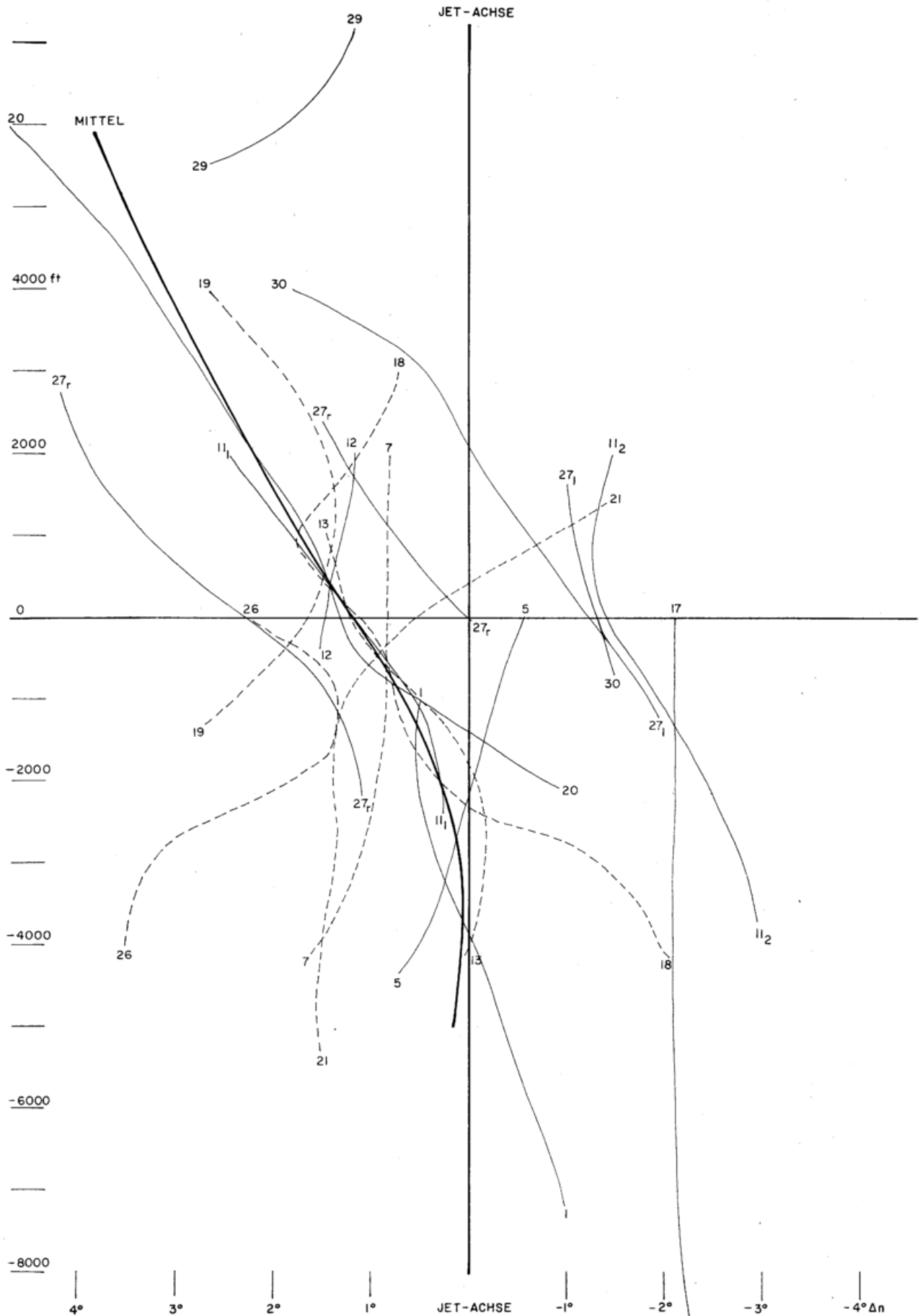


Abb. 67
Positionen der Isentropengraben in einem auf die vertikale Strahlstromachse bezogenen Koordinatensystem. Abszisse: Abstand in Breitengrad von der Jet-Achse. Ordinate: Höhe über bzw. unter dem Kern-Niveau. Symbole wie in Abb. 58.

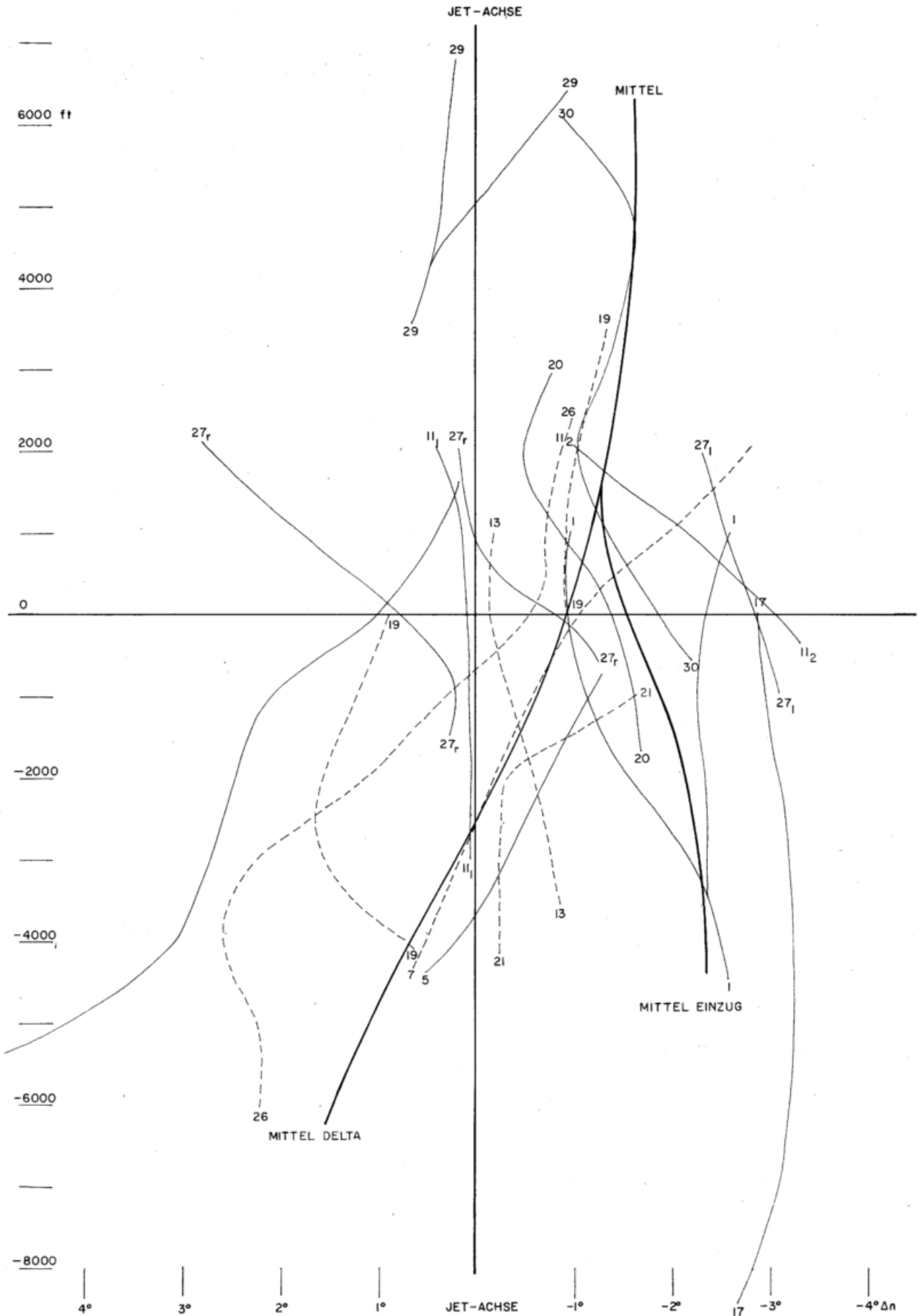


Abb. 68
Position der Isentropenbuckel in einem auf die vertikale Strahlstromachse bezogenen Koordinatensystem. (Vgl. Leg. zu Abb. 67).

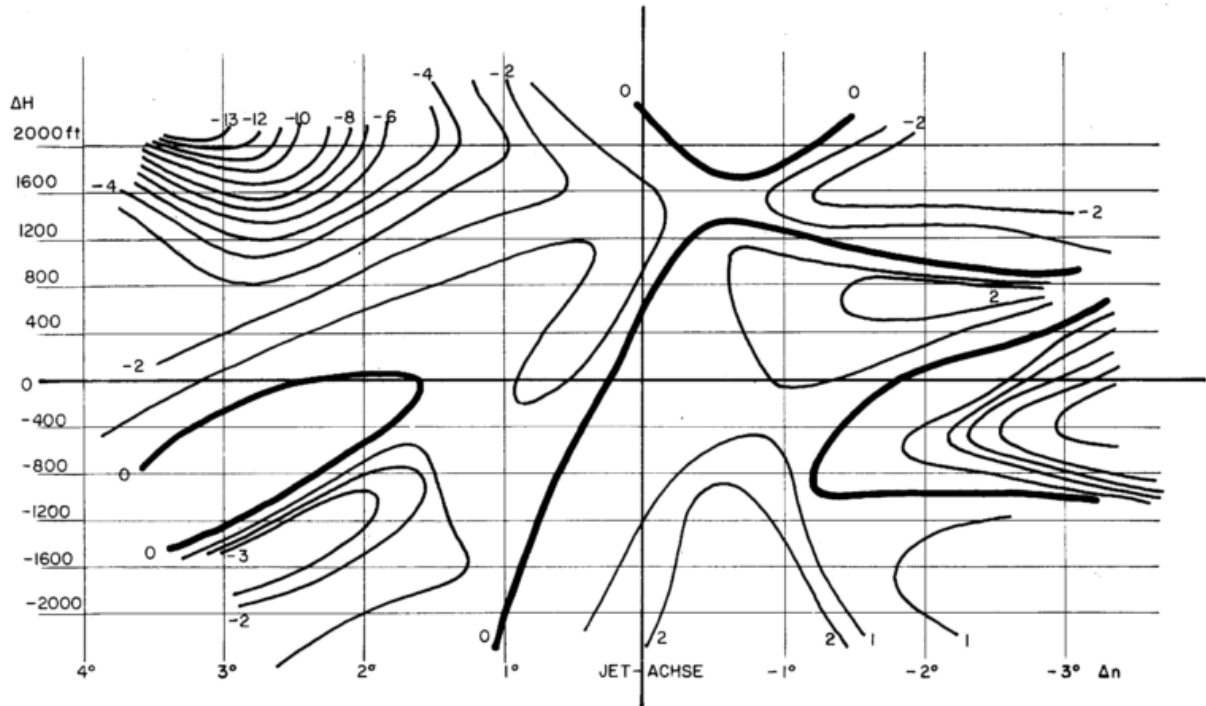


Abb. 69
Differenz der mittleren potentiellen Temperaturen im Einzugs- und Deltagebiet in einem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem. (Koordinaten wie in Abb. 62).

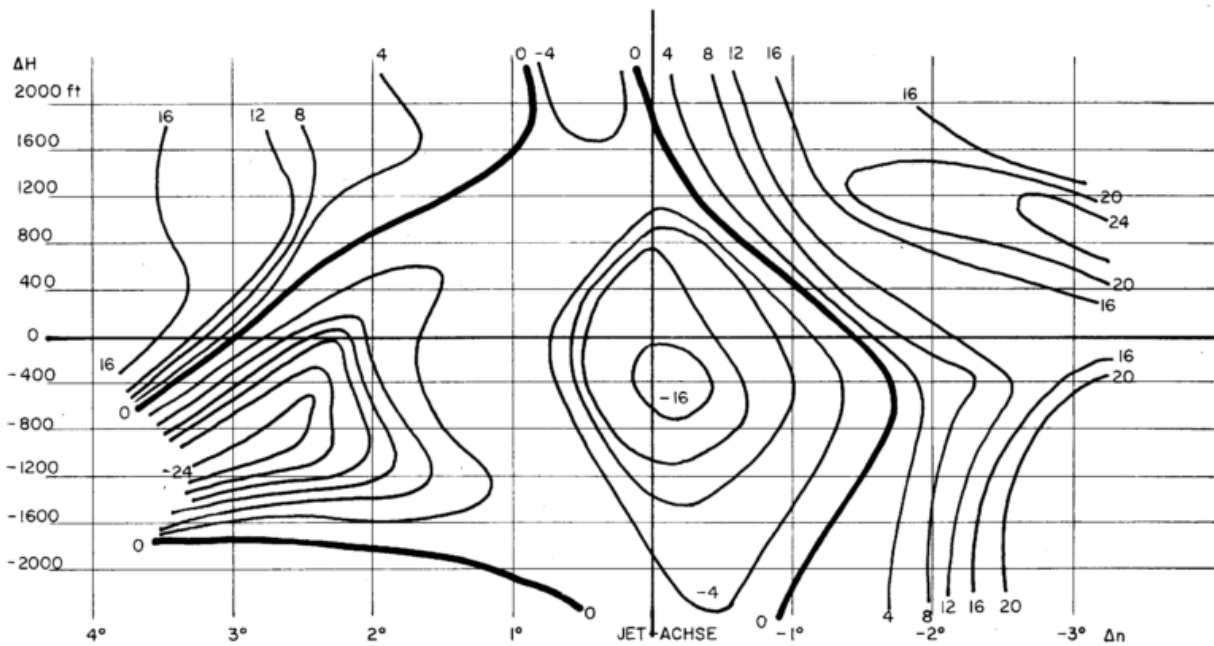


Abb. 70
Differenz der mittleren Normalkomponenten im Einzugs- und Deltagebiet. Koordinaten wie in Abb. 62.

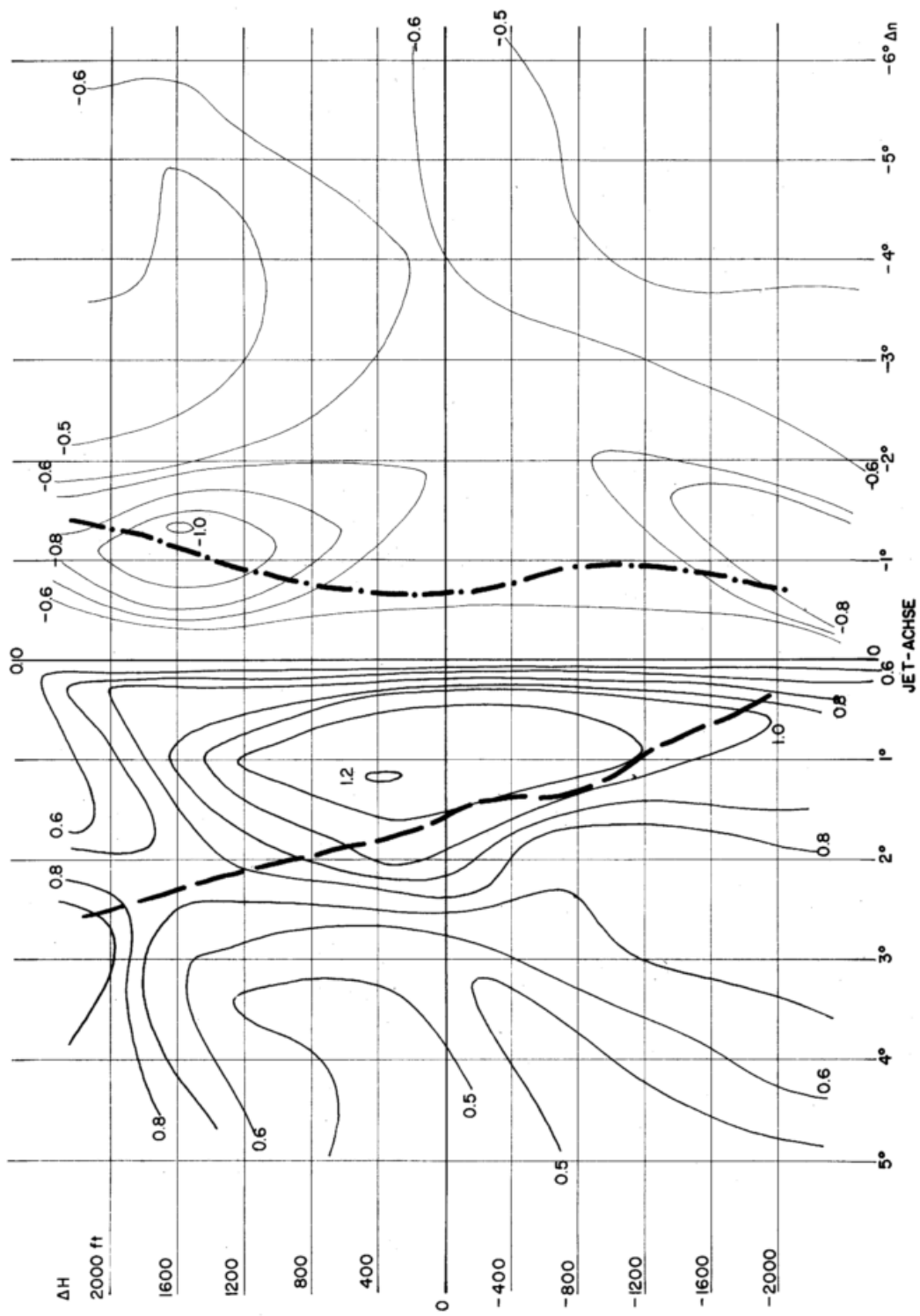


Abb. 71
Mittlere horizontale Scherung aus Abb. 62 in einem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem. Die Positionen des mittleren Isentropengrabbens und Isentropenbuckels sind wie in Abb. 66 markiert.

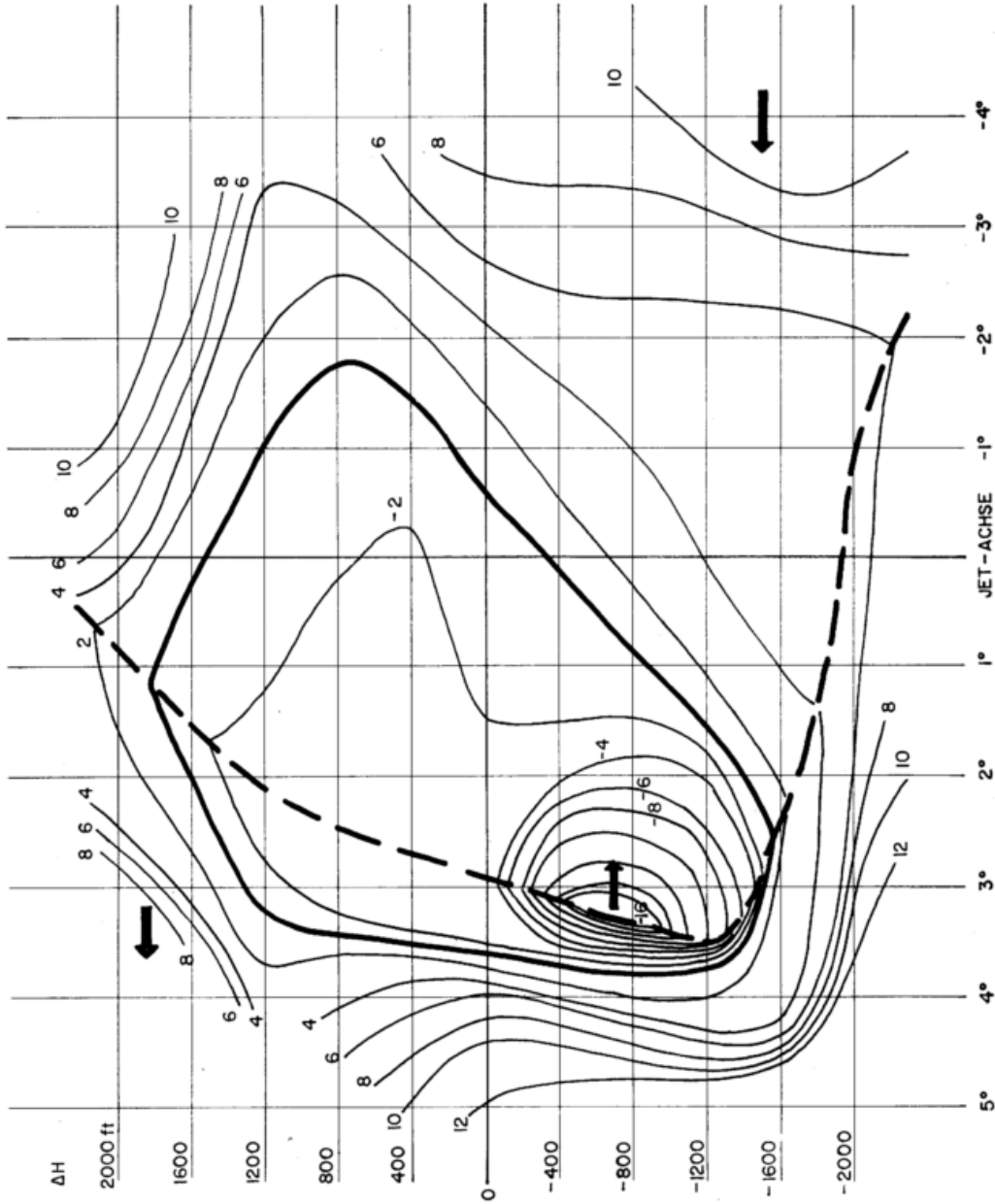


Abb. 72
Mittlere Normalkomponente (Knoten) in einem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem (Koordinaten wie in Abb. 62). Dick strichliert: Achse minimaler Normalkomponenten. Dicke Linien: Nulllinien.

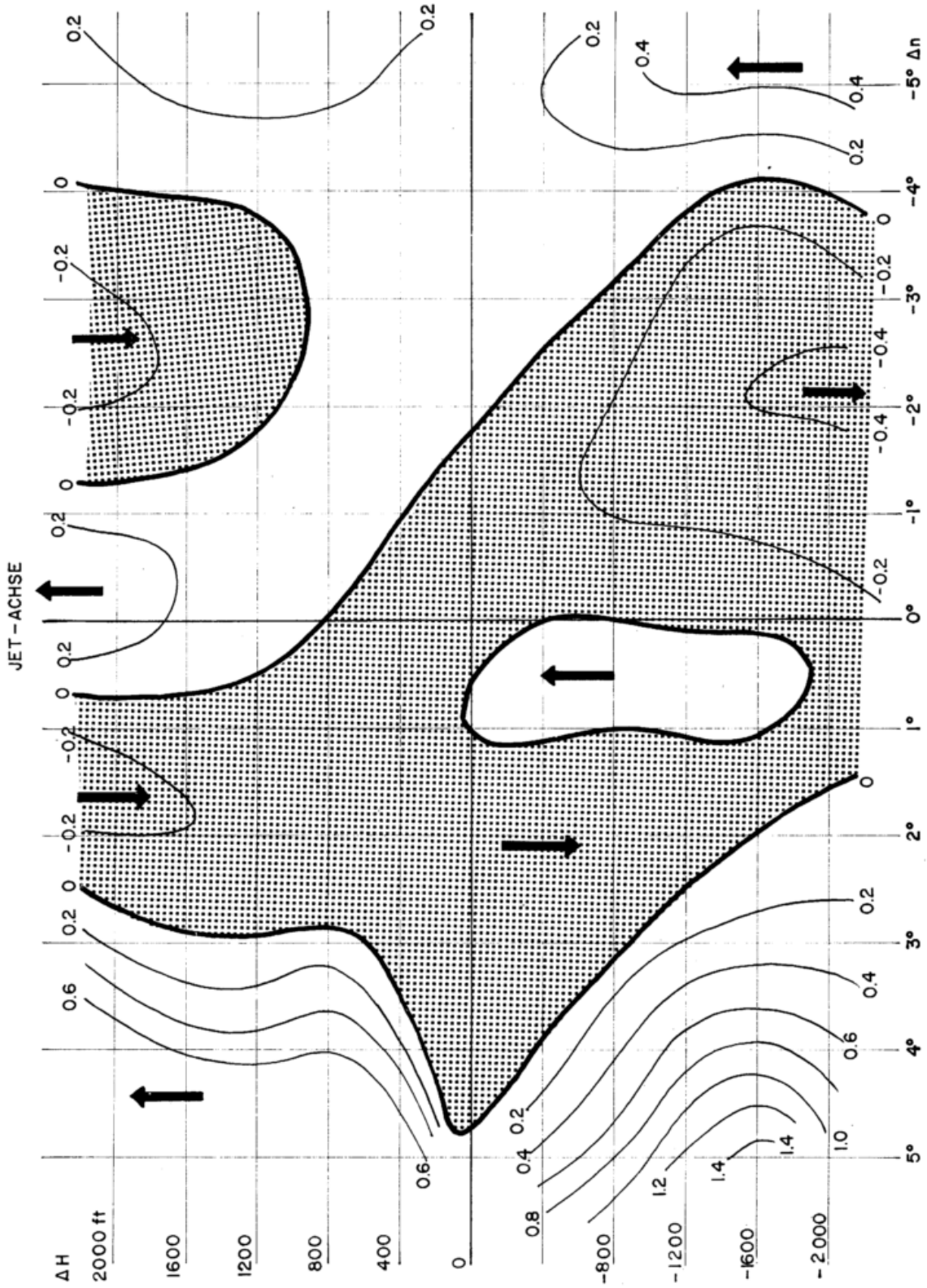


Abb. 74
Mittlere Vertikalgeschwindigkeit (m/sec) in einem auf die vertikale Jet-Achse bezogenen Koordinatensystem. Dicke Linien: Nulllinien; Abwärtsbewegung durch schattierte Gebiete gekennzeichnet.

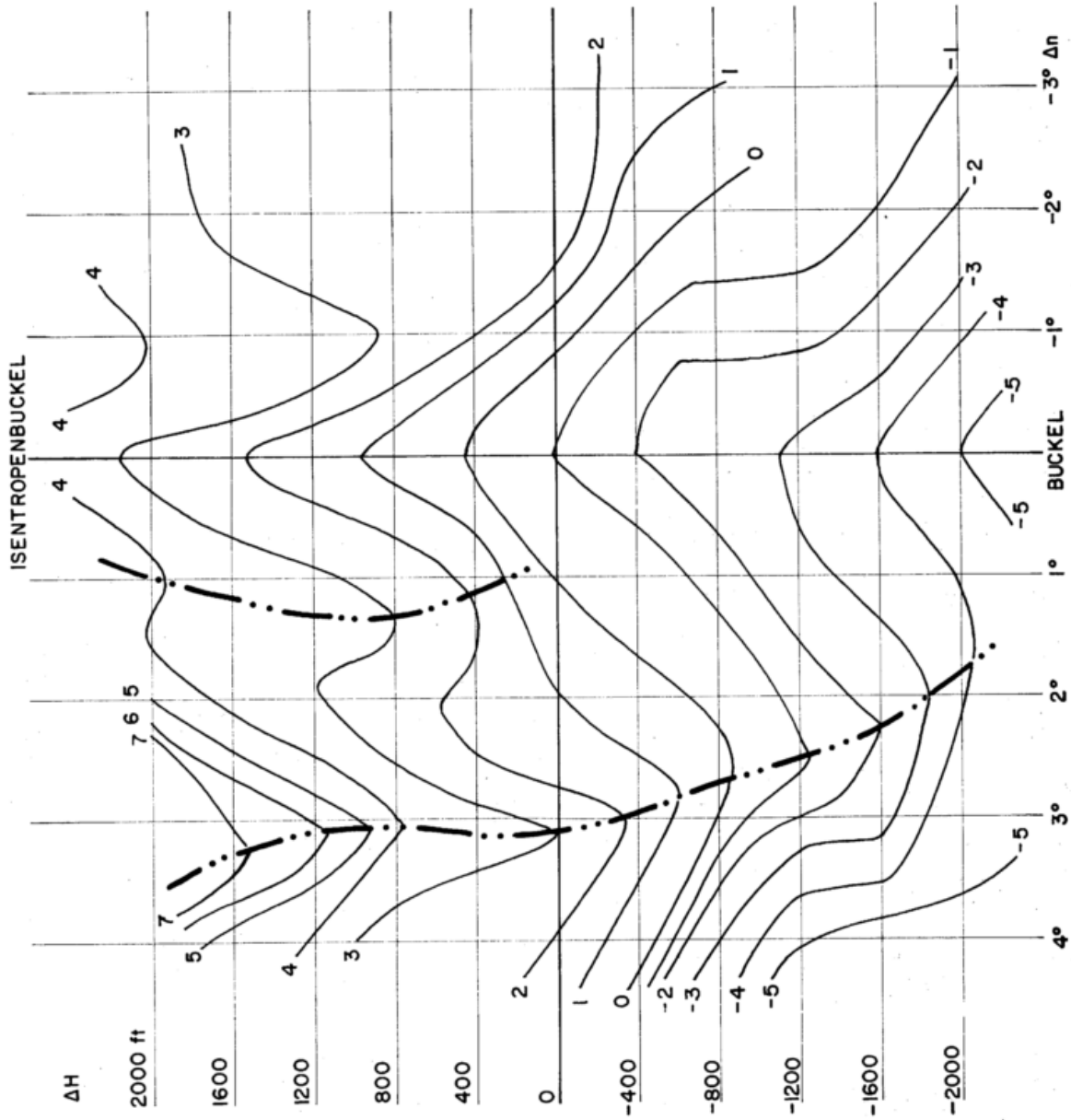


Abb. 75
Mittlere Verteilung der normierten potentiellen Temperaturen (vgl. Leg. zu Abb. 66) in einem auf die Achse des isentropenbuckels bezogenen System. Abszisse: Horizontaler Abstand im Breitengrad von der Achse des isentropenbuckels, normal zur Windrichtung im Jet-Kern; Ordinate: Vertikalabstand in Fuß vom Niveau des Jet-Kernes. Strich-doppelpunkt: Achsen der mittleren isentropenrücken.

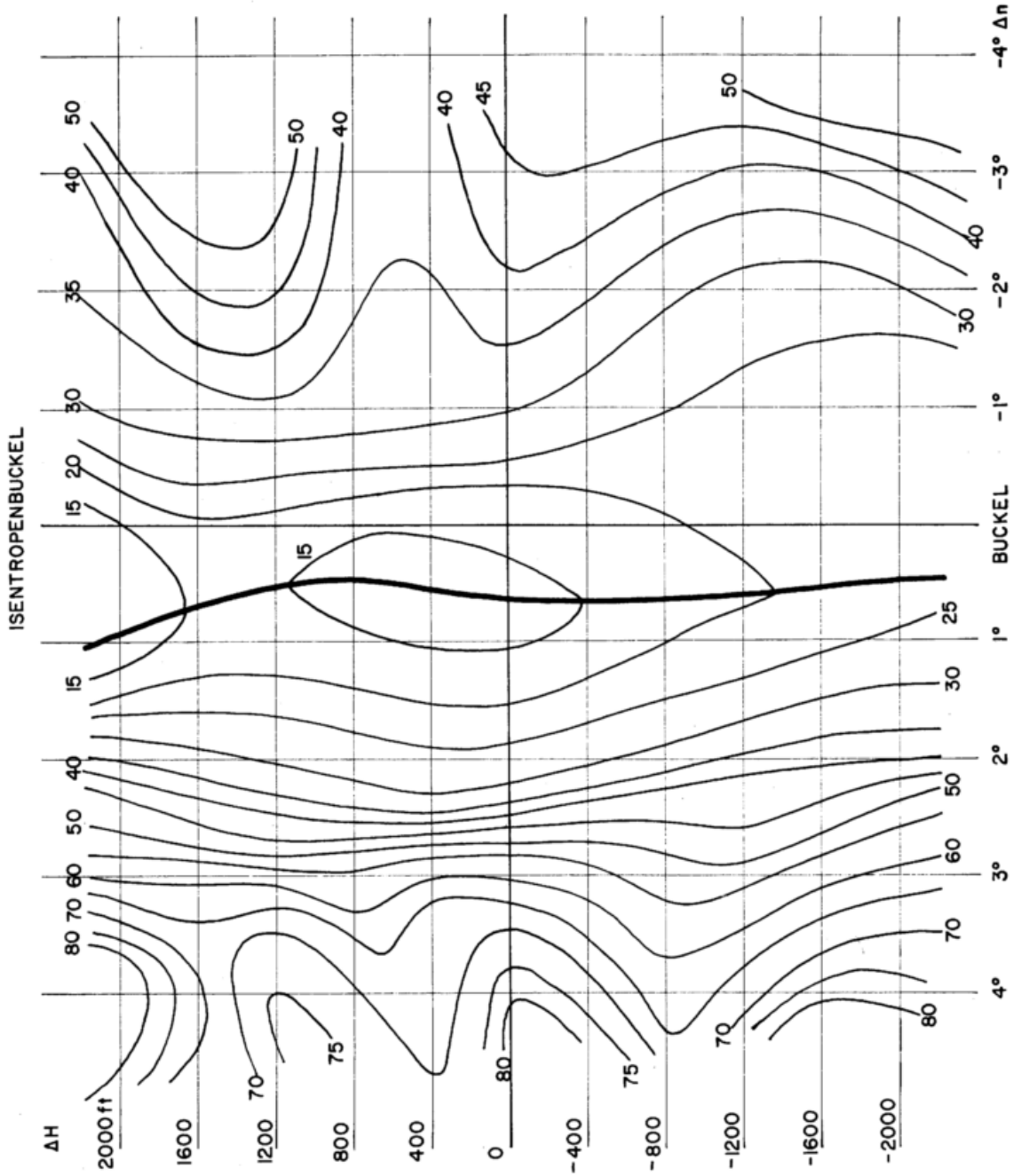


Abb. 76
Isotachen der mittleren normierten Windgeschwindigkeiten in Knoten (vgl. Leg. zu Abb. 62) in einem auf die Achse des Isentropenbuckels bezogenen Koordinatensystems. (Vgl. Leg. zu Abb. 76.) Dicke Linien: Jet-Achse.

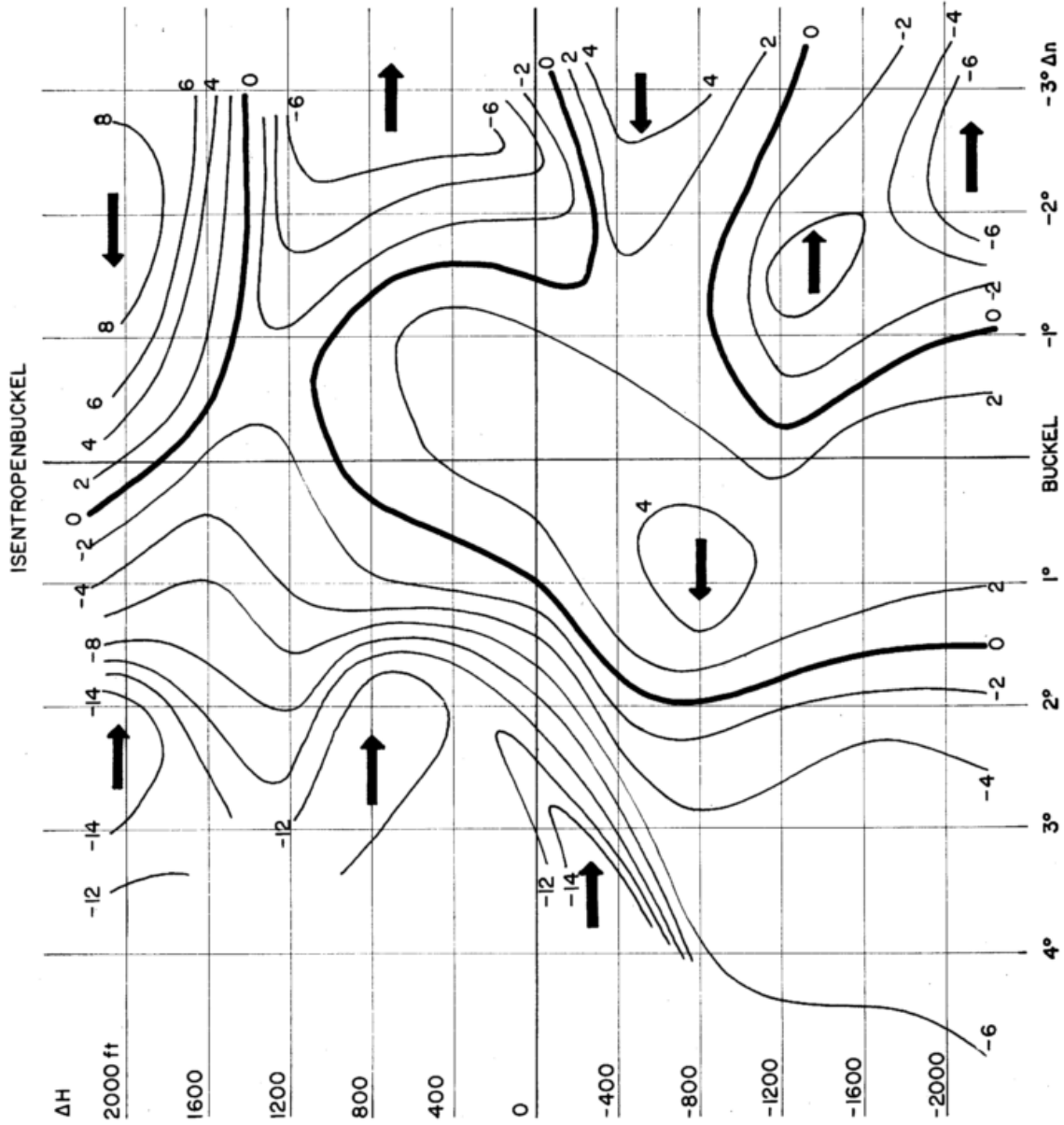


Abb. 77
Mittlere Normalkomponente (Knoten) in einem auf die Achse des Isentropenbuckels bezogenen Koordinatensystem. (Vgl. Leg. zu Abb. 75.) Dicke Linien Nulllinien.

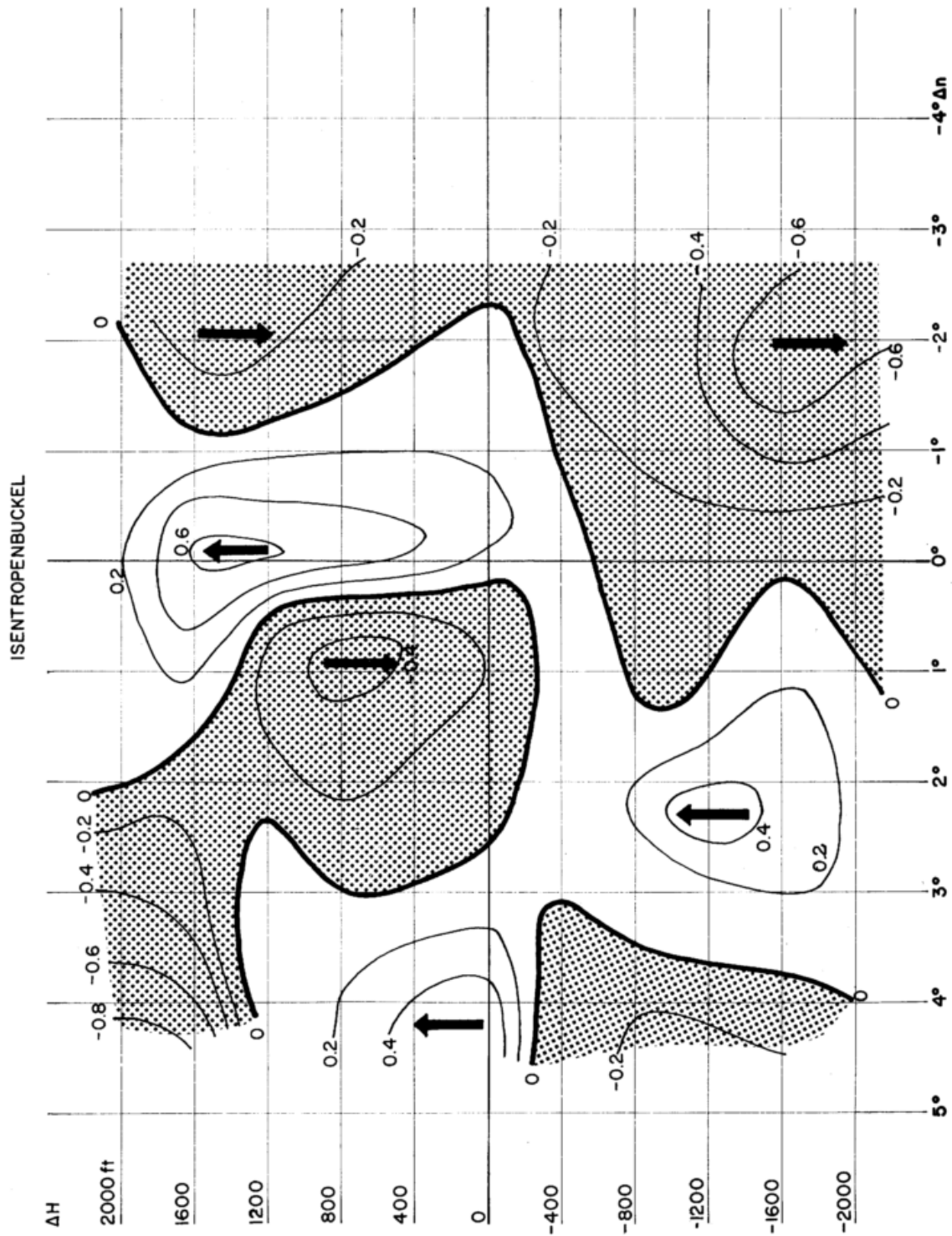


Abb. 78
Mittlere Vertikalgeschwindigkeit (m/sec) in einem auf die Achse des Isentropenbuckels bezogenen Koordinatensystem. (Vgl. Leg. zu Abb. 76). Dicke Linien: Nulllinien, Abwärtsbewegung durch Schattierungen gekennzeichnet.

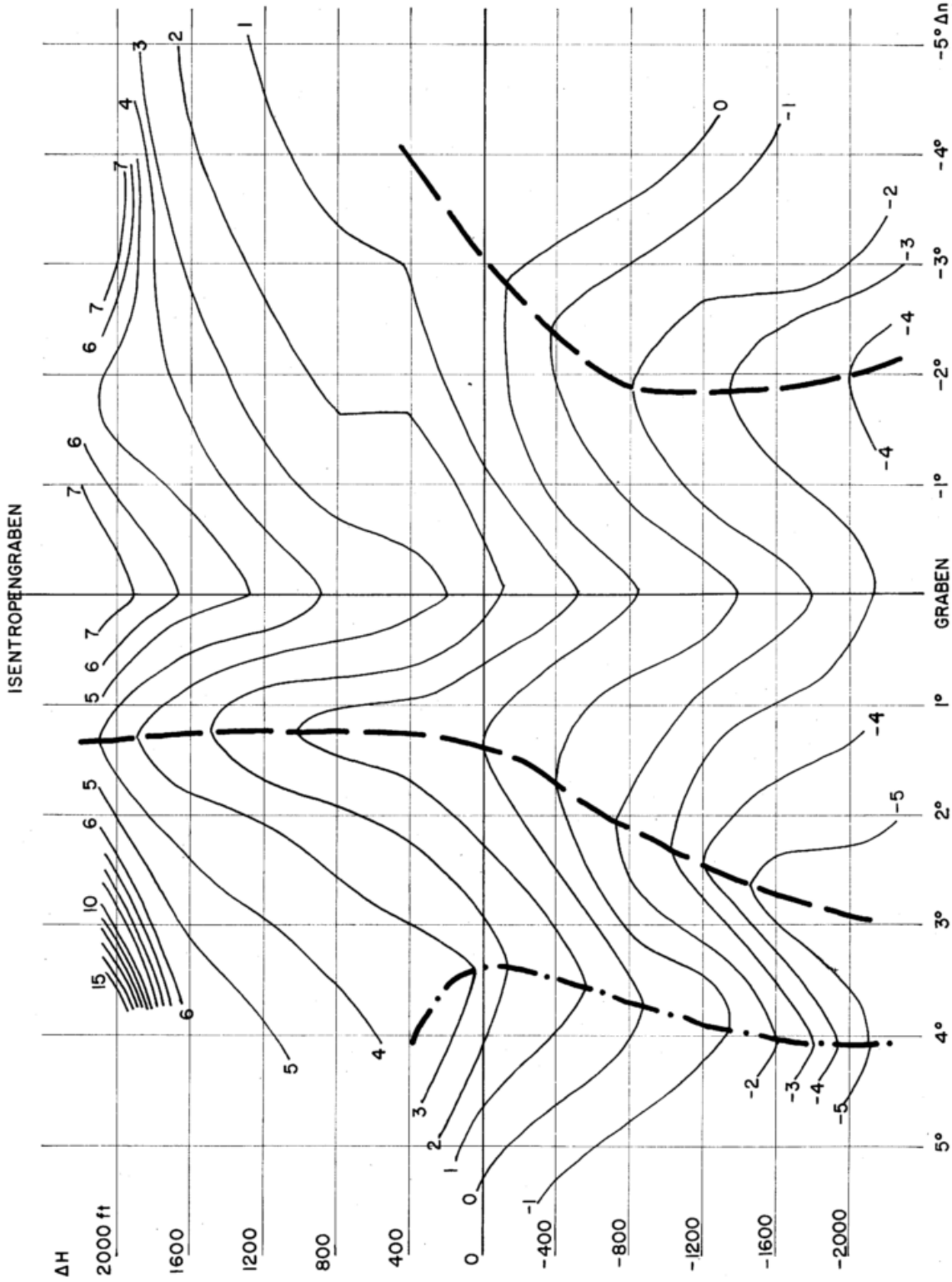


Abb. 79
 Mittlere Verteilung der normierten potentiellen Temperaturen (vgl. Leg. zu Abb. 66) in einem auf die Achse des Isentropengrabens bezogenen System. Abszisse: Horizontaler Abstand in Breitengrad von der Achse des Isentropengrabens, normal zur Windrichtung im Jet-Kern; Ordinate: Vertikalabstand in Fuß vom Niveau des Jet-Kernes. Dick strichpunktliert; sekundärer Isentropengraben. Dick strichliert: Isentropenbuckel.

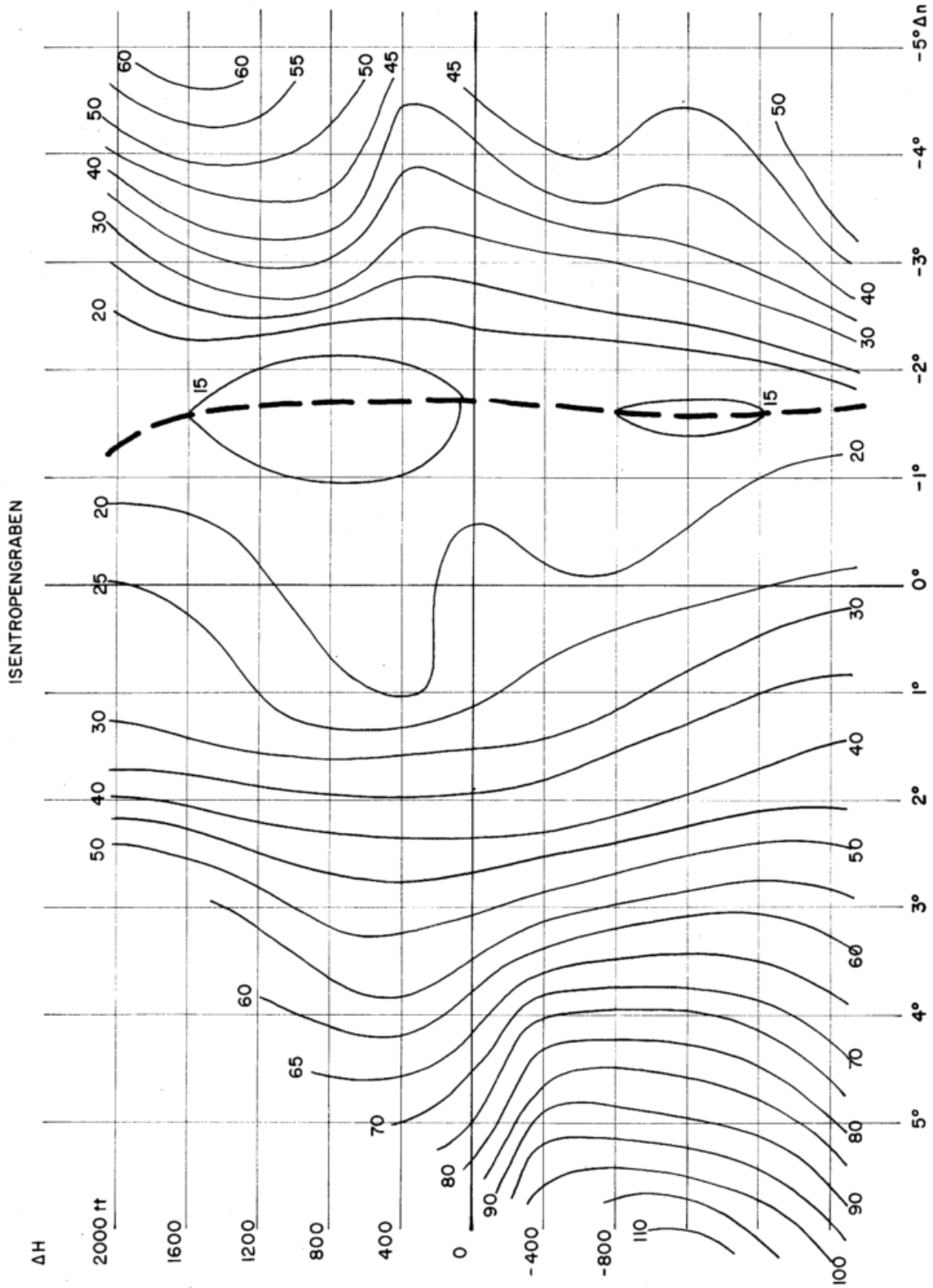


Abb. 80
Isotachen der mittleren normierten Windgeschwindigkeit in Knoten (vgl. Leg. zu Abb. 62) in einem auf die Achse des Isentropengrabens bezogenen Koordinatensystem. (Vgl. Leg. zu Abb. 79.) Dick strichliert: vertikale Jet-Achse.

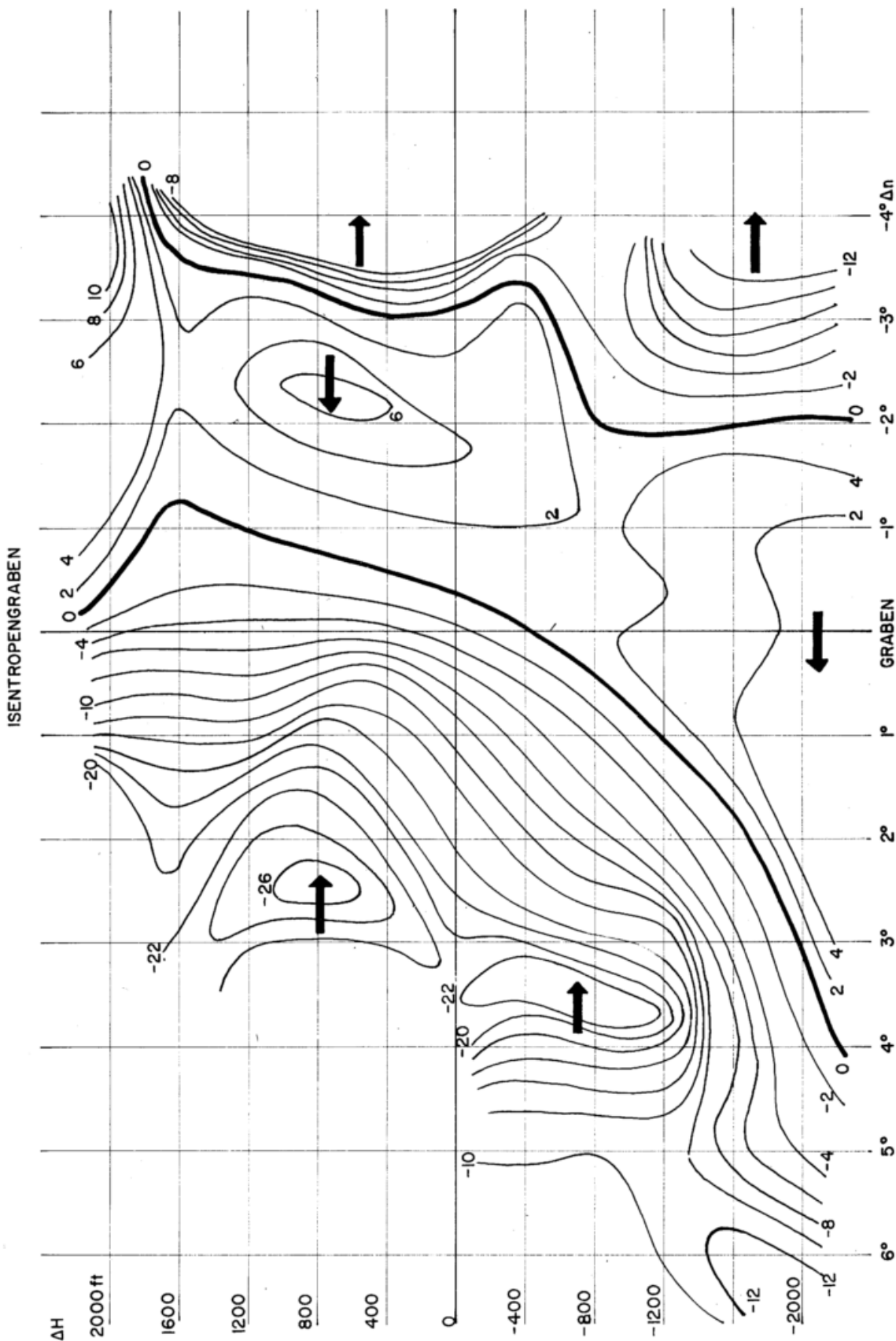


Abb. 81
Mittlere Normalkomponente (Knoten) in einem auf die Achse des Isentropengrabens bezogenen Koordinatensystem. (Vgl. Leg. zu Abb. 79). Dicke Linien: Nulllinien.

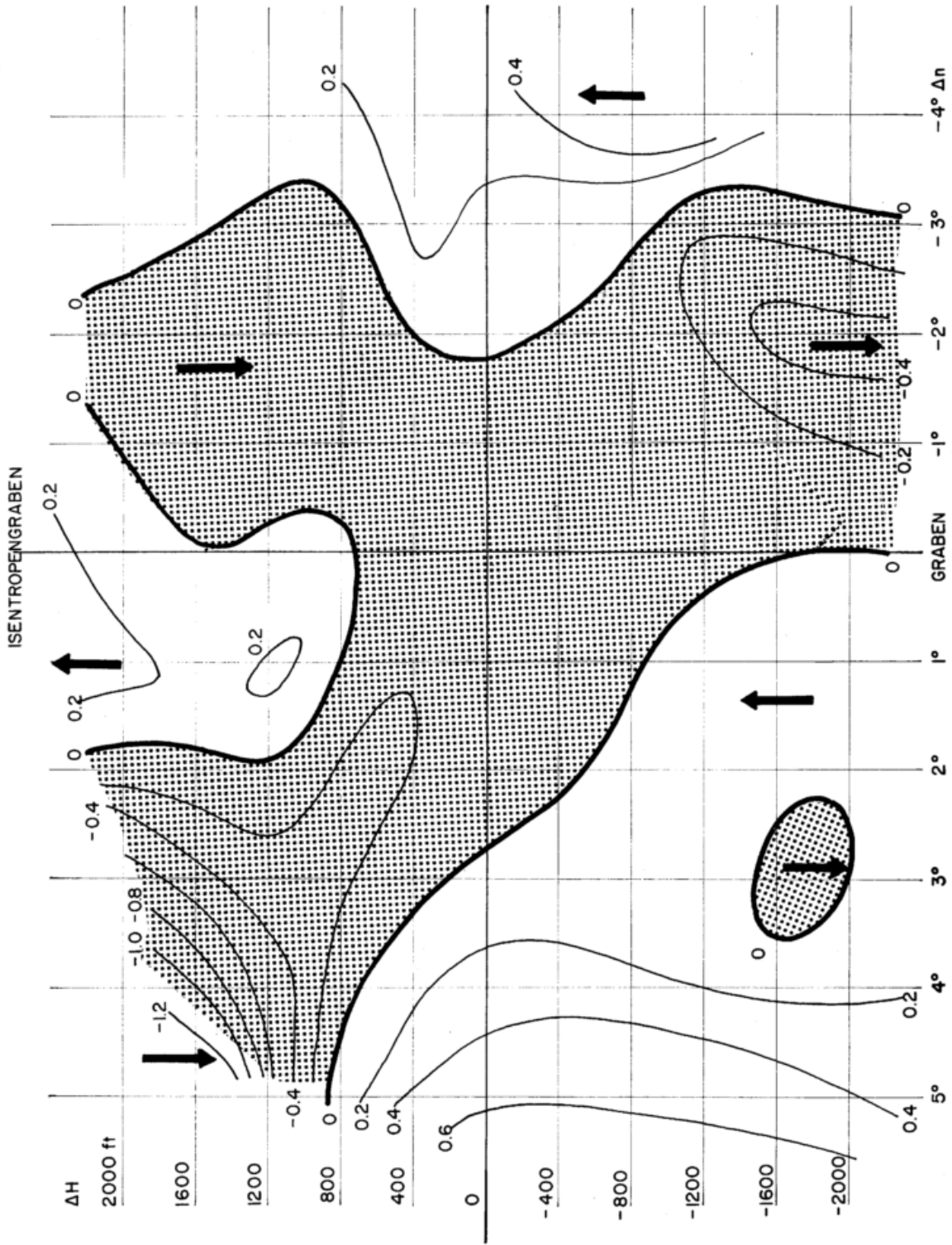


Abb. 82
 Mittlere Vertikalgeschwindigkeit (m/sec) in einem auf die Achse des Isentropen-
 grabens bezogenen Koordinatensystem. (Vgl. Leg. zu Abb. 78.) Dicke Linien:
 Nulllinien. Abwärtsbewegung durch Schattierung gekennzeichnet.

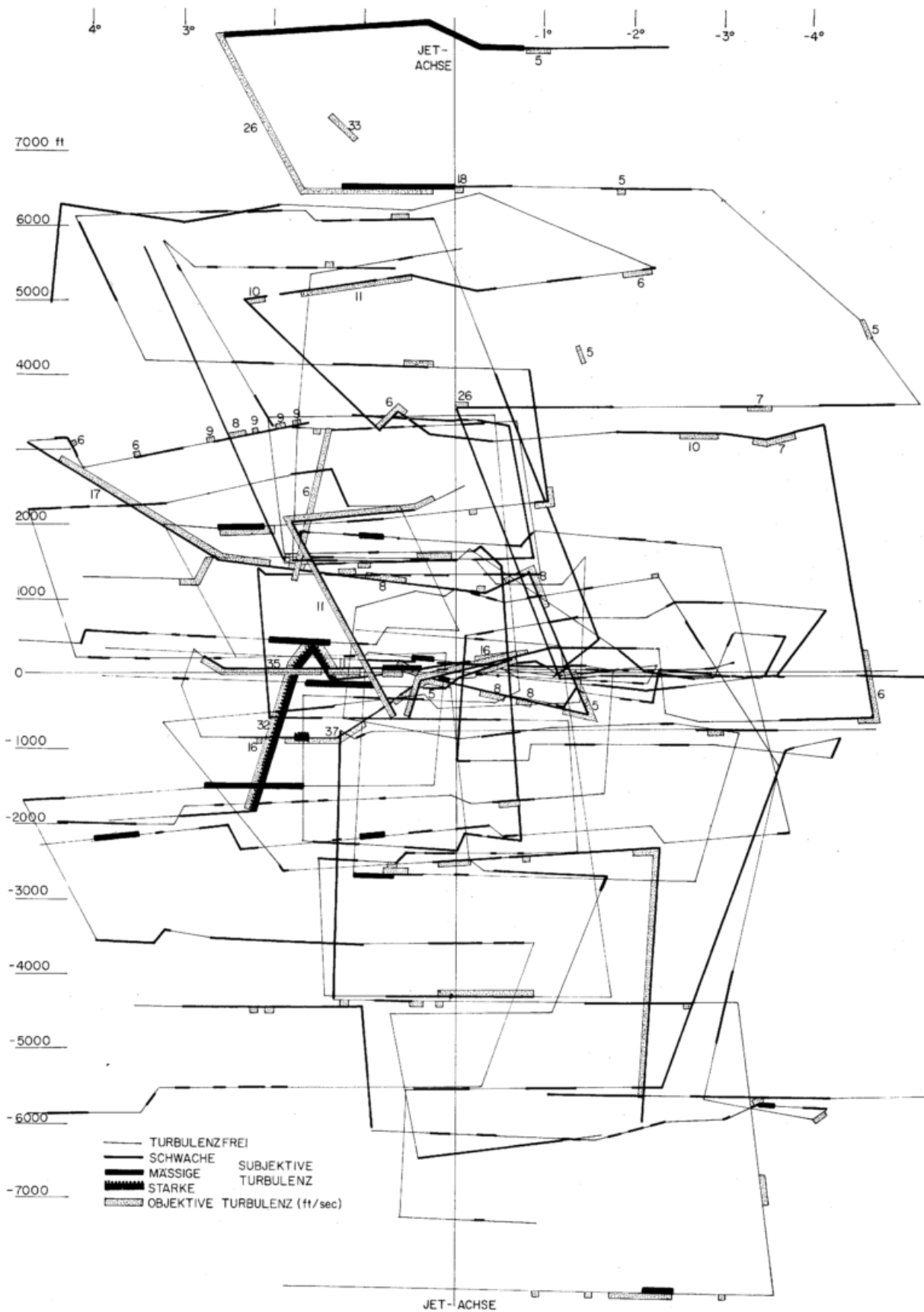


Abb. 83
 Subjektive und objektive CAT-Beobachtungen der Flüge Nr. 1, 5, 11, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 27, 29, 30 in einem auf die vertikale Strahlstromachse bezogenen Koordinatensystem. (Vgl. Leg. zu Abb. 62.) Zahlen bei objektiven Turbulenzmessungen geben maximale Böengeschwindigkeit (Fuß/sec) an.

Berichte des Deutschen Wetterdienstes (Fortsetzung)

Band 6

Nr. 40 H. K. Meyer: Betrachtungen über Höhenvorhersagekarten	4,70 DM
Nr. 41 F. Schnelle u. W. Breuer: Meteorologische Meßgeräte und Voraussetzungen für den Schorfwarndienst	3,40 DM
Nr. 42 W. Collmann: Diagramme zum Strahlungsklima Europas	3,10 DM
Nr. 43 H. Mollwo: Klimawerte von Frankfurt/Main 1857—1956	7,90 DM
Nr. 44 W. Regula: Das Spektrum des Wasserdampfes	4,40 DM
Nr. 45 K. Bürger: Zur Klimatologie der Großwetterlagen	46,60 DM

Band 7

Nr. 46 R. Pfau: Statistische Bearbeitung von Bodenfeuchtigkeits- werten	3,40 DM
Nr. 47 E. Brandtner: Methodische Untersuchungen an phänologischen Beobachtungen unter besonderer Berücksichti- gung phytopathologischer Probleme	2,20 DM
Nr. 48 H. Kraus: Untersuchungen über den nächtlichen Energie- transport und Energiehaushalt in der boden- nahen Luftschicht bei der Bildung von Strahlungs- nebeln	7,— DM
Nr. 49 J. Grunow u. W. Leistner: Registrierungen der Verdunstungsgröße in Wyk/ Föhr und in Hohenpeißenberg	4,10 DM
Nr. 50 F. K. Hartmann, J. van Eimern u. G. Jahn: Untersuchungen reliefbedingter kleinklimatischer Fragen in Geländequerschnitten der hochmonta- nen und montanen Stufe des Mittel- und Süd- westharzes	6,90 DM
Nr. 51 Die Meteorologische Tagung in Garmisch-Parten- kirchen vom 17. bis 19. September 1958	24,— DM
Nr. 52 H. Guss: Sichtweite und Bewölkung an deutschen Ver- kehrsflughäfen	5,60 DM
Nr. 53 H. Kaiser: Die Strömung an Windschutzstreifen	7,50 DM

Band 8

Nr. 54 5. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie in Garmisch-Partenkirchen vom 14. bis 16. September 1958	39,40 DM
Nr. 55 H. Haarländer: Zum Problem der Verfrachtung radioaktiver Spu- renstoffe in der Atmosphäre	10,— DM
Nr. 56 E. Kling: Ein thermo-elektrisch geregeltes Frigorimeter zur wirkungsbezogenen Messung der meteorologischen Umweltbedingungen in der Landwirtschaft	6,— DM
Nr. 57 R. Trappenberg: Ein Beitrag zu den Windverhältnissen in den ersten 100 m der Atmosphäre	8,— DM
Nr. 58 H.-W. Georgii: Über die Eiskeimbildung in unterkühlten Wolken in ihrer Abhängigkeit von atmosphärischem Aerosol	7,— DM
Nr. 59 Alexander von Humboldt-Gedenkfeier in Frank- furt a. M. am 19. Juni 1959	5,— DM

Band 9

Nr. 60 D. Ottmar: Beiträge zur Phänologie Spaniens auf Grund der phänologischen Beobachtungen des Spanischen Wetterdienstes 1943—1954	4,30 DM
Nr. 61 E. R. Reiter: Turbulenz im wolkenfreien Raum (Clear-Air-Tur- bulence)	10,80 DM
Nr. 62 H. Guss: Statistik der meteorologischen Eignung west-, nord- und mitteleuropäischer Flughäfen als gegen- seitige Ausweichhäfen	6,60 DM
Nr. 63: W. Lenke: Klimadaten von 1621—1650 nach Beobachtungen des Landgrafen Hermann IV. von Hessen (Uranophi- lus Cyriandrus)	9,60 DM
Nr. 64 R. Reidat: Klimadaten für Bauwesen und Technik (Lufttemperatur)	6,80 DM
Nr. 65 H. Haarländer: Beitrag zu einer Theorie stationärer Antizyklonen	9,— DM
Nr. 66 F. Albrecht: Jahreskarten des Wärme- und Wasserhaushaltes der Ozeane	4,— DM
Nr. 67 E. de Bary u. F. Möller: Die mittlere vertikale Verteilung von Wolken in Abhängigkeit von der Wetterlage	8,70 DM
Nr. 68 R. Holzapfel: Ergebnisse aerologischer Beobachtungen in Deutschland (Teil IV bis IX)	11,25 DM

Band 10

Nr. 69 E. Trautmann: Die Hagelhäufigkeit in Bayern (1952—1956)	3,30 DM
Nr. 70 M. Schneider: Gewebetemperaturen frostempfindlicher Teile von Weinreben vor der Blattentfaltung bei der Frost- schutzberegnung	4,15 DM
Nr. 71 H. Regula: Die meteorologischen Verhältnisse auf der Flug- strecke Deutschland — Südamerika	5,25 DM
Nr. 72 W. Dege: Wissenschaftliche Beobachtungen auf dem Nord- ostland von Spitzbergen 1944—1945	14,85 DM
Nr. 73 E. Frankenberger: Beiträge zum Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58. 1. Meß-Ergebnisse und Berechnungen zum Wärmehaushalt der Erdoberfläche	10,50 DM
Nr. 74 F. Fuß: Der Einfluß der Bodenbedeckung auf das Klima des Bodens und der bodennahen Luft	6,— DM
Nr. 75 W. Lenke: Bestimmung der alten Temperaturwerte von Tü- bingen und Ulm mit Hilfe von Häufigkeitsvertei- lungen	8,70 DM
Nr. 76 Freilandversuche 1959 zur Frostbekämpfung durch Geländeheizung	8,40 DM

Band 11

Nr. 77 M. Manig u. H. Schirmer: Das Klima des südlichen Schwarzwaldes. Ein- flüsse der Änderung des natürlichen Abflusses auf das Klima	11,10 DM
Nr. 78 H. Dudel: Über Schwankungen der zonalen Windkomponente 500 mb nach Anstiegen der solaren Aktivität	5,40 DM
Nr. 79 F. Albrecht: Der jährliche Gang der Komponenten des Wär- me- und Wasserhaushaltes der Ozeane	5,70 DM