

65

2802

2. Ex.

Berichte  
aus dem  
Institut für Meereskunde  
an der  
Christian-Albrechts-Universität Kiel

Nr. 52

1978

DOI 10.3283/IMM-BER-52

DIE STRUKTUR DER ATMOSPHÄRISCHEN  
TEMPERATUR- UND GEOPOTENTIALWELLEN  
UND DIE DURCH SIE HERVORGERUFENEN  
TRANSPORTE VON SENSIBLER ENERGIE UND DREHIMPULS  
WÄHREND EINES VIERTELJÄHRIGEN WINTERZEITRAUMS  
NOVEMBER 1967 - JANUAR 1968

von

Reinhard Strüfing



Pres. - Ex.!

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:

Institut für Meereskunde  
Abt. Maritime Meteorologie  
Düsternbrooker Weg 20  
D 2300 K i e l 1

DIE STRUKTUR DER ATMOSPHERISCHEN  
TEMPERATUR- UND GEOPOTENTIALWELLEN  
UND DIE DURCH SIE HERVORGERUFENEN  
TRANSPORTE VON SENSIBLER ENERGIE UND DREHIMPULS  
WÄHREND EINES VIERTELJÄHRIGEN WINTERZEITRAUMS  
NOVEMBER 1967 - JANUAR 1968

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung  
des Grades eines Diplommeteorologen des  
Fachbereiches Mathematik-Naturwissenschaften  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von: Reinhard Strüfing  
Referent: Prof. Dr. P. Speth  
Koreferent: Prof. Dr. Fr. Defant

Kiel 1978

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Überschuß an Strahlungsenergie für das Gesamtsystem Atmosphäre plus Ozean in den niederen Breiten und das Defizit im Bereich der Polarkalotte erfordern polwärts gerichtete atmosphärische und ozeanische Transporte von sensibler Energie. Desgleichen wird die atmosphärische Westwinddrift durch im wesentlichen nach Norden gerichtete Flüsse von Drehimpuls gegen die Bodenreibung aufrechterhalten. In den mittleren Breiten werden diese Transporte insbesondere durch die atmosphärischen Wellen- und Wirbelstörungen geleistet, die sich aus den stehenden und wandernden Störungen zusammensetzen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Struktur der atmosphärischen Wellen und der durch sie hervorgerufenen Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls. Dazu stehen in einem vierteljährigen Zeitraum im Winter 1967/68 im zwölfstündigen Abstand die Fourieranalysierten Temperatur- und Geopotentialfelder der Nordhemisphäre zwischen 850 und 100 mb zur Verfügung.

Die Struktur der atmosphärischen Wellen und die durch sie getätigten Flüsse sind durch die Wellenzahlen 1 bis 6 weitgehend bestimmt. Der Transport von sensibler Energie ergibt sich aus den Amplituden der Temperatur- und Geopotentialwellen und der Phasendifferenz zwischen ihnen, der Drehimpulstransport aus den Geopotentialamplituden, sowie der horizontalen Achsenneigung. Für zeitlich gemittelte Zustände werden diese Transporte und die obigen Kenngrößen im Wellenzahlenbereich untersucht. Auch wird der Variabilität mit der Zeit nachgegangen, wobei Beziehungen zwischen den einzelnen Transportgrößen aufgedeckt und für spezielle Wettersituationen besprochen werden.

## SUMMARY

The surplus of the radiation energy for the combined system atmosphere plus ocean in the lower latitudes and the deficit in the polar regions require atmospheric and oceanic poleward transports of sensible heat. In a similar way the westerlies are maintained by poleward transports of angular momentum against surface frictional effects. In the middle latitudes these transports are mainly due to atmospheric waves and vortices which are decomposed into standing and transient disturbances.

The present work is concerned with the structure of the atmospheric waves and the resulting transports of sensible heat and momentum. For that purpose the Fourier-analysed temperature and geopotential fields of the Northern Hemisphere for three months in winter 1967/68 are available every 12 hours between the 850 and the 100 mb level.

The structure and the transports of the atmospheric waves are largely determined by the first six wavenumbers. The flux of sensible heat results from the amplitudes of the temperature and geopotential waves and the phase difference between them, the momentum transport from the geopotential amplitudes and the horizontal tilt of these waves. For time-averaged states these transports and parameters are discussed in the zonal wavenumber domain. It follows a presentation of the temporal variability of the transports, whereby relations between the two kinds of fluxes of sensible heat and angular momentum are investigated. Also special forms of circulation are discussed with respect to transport behaviour.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Darstellung der Transporte in Fourierreihenform	6
2.1. Die zonale Harmonische Analyse der Geopotential- und Temperaturfelder	6
2.2. Der geostrophische Wind in Fourierkoeffizienten	7
2.3. Transporte als Produkt zweier Fourierreihen	10
2.3.1. Die gesamte zusammengesetzte Fourierreihe	10
2.3.2. Zonale Mittel	13
2.4. Diskussion der Gleichungen für die zonalen Transportmittel	14
2.4.1. Sensible Energie	14
2.4.2. Drehimpuls	17
3. Ausgangsdaten und ihre Aufbereitung	19
4. Die mittleren Verhältnisse im Zeitraum Nov. 67, Dez. 67, Jan. 68	20
4.1. Die Struktur der atmosphärischen Wellen	21
4.1.1. Amplituden der Temperatur- und Geopotentialwellen	21
4.1.2. Phasendifferenzen, horizontale und vertikale Achsenneigungen	23
4.1.2.a. Phasendifferenzen zwischen Temperatur- und Geopotentialwellen	24
4.1.2.b. Horizontale Achsenneigungen der Geopotentialwellen	24
4.1.2.c. Vertikalneigungen der Temperatur- und Geopotentialwellen	26

	Seite
4.2. Die durch die atmosphärischen Wellen hervorgerufenen Transporte	27
4.2.1. Sensible Energie	27
4.2.2. Drehimpuls	32
4.3. Horizontalverteilungen	35
5. Zeitliche Veränderlichkeit der Transporte im Zeitraum Nov. 67, Dez. 67, Jan. 68	38
5.1. Zeitreihen der Transporte von sensib- ler Energie und Drehimpuls im hemi- sphärischen Mittel	38
5.1.1. Hemisphärische Mittel der Trans- porte in Relation zu bestimmten Temperatur- und Geopotential- differenzen	40
5.1.2. Beiträge der Wellenzahlen 1 bis 6	41
5.2. Darstellung der Verhältnisse zu zwei ein- zelnen Terminen mit unterschiedlichem Zirkulationstypus	44
5.2.1. Charakteristik der Zirkulations- form am 5.11.1967 und am 20.1.1968	44
5.2.2. Struktur der atmosphärischen Wellen für die zwei unterschied- lichen Zirkulationsformen	45
5.2.3. Transporte der atmosphärischen Wellen für die zwei unterschied- lichen Zirkulationsformen	47
5.2.3.a. Sensible Energie	47
5.2.3.b. Drehimpuls	49
6. Schlußbemerkung	51
Literaturverzeichnis	54
Abbildungen	

## 1. EINLEITUNG

Die Sonne liefert die Energie, die zur Aufrechterhaltung der atmosphärischen Zirkulation und der Meeresströmungen notwendig ist. Während in den tropischen und subtropischen Breiten die einfallende Strahlung die ausgehende übertrifft, also ein Strahlungsüberschuß herrscht, wird im Bereich der höheren Breiten mehr Energie abgestrahlt als einfällt. Dies würde zu einer Aufheizung des Gesamtsystems Ozean und Atmosphäre in den niederen Breiten und einer Abkühlung in den subpolaren und polaren Gebieten führen, wenn nicht Energietransporte in meridionaler Richtung die Differenzen in den Strahlungsbilanzen ausgleichen würden. Besonders die horizontalen Flüsse von sensibler und latenter Wärme bauen den Überschuß der niederen Breiten ab und stellen in den Bereichen mit Strahlungsdefizit die für die Ausstrahlung notwendige Energie zur Verfügung.

In den Gebieten der Westwinddrift gibt die Atmosphäre über den Vorgang der Bodenreibung westlichen Drehimpuls an die Erde ab, im Bereich der Passate nimmt sie hingegen Drehimpuls von der Erdoberfläche auf. Die Passatwindzonen stellen also eine Quelle relativen Drehimpulses dar, die Bereiche der Westwinddrift eine Senke. Die meridionalen Flüsse von Drehimpuls von den Quellen zu den Senken erhalten die Westwinddrift gegen die Bodenreibung und damit auch den quasistationären Gleichgewichtszustand der Atmosphäre. Im Gegensatz zu den Wärmeflüssen, die in höheren Breiten nach Norden gerichtet sind, wird relativer Drehimpuls - wenn auch in sehr viel geringerem Umfang - von den polaren in die mittleren Breitenzonen transportiert.

Es stellt sich nun die Frage, in welchem Maße Vorgänge in der atmosphärischen Zirkulation zu den genannten

Transporten beitragen. Die allein durch die mittlere Meridionalzirkulation hervorgerufenen Flüsse würden, wie man gezeigt hat, nicht ausreichen, den quasistationären Gleichgewichtszustand zu erhalten. In diesem Zusammenhang ist auf die sich fortbewegenden Zyklonen zu verweisen, die gekoppelt mit den atmosphärischen Wellen in den gemäßigten Breiten den größten Teil der Flüsse hervorrufen. Deren Bedeutung tritt durch Betrachtung der Transportvorgänge im sogenannten gemischt räumlich-zeitlichen Bereich ("mixed space-time domain") hervor. In diesem Verfahren werden die beteiligten Größen sowohl zeitlich als auch räumlich gemittelt. Dabei setzen sich die Flüsse, geleistet durch die gesamte Meridionalzirkulation, zusammen aus den Beiträgen der mittleren Meridionalzirkulation, den stehenden und den wandernden Wellen, siehe z.B. P. SPETH (1974a, 1974b). Als stehend bezeichnet man die langen atmosphärischen Wellen, die im mittleren Geopotential- oder Temperaturfeld sichtbar sind und ihre Ursache in der Verteilung von Land und Meer haben. Die wandernden Wellen stellen hingegen die zeitliche Veränderlichkeit der Geopotential- und Temperaturfelder dar.

Berechnungen der meridionalen atmosphärischen Flüsse im zonalen Mittel nach dem "mixed space-time domain" - Verfahren wurden von A.H. OORT und E.M. RASMUSSEN (1971) durchgeführt, deren vertikal gemittelte Ergebnisse für den Monat Januar als charakteristischen Wintermonat Abb. I enthält. Es zeigt sich, daß die wandernden und stehenden Wellen nördlich  $40^{\circ}\text{N}$  den Hauptbeitrag zum Transport sensibler Energie leisten, während der negative, d.h. nach Süden gerichtete Wärmefluß südlich  $25^{\circ}\text{N}$  fast ausschließlich durch die mittlere Meridionalzirkulation verursacht ist. Die durch Wellen hervorgerufenen Transporte sind nur nach Norden gerichtet, abgesehen von einem geringen Beitrag der stehenden Wellen in den niederen Breiten zum negativen Wärmefluß. In  $50^{\circ}\text{N}$  wird der Transportanteil der stehenden Wellen maximal und



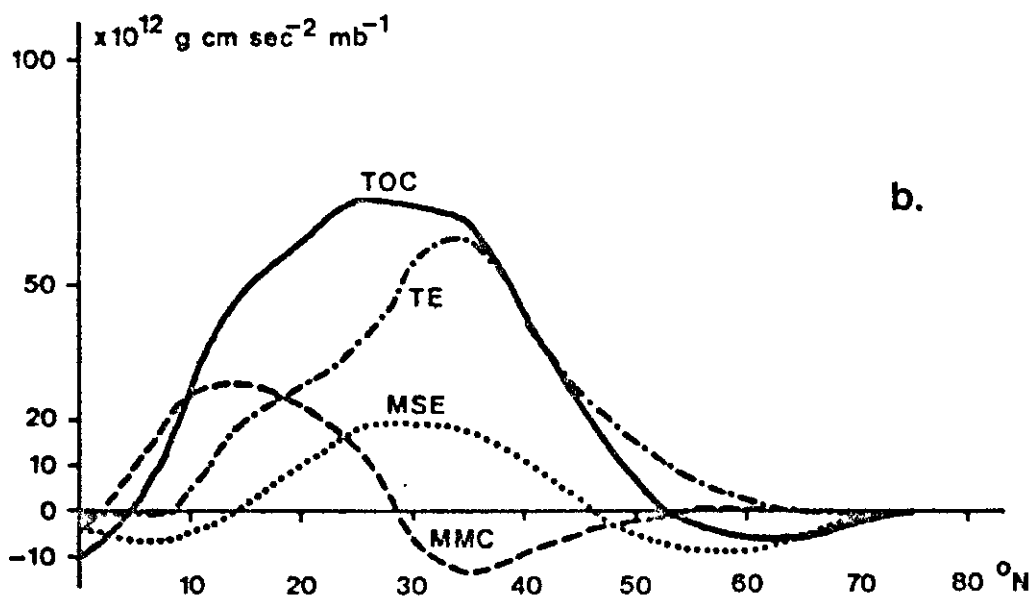
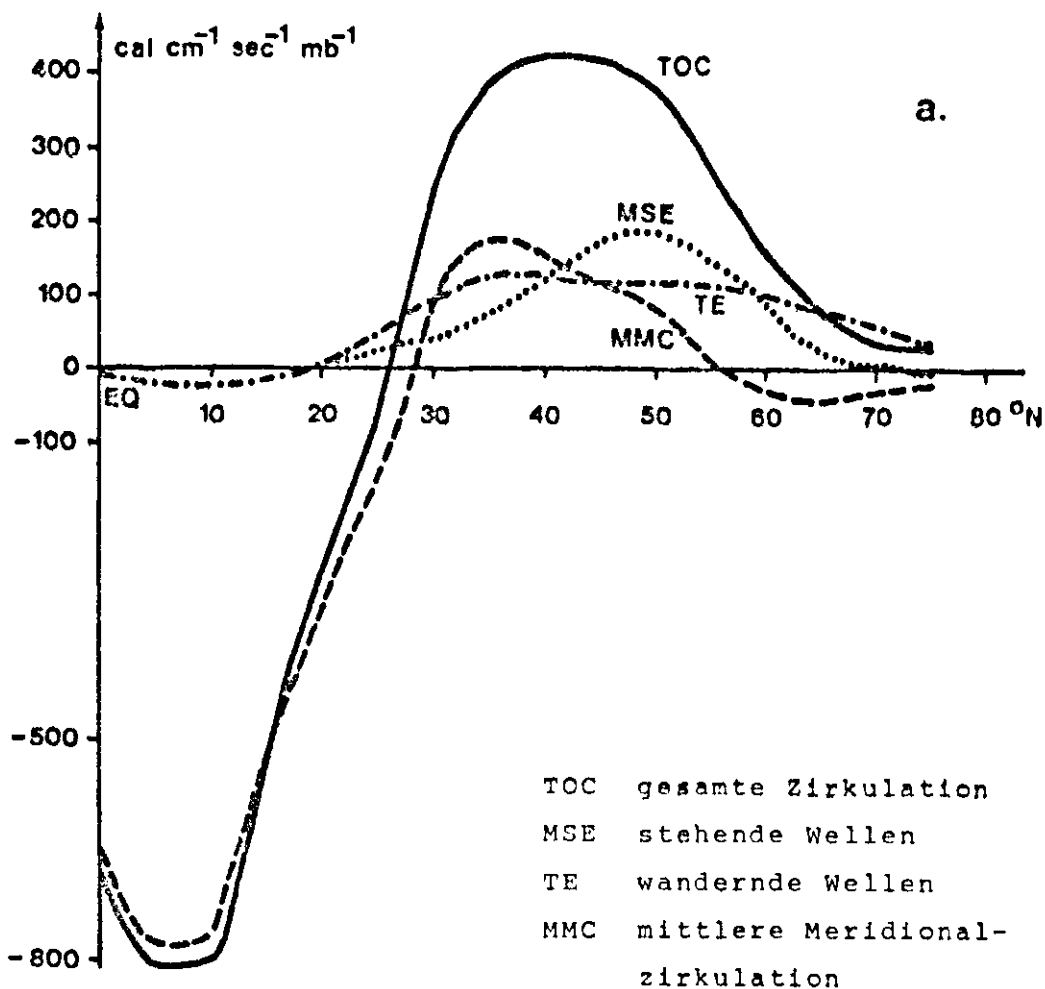


Abb. I:

Zonale Mittelwerte der meridionalen Transporte von sensibler Energie (a) und Drehimpuls (b) nach A.H. OORT u. E.M. RASMUSSEON (1971), entnommen aus P. SPETH (1974a). Positive Zahlen entsprechen nordwärts gerichteten Transporten. Vertikale Mittelwerte von 1000 bis 50 mb in  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{mb}^{-1}$  ( $=419 \text{ W m}^{-1} \text{mb}^{-1}$ ) und  $10^{12} \text{g cm sec}^{-2} \text{mb}^{-1}$ . Die Breitenkreismittel sind mit dem Cosinus der geogr. Breite gewichtet.

liegt über dem Beitrag der wandernden Wellen. Das Wärme-flußmaximum der gesamten atmosphärischen Zirkulation richtet sich bei etwa  $40^{\circ}\text{N}$  ein.

Die größten Transporte von Drehimpuls nach Norden (Abb. Ib) finden hingegen weiter südlich zwischen  $25^{\circ}$  und  $30^{\circ}\text{N}$  statt, wobei der Anteil der wandernden Wellen den der stehenden beträchtlich übertrifft. Maximale Beiträge der mittleren Meridionalzirkulation findet man bei  $15^{\circ}\text{N}$ , während die von Wellen verursachten Anteile erst zwischen  $30^{\circ}$  und  $35^{\circ}\text{N}$  größte Werte erreichen. Nördlich  $30^{\circ}\text{N}$  ist die mittlere Meridionalzirkulation für den Fluß von Drehimpuls von relativ geringer Bedeutung. Die nördlich von etwa  $55^{\circ}\text{N}$  nach Süden gerichteten Transporte werden insbesondere durch die stehenden Wellen erzeugt.

Die Transportvorgänge fanden in den letzten zwei Jahrzehnten vermehrtes Interesse, da durch den Ausbau des Netzes von Radiosondenstationen umfangreiches Datenmaterial verfügbar wurde, das im Rahmen verbesserter Computertechnik leichter zu verarbeiten war. Neben der bereits genannten Untersuchung von A.H. OORT und E.M. RASMUSSEN (1971) beschäftigten sich Arbeiten von N.J. MACDONOLD u. H.M. FRAZIER (1969), S.L. HASTENRATH (1968), A. WIIN-NIELSEN et al. (1963), A.J. MILLER et al. (1970) und E.R. REITER (1969) insbesondere mit der Erstellung von Übersichten der atmosphärischen Flüsse, während S.K. KAO et al. (1970) und S.K. KAO und J.F. SAGENDORF (1970) die Transporte im Wellenzahlen-Zeit-Spektralbereich untersuchten. Aufgabe der Arbeit von E. ELIASSEN (1958) und S.K. KAO (1970) war es, die Struktur der langen atmosphärischen Wellen darzustellen. SATO (1974) und H. van LOON et al. (1973) bezogen sich dabei nur auf die stehenden Wellen.

Im Gegensatz zur Untersuchung der stehenden Wellen von A. OSTHAUS (1978) ist es Aufgabe dieser Arbeit, im zonalen Wellenzahlenbereich die Struktur der atmosphärischen

Wellen zu untersuchen und die durch sie hervorgerufenen Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls zu beschreiben. Als Datenmaterial stehen dazu im Zeitraum 15.10.1967 bis 1.2.1968 für 00<sup>h</sup> und 12<sup>h</sup>GMT die Geopotential- und Temperaturfelder der Nordhemisphäre in Form zonaler Fourierkoeffizienten zur Verfügung.

Es werden also die atmosphärischen Wellenvorgänge dargestellt, die auf den täglichen Wetterkarten sichtbar sind und sich aus den *stehenden* und *wandernden* Wellen zusammensetzen. Die Anteile der einzelnen Wellenarten sind dabei jedoch von der Wellenzahl abhängig. So überlagern sich den stehenden Wellen, die durch die drei ersten Wellenzahlen weitgehend bestimmt sind, wie A. OSTHAUS in der schon zitierten Arbeit gezeigt hat, in diesem Wellenzahlenbereich wandernde Wellen von geringer Amplitude. Die wandernden Wellen sind dann für die höheren Wellenzahlen von Bedeutung.

Nach Darstellung der mathematischen Grundlagen und der Aufbereitung der Daten (Abschnitt 2 u. 3) beschäftigt sich Abschnitt 4 mit der Struktur der atmosphärischen Wellen und den mittleren Verhältnissen der Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls; in Abschnitt 5 wird dann der Versuch unternommen, die zeitliche Veränderlichkeit der Transporte im Mittelungszeitraum dadurch zu beschreiben, daß auf die Verhältnisse an zwei einzelnen Terminen von recht unterschiedlicher Zirkulationsform und auf Zeitreihen der Flüsse im hemisphärischen Mittel eingegangen wird.

## 2. DARSTELLUNG DER TRANSPORTE IN FOURIERREIHENFORM

### 2.1. DIE ZONALE HARMONISCHE ANALYSE DER GEOPOTENTIAL- UND TEMPERATURFELDER

Zur Untersuchung der langen atmosphärischen Wellen erscheint die Methode der zonalen Harmonischen Analyse ein besonders geeignetes Hilfsmittel zu sein. Dabei werden die Parameter, z.B. die geopotentielle Höhe  $\phi$  entlang eines Breitenkreises  $\phi$  aufgefaßt als eine periodische Funktion der geographischen Länge  $\lambda$  auf einem Intervall, das den gesamten Breitenkreis umfaßt. Die zonale Harmonische Analyse nähert für jeden einzelnen Breitenkreis diese periodische Funktion durch eine trigonometrische Summe an. Am Schnittpunkt des Breitenkreises  $\phi$  mit dem Längenkreis  $\lambda$  gilt:

(2.1.1)

$$\phi(\phi, \lambda) = A_0^\phi / 2 + \sum_{n=1}^N \{ a_n^\phi(\phi) \cos n\lambda + b_n^\phi(\phi) \sin n\lambda \}$$

$$\text{mit:} \quad A_0^\phi(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \phi(\phi, \lambda) \, d\lambda$$

$$a_n^\phi(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \phi(\phi, \lambda) \cos n\lambda \, d\lambda$$

$$b_n^\phi(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \phi(\phi, \lambda) \sin n\lambda \, d\lambda$$

Diese Fourierreihe läßt sich in eine Form umschreiben, die für die Meteorologie anschauliche Informationsmöglichkeiten enthält:

$$(2.1.2) \quad \hat{\phi}(\phi, \lambda) = A_0^\phi / 2 + \sum_{n=1}^N A_n^\phi \sin(n\lambda - \theta_n^\phi)$$

wobei gilt:

$$(2.1.3) \quad A_n^\phi = \sqrt{a_n^{\phi 2} + b_n^{\phi 2}}$$

$$\theta_n^\phi = \arctan(a_n^\phi / b_n^\phi)$$

Die Form der atmosphärischen Wellen entlang eines Breitenkreises  $\phi$  wird also bestimmt durch  $n$  sinusförmige Wellen, deren Beiträge sich aus den Amplituden  $A_n$  und den Phasenwinkeln  $\theta_n$  gegenüber einem Bezugsmeridian ergeben, wie in Abb. II dargestellt, und die sich einem zonalen Mittelwert  $A_0/2$  überlagern. Bei Wellenzügen, die gegen den Bezugsmeridian nach Westen verschoben sind, ist  $\theta_n$  positiv. Zur Bedeutung der  $A_n$  und  $\theta_n$  für die Transporte sei auf Abschnitt 2.4. verwiesen.

Zu beachten ist, daß die den Wellenzahlen zugeordneten Wellenlängen mit der Zunahme der geographischen Breite geringer werden, da die Länge des Intervalls, der Erdumfang an den einzelnen Breitenkreisen, zum Pol hin abnimmt. So hat Wellenzahl 3 nach Tabelle 1 in  $30^\circ\text{N}$  eine Wellenlänge von 11556 KM, in  $60^\circ\text{N}$  aber nur noch von 6672 KM.

## 2.2. DER GEOSTROPHISCHE WIND IN FOURIERKOEFFIZIENTEN

Die Gleichungen für den geostrophischen Wind in Polarkoordinaten lauten:

$$(2.2.1.a) \quad u = -\frac{g}{f} \frac{\partial \phi}{a \partial \phi}$$

$$(2.2.1.b) \quad v = \frac{g}{f} \frac{\partial \phi}{a \cos \phi \partial \lambda}$$

f: Coriolisparameter

g: Erdbeschleunigung

a: Erdradius

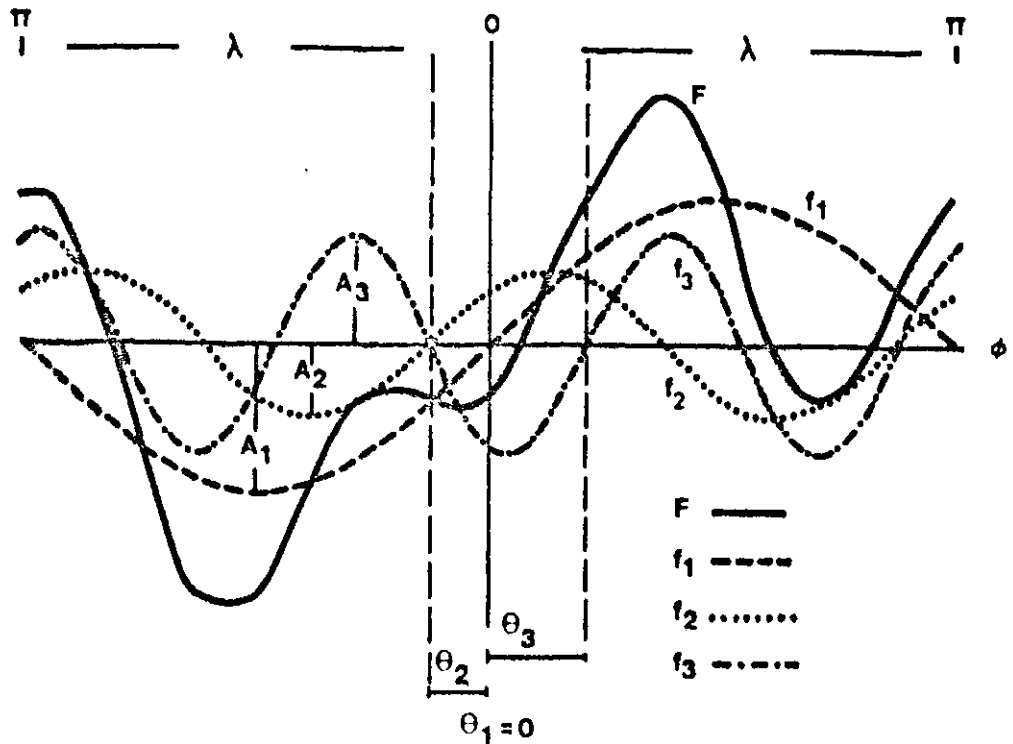


Abb. II:  
 Beispiel für die Entwicklung einer meteorologischen Funktion  $F(\phi, \lambda)$  um einen Breitenkreis mit Hilfe der Harmonischen Analyse.

Tabelle 1: Wellenlänge in km der Wellenzahlen 1 bis 8 in Abhängigkeit von der geographischen Breite

	1	2	3	4	5	6	7	8
80°N	6951	3476	2317	1738	1390	1159	993	869
70°N	13691	6846	4564	3423	2738	2282	1956	1712
60°N	20015	10008	6672	5004	4003	3336	2859	2502
50°N	25731	12866	8577	6433	5146	4289	3676	3217
40°N	30665	15333	10222	7666	6133	5111	4381	3833
30°N	34667	17334	11556	8667	6933	5778	4952	4334
20°N	37616	18808	12539	9404	7523	6269	5374	4702

Durch Einsetzen der Fourierreihe der geopotentiellen Höhe ergeben sich folgende Gleichungen:

$$(2.2.2a) \quad u_{(\phi, \lambda)} = \bar{u}_{(\phi)} + \sum_{n=1}^N \{ a_n^u(\phi) \cos n\lambda + b_n^u(\phi) \sin n\lambda \}$$

$$(2.2.2b) \quad v_{(\phi, \lambda)} = \sum_{n=1}^N \{ a_n^v(\phi) \cos n\lambda + b_n^v(\phi) \sin n\lambda \}$$

mit:

$$(2.2.3a) \quad \bar{u} = - \frac{g}{f \cdot a} \frac{\partial (A \frac{\phi}{2})}{\partial \phi}, \quad \bar{v} = 0 \quad 1)$$

$$(2.2.3b) \quad a_n^u = \frac{g}{f \cdot a} \frac{\partial a_n^\phi}{\partial \phi}, \quad b_n^u = - \frac{g}{f \cdot a} \frac{\partial b_n^\phi}{\partial \phi}$$

$$(2.2.3c) \quad a_n^v = \frac{g}{f \cdot a \cdot \cos \phi} n b_n^\phi, \quad b_n^v = - \frac{g}{f \cdot a \cdot \cos \phi} n a_n^\phi$$

Bei einer zonalen Harmonischen Analyse für alle Breitengrade in einem Abstand von  $\Delta\phi$  werden die Differentialquotienten in Gl. 2.2.3.b angenähert durch die Differenzenquotienten:

$$(2.2.4) \quad \frac{\partial a_n^u}{\partial \phi} = \frac{2\Delta\phi}{\pi} \left( a_{n(\phi+\Delta\phi)} - a_{n(\phi-\Delta\phi)} \right)$$

1) Bei Annahme geostrophischer Bedingungen ist die mittlere Meridionalgeschwindigkeit gleich null zu setzen.

### 2.3. TRANSPORTE ALS PRODUKT ZWEIER FOURIERREIHEN

#### 2.3.1. Die gesamte zusammengesetzte Fourierreihe

Der meridionale Transport sensibler Energie  $S$  ist bestimmt durch das Produkt aus der Temperatur  $T$  und der Meridionalgeschwindigkeit  $v$ . Der Transport zwischen den Druckflächen  $p_1$  und  $p_2$  über einen Breitenkreis ergibt sich pro Längeneinheit wie folgt:

$$(2.3.1) \quad S = \int_{p_1}^{p_2} c_p T v \frac{dp}{g}$$

$c_p$ : spez. Wärme bei konstantem Druck

Beim Transport von Drehimpuls ist zu beachten, daß sich der absolute Drehimpuls aus einem Term des relativen und einem Term des durch die Rotation der Erde hervorgerufenen Drehimpulses zusammensetzt. Wichtig ist jedoch der Fluß von relativem Drehimpuls  $M$ , der durch das Produkt der Zonalgeschwindigkeit  $u$  und der Meridionalgeschwindigkeit  $v$  gegeben ist:

$$(2.3.2) \quad M = \int_{p_1}^{p_2} R \cos \phi u v \frac{dp}{g}$$

mit:  $R = a \cos \phi$

Unter Benutzung der Fourierreihen werden die Transporte durch das Produkt zweier Reihen beschrieben. Im folgenden soll am Beispiel des Transports sensibler Energie dieses Produkt zu einer Fourierreihe umgeformt werden, deren Koeffizienten sich aus den Fourierkoeffizienten der Ausgangsreihen ergeben.



Komplex lassen sich die Reihen für T und v wie folgt schreiben:

$$(2.3.3) \quad T(\lambda) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n^T e^{in\lambda} \quad v(\lambda) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n^V e^{in\lambda}$$

$$\begin{aligned} \text{als Produkt: } T(\lambda) \cdot v(\lambda) &= \left[ \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n^T e^{in\lambda} \right] \left[ \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n^V e^{in\lambda} \right] \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_n^T c_m^V e^{i(n+m)\lambda} \right] \end{aligned}$$

Mit:

$$(2.3.4) \quad \begin{aligned} c_n &= \frac{1}{2} (a_n - i b_n) \quad \text{für } n, m > 0 \\ c_n &= \frac{1}{2} (a_n + i b_n) \quad \text{für } n, m < 0 \\ c_0 &= a_0/2 \end{aligned}$$

wird die komplexe Reihe wieder in die reelle Form überführt. Einsetzen und Zusammenfassen unter Berücksichtigung von

$$(2.3.5) \quad \cos n\lambda = \frac{e^{in\lambda} + e^{-in\lambda}}{2} \quad \sin n\lambda = \frac{e^{in\lambda} - e^{-in\lambda}}{2i}$$

führen zu:

$$\begin{aligned} T(\lambda) \cdot v(\lambda) &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2} (a_n^T a_m^V - b_n^T b_m^V) \cos((n+m)\lambda) + \frac{1}{2} (a_n^T b_m^V + b_n^T a_m^V) \sin((n+m)\lambda) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} (a_n^T a_m^V + b_n^T b_m^V) \cos((n-m)\lambda) - \frac{1}{2} (a_n^T b_m^V - b_n^T a_m^V) \sin((n-m)\lambda) \right] \end{aligned}$$

Weiter umgeformt ist das Produkt zweier Fourierreihen  
n-ter Ordnung eine Fourierreihe 2n-ter Ordnung:

$$(2.3.6) \quad T(\lambda) \cdot v(\lambda) = a_{0/2}^S + \sum_{k=1}^K \{ a_k^S \cos k\lambda + b_k^S \sin k\lambda \}$$

mit:

$$(2.3.7) \quad A_0^S = \sum_{k=1}^{K/2} (a_k^T a_k^v + b_k^T b_k^v) \quad 1)$$

$$(2.3.8) \quad a_k^S = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{K/2} \left[ \sum_{m=0}^{K/2} \delta_{k, (n+m)} (a_n^T a_m^v - b_n^T b_m^v) + \delta_{k, (|n-m|)} (a_n^T a_m^v + b_n^T b_m^v) \right]$$

$$(2.3.9) \quad b_k^S = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{K/2} \left[ \sum_{m=0}^{K/2} \delta_{k, (n+m)} (a_n^T b_m^v + b_n^T a_m^v) - \text{sign}(n-m) \delta_{k, (|n-m|)} (a_n^T b_m^v - b_n^T a_m^v) \right]$$

wobei:

$$a_0^T \equiv a_{0/2}^T \quad K = 2N$$

$$\delta_{k, (|n+m|)} = \begin{cases} 1 & \text{für } k = |n+m| \\ 0 & \text{für } k \neq |n+m| \end{cases}$$

$$\text{sign}(n-m) = \begin{cases} -1 & n < m \\ 0 & \text{für } n = m \\ 1 & n > m \end{cases}$$

1) Für  $k=0$  gilt:  $a_0^v = 0$ ; da  $b_0^T, b_0^v, b_0^u$  sowieso null sind,  
wird das Summenglied für  $k=0$  außer Acht gelassen.

### 2.3.2. Zonale Mittel

Während alle Wellenzahlen  $n, m$  der Ausgangsreihen sehr unübersichtlich ihren Beitrag zu jeder einzelnen Wellenzahl  $k$  der Transportreihe leisten, sind nach Gl. 2.3.7. die zonalen Mittel  $A_O^S/2$  und  $A_O^M/2$  einfach die Summen der zonalen Mittel der einzelnen Wellenzahlen. Diesen gilt neben der Berechnung der horizontalen Transportverteilung, wozu die gesamte Fourierreihe benötigt wird, besonderes Interesse, da sich aus ihnen Rückschlüsse auf die Transportmechanismen ziehen lassen.

Dazu sind die Gleichungen der zonalen Mittel jedoch in Ausdrücke der Amplituden und Phasen für Geopotential und Temperatur umzuschreiben. Unter Anwendung von Gl. 2.3.1. und Gl. 2.3.7. gilt für den Transport sensibler Energie im zonalen Mittel:

$$\bar{S}^\lambda = c_p \int_{P_1}^{P_2} (A_{O/2}^S) \frac{dp}{g} = c_p/2 \int_{P_1}^{P_2} \left( \sum_{k=1}^N (a_k^T a_k^v + b_k^T b_k^v) \right) \frac{dp}{g}$$

Außerdem ist nach Gl. 2.1.3:

$$(2.3.10) \quad a_n = A_n \sin \theta_n \quad b_n = A_n \cos \theta_n$$

Einsetzen nach Gl. 2.2.3.c, Gl. 2.3.10. und Anwenden der Additionstheoreme führen dann zu:

$$(2.3.11) \quad \bar{S}^\lambda = c_p/2 \frac{g}{f \cdot a \cdot \cos \phi} \int_{P_1}^{P_2} \left( \sum_{k=1}^N k A_k^\phi A_k^T \sin (\theta_k^T - \theta_k^\phi) \right) \frac{dp}{g}$$

Das zonale Mittel des Drehimpulstransports ist nach Gl. 2.3.2. und Gl. 2.3.7.:

$$\bar{M}^\lambda = R \cos \phi \int_{P_1}^{P_2} (A_{o/2}^M) \frac{dp}{g} = R \cos \phi / 2 \int_{P_1}^{P_2} \left( \sum_{k=1}^N (a_k^u a_k^v + b_k^u b_k^v) \right) \frac{dp}{g}$$

Umformen nach Gl. 2.2.3.b, Gl. 2.2.3.c, Gl. 2.2.4. und Anwenden der Additionstheoreme ergeben:

(2.3.12)

$$\bar{M}^\lambda = \frac{g^2 \Delta \phi \cos \phi}{f^2 a \pi} \int_{P_1}^P \left( \sum_{k=1}^N k A_{k,\phi}^\phi \left( \Lambda_{k,(\phi-\Delta\phi)}^\phi \sin \left( \theta_{k,(\phi-\Delta\phi)}^\phi - \theta_{k,\phi}^\phi \right) + A_{k,(\phi+\Delta\phi)}^\phi \sin \left( \theta_{k,\phi}^\phi - \theta_{k,(\phi+\Delta\phi)}^\phi \right) \right) \right) \frac{dp}{g}$$

## 2.4. DISKUSSION DER GLEICHUNGEN FÜR DIE ZONALEN TRANSPORTMITTEL

### 2.4.1. Sensible Energie

Aus Gl. 2.3.11. geht hervor, daß der Beitrag der Wellenzahl  $k$  zum zonal gemittelten Transport sensibler Energie ( $S_k$ ) durch das Produkt der Wellenzahl  $k$ , der Amplituden des Geopotentials und der Temperatur und durch die Phasendifferenz zwischen diesen beiden Wellen bestimmt ist. Die Abhängigkeit der Flüsse fühlbarer Wärme von der Wellenzahl  $k$  resultiert nach Gl. 2.2.3.c aus der meridionalen Windgeschwindigkeit.

Die Phasendifferenz zwischen Geopotential- und Temperaturwelle bestimmt, inwieweit und mit welchem Vorzeichen der durch das Produkt aus Wellenzahl und Amplituden vorgegebene maximale Betrag von  $S_k$  erreicht wird. Wenn die Temperaturwelle, z.B. um  $\pi/2$  weiter westlich als die Geopotentialwelle liegt, sind die Wellen der Temperatur und

der Meridionalgeschwindigkeit phasengleich, da letztere ebenfalls um  $\pi/2$  gegen die Geopotentialwelle verschoben ist. Im Trogbereich wird dann kalte Luft nach Süden ( $T_k^-, v_k^-$ ) transportiert, im Bereich des Rückens warme Luft nach Norden ( $T_k^+, v_k^+$ ). In diesem speziellen Fall ist der Fluß fühlbarer Wärme über den gesamten Bereich der geographischen Breite positiv. Allgemein bestimmt jedoch das Phasenverhalten der Temperatur- zur Geopotentialwelle, welcher der Bereiche mit positivem oder negativem Transport überwiegt.

Abb. III zeigt auf einem Breitenkreis für eine beliebige Wellenzahl  $k$  die sinusförmigen Kurven des Geopotentials, der Temperatur und der meridionalen Windgeschwindigkeit. Im Fall A nimmt die Phasendifferenz zwischen den  $T_k$ - und  $\phi_k$ -Kurven ( $\alpha_k$ ) den Wert null an. Da die Bereiche mit positiver Korrelation zwischen T- und v-Werten den Bereichen negativer Korrelation entsprechen, finden im zonalen Mittel bei  $\alpha_k=0$ , ebenso wie bei  $\alpha_k = \pm\pi$  keine Transporte von sensibler Energie statt.

Im Fall B ist die  $T_k$ -Kurve um 0 bis  $\pi$  gegen die  $\phi_k$ -Kurve verschoben. Die Bereiche positiver Korrelationen überwiegen und  $S_k$  ist positiv. Im schon behandelten Fall C nimmt  $S_k$  mit  $\alpha_k = \pi/2$  Maximalwerte an. In Fall D hingegen, in dem  $\alpha_k$  negativ ist, überwiegen die Bereiche negativer Korrelationen der T- und v-Werte, so daß  $S_k$  negativ wird.

Im zonalen Mittel ist der meridionale Transport sensibler Energie für jede einzelne Wellenzahl  $k$  also positiv, wenn die Temperaturwelle zwischen 0 und  $\pi$  westlicher als die Welle geopotentieller Höhe liegt, jedoch negativ bei einem Vorsprung der Temperaturwelle von 0 bis  $\pi$  nach Osten.

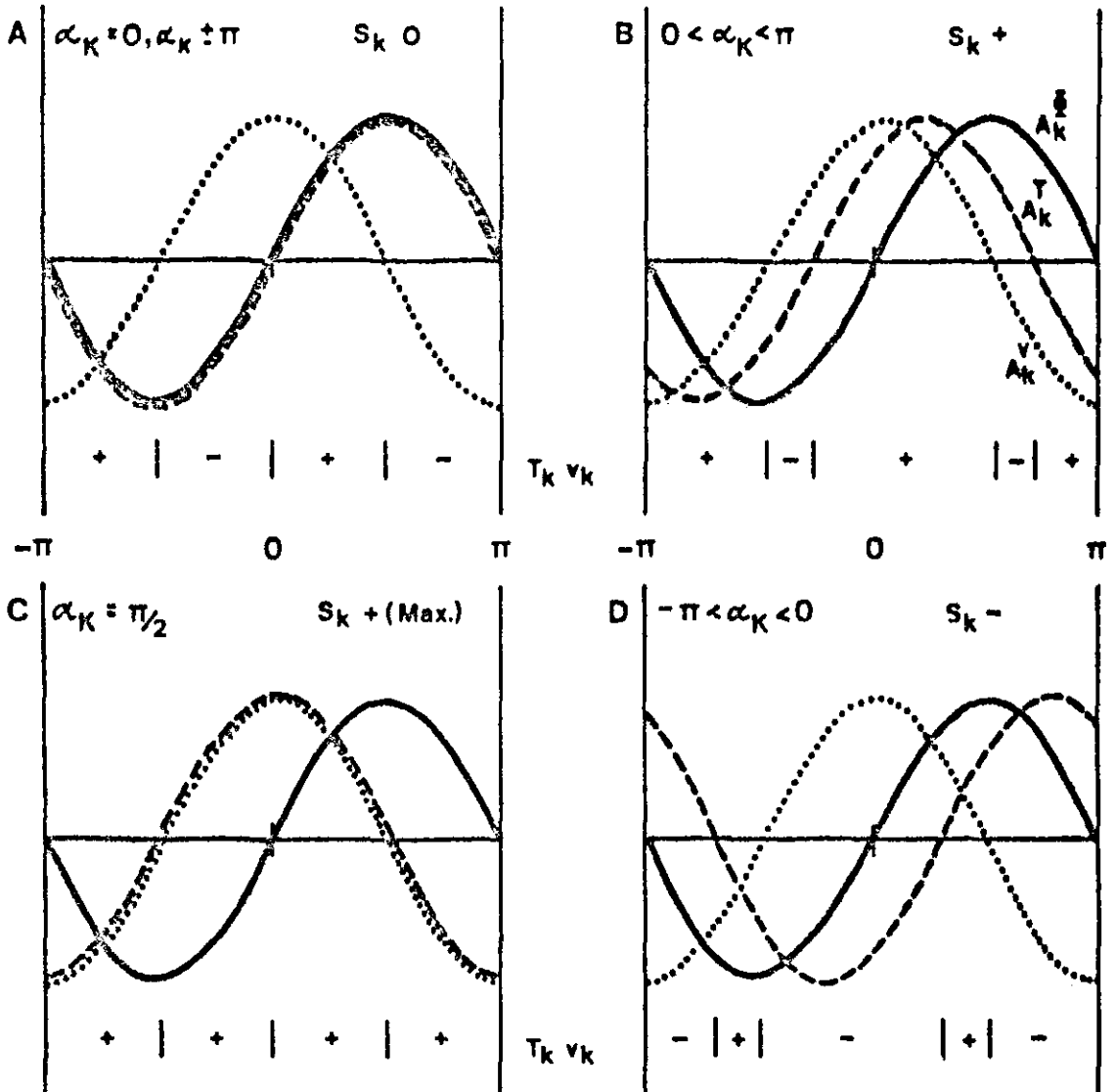


Abb. III:

Die Transporte von sensibler Energie  $S_k$  als Funktion der Phasendifferenz  $\alpha_k$  für die sinusförmigen Kurven des Geopotentials  $\phi_k$  und der Temperatur  $T_k$ . Die Kurve der Meridionalgeschwindigkeit  $v_k$  ist gegen die von  $\phi_k$  um  $\pi/2$  verschoben.  $\alpha_k$  ist positiv, wenn  $T_k$ -Kurve westlicher liegt als  $\phi_k$ -Welle.

### 2.4.2. Drehimpuls

Nach Gl. 2.3.12. ist der Transport von Drehimpuls der Wellenzahl  $k$  bestimmt durch das Produkt aus Wellenzahl, Geopotentialamplituden am Breitenkreis  $\phi$  und den benachbarten Breiten, sowie durch die horizontale Achsenneigung im Geopotentialfeld. Wenn beide Sinusterme positiv sind, ergeben sich für den Fluß von Drehimpuls positive Werte, d.h. der Transport ist nach Norden gerichtet. In diesem Fall liegt die Trogachse der geographischen Breite  $\phi + \Delta\phi$  weiter östlich als die des Breitenkreises  $\phi$ , was einer Achsenneigung von Südwest nach Nordost entspricht.

Wie Abb. IV zeigt, hat dies seine Ursache darin, daß bei einer SW-NO-Achsenneigung die langen atmosphärischen Wellen auf der Vorderseite eines Geopotentialtroges infolge der stärkeren Isohypsendrängung mehr Drehimpuls nach Norden transportieren als auf der Rückseite nach Süden, siehe auch J. BJERKNES (1951) und A. u. Fr. DEFANT (1958). Bei einer horizontalen Achsenneigung von Südost nach Nordwest fließt dann Drehimpuls nach Süden, während keine Drehimpulstransporte stattfinden, wenn die Achsen im Geopotentialfeld meridional ausgerichtet sind.

In den einzelnen Wellenzahlen bewirkt eine positive Achsenneigung, daß die  $u_k$ - und  $v_k$ -Komponenten nicht mehr um  $\pi/2$  verschoben sind, wie dies bei einem Achsenverlauf von Süd nach Nord der Fall ist. Die Phase der Meridional-Komponente wird durch die Geopotentialwelle an der Breite  $\phi$  bestimmt, während sich die  $u_k$ -Komponente aus der Phasenlage an den benachbarten Breiten ergibt. Wie Abb. IV veranschaulicht, verschieben sich bei einer Neigung von Südwest nach Nordost die Wellen von  $u_k$  und  $v_k$  derart, daß die Bereiche positiver Korrelationen überwiegen.

Nach den Drehimpulstransporten, dargestellt in Abb. I, ist daher zu erwarten, daß die Achsen im Geopotentialfeld der niederen und mittleren Breiten von Südwest nach

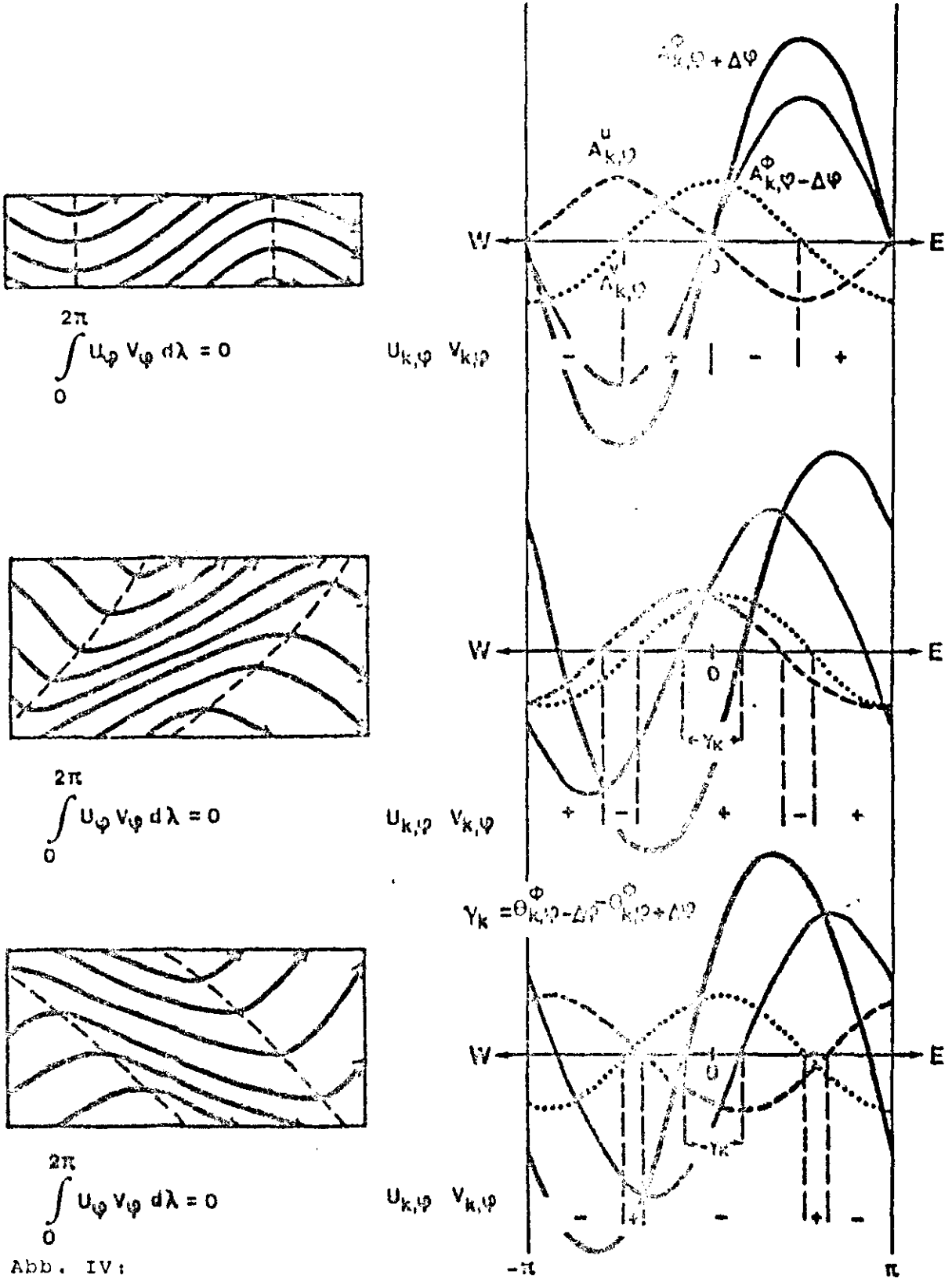


Abb. IV:

Die Relation zwischen horizontaler Achsenneigung der Geopotentialwellen und der Richtung des zonal gemittelten Transports von Drehimpuls für atmosphärische Wellen (n. DEFANT/DEFANT (1958), S. 335) und sinusförmige Wellenzüge einzelner Wellenzahlen (r.). Bei  $\gamma_k = 0$  kein Transport (oben), für  $\gamma_k > 0$  Drehimpulsfluß nach Norden (Mitte), Transport nach Süden bei  $\gamma_k < 0$  (unten).



Nordost ausgerichtet sind, in höheren Breiten aber einen Verlauf von Nordwest nach Südost einnehmen.

### 3. AUSGANGSDATEN UND IHRE AUFBEREITUNG

Als Ausgangsdaten standen die Geopotential- und Temperaturfelder der Nordhemisphäre in 6 Standarddruckflächen zur Verfügung, dargestellt auf dem Gitternetz des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach. Zwecks Reduktion der Daten analysierte K. ARPE (1971) die meteorologischen Felder mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen, aus deren Koeffizienten dann die Fourierkoeffizienten bestimmt wurden.

Diese Rechnungen erfolgten zweimal täglich für den Zeitraum 15. Oktober 1967, 12<sup>h</sup> GMT bis zum 1. Februar 1968, 00<sup>h</sup> GMT in den Niveaus 850, 700, 500, 300, 200 und 100 mb. Die Daten umfassen also für 218 Termine mit Ausnahme der planetarischen Reibungsschicht die Troposphäre und die untere Stratosphäre. Die Fourierkoeffizienten liegen bis zur 11. Ordnung für alle 2,5 Breitengrade zwischen 10° und 87,5°N vor.

Um nun für den Winter charakteristische Werte zu erhalten, wurde eine Mittelung über die Monate November, Dezember und Januar, also über 185 Termine vorgenommen. Die 33 Termine des Monats Oktober 1967 wurden dabei außer Acht gelassen, da sie nicht die Verhältnisse der winterlichen Zirkulation wiedergeben. Sich bei einer Betrachtung der Struktur der atmosphärischen Wellen und der durch sie hervorgerufenen Transporte nur auf einen Monat, z.B. den Januar zu beziehen, erscheint wenig sinnvoll; die Eigenheiten der Zirkulation in diesem Zeitraum können die Ergebnisse erheblich verfälschen.

#### 4. DIE MITTLEREN VERHÄLTNISSE IM ZEITRAUM NOVEMBER, DEZEMBER 1967, JANUAR 1968

In diesem Kapitel wird zuerst für die Wellenzahlen 1 bis 6, durch die, wie noch zu zeigen ist, die Transporte bereits weitgehend bestimmt sind, die mittlere Struktur der atmosphärischen Wellen dargestellt. Sie ergibt sich aus den Amplituden des Geopotentials und der Temperatur, sowie den horizontalen und vertikalen Achsenneigungen. Es folgt eine Beschreibung der Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls, die durch die atmosphärischen Wellen hervorgerufen werden. Zum Schluß wird noch auf die Horizontalverteilungen eingegangen. Da der Mittelungszeitraum, ein Vierteljahr im Winter 1967/68, einige Eigenheiten enthält, wird besonderer Wert darauf gelegt, diese durch Vergleich mit anderen Arbeiten herauszustellen.

Die zu untersuchenden Größen wurden zu den einzelnen Terminen berechnet und dann über den gesamten Zeitraum gemittelt. Die Darstellung der zonalen Mittel erfolgt durch Meridionalschnitte zwischen  $20^{\circ}$  und  $80^{\circ}\text{N}$  und Wellenzahlspektren für einzelne Niveaus in den Breiten  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  und  $60^{\circ}\text{N}$ . Letztere Breiten wurden ausgewählt, um den gesamten Bereich der atmosphärischen Wellen zu erfassen. Bei  $30^{\circ}\text{N}$  sind, wie schon Abb. I zeigt, zudem die Flüsse von Drehimpuls am stärksten. Die Meridionalschnitte sind auf die Breiten zwischen  $20^{\circ}$  und  $80^{\circ}\text{N}$  beschränkt, da einerseits nördlich  $80^{\circ}\text{N}$  die mit dem Cosinus der geographischen Breite gewichteten Flüsse klein sind und andererseits südlich  $20^{\circ}\text{N}$  Geostrophiebedingung und geringere Radiosondenstationsdichte die Ergebnisse verfälschen.

#### 4.1. DIE STRUKTUR DER ATMOSPHERISCHEN WELLEN

##### 4.1.1. *Amplituden der Temperatur- und Geopotentialwellen*

Analog zur Betrachtung der stehenden Wellen von A. OSTHAUS (1978) wurde in Abb. 1 der prozentuale Anteil an der gesamten Amplitudensumme aller 11 Wellenzahlen aufgetragen, den die ersten sechs Wellenzahlen der atmosphärischen Wellen hervorrufen. Dieser Anteil liegt für die Temperatur- und Geopotentialwellen in 850 mb bei ca. 75 % in 30°N und steigt mit zunehmender geographischer Breite und zu höheren Niveaus bis knapp 100 % in 70°N an. In diesem Größenbereich liegen auch die Anteile, die im Monat Januar für die stehenden Wellen schon durch die ersten drei Wellenzahlen bewirkt werden. Bei den allgemeinen atmosphärischen Wellen, die keiner Aufteilung im "space-time domain" unterlagen, erreichen die Wellenzahlen 1 bis 3 in den mittleren Breiten nur Anteile von ca. 60 %. Hier sind also die Wellenzahlen 4 bis 6 besonders zu beachten.

In den Wellenzahlspektren (Abb. 2 u. 3) ist demnach die Abnahme der Amplituden mit zunehmender Wellenzahl für die atmosphärischen Wellen geringer als bei den stehenden Wellen allein. In den oberen Druckflächen und höheren Breiten ist sie stärker ausgeprägt. Letzteres beruht wohl auch auf der Verringerung der Wellenlänge mit zunehmender Breite, entsprechend Tabelle 1. Der starke Amplitudenabfall mit zunehmender Wellenzahl in den oberen Druckflächen hat seine Ursache darin, daß die den höheren Wellenzahlen zuzuordnenden Zyklonen die Atmosphäre in Tropopausennähe und in der unteren Stratosphäre kaum beeinflussen.

Interessant ist die im Vergleich zu den benachbarten Wellenzahlen größere Amplitude der Wellenzahl 6 in 30°N, insbesondere im Geopotentialfeld von 200 und 300 mb. Wie noch zu zeigen ist, sind die Tröge der drei orographiebedingt stehenden Wellen gerade in diesem Bereich durch

die horizontale Achsenneigung stark deformiert. Nach E.R. REITER (1969) wird deshalb Wellenzahl 6 als erste Oberwelle angeregt.

Wie aus den mittleren Meridionalschnitten für die Wellenzahlen 1 bis 6 (Abb. 4 u. 5) zu erkennen ist, weisen die Temperatur- und Geopotentialamplituden unterschiedliche Vertikalstrukturen auf. Dies ist auch aus Abb. 6 ersichtlich. Infolge der großen Temperaturoegensätze in der unteren Troposphäre, die sich mit abnehmendem Druck abschwächen, verringern sich auch die Amplituden der Temperaturwellen bis 300 mb, während die der Geopotentialwellen größer werden und für die Wellenzahlen 3 bis 6 höchste Werte in 200 bis 300 mb erreichen. Oberhalb 300 mb steigen die Temperaturamplituden dieser Wellenzahlen zu einem Sekundärmaximum in 200 mb an. Für die Wellenzahlen 1 und 2 sind die Maxima sowohl der Temperatur- als auch der Geopotentialamplituden in 100 mb zu finden.

Auch in der Lage der größten Amplituden in bezug auf die geographische Breite unterscheiden sich die ersten beiden Wellenzahlen von den vier weiteren, siehe auch Abb. 7. Die Maxima der Amplituden im Temperaturfeld liegen für die Wellenzahlen 1 und 2 in der Höhe bei  $60^{\circ}\text{N}$ , in der unteren Troposphäre für Wellenzahl 1 in  $70^{\circ}\text{N}$  und für Wellenzahl 2 in  $60^{\circ}\text{N}$ . Erstere verfügt unterhalb 200 mb als einzige Wellenzahl über ein Sekundärmaximum in  $45^{\circ}\text{N}$ . Die größten Temperaturamplituden der Wellenzahlen 3 bis 5 befinden sich in  $50^{\circ}\text{N}$  und resultieren aus den großen zyklonalen Wirbelstörungen, die entlang der Polarfront mit einer mittleren Lage von  $50^{\circ}\text{N}$  zu finden sind. Wellenzahl 6 hat in  $40^{\circ}\text{N}$  größte Amplitudenwerte, so daß man, über alle Wellenzahlen betrachtet, mit zunehmender Wellenzahl eine Verlagerung der Maxima nach Süden feststellen kann. Die größten Geopotentialamplituden stimmen in der Breitenlage gut mit den Maxima der Temperatur überein.

Die höchsten Amplitudenwerte weist Wellenzahl 1 mit  $6,3^{\circ}\text{C}$

in 850 mb und 183 gpm in 100 mb auf. Zu höheren Wellenzahlen verringern sich dann die Amplituden, betragen aber für Wellenzahl 6 noch etwa ein Drittel der Maximalwerte der ersten Wellenzahl.

Die Lage der größten Amplituden der Wellenzahlen 1 und 2 in der 100-mb-Druckfläche der höheren Breiten wird durch die starke Ausstrahlung hervorgerufen. Dieser Prozeß - er bewirkt auch den Polarnachtjetstream - verursacht eine Vergrößerung des meridionalen Gradienten und der Amplituden im Temperatur- und Geopotentialfeld. Da die Atmosphäre in der Höhe und auch am Boden in diesen Bereichen im wesentlichen nur durch die Asymmetrie der Zirkulation (Wellenzahl 1) und die beiden Tröge über dem Asiatischen und Amerikanischen Kontinent (Wellenzahl 2) bestimmt ist, bezieht sich die Vergrößerung der Amplituden praktisch nur auf diese Wellenzahlen. Die Doppelstruktur der Wellenzahl 1 in den Geopotentialwellen ist in 300 mb am stärksten ausgeprägt, da das südlichere Maximum in  $50^{\circ}\text{N}$  die Asymmetrie des Polarjets darstellt.

#### *4.1.2. Phasendifferenzen, horizontale und vertikale Achsenneigungen*

Diese Größen wurden, wie auch die mittleren Amplituden und Transporte, durch arithmetische Mittelung gewonnen. So berechnete Phasendifferenzen und Achsenneigungen ergeben allerdings nur einen Überblick über die Verhältnisse, weil die Winkeldifferenzen zyklische Größen sind und großen Schwankungen unterliegen, so daß die Mittelwerte relativ gering sind. In den Vorzeichen und teilweise auch in der Lage größter Werte ergab sich jedoch - wie später noch beschrieben wird - eine fast exakte Übereinstimmung mit den Transporten. Daher wurde auf die Angabe der üblicherweise berechneten Varianzen verzichtet, zumal bei dieser Mittelungsart auch die wichtige Vorzeicheninformation fortfällt. Die Werte der Maxima können bei den einzelnen Untersuchungen nur von untergeordneter Bedeutung sein.

Die in diesem Abschnitt zu untersuchenden Größen werden *im Bogenmaß* angegeben, da eine Darstellung in Winkelgraden von der Wellenzahl abhängig ist und so direkte Vergleichsmöglichkeiten zwischen den Wellenzahlen verhindert.

#### 4.1.2.a. Phasendifferenzen zwischen Temperatur- und Geopotentialwellen

Die Meridionalschnitte der zeitlich gemittelten Phasendifferenz für die Wellenzahlen 1 bis 6 (Abb. 8) zeigen überwiegend positive Werte. In diesem Fall ist die Temperaturwelle gegen die Geopotentialwelle nach Westen verschoben. Ähnlich den mittleren Amplituden im Temperaturfeld verzeichnen die Phasendifferenzen größte Werte in 850 und 200 bis 100 mb. Die geringsten Phasenverschiebungen sind in der mittleren Troposphäre zu finden. Die Maxima in der Höhe beschränken sich auf den Bereich von  $35^{\circ}$  bis  $55^{\circ}$ N, in der unteren Troposphäre treten teilweise mehrere Maxima der Phasendifferenz auf. Bei höheren Werten, die sich über einen größeren Bereich erstrecken, scheinen die Maxima der Wellenzahlen 1 bis 3 deutlicher ausgeprägt zu sein. Größere, negative Werte sind für die Wellenzahlen 2 und 3 in den höheren Niveaus der niederen Breiten zu finden.

#### 4.1.2.b. Horizontale Achsenneigungen der Geopotentialwellen

Die Horizontalneigungen der Achsen im Geopotentialfeld ergeben sich aus den Phasendifferenzen der Geopotentialwellen zwischen zwei Breitenkreisen, hier im Abstand von  $2,5^{\circ}$ . Um neben der Darstellung der mittleren horizontalen Achsenneigung im Geopotentialfeld für die Wellenzahlen 1 bis 6 im Meridionalschnitt (Abb. 9) auch den horizontalen Verlauf der Trogachsen aufzuzeigen, wurde Abb. 10 entworfen. Hier werden die horizontalen Phasendifferenzen der Geopotentialwellen zwischen den Breitengraden  $\phi$  und  $\phi - 2,5$  von  $80^{\circ}$ N nach Süden hin bis  $20^{\circ}$ N aufsummiert. Daraus er-

gibt sich an den einzelnen Breitenkreisen die Phasenlage und damit auch die Trogachsenlage in bezug auf  $80^{\circ}\text{N}$ .

In der Abbildung der mittleren Meridionalschnitte entsprechen positive Werte einer Ausrichtung der Achsen von Südwest nach Nordost. Daraus geht hervor, daß die größten horizontalen Achsenneigungen im Geopotentialfeld zumeist in 200 mb im Bereich um  $30^{\circ}\text{N}$  zu finden sind. Somit stimmen die maximalen Amplituden der Geopotentialwellen (siehe Abb. 5) in den Druckflächen in etwa überein mit den größten Achsenneigungen, weichen aber in der geographischen Breite voneinander ab. Lediglich Wellenzahl 3 hat maximale Achsenneigungen in 400 bis 500 mb und für Wellenzahl 5 liegen diese bei  $40^{\circ}$  bis  $45^{\circ}\text{N}$ .

Die größten mittleren Horizontalneigungen der Geopotentialwellen verzeichnet Wellenzahl 1. Hier sind die Trogachsen bis zu  $18^{\circ}$  pro 2,5 Breitengrade gegeneinander verschoben. Dies zeigt sich auch im horizontalen Achsenverlauf; der Trog ist für Wellenzahl 1 besonders in 200 mb zwischen  $20^{\circ}$  und  $40^{\circ}\text{N}$  sehr stark von Südwest nach Nordost ausgerichtet. Im Bereich von  $20^{\circ}$  bis  $80^{\circ}$  ergibt sich eine Verlagerung der Trogachsen von ca. einer halben Wellenlänge. In diesem Fall liegt der Rücken in  $20^{\circ}\text{N}$  auf demselben Meridian wie der Trog in  $80^{\circ}\text{N}$ .

Negative Achsenneigungen weisen insbesondere die Wellenzahlen 2 und 3 in den mittleren und höheren Breiten auf. Sie erstrecken sich in 850 mb weiter nach Süden als in den oberen Druckflächen. Die Achsen der Wellenzahl 3 sind also in 500 und 200 mb südlich  $50^{\circ}\text{N}$  von SW nach NO ausgerichtet, nördlich dieses Breitenkreises von NW nach SO. Für Wellenzahl 2 neigen sich die Achsen erst südlich  $40^{\circ}\text{N}$  stärker von Südwest nach Nordost. Die maximalen negativen Neigungen im Geopotentialfeld nehmen erheblich geringere Werte an als die größten positiven.

Wie bei der mittleren Phasendifferenz (siehe Abb. 8) sind für die Wellenzahlen 1 bis 3 ausgeprägtere Maxima

der Achsenneigung zu finden als für die höheren Wellenzahlen. Die Achsen letzterer sind dann auch nur meist leicht von Südwest nach Nordost ausgerichtet. In 850 mb vorzeichnen die Wellenzahlen 4 und 5 geringe Neigungen von Nordwest nach Südost.

#### 4.1.2.c. Vertikalneigungen der Temperatur- und Geopotentialwellen

Aussagen über die mittleren Vertikalneigungen der atmosphärischen Wellen als Funktion der geographischen Breite erlaubt Abb. 11, wobei für positive Werte die Achse im oberen Niveau weiter westlich liegt. Zwecks besserer Vergleichsmöglichkeiten wurden die vertikalen Phasendifferenzen auf einen Druckunterschied von 100 mb normiert.

Man entnimmt dieser Abbildung, daß die Achsen im Temperaturfeld stärker geneigt sind und auch größere Schwankungen in bezug auf die geographische Breite aufweisen als die des Geopotentialfelds. Letztere sind fast ausschließlich nach Westen geneigt mit größten Werten zwischen 850 und 700 mb, ausgenommen Wellenzahl 1. In diesem Atmosphärenbereich neigen sich die Achsen der Temperaturwellen häufig nach Osten, in den höheren Druckflächen aber teilweise in größerem Umfang nach Westen.

Dies bedeutet, daß sich die Geopotentialachsen entsprechend der Struktur der Zyklonen besonders in der unteren Troposphäre mit abnehmendem Druck nach Westen neigen, und die Achsen der Temperaturwellen zwischen 850 und 500 mb meist nach Osten geneigt sind. Aus diesen Tendenzen resultiert die Abschwächung der im vorigen Abschnitt behandelten Phasendifferenz zwischen Temperatur- und Geopotentialwellen (siehe Abb. 8) von den untereren Druckflächen bis 500 mb. Bei den geringen Gegensätzen oberhalb 300 mb sind Temperatur und Geopotential in ihren Wellenformationen dort nur wenig gekoppelt. Dies äußert sich oftmals in einer Vergrößerung der Phasendifferenz,



die bei kaum vorhandener Vertikalneigung im Geopotentialfeld zu größeren vertikalen Neigungen im Temperaturfeld führt.

#### 4.2. DIE DURCH DIE ATMOSPHERISCHEN WELLEN HERVORGERUFENEN TRANSPORTE

In diesem Abschnitt werden die zonalen Mittel der Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls untersucht. Eine darüberhinaus führende Betrachtung der Amplituden der Flüsse erscheint wenig sinnvoll, da sie infolge der unübersichtlichen Zusammensetzung nach Gl. 2.3.6, nicht mit den Geopotential- und Temperaturwellen zu vergleichen sind.

##### 4.2.1. *Sensible Energie*

In Abb. 12 sind die zeitlich und zonal gemittelten Flüsse von sensibler Energie im Meridionalschnitt und vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb dargestellt. Dieser Bereich ergibt sich aus der übergreifenden Mittelung zwischen 850 und 100 mb. Zu Vergleichszwecken wurden auch die Ergebnisse von A.H. OORT u. E.M. RASMUSSEN (1971) aufgetragen, die sich ebenfalls auf den Zeitraum November bis Januar beziehen, allerdings im *Mittel über fünf Jahre*, und die sich aus den stehenden und wandernden Wellen ergeben.

Im vertikalen Mittel wird über den gesamten Bereich von  $20^{\circ}$  bis  $80^{\circ}$ N fühlbare Wärme nach Norden transportiert. Die größten Flüsse finden mit 304 Einheiten in  $50^{\circ}$ N in der Nähe der Polarfront statt. Aus den Meridionalschnitten ist zu erkennen, daß sich die Bereiche maximaler Transporte von  $47,5^{\circ}$ N in 850 mb bis zu  $55^{\circ}$ N in 100 mb leicht nach Norden verlagern. Man entnimmt Abb. 12 ferner, daß die maximalen Transporte mit 417 Einheiten in 850 mb mit zunehmender Höhe bis 500 oder 300 mb geringer werden. In 100 mb erreichen sie dann ein zweites

Maximum mit 301 Einheiten. Negative Flüsse sind nur in  $20^{\circ}$  bis  $30^{\circ}\text{N}$  in der Schicht zwischen 100 und 200 mb zu finden.

Ähnliche Ergebnisse erzielten auch OORT u. RASMUSSEN (O. u. R.), wobei sich die vertikalen Mittel kaum unterscheiden. In den mittleren Meridionalschnitten ergeben sich jedoch Abweichungen insbesondere nahe der Tropopause, denn bei O.u.R. erreichen die Flüsse sensibler Energie das Sekundärmaximum schon in 200 mb und nehmen dann zu 100 mb hin wieder leicht ab. Schwankungen dieser Art treten zumindest bei den stehenden Wellen auf, wie P. SPETH u. A. OSTHAUS (1978) für 10 Januarmonate gezeigt haben. Neben diesen Unterschieden, die auf den Mittelungszeitraum zurückzuführen sind, können Abweichungen auch durch die Anwendung der Fourieranalyse und die Annahme geostrophischen Windes hervorgerufen werden.

Wie schon bei den Amplituden gezeigt, sind bei den zu untersuchenden Wellen auch die höheren Wellenzahlen zu beachten. In Abb. 13 wird der vertikal gemittelte totale Transport von sensibler Energie unterteilt in Beiträge der Wellenzahlen 1 bis 3, 4 bis 8 und 7 bis 11. Die Wellenzahlen 4 bis 8 tragen südlich  $55^{\circ}\text{N}$  in annähernd dem gleichen Umfang zum Fluß fühlbarer Wärme bei wie die ersten drei Wellenzahlen. Nördlich  $55^{\circ}\text{N}$  überwiegen jedoch die letzteren. Die größten Transporte sind für die Gruppe der Wellenzahlen 1 bis 3 bei  $50$  bis  $55^{\circ}\text{N}$  zu finden, für die der Wellenzahlen 4 bis 8 bei etwa  $45^{\circ}\text{N}$ .

Die Darstellung der durch die Wellenzahlengruppen geleisteten Beiträge in den einzelnen Druckflächen (Abb. 14) ergibt einen wachsenden Einfluß der ersten 3 Wellenzahlen mit zunehmender Höhe. In der unteren Troposphäre erzeugen die höheren Wellenzahlen, die mit den sich fortbewegenden zyklonalen Wirbelstörungen verbunden sind, zwar südlich  $50^{\circ}\text{N}$  höhere Transporte sensibler Energie. Diese verringern sich aber zu den oberen Niveaus hin permanent.

Die Beiträge der Gruppe der Wellenzahlen 1 bis 3 steigen nach minimalen Werten in 300 bis 500 mb zu den darüberliegenden Niveaus wieder an, so daß besonders in 100 mb der Fluß fühlbarer Wärme fast ausschließlich durch die ersten 3 Wellenzahlen bestimmt ist. Das im zonalen Mittel aller Wellenzahlen erkennbare Anwachsen des Transports sensibler Energie zu den höheren Niveaus ist also durch die Wellenzahlen 1 bis 3 hervorgerufen. Dies ist im Einklang mit früheren Bestimmungen von A. WIIN-NIELSEN et al. (1963).

In Abb. 13 u. 14 wurden auch die Anteile der Wellenzahlen 7 bis 11 aufgetragen. Diese sind im vertikalen Mittel gering und haben größten Einfluß in 850 mb. Aussagen darüber, welchen Beitrag die Wellenzahlen 1 bis 6 zum absoluten Gesamttransport leisten, lassen sich aus Abb. 15 entnehmen. Im vertikalen Mittel werden durch die ersten sechs Wellenzahlen in  $30^{\circ}\text{N}$  und  $45^{\circ}\text{N}$  ca. 80 %, in  $60^{\circ}\text{N}$  fast 100 % des absoluten Gesamttransports von sensibler Energie verursacht; für die Wellenzahlen 1 bis 3 sind es 35 bis 75 %. Aus der Darstellung in den einzelnen Niveaus geht hervor, daß der Anteil der Wellenzahlen 1 bis 6 nur im 850 mb-Niveau in  $30^{\circ}\text{N}$  unter 80 % liegt. Dort wird ca. ein Drittel des absoluten Gesamttransports durch die Wellenzahlen 7 bis 11 geleistet.

Abb. 16 enthält für die Wellenzahlen 1 bis 6 die mittleren Meridionalschnitte des Transports sensibler Energie. Die Flüsse der einzelnen Wellenzahlen sind mit wenigen Ausnahmen nach Norden gerichtet. Wesentlich von null verschiedene negative Transporte werden, der negativen Phasendifferenz (siehe Abb. 8) in diesem Bereich entsprechend, nur durch die Wellenzahlen 2 und 3 in 100 und 200 mb südlich  $35^{\circ}\text{N}$  geleistet. Dies kann aus der Umkehrung des meridionalen Temperaturgradienten resultieren; in diesen Niveaus sind die Temperaturwerte in den niederen Breiten geringer als in den mittleren.

Abb. 16 verdeutlicht auch das bereits festgestellte unterschiedliche Transportverhalten der Wellenzahlengruppen. Für die Wellenzahlen 1 bis 3 sind maximale Flüsse sensibler Energie in 850 mb und 200 bis 100 mb zu finden, die sich für die Wellenzahlen 4 und 5 nur auf 850 mb beschränken. Das Maximum der Wellenzahl 6 in 200 mb ist im Vergleich zu den ersten drei Wellenzahlen geringer ausgeprägt.

Ein Vergleich mit den Meridionalschnitten der Temperaturamplituden (Abb. 4) zeigt, daß die Maxima der Flüsse fühlbarer Wärme sowohl in der geographischen Breite als auch in den Druckflächen mit den größten Amplituden der Temperaturwellen übereinstimmen. Man kann deshalb davon ausgehen, daß dieselben meteorologischen Vorgänge, die das Amplitudenverhalten bestimmen, auch die Transporte sensibler Energie entsprechend beeinflussen. Unterschiede ergeben sich lediglich für die Wellenzahlen 4 bis 6 in den oberen Niveaus. Bei den Wellenzahlen 4 und 5 sind dort im Gegensatz zu den Amplituden und Phasendifferenzen maximale Transporte von sensibler Energie nicht zu finden. Für Wellenzahl 6 liegen letztere in 200 mb im Bereich größter Phasendifferenzen, gegen das Maximum der Amplituden um 10 Breitengrade verschoben. Hier ist daher bei geringen Amplituden ein Einfluß der Phasendifferenz zwischen Temperatur- und Geopotentialwellen festzustellen.

Die größten Flüsse erzeugen in den oberen Niveaus die Wellenzahlen 1 und 2 mit 110 Einheiten. In 850 mb trägt Wellenzahl 3 mit 100 Einheiten am stärksten zum Fluß fühlbarer Wärme bei, siehe auch S.K. KAO u. J.F. SAGENDORF (1970).

Die Darstellung der Transporte als Funktion der geographischen Breite (Abb. 17) zeigt, daß Wellenzahl 1 in 850 mb in geringerem Umfang fühlbare Wärme nach Norden transportiert als die Wellenzahlen 2 und 3, obwohl deren Amplituden der Temperatur- und Geopotentialwellen (siehe Abb. 7)



teilweise geringer sind. Auch die Maxima der Wellenzahlen 2 und 4 liegen in der unteren bis mittleren Troposphäre über denen der Wellenzahl 1. Ursache dafür ist die Abhängigkeit des Transports sensibler Energie von der Wellenzahl.

Südllich  $40^{\circ}\text{N}$  erzeugt Wellenzahl 6 größere Transporte als die Wellenzahlen 4 und 5. Das Wellenzahlspektrum (Abb. 15) gibt darüber weitere Auskunft. Um die durch die einzelnen Wellenzahlen bewirkten Flüsse besser vergleichen zu können, wurden in dieser Abbildung die Absolutbeträge aufgetragen. Negative Transporte sensibler Energie sind durch Minuszeichen unterhalb der Spektren gekennzeichnet. In  $30^{\circ}\text{N}$  leistet Wellenzahl 6 in 850 mb die größten Beiträge zum Fluß fühlbarer Wärme und wird in 200 und 300 mb nur von Wellenzahl 1 übertroffen. Die Dominanz der Wellenzahl 6 gegenüber den benachbarten Wellenzahlen beruht auf den relativ großen Amplituden, auf der bereits angesprochenen Proportionalität der Flüsse zur Wellenzahl  $k$  und wohl auch auf der in diesen Breiten größeren Phasendifferenz.

Vergleicht man die Meridionalschnitte des Transports sensibler Energie (Abb. 16) mit denen der Phasendifferenz (siehe Abb. 8), so zeigt sich, daß trotz arithmetischer Mittelung der Winkelgrößen die Bereiche positiver (neg.) Flüsse recht gut mit den positiven (neg.) Phasendifferenzen übereinstimmen. Abweichungen treten nur in Bereichen geringer Flüsse, bzw. kleiner Differenzen zwischen den Phasen der Temperatur- und Geopotentialwellen auf. Sie entstehen dann, wenn zu einem Termin größere Flüsse mit kleineren Phasendifferenzen gekoppelt sind und sich zum nächsten Termin bei negativen Flüssen die Verhältnisse umkehren. Das Mittel kann dabei geringe positive Transporte bei kleinen negativen Werten für die Phasendifferenz ergeben.

#### 4.2.2. Drehimpuls

Abb. 12 bringt auch den zonal gemittelten Fluß von Drehimpuls der atmosphärischen Wellen im Meridionalschnitt und vertikalen Mittel zur Darstellung, wobei analog zum Transport sensibler Energie zu Vergleichszwecken auch die Ergebnisse von A.H. OORT u. E.M. RASMUSSEN (1971) aufgetragen wurden.

Im vertikalen Mittel finden südlich  $60^{\circ}\text{N}$  umfangreiche positive Transporte von Drehimpuls mit maximalen Werten bei  $35^{\circ}\text{N}$  statt, während die sehr schwachen Flüsse nördlich  $60^{\circ}\text{N}$  nach Süden gerichtet sind. Die Zone größter Konvergenz von Drehimpuls, die man aus der Abschwächung des Transports mit zunehmender Breite erkennen kann, befindet sich zwischen  $40^{\circ}$  und  $60^{\circ}\text{N}$  im Bereich der Westwinde. Im Vergleich zu O.u.R. ist die Kurve der eigenen Resultate um annähernd 5 Breitengrade nach Norden verschoben, wobei das Maximum mit 83 Einheiten geringer ausfällt.

Die mittleren Meridionalschnitte zeigen eine Zunahme der Drehimpulstransporte von 850 bis 200 mb, wo sie im Bereich höchster Windgeschwindigkeiten ein Maximum erreichen. Die eigenen, im vertikalen Mittel sehr geringen negativen Flüsse erklären sich dadurch, daß einerseits die nach Norden gerichteten Transporte sich in 100 und 200 mb bis  $75^{\circ}\text{N}$  erstrecken und andererseits die negativen Flüsse in den darunterliegenden Druckflächen gering sind.

Die Abweichungen zu den von O.u.R. berechneten Drehimpulstransporten sind ähnlich wie beim Fluß fühlbarer Wärme von der Wahl des Mittelungszeitraums abhängig. Für den Transport von Drehimpuls sei dabei verwiesen auf die Differenzen in der zonal gemittelten geopotentiellen Höhe, die sich zu O.u.R. ergeben. Die Abb. 19 präsentiert diese Differenzen in einem Meridionalschnitt. Danach liegt im Zeitraum Nov., Dez. 67, Jan. 68 insbesondere die transportintensive 200 mb-Druckfläche südlich  $45^{\circ}\text{N}$  tiefer, in mittleren Breiten jedoch höher als das fünfjährige Mittel

von OORT u. RASMUSSEN, bei denen die meridionale Geopotentialdifferenz zwischen  $30^{\circ}$  und  $60^{\circ}\text{N}$  in 200 mb etwa 700 gpm beträgt. Die mit ca. 70 gpm um 10 % geringere eigene Geopotentialdifferenz verursacht eine weniger intensive Zonalzirkulation, die im Einklang mit obigen Resultaten geringerer Drehimpulstransporte ist. Diese Zusammenhänge wären jedoch durch Modellrechnungen nachzuprüfen.

In den Abb. 20 u. 21 werden die Drehimpulstransporte im vertikalen Mittel und in den einzelnen Druckflächen nach den Wellenzahlengruppen 1 bis 3, 4 bis 8 und 7 bis 11 aufgeteilt. Die Wellenzahlen 4 bis 8 leisten im vertikalen Mittel einen Beitrag zum zonal gemittelten Fluß von Drehimpuls, der nur wenig unter dem der Wellenzahlen 1 bis 3 liegt. Wie beim Transport sensibler Energie unterscheiden sich die allgemeinen atmosphärischen Wellen in diesem Punkt von den stehenden Wellen, wo nach A. OSTHAUS (1978) die Beiträge der ersten 3 Wellenzahlen den Transport von Drehimpuls weitgehend bestimmen. Bei den Flüssen von Drehimpuls kommt den Wellenzahlen 4 bis 8 eine größere Bedeutung zu, als dies beim Fluß fühlbarer Wärme (siehe Abb. 13) der Fall ist, wo die Anteile im vertikalen Mittel nördlich  $50^{\circ}\text{N}$  um ca. das Doppelte höher liegen. In den einzelnen Druckflächen, für die in 700 und 850 mb wegen der geringen Flüsse keine Aufteilung erfolgte, vergrößert sich der Anteil der Wellenzahlen 1 bis 3 am Transport von Drehimpuls mit zunehmender Höhe, wird aber erst in 100 mb dominierend. Für alle Wellenzahlengruppen liegen die Maxima des Drehimpulstransports nahe  $35^{\circ}\text{N}$ .

Aus der Darstellung der Wellenzahlengruppen geht hervor, daß der Anteil der Wellenzahlen 7 bis 11 gering ist. Entsprechend Abb. 22, die den prozentualen Anteil der Wellenzahlen 1 bis 6 am absoluten Gesamttransport darstellt, leisten die ersten sechs Wellenzahlen im vertikalen Mittel jeweils ca. 90 % in  $30^{\circ}$  und  $45^{\circ}\text{N}$ . Nur in 850 mb liegt der Anteil der Wellenzahlen 1 bis 6 im Bereich von  $30^{\circ}\text{N}$  bei 80 %. Der Fluß von Drehimpuls ist daher ähnlich den

Amplituden der Temperatur- und Geopotentialwellen und dem Fluß fühlbarer Wärme durch die Wellenzahlen 1 bis 6 weitgehend bestimmt.

Die mittleren Meridionalschnitte des Transports von Drehimpuls für die Wellenzahlen 1 bis 6 (Abb. 23) zeigen maximale Flüsse in den 200- oder 300-mb-Druckflächen, für die mit über 50 Einheiten transportintensivsten Wellenzahlen 1 und 3 bei  $35^{\circ}$  bzw.  $40^{\circ}$ N. Demgegenüber weist Wellenzahl 2 wesentlich geringere Transporte auf. Die nach Süden gerichteten Flüsse werden, der horizontalen Achsenneigung der Geopotentialwellen entsprechend, nur durch die Wellenzahlen 2 und 3 vornehmlich in der unteren bis mittleren Troposphäre erzeugt, wobei die negativen Maxima mit knapp -10 Einheiten in 300 mb nahe  $57,5^{\circ}$ N auffindbar sind.

Untersuchungen von A.J. MILLER et al. (1967) und S.K. KAO et al. (1970) kommen zu ähnlichen Ergebnissen, ordnen der Wellenzahl 2 aber größere negative Transporte zu. Außerdem übertrifft nach beiden Arbeiten Wellenzahl 3 die Flüsse der Wellenzahl 1 um das Doppelte, was hier nicht der Fall ist. Interessant sind auch die überraschend starken Flüsse für Wellenzahl 6 bei etwa  $30^{\circ}$ N. Die vorstehend erwähnten Untersuchungen messen zwar dieser Wellenzahl in den niederen Breiten auch eine besondere Bedeutung bei, in diesem Ausmaß sind die Transporte der Wellenzahl 6 aber als eine spezielle Besonderheit des Zeitraums Nov., Dez. 67, Jan. 68 aufzufassen.

Bei einem Vergleich mit den Meridionalschnitten der Geopotentialamplituden (siehe Abb. 5) und der Horizontalneigungen (siehe Abb. 9) sind die größten Transporte in jenen Druckflächen zu finden, in denen diese Größen ebenfalls maximale Werte aufweisen. Die Deformation der Geopotentialwellen, ausgedrückt durch die horizontale Achsenneigung, bewirkt aber, daß die größten Drehimpulstransporte im Bereich des Subtropenjets geleistet und damit gegenüber den maximalen Geopotentialamplituden nach Süden verschoben sind.



Die Transporte werden neben den Amplituden am Breitenkreis  $\phi$  und den benachbarten Breiten auch durch die Wellenzahl  $k$  beeinflusst, wie dies auch für den Fluß fühlbarer Wärme gilt. So erklärt sich, daß Wellenzahl 3 trotz geringerer Amplitude in  $40^{\circ}\text{N}$  größere Flüsse von Drehimpuls hervorruft als Wellenzahl 1. Auch die besonders intensiven Transporte der Wellenzahl 6 sind durch diese Faktoren zu begründen. Die geringen positiven Flüsse der Wellenzahl 2 in 200 mb resultieren daraus, daß das Maximum der horizontalen Achsenneigung der Geopotentialwellen zusammenfällt mit geringen Amplituden.

Die Darstellung der Drehimpulstransporte in den einzelnen Niveaus als Funktion der geographischen Breite (Abb. 24) zeigt, daß sich die Anteile der einzelnen Wellenzahlen am zonalen Mittel verändern. Wellenzahl 3 dominiert zwischen 500 und 200 mb gegenüber Wellenzahl 1, während letztere in 100 mb die größten Flüsse bewirkt. In 850 und 700 mb transportieren die Wellenzahlen 2 und 3 in etwa dem gleichen Maße Drehimpuls nach Süden, in 500 und 200 mb sind die Anteile der Wellenzahl 2 am nach Norden gerichteten Fluß gegenüber denen der Wellenzahl 3 gering, in 100 mb jedoch wieder gleichrangig. Das Wellenzahlspektrum des Drehimpulstransports (Abb. 25) zeigt, daß in  $30^{\circ}\text{N}$  wie beim Fluß fühlbarer Wärme (siehe Abb. 18) Wellenzahl 6 in 300 mb die größten Flüsse erzeugt und im 200 mb-Niveau nur von Wellenzahl 1 übertroffen wird.

#### 4.3. HORIZONTALVERTEILUNGEN

Das mittlere Temperaturfeld der Nordhemisphäre in 500 mb im Zeitraum November 1967 bis Januar 1968 stellt Abb. 26 dar, in die auch die ungefähre Lage der Polarfront (gepunktete Linie) eingetragen ist, die man aus früheren Untersuchungen von E. PALMÉN u. C.W. NEWTON (1969) u.a.m., siehe auch K. BAESE (1973), entlang der Leitisotherme mit dem Wert von  $-28^{\circ}\text{C}$  findet. Die Verteilung der Temperaturen wurde durch Mittelung der Fourierkoeffizienten gewonnen. Im Gegensatz zu den bisherigen Betrachtungen

kommen in dieser Abbildung nur die *stehenden Wellen* zum Ausdruck.

Man erkennt zwei gut ausgebildete Kaltlufttröge über der Ostasiatischen Küste und dem Ostkanadischen Inselarchipel. Der dritte Trog über Osteuropa ist zwar weniger ausgeprägt, erscheint jedoch im bearbeiteten Zeitraum ebenso wie der Atlantische Rücken im Vergleich zum langjährigen Mittel relativ gut entwickelt. Gemäß der Drängung der Isohypsen über Neufundland und der Ostasiatischen Küste sind dort die stärksten Winde zu erwarten.

Die Trogachsen des mittleren Geopotentialfeldes, deren Lage sich aus den Minima der geopotentiellen Höhe entlang eines Breitenkreises ergibt, weisen südlich  $45^{\circ}\text{N}$  insbesondere über dem Amerikanischen Kontinent eine starke Neigung von Südwest nach Nordost auf. Zwischen  $45^{\circ}$  und  $55^{\circ}\text{N}$  sind die Achsen annähernd meridional ausgerichtet und nehmen dann weiter nördlich eine geringe Neigung von Nordwest nach Südost an. Die Darstellung der Achsen im mittleren Temperaturfeld zeigt, daß diese besonders in den gemäßigten Breiten im wesentlichen westlicher liegen als die Achsen des Geopotentialfeldes.

In den Abb. 27 u. 28 kommen die mittleren Flüsse von sensibler Energie und Drehimpuls, hervorgerufen durch die gesamte Zirkulation unter geostrophischen Bedingungen, im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb zur Darstellung. Die Flüsse an den einzelnen Terminen wurden mit Hilfe der zusammengesetzten Fourierreihe nach Gl. 2.3.6. berechnet und dann gemittelt. Unter Einbezug von Abb. 26 zeigt sich, daß die Transporte auf den Trogvorderseiten der drei stehenden Wellen nach Norden, auf der Rückseite nach Süden gerichtet sind. Dies hat seine Ursache darin, daß bei den Horizontalverteilungen das zonale Temperaturmittel (in Grad Kelvin), bzw. die mittlere zonale Windgeschwindigkeit zu berücksichtigen sind. Diese beiden Mittelwerte nehmen nur positive Werte an, und die Terme der Fourierreihe, in denen sie vorkommen, überwiegen gegenüber den Termen, die sich nur aus den einzelnen

Wellenzahlen zusammensetzen. Deshalb bestimmt in der Horizontalverteilung der Flüsse, die durch die gesamte Zirkulation bewirkt werden, die Meridionalgeschwindigkeit die Richtung der Transporte.

Die Zentren maximaler Flüsse von sensibler Energie befinden sich - wie es vom zonalen Mittel (siehe Abb. 12) zu erwarten ist - innerhalb der Zone zwischen  $45^{\circ}$  und  $65^{\circ}\text{N}$  und sind entlang der mittleren Lage der Polarfront orientiert. Die mit 67 Einheiten größten positiven Transporte fühlbarer Wärme liegen etwas östlich von Neufundland im Bereich des vergleichsweise gut entwickelten Atlantischen Rückens, das Maximum nach Süden gerichteter Transporte mit -49 Einheiten über Sibirien. Im ersten Fall wird über dem Atlantik warme Luft nach Norden transportiert, im zweiten kalte Sibirische Festlandsluft nach Süden. Wenn man die Transportvorgänge in der Nähe jedes einzelnen der drei Tröge betrachtet, so findet man nur über Nordamerika ein starkes Überwiegen der positiven Flüsse. Die Differenz zwischen Vorder- und Rückseitentransporten ist hier so groß, daß im betrachteten Zeitraum insbesondere der Nordamerikanische Trog zu dem im zonalen Mittel nach Norden gerichteten Transport von sensibler Energie beiträgt.

Dies gilt auch für den Fluß von Drehimpuls (siehe Abb. 28), wo südöstlich von Neufundland mit 89 Einheiten ebenfalls die größten nordwärts gerichteten Transporte stattfinden. Im Unterschied zu den Flüssen sensibler Energie liegen die Zentren maximaler, positiver Transporte weiter südlich zwischen  $30^{\circ}$  und  $45^{\circ}\text{N}$ . Dort findet man nach Abb. 26 auch die stärksten horizontalen Achsenneigungen. Die Zentren negativer Flüsse liegen bei  $50^{\circ}$  bis  $55^{\circ}\text{N}$  für Nordamerika und Europa, in Asien aber in  $35^{\circ}$  bis  $40^{\circ}$  mit -72 Einheiten als größtem negativem Wert.

Diese Resultate werden im wesentlichen durch die Berechnungen von P. SPETH (1974b) bestätigt, auch wenn sich

diese Arbeit nur auf den Monat Januar für sich bezieht. Ein Vergleich der Flüsse in bezug auf ihre maximalen Werte ist daher kaum möglich. Unterschiede ergeben sich für den Fluß sensibler Energie im Bereich des Osteuropäischen Trogs, wo die eigenen Resultate auch Transporte in nördlicher Richtung aufweisen. Bei P. SPETH liegt das Gebiet stärkster Flüsse außerdem nicht über dem Atlantik, sondern östlich des Asiatischen Kontinents über dem Pazifik.

## 5. ZEITLICHE VERÄNDERLICHKEIT DER TRANSPORTE IM ZEITRAUM NOVEMBER, DEZEMBER 1967, JANUAR 1968

Dieser Abschnitt soll einen Überblick darüber geben, in welchem Ausmaß die Struktur der langen atmosphärischen Wellen und die durch sie hervorgerufenen Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls zu einzelnen Terminen vom zeitlichen Mittel abweichen. Dies geschieht durch Darstellung von Zeitreihen der Flüsse im hemisphärischen Mittel und durch Beschreibung der Verhältnisse zu einzelnen Terminen.

### 5. 1. ZEITREIHEN DER TRANSPORTE VON SENSIBLER ENERGIE UND DREHIMPULS IM HEMISPHÄRISCHEN MITTEL

Abb. 29 zeigt für den Januar 1968 Zeitreihen der zonal gemittelten Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls über die Breitenkreise von  $30^{\circ}$  und  $50^{\circ}\text{N}$  im vertikalen Mittel aus der Summe aller Wellenzahlen. In diesen Bereichen treten im zeitlichen Mittel jeweils die stärksten Flüsse auf. Wegen der starken kurzfristigen Schwankungen an den einzelnen Breitenkreisen sind Tendenzen über einen längeren Zeitraum kaum zu erkennen.

Als Indikator für die zeitliche Veränderlichkeit der Flüsse wird daher ein hemisphärisches Mittel gebildet, in dem die vertikal integrierten und mit dem Cosinus

der geographischen Breite gewichteten zonalen Mittel aller 2,5 Breitengrade von  $10^{\circ}$  bis  $85^{\circ}\text{N}$  *absolut aufsummiert* und durch ihre Anzahl (27) geteilt werden. So erhält man pro Termin eine Zahl, die als ein Maß für die Transportaktivität angesehen werden kann, das nach Abb. 29 die Tendenzen der Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls recht gut wiedergibt, wegen der Absolutwerte und der Cosinus-Wichtung aber nicht mit den tatsächlichen Transporten über die Breitenkreise zu vergleichen ist (siehe punktierte Linienzüge).

Bei der Berechnung der hemisphärischen Mittel aus den absoluten Transporten werden also die Vorzeichen außer Acht gelassen, und zwar aus folgenden Gründen. Die Westwinde werden durch positive Drehimpulstransporte aus niederen Breiten und nach Süden gerichtete Flüsse aus höheren Breiten aufrechterhalten. Addiert man nun positive und negative Flüsse, so zeigt das Mittel über alle Breitenkreise geringere Transporte von Drehimpuls an, als dem Westwindband tatsächlich zugute kommen.

Beim Transport von sensibler Energie ist wichtig, in welchem Umfang fühlbare Wärme in die höheren Breiten geschafft wird, um dort das Strahlungsdefizit auszugleichen. Dieser Gesichtspunkt wird zum Ausdruck gebracht, wenn man bei der Bildung des hemisphärischen Mittels die Vorzeichen der Transporte an den einzelnen Breitenkreisen berücksichtigt. Da jedoch - wie im folgenden Abschnitt dargestellt wird - die negativen Flüsse fühlbarer Wärme im zonalen Mittel, gebildet aus allen Wellenzahlen, äußerst gering sind, unterscheidet sich das hemisphärische Mittel mit Berücksichtigung der Vorzeichen kaum von dem der absoluten Transporte.

*5.1.1. Hemisphärische Mittel der Transporte in Relation zu bestimmten Temperatur- und Geopotentialdifferenzen*

Die Zeitreihen der hemisphärisch gemittelten Flüsse von sensibler Energie und Drehimpuls aus der Summe aller Wellenzahlen kommen für den Mittelungszeitraum in Abb. 30 zur Darstellung. Für diese Zeitreihen wurde auch die zweite Hälfte des Oktober 1967 mitberücksichtigt. Da die Datenfelder zweimal pro Tag vorliegen, umfassen die Zeitreihen insgesamt 218 Termine.

Beim Transport sensibler Energie wurde neben dem hemisphärischen Mittel der absolut aufsummierten Flüsse auch das Mittel unter Berücksichtigung der Vorzeichen aufgetragen. Die Differenz zwischen den verschiedenen Mitteln zeigt das Zweifache der negativen Transporte an. Diese sind zu fast allen Terminen vernachlässigbar klein.

Auch im hemisphärischen Mittel unterliegen die Flüsse großen Schwankungen, die für den Drehimpulstransport stärker ausgeprägt sind. Den mit 2 bis 5 Tagen relativ kurzperiodischen Abweichungen ist als langfristige Tendenz ein Anwachsen des hemisphärischen Mittels bis etwa Ende Dezember insbesondere für den Transport fühlbarer Wärme überlagert. Da der Monat Januar im langjährigen Mittel die stärksten Flüsse verzeichnet, sind die recht geringen Werte in der zweiten Hälfte dieses Monats als eine Eigenheit des Januar 1968 anzusehen.

Es stellt sich nun die Frage, ob im hemisphärischen Mittel für die zeitliche Veränderlichkeit der Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls Beziehungen untereinander bestehen. So scheinen allgemein geringere Drehimpulsflüsse mit größeren Transporten fühlbarer Wärme korreliert zu sein, wie dies im Zeitraum vom 15. 12. 1967 bis 15. 1. 1968 der Fall ist. Auch im November, z.B. vom 2. bis 7. 11. deuten sich Beziehungen dieser Art an. In

einigen Fällen, wie zwischen dem 1. und 10. 12. 1967, zeigt sich jedoch auch eine Übereinstimmung im Verhalten der beiden Flüsse.

In Abb. 30 sind auch die Zeitreihen der zonal gemittelten, meridionalen Differenz des Geopotentials zwischen  $30^{\circ}$  und  $60^{\circ}$ N in 200 mb und der Temperatur zwischen  $25^{\circ}$  und  $85^{\circ}$ N in 850 mb unter dem Aspekt aufgetragen, die zeitliche Veränderlichkeit von Größen, die direkt aus dem Temperatur- und Geopotentialfeld herzuleiten sind, mit der der Flüsse von sensibler Energie und Drehimpuls im hemisphärischen Mittel zu vergleichen. Während für den Transport fühlbarer Wärme keine Beziehung zu den Temperatur- und Geopotentialdifferenzen erkennbar ist, besteht die Möglichkeit einer Korrelation größerer meridionaler Differenzen im Geopotentialfeld mit größeren Drehimpulstransporten, wie dies auch für die mittleren Verhältnisse festgestellt werden konnte.

Das Problem der zeitlichen Veränderlichkeit der meridionalen Flüsse in bezug auf Veränderungen im Temperatur- und Geopotentialfeld kann hier nur angerissen werden. Es würde intensive Korrelationsrechnungen notwendig machen, um die Aussagen dieses Abschnitts statistisch zu belegen, was jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinausführt.

#### 5.1.2. Beiträge der Wellenzahlen 1 bis 6

Während im zeitlichen Mittel die Wellenzahlen 1 bis 6 nur geringe negative Beiträge zu den zonalen Transportmitteln aus allen Wellenzahlen leisten, treten zu den einzelnen Terminen auch kräftige nach Süden gerichtete, also negative Flüsse auf, wie noch zu zeigen ist. Da in diesem Abschnitt jedoch die Transportaktivität der einzelnen Wellenzahlen untersucht werden soll, wurde das hemisphärische Mittel ohne Berücksichtigung der Vorzeichen durch Summation der Absolutbeträge gebildet.

In Abb. 31 sind jene Anteile, welche den Wellenzahlen 1 bis 6 am hemisphärisch gemittelten totalen sensiblen Wärmetransport zukommen, dargestellt. Die Veränderungen im Mittel aller Wellenzahlen setzen sich insbesondere zusammen aus den Schwankungen der Wellenzahlen 1 bis 3. Dabei ist die zeitliche Veränderlichkeit der Wellenzahl 3 von kürzerer Periode als die der ersten beiden, die zudem gegenläufige Tendenzen aufweisen. Die Beiträge der Wellenzahl 4 variieren in geringerem Umfang, wobei lediglich der Zeitraum um etwa den 15. 1. bei vier gut entwickelten Trögen (DWD 1967/68) einen sehr hohen Anteil verzeichnet, dessen Spitze auch direkt im gesamten Mittel zum Ausdruck kommt. Die Beiträge der Wellenzahlen 5 und 6 sind teilweise von der Größenordnung der niederen Wellenzahlen, besonders zwischen dem 8. und 23. Dezember. Eine Betrachtung der Horizontalverteilungen zeigt, daß in diesem Zeitraum mehrere Kaltlufttropfen, die nach Süden aus dem polaren Kältereservoir isoliert ausgetreten sind, und gegenläufig vom Boden in die obere Troposphäre abgehobene Warmluftshalen eine instabile Zirkulationsphase charakterisieren.

Aus der Darstellung der Beiträge einzelner Wellenzahlen zum hemisphärisch gemittelten Transport von Drehimpuls (Abb. 32) geht hervor, daß der Anteil der Wellenzahl 3 die größte zeitliche Veränderlichkeit aufweist und im Zeitraum Ende Dezember bis Mitte Januar den Transport aus der Summe aller Wellenzahlen entscheidend bestimmt. Wie beim Fluß sensibler Energie verzeichnet Wellenzahl 4 bei sonst geringen Schwankungen am 15. 1. sehr hohe Werte. Variationen größeren Umfangs sind auch für Wellenzahl 6 zu finden, deren Anteil deutlich über dem der Wellenzahl 5 liegt. Der Spitzenwert für Wellenzahl 6 um den 22. 12. stimmt mit der Zeit vermehrter und großräumiger "cut off" - Wirbel überein.

Interessant ist, daß die Beiträge der Wellenzahlen 1 und 2 zum hemisphärischen Mittel des Drehimpulstransports annähernd gleich groß sind, obwohl Wellenzahl 2 am



zeitlichen Mittel nur geringen Anteil hat. Dies ist darauf zurückzuführen, daß Wellenzahl 2 zwar recht transportintensiv ist, aber wegen häufiger Vorzeichenwechsel, die hier nicht zum Ausdruck kommen, im zeitlichen Mittel nur geringen Anteil aufweist. Für Wellenzahl 1 führen dann die seltener auftretenden Wechsel im Vorzeichen zu einem im Mittel höheren Anteil. Die Betrachtung der einzelnen Termine wird dies später noch zeigen.

Es wäre daher sinnvoll, neben der hier gewählten Darstellung der absoluten Beiträge einzelner Wellenzahlen zu den Flüssen von sensibler Energie und Drehimpuls bei weiteren Untersuchungen der zeitlichen Veränderlichkeit auch die Vorzeichen der jeweiligen Transportanteile zu berücksichtigen.

## 5.2. DARSTELLUNG DER VERHÄLTNISSE ZU ZWEI EINZELNEN TERMINEN MIT UNTERSCHIEDLICHEM ZIRKULATIONSTYPUS

Ausgehend von den Zeitreihen der Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls im hemisphärischen Mittel, wäre es nun möglich, die Struktur der fortschreitenden Wellen und der durch sie hervorgerufenen Transporte zu Terminen mit extremen Flüssen zu untersuchen. Andererseits ist auch die Frage interessant, in welchem Umfang sich die Transporte für Termine stark mäandrierender Zirkulation von jenen mit einer weitgehend zonal verlaufenden Zirkulationsform unterscheiden. Innerhalb des relativ kurzen bearbeiteten Zeitraums waren jedoch nur Termine zu finden, in denen diese Charakteristiken lediglich angedeutet vorhanden waren. Bei der Betrachtung einzelner Niveaus wird aus Platzgründen nur auf die Druckflächen von 850 und 200 mb eingegangen.

### 5.2.1. *Charakteristik der Zirkulationsform am 5.11.1967 und am 20.1.1968*

Als Beispiel für eine mäandrierende Zirkulationsform wurde der 5.11.1967, 12<sup>h</sup> GMT ausgewählt. Die Horizontalverteilung der Temperatur in 500 mb (Abb. 33) zeigt zwei schmale Kaltlufttröge über Nordamerika und westlich von Europa, die sich weit nach Süden erstrecken, und einen umfangreicheren Trog über Asien, in dessen Bereich zwei kleinere Wellenvorgänge angedeutet sind. Entlang der Polarfront, die analog zu Abb. 26 eingetragen ist, verläuft ein gut entwickeltes Starkwindband, so daß der Zonalindex in seiner Definition als geostrophischer Wind aus der zonal gemittelten Geopotentialdifferenz in 500 mb zwischen 35° und 55°N mit 15 m/sec einen recht hohen Wert aufweist, obwohl die Zirkulation eher vom Typ einer "low index" -form ist.

Austropfungen sind am 5.11.1967 allenfalls über Südosteuropa zu finden, während der 20.1.1968, 12<sup>h</sup> GMT (Abb. 34),

der als Beispiel zonaler Zirkulationsform ausgewählt wurde, mehrere Kaltlufttropfen und Warmluftshalen über Asien, Nordamerika und Europa verzeichnet. Zwei Tröge über den Aleuten und Grönland sind in meridionaler Richtung relativ schwach entwickelt, so daß sich zwei Starkwindbänder über Nordamerika nahe  $60^{\circ}\text{N}$ , bzw. über Asien im Bereich von  $40^{\circ}\text{N}$  ausgebildet haben und der Zirkulation einen zonalen Charakter geben. Infolge der Asymmetrie der Starkwindbänder ist der meridionale Gradient im Geopotential gering und damit auch der Zonalindex mit  $9,9 \text{ m/sec}$ . Demzufolge kann man die Definition des Zonalindex zur Charakterisierung dieser beiden Termine nicht eindeutig anwenden.

#### *5.2.2. Struktur der atmosphärischen Wellen für die zwei unterschiedlichen Zirkulationsformen*

Abb. 35 präsentiert die aktuellen prozentualen Anteile der Wellenzahlen 1 bis 3 und 4 bis 6 an der Amplitudensumme der Wellenzahlen 1 bis 11. Danach liegen die Anteile der ersten 6 Wellenzahlen in mittleren Breiten zu beiden Terminen bei 80 % und mehr und weichen somit nur geringfügig von den mittleren Verhältnissen (siehe Abb. 1) ab. Im Unterschied zu den zonaleren Bedingungen am 20.1.1968 sind die Beiträge der Wellenzahlen 4 bis 6 am 5.11.1967 besonders für die Temperaturamplituden in 850 mb wesentlich größer.

Dies kommt auch in der Darstellung der Amplituden als Funktion der geographischen Breite (Abb. 36) zum Ausdruck. Während für den 5.11.1967, den mäandrierenden Fall, die Amplituden der Wellenzahlen 4 und 5 analog zur Anzahl der Tröge für die Temperatur in 850 mb und das Geopotential in 200 mb zwischen  $45^{\circ}$  und  $50^{\circ}\text{N}$  hohe Werte aufweisen, sind sie für den zonalen Fall, den 20.1.1968, nur schwach entwickelt. Die ungewöhnliche Asymmetrie bei letzterem Termin führt zu einer Betonung der Wellenzahl 1.

In 200 mb lassen sich am Amplitudenverhalten der Temperatur keine

markanten Unterschiede feststellen. So sind die Amplituden der Wellenzahlen 4 bis 6 im Gegensatz zu den Verhältnissen in der unteren Troposphäre für den Fall zonaler Zirkulation stärker entwickelt. Zu erwähnen ist noch, daß die maximalen Amplitudenwerte zu den einzelnen Terminen rund doppelt so groß sind wie im zeitlichen Mittel. Bei einer Betrachtung der Wellenzahlspektren (Abb. 37) fallen insbesondere zwei Punkte auf. Zum einen ist die Kopplung zwischen den  $15^{\circ}$  voneinander entfernten Breitenkreisen recht gering, zum anderen findet man teilweise auch höhere Amplituden für die Wellenzahlen 7 bis 9.

Die aktuellen Phasendifferenzen zwischen den Temperatur- und Geopotentialwellen, in Abb. 38 als Funktion der geographischen Breite in 200 mb aufgetragen, nehmen im Gegensatz zu den mittleren Verhältnissen (siehe Abb. 8) auch größere negative Werte an und unterliegen starken Schwankungen. Dabei kommen die Eigenschaften der mittleren Phasendifferenzen nicht zum Ausdruck. Unterschiede zwischen den beiden Terminen ergeben sich darin, daß der 20.1.1968 häufiger negative Phasendifferenzen verzeichnet, d.h., daß die Temperaturwelle öfter östlich der des Geopotentials liegt.

Die Abbildungen 39 u. 40 bringen den horizontalen Trogachsenverlauf im Geopotentialfeld für die Wellenzahlen 1 bis 6 in 200 mb auf einer Karte der Nordhemisphäre zur Darstellung. Man sieht, daß die zonale Zirkulation am 20.1.1968 sich durch eine etwas gleichmäßigere Verteilung der Trogachsen vom mäandrierenden Termin unterscheidet, für den die Lage der Tröge der langen atmosphärischen Wellen durch Häufung der Trogachsen einzelner Wellenzahlen zu erkennen sind. Der Trogachsenverlauf der Wellenzahl 1 ist für beide Termine annähernd gleich. Von Nordost nach Südwest geneigt, liegt ihr Trog in  $70^{\circ}\text{N}$  über der Beringstraße und in  $20^{\circ}\text{N}$  über dem Atlantik. Wie bei den Zeitreihen der Beiträge der einzelnen Wellenzahlen zum Transport von Drehimpuls vermutet,

ergeben sich aber schon für Wellenzahl 2 Unterschiede. Für den zonalen Termin verläuft die Achse am 20.1.1968 von NW nach SO über Atlantik und Pazifik, für den Fall mäandrierender Zirkulation am 5.11.1967 von NO nach SW über Nordamerika und Asien.

Durch die Darstellung der aktuellen horizontalen Achsenneigungen der Geopotentialwellen als Funktion der geographischen Breite (Abb. 41) werden in 200 mb Vergleichsmöglichkeiten mit den mittleren Trogachsenneigungen (siehe Abb. 9) geschaffen. Danach liegen die größten aktuellen Werte mit  $\pi/4$  beträchtlich über den für mittleren Verhältnisse höchsten Achsenneigungen der Geopotentialwellen von  $\pi/10$  pro 2,5 Breitengrade. Das im zeitlichen Mittel erkennbare breitenspezifische Verhalten ist bei den aktuellen horizontalen Achsenneigungen nicht feststellbar. Diese nehmen auch in den niederen Breiten größere negative Werte an, was für den 5.11.1967 häufiger festzustellen ist.

Den aktuellen vertikalen Verlauf der Trogachsen zeigen die Abbildungen 42 u. 43. Mit wenigen Ausnahmen sind die Trogachsen der Geopotentialwellen mit zunehmender Höhe nach Westen geneigt, während die Achsen im Temperaturfeld zwischen 850 und 500 mb häufig eine Neigung nach Osten gegen die Geopotentialwellen aufweisen, um darüber stärker nach Westen abzuweichen. In Einzelfällen ist ein Vorseilen der Temperaturwellen nach Osten in den oberen Druckflächen erkennbar.

### 5.2.3. *Transporte der atmosphärischen Wellen für die zwei unterschiedlichen Zirkulationsformen*

#### 5.2.3.a. Sensible Energie

Abb. 44 präsentiert für beide Termine die zonal gemittelten Flüsse von sensibler Energie in Meridionalschnitt und vertikalem Mittel. Während der Meridionalschnitt der mäandrierenden Zirkulation vom 5.11.1967 in den Grund-

zügen mit den mittleren Verhältnissen (siehe Abb. 12) übereinstimmt, dabei aber größere Flüsse in 200 mb aufweist, werden für den zonalen Fall vom 20.1.1968 große Abweichungen festgestellt. Für letzteren Termin verursachen die Starkwindbänder in den Bereichen von  $40^{\circ}$  -  $60^{\circ}$ N Flüsse von fühlbarer Wärme in 850 mb, die deutlich unter den Werten des zeitlichen Mittels liegen. In den höheren Druckflächen ist die von den mittleren Verhältnissen her bekannte Struktur mit einem Maximum in 100 und 200 mb kaum gegeben. Teilweise sind die Transporte in diesen Druckflächen nach Süden gerichtet, so daß dann im vertikalen Mittel der zonale Termin nur geringe Transporte sensibler Energie verzeichnet. Bei mäandrierender Zirkulation (5.11.1967) werden im vertikalen Mittel überdurchschnittliche Flüsse hervorgerufen.

Bei Betrachtung der vertikal gemittelten Horizontalverteilungen (Abb. 45 u. 46) zeigt sich, daß für den 5.11.1967 die durch die Gesamtzirkulation erzeugten starken Flüsse fühlbarer Wärme in  $50^{\circ}$ N ihre Ursache in einer Kette von Zentren größter Transporte entlang der Polarfront haben. Am 20.1.1968 sind diese Zentren wegen der isolierten Kaltlufttropfen auf einen größeren Breitenbereich verteilt und nehmen auch geringere Werte an.

Der relativ häufig auftretende Vorzeichenwechsel der Phasendifferenzen bestimmt auch die aktuellen Meridionalschnitte für den Transport sensibler Energie in den Wellenzahlen 1 bis 6 (Abb. 47 u. 48). Im Gegensatz zu den mittleren Verhältnissen finden zu den einzelnen Terminen auch starke nach Süden gerichtete, d.h. negative Flüsse statt. Die Maxima sind in bezug auf die geographische Breite mehr gestreut, wobei sie jedoch Druckflächen nahe der Tropopause und in der unteren Troposphäre bevorzugen. Die Abschwächung der maximalen Transportanteile mit zunehmender Wellenzahl ist nur wenig ausgeprägt, so daß, wie schon angesprochen, für die aktuellen Transporte auch die höheren Wellenzahlen 4 bis 6 besonders zu berücksichtigen

sind. Bei einem Vergleich der beiden Termine wird deutlich, daß für den Fall zonaler Zirkulation (20.1.1968) in größerem Umfang fühlbare Wärme nach Süden verbracht wird, während für den mäandrierenden Fall bei den Wellenzahlen 2, 4 und 5 größere positive Flüsse zu finden sind.

Zu beachten ist noch, daß beim Fluß fühlbarer Wärme die Wellenzahl 4 am 5.11.1967 und Wellenzahl 1 am 20.1. die Struktur des Meridionalschnitts aus der Summe aller Wellenzahlen entscheidend bestimmen. Möglich ist dies dadurch, daß hohe Amplitudenwerte verbunden sind mit Phasendifferenzen um  $\pi/2$ . Die Dominanz dieser Wellenzahlen kommt auch zum Ausdruck in den Zeitreihen der Beiträge, die die Wellenzahlen 1 bis 6 zum gesamten hemisphärischen Mittel der Transporte sensibler Energie leisten (Abb. 31). Hier überwiegen die Werte der Wellenzahl 4 am 5.11.1967. Dies gilt besonders am 20.1.1968 für Wellenzahl 1.

Den Wellenzahlspektren der aktuellen Flüsse fühlbarer Wärme in 200 und 850 mb (Abb. 49) ist zu entnehmen, daß auch die Wellenzahlen 7 bis 9 zu einzelnen Terminen, hier besonders am 20.1.1968, südlich  $45^{\circ}\text{N}$  nicht zu vernachlässigen sind. Der prozentuale Anteil der Wellenzahlen 1 bis 6 am absoluten Gesamttransport sensibler Energie (Abb. 50) liegt zu diesem Termin bei weniger als 60 %. In  $45^{\circ}\text{N}$  verursachen die ersten sechs Wellenzahlen aber um 80 %, wobei Abweichungen für die verschiedenen Druckflächen von ca.  $\pm 10$  % auftreten.

#### 5.2.3.b. Drehimpuls

Neben dem Fluß sensibler Energie kommen in Abb. 44 beide Termine auch die zonal gemittelten Drehimpulstransporte in Meridionalschnitt und vertikalem Mittel zur Darstellung. Der Termin zonaler Zirkulation weist mit 203 Einheiten maximale Transporte in  $40^{\circ}\text{N}/200$  mb auf, die in bezug auf die Größenordnung mit den mittleren Ver-



hältnissen (siehe Abb. 12) übereinstimmen, aber um 10 Breitengrade nach Norden verschoben sind. Für den Termin mäandrierender Zirkulation kann man geringere, positive Flüsse zwischen  $30^{\circ}$  und  $40^{\circ}$ N feststellen, während im Bereich der Polarfront mit maximal -60 Einheiten recht intensiv Drehimpuls nach Süden verbracht wird. So kommen für den 5.11.1967 starke Abweichungen im vertikalen Mittel zustande.

Bei einem Vergleich mit dem Fluß fühlbarer Wärme zeigt sich, daß die mäandrierende Zirkulation am 5.11.1967 in größerem Umfang sensible Energie transportiert, aber geringere Drehimpulstransporte aufweist. Für den Termin zonalen Zirkulation (20.1.1968) sind die Verhältnisse jedoch umgekehrt. Hierin ergibt sich eine Übereinstimmung mit den bei den Zeitreihen (siehe Abb. 30) beobachteten Tendenzen.

In der Horizontalverteilung der durch die Gesamtzirkulation unter geostrophischen Bedingungen hervorgerufenen Drehimpulstransporte am 5. 11. 1967 (Abb. 51) lassen sich die im zonalen Mittel negativen Flüsse auf vier relativ gut entwickelte Zentren nach Süden gerichteter Transporte zurückführen. Im Fall zonalen Zirkulation (Abb. 52) resultiert die Verlagerung der größten Drehimpulsflüsse nach Norden aus den Zentren kräftiger negativer Transporte im Bereich von  $30^{\circ}$ N.

Einem Vergleich der aktuellen Horizontalverteilungen sowohl der Drehimpulstransporte als auch der Flüsse sensibler Energie mit den mittleren Verhältnissen (siehe Abb. 27 u. 28) kann man entnehmen, daß die Bereiche positiver und negativer Flüsse entsprechend der Anzahl und Lage der Tröge vielfältiger angeordnet sind. Es zeigt sich aber, daß über dem Atlantik, Europa und der Ostküste Asiens oder dem Pazifik nach Norden gerichtete Flüsse zu finden und insofern trotz Abweichungen in bezug auf die geographische Länge Grundzüge der mittleren Verhältnisse vorhanden sind.



Den aktuellen Meridionalschnitten für den Fluß von Drehimpuls (Abb. 53 u. 54) ist zu entnehmen, daß trotz größerer Abweichungen der aktuellen horizontalen Achsenneigungen die maximalen Flüsse in 200 oder 300 mb auf den Bereich von  $30^{\circ}$  bis  $50^{\circ}\text{N}$  beschränkt sind, wobei die Transporte auch in den niederen Breiten nach Süden gerichtet sein können. Für die zonale Zirkulation am 20. 1. 1968 werden die starken positiven, also nach Norden gerichteten Transporte in den Wellenzahlen 1, 3, 4 und 6 teilweise kompensiert durch die negativen Flüsse der Wellenzahlen 2 und 5. Am 5. 11. 1967 kommen zu den gering entwickelten positiven Flüssen stärkere negative Werte in den Wellenzahlen 3 und 4 hinzu.

Dem Transport von sensibler Energie entsprechend, sind auch für den Fluß von Drehimpuls zu einzelnen Terminen die Wellenzahlen 7 bis 9 zu beachten, besonders am 20. 1. 1968 in  $30^{\circ}\text{N}$ , wie Abb. 49 für das 200 mb-Niveau zeigt. Während in  $30^{\circ}\text{N}$  die prozentualen Anteile der ersten 6 Wellenzahlen am absoluten Drehimpulstransport (Abb. 50) im Bereich um 80 % liegen, erreichen sie in  $45^{\circ}\text{N}$  85 bis 90 %.

## 6. SCHLUSSBEMERKUNG

Aufgabe dieser Arbeit war es, die Struktur der atmosphärischen Wellen für einen dreimonatigen Zeitraum im Winterhalbjahr 1967/68 zu untersuchen und die durch sie hervorgerufenen Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls zu bestimmen.

Wie bei den stehenden Wellen wurde auch bei den allgemeinen atmosphärischen Wellen, die keiner Aufteilung nach dem "space-time domain" unterlagen, eine Verringerung der Amplituden mit zunehmender Wellenzahl festgestellt. Unterschiede ergeben sich jedoch darin, daß bei letzteren auch die Wellenzahlen 4 bis 6 zu beachten sind. Der Anteil der ersten sechs Wellenzahlen an der Amplitudensumme der

Geopotential- und Temperaturwellen entspricht hier mit mehr als 80 % etwa dem Anteil der Wellenzahlen 1 bis 3 bei den stehenden Wellen, siehe auch A. OSTHAUS (1978).

Obwohl die Daten nur aus einem speziellen Winterhalbjahr stammen, wurde im zonalen Mittel für den Fluß fühlbarer Wärme weitgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen erzielt, die A.H. OORT u. E.M. RASMUSSEN (1971) für einen Fünfjahreszeitraum berechnet haben. Die Abweichungen, die sich beim Transport von Drehimpuls ergaben, waren markanter und konnten mit einem geringeren meridionalen Gradienten im mittleren Geopotentialfeld in Zusammenhang gebracht werden.

Bei der Untersuchung der einzelnen Wellenzahlen ergeben sich für den Transport sensibler Energie Unterschiede zwischen den Wellenzahlen 1 bis 3 und 4 bis 6, da letztere in den höheren Druckflächen nur über wenig ausgebildete, bzw. keine maximalen Flüsse verfügen. In 30 bis 40°N überwiegen die Anteile der Wellenzahl 6 gegenüber denen der Wellenzahlen 4 und 5. Besonders ausgeprägt ist dies beim Transport von Drehimpuls der Fall. Nach Süden gerichtete Drehimpulsflüsse sind praktisch auf die Wellenzahlen 2 und 3 beschränkt.

Die zeitliche Veränderlichkeit der Flüsse von sensibler Energie und Drehimpuls wird durch Zeitreihen und Analyse einzelner Termine mit unterschiedlicher Zirkulationsform dargestellt. Die aktuellen Transporte unterliegen großen Schwankungen. Im Gegensatz zu den mittleren Verhältnissen treten bei den einzelnen Terminen für einige Wellenzahlen auch starke nach Süden gerichtete Transporte auf.

Es ergibt sich die Tendenz, daß bei mäandrierender Zirkulationsform geringere Drehimpulsflüsse mit größeren Transporten sensibler Energie verbunden sind, bzw. umgekehrte Verhältnisse im Fall zonal verlaufender Zirkulation zu finden sind. Außerdem deuten die Zeitreihen

die Möglichkeit an, größere aktuelle Drehimpulsflüsse mit einem starken meridionalen Gradienten im Geopotentialfeld in Zusammenhang zu bringen. Beim Fluß fühlbarer Wärme ist eine eingehende statistische Bearbeitung notwendig, um eine Beziehung dieser Größe zu einem meridionalen Temperaturgradienten festzustellen.

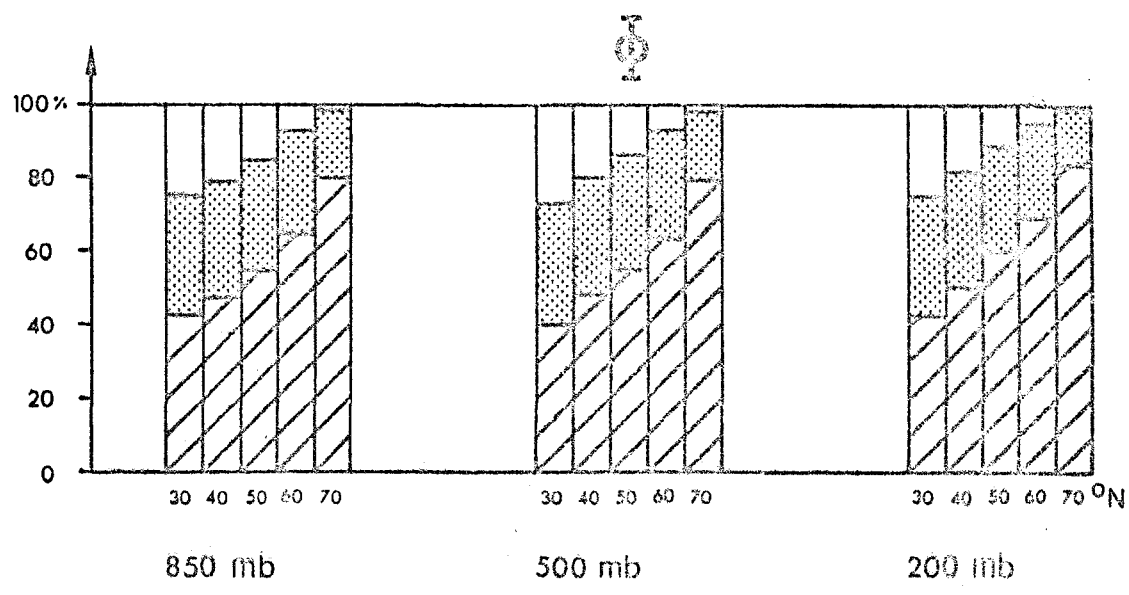
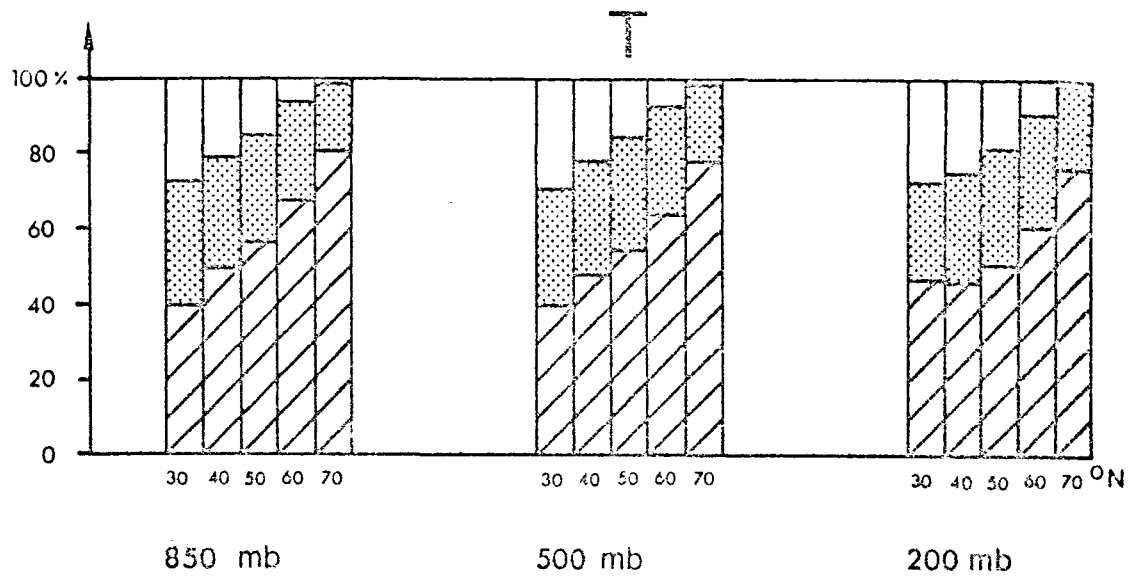
Infolge des relativ kurzen Zeitraumes, den die Daten umfassen, enthalten die Ergebnisse einige Eigenheiten. Es ist daher von Nutzen, die hier vollzogenen Untersuchungen auch auf bestimmte Zeiträume weiterer Winterhalbjahre auszudehnen. Dabei wären insbesondere die Aspekte der klimatischen Variabilität zu beachten. So könnte man die Streuung der aktuellen Transporte in bezug auf die mittleren Verhältnisse näher untersuchen. Neben weiteren Versuchen, die aktuellen Transporte durch meridionale Gradienten im Temperatur- und Geopotentialfeld zu parametrisieren, würde auch die Beschreibung der Termine extremer Transporte von Interesse sein.

LITERATURVERZEICHNIS

- Arpe, K., 1971, Die Darstellung von meteorologischen Feldern mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen, in: Bericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft zum Sonderkonto De 122/23
- Baese, K., 1973, Bestimmung des Jahresganges der charakteristischen Temperaturen an der Polar- und Subtropenfront in verschiedenen Standardniveaus, Dipl.-Arb. Math.-Naturw, Fak. Univ. Kiel
- Bjerknes, J., 1951, The maintenance of the zonal circulation of the atmosphere, P.V. Meteor. Un. geod. geophys. int. Brüssel, I-XXIII (presid. Adress)
- Defant, A. u. Fr., 1958, Physikalische Dynamik der Atmosphäre, Akademische Verlagsgesellschaft mbH, Frankfurt/M.
- Deutscher Wetterdienst, 1967/68, Täglicher Wetterbericht Jahrg. 92/93, Offenbach
- Eliassen, E., 1958, A study of the long atmospheric waves on the basis of zonal harmonic analysis, Tellus 10, pp 206-215
- Hastenrath, S.L., 1968, On the role of eddy mechanisms in the meridional energy transports, Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A, 17, pp 114-124
- Holopainen, E.O., 1967, On the mean meridional circulation and the flux of angular momentum over the northern hemisphere, Tellus 19(1), pp 1-13
- Kao, S.K., 1970, Wavenumber-frequency spectra of temperature in the free atmosphere, J. of Atm. Sc. 27, pp 1000-1007
- Kao, S.K., C.Y. Tsay and L.L. Wendell, 1970, The large scale meridional transport of sensible heat in wavenumber-frequency space, Tellus 23, pp 172-185

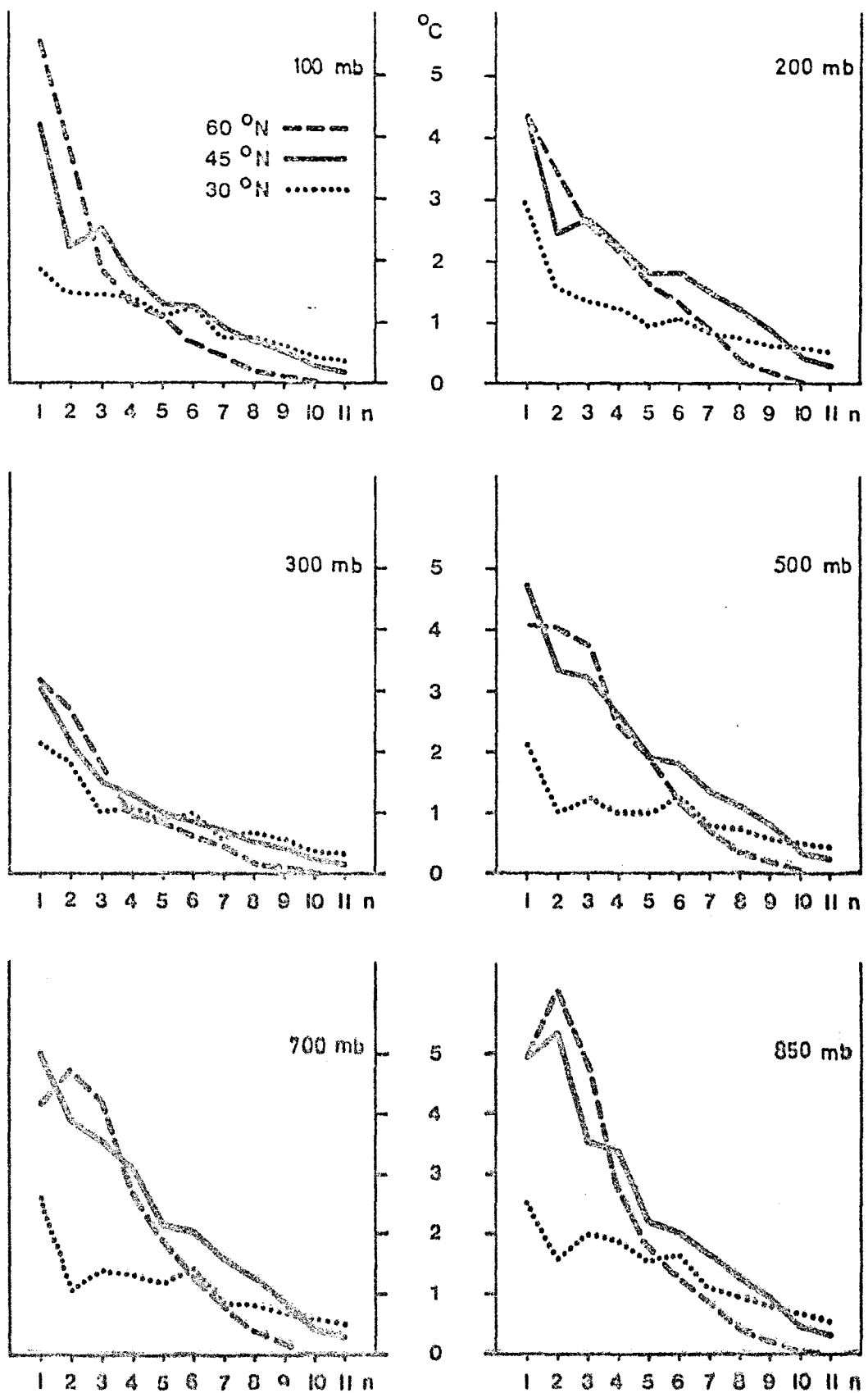
- Kao, S.K. and J.F. Sagendorf, 1970, The meridional transport of angular momentum in wavenumber-frequency space, J. of Atm. Sci. 27, pp 614-626
- van Loon, H., R. Jenne and K. Labitzke, 1973, Zonal harmonic standing waves, J. of Geoph. Res. 78 (21), pp 4463-4471
- MacDonald, N.J. and H.M. Frazier, 1971, A note on the seasonal variation of the flux of angular momentum by the transient and standing eddies in the northern hemisphere, Tellus 21, pp 656-667
- Miller, A.J., S. Teweles and H.M. Woolf, 1967, Seasonal variation of angular momentum transport of 500 mb, Monthly Weather Rev. 95, pp 427-438
- Oort, A.H. and E.M. Rasmusson, 1971, Atmospheric circulation statistics, U.S. Dep. Commerce, Nat. Oceanic Atmosph. Adm., Prof. Pap. 5,
- Osthaus, A., 1978, Die Struktur der stehenden Temperatur- und Geopotentialwellen im Januar und Juli und die durch sie hervorgerufenen Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls, Berichte IfM Kiel Nr. 46
- Palmén, E. and C.W. Newton, 1969, Atmospheric circulation systems, Academic Press, New York
- Reiter, E.R., 1969, Atmospheric transport processes, Part I, Energy transfers and transformations, U.S. Atomic Energy Commiss., Crit. Rev. Ser., pp 1-253
- Sato, Y., 1974, Vertikal structure of quasi-stationary planetary waves in several winters, J. of the Met. Soc. of Japan 52, No. 3, pp 272-282

- Speth, P., 1974a, Energetische Vergleichszahlen für Modellrechnungen der allgemeinen atm. Zirkulation, Met. Rundschau 27, S. 33-53
- Speth, P., 1974b, Horizontale Flüsse von sensibler und latenter Energie und von Impuls für die Atmosphäre der Nordhalbkugel, Met. Rundschau 27, S. 69-90
- Speth, P. und A. Osthaus, 1978, Großskalige horizontale Flüsse von sensibler Energie und von Impuls für jeden Januar und Juli aus dem Zeitraum 1967 bis 1976 für die Atmosphäre der Nordhalbkugel, hervorgerufen durch stehende Wellen, Berichte IfM Kiel Nr. 40
- Wiin-Nielsen, A., J.A. Brown and M. Drake, 1963, On the atmospheric energy conversions between the zonal flow and eddies, Tellus 15, pp 261-279



Mittlerer prozentualer Anteil der Wellenzahlen 1 bis 3 (schraffiert) und 4 bis 6 (schattiert) an der Gesamtsumme der Amplituden über 11 Wellenzahlen für die atmosphärischen Temperatur (T) und Geopotentialwellen (Φ).

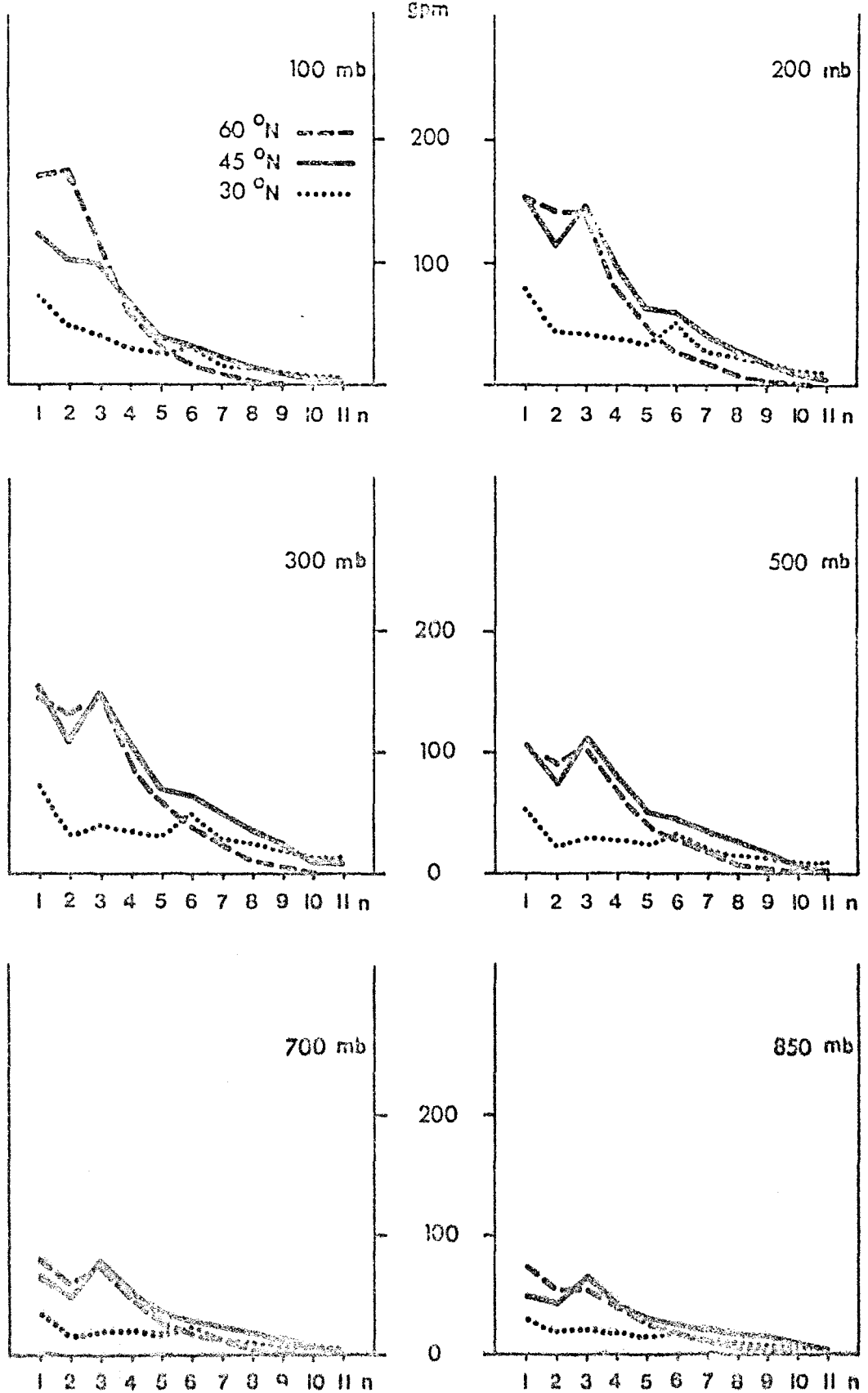
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



Wellenzahlspektren der mittleren Temperaturamplituden der atmosphärischen Wellen für verschiedene geographische Breiten, angegeben in °C.

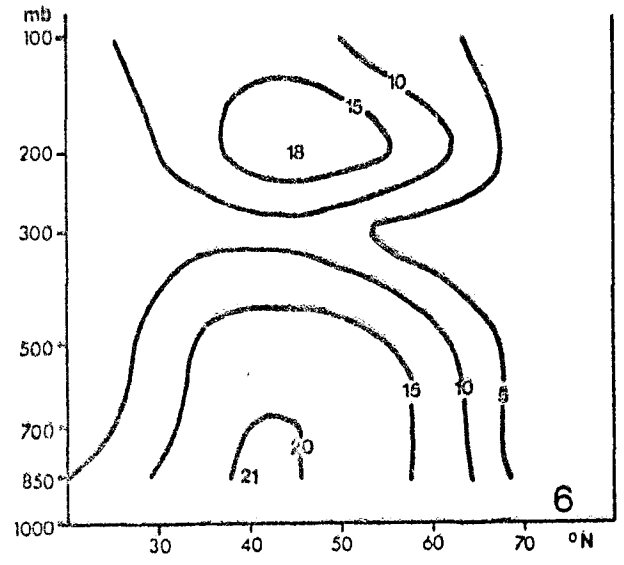
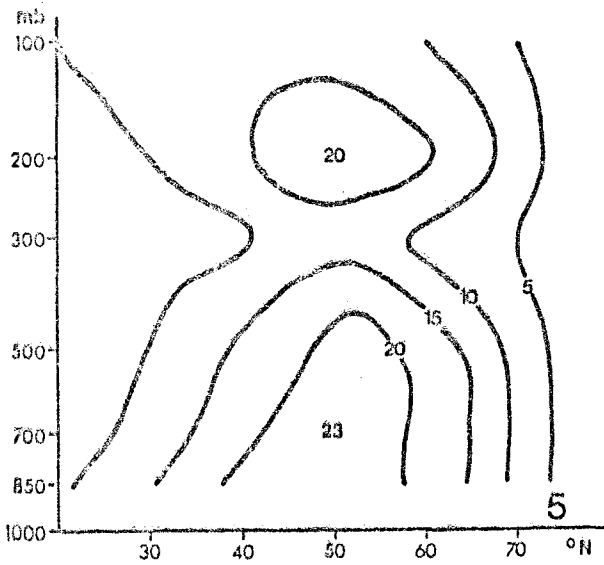
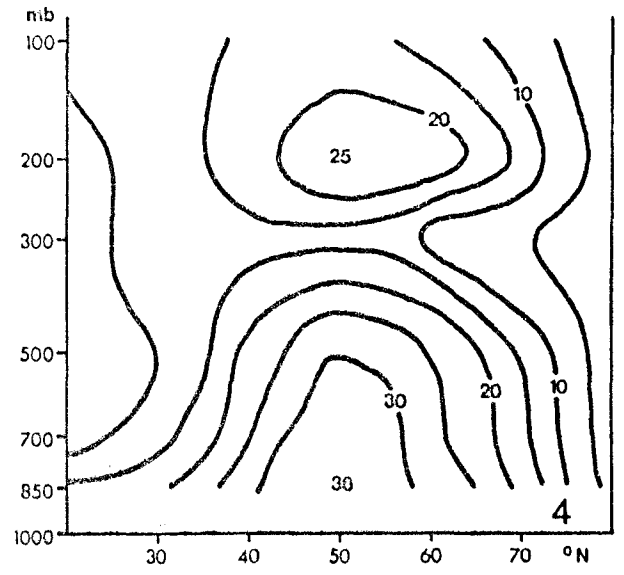
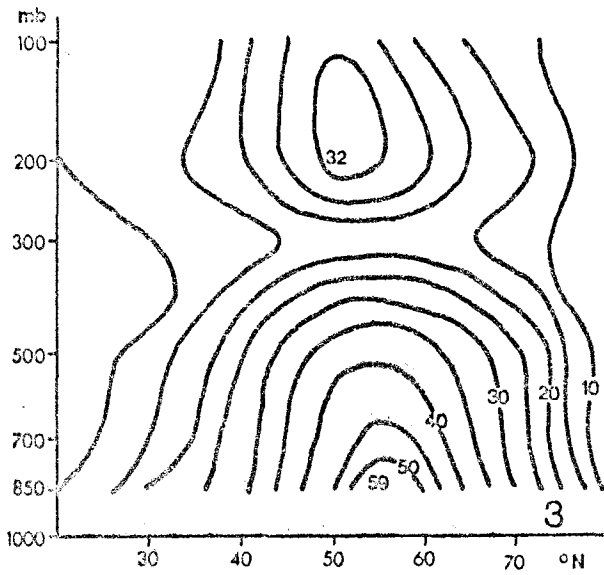
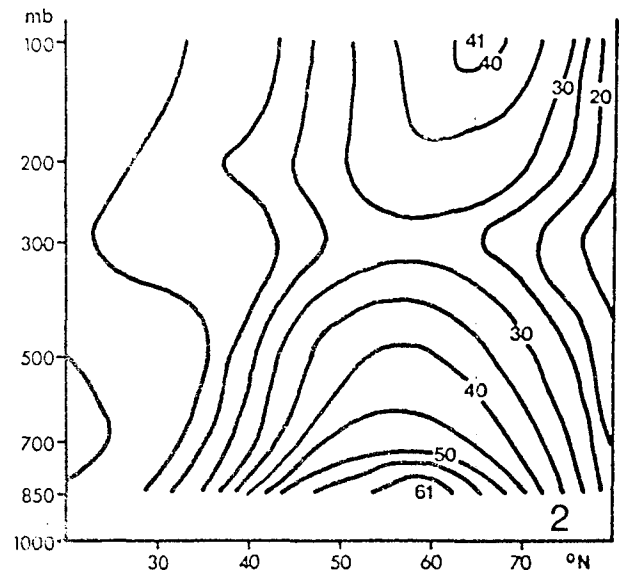
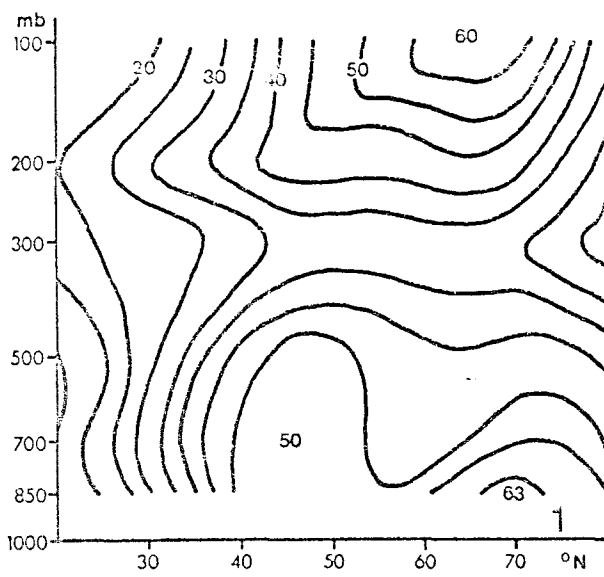
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968





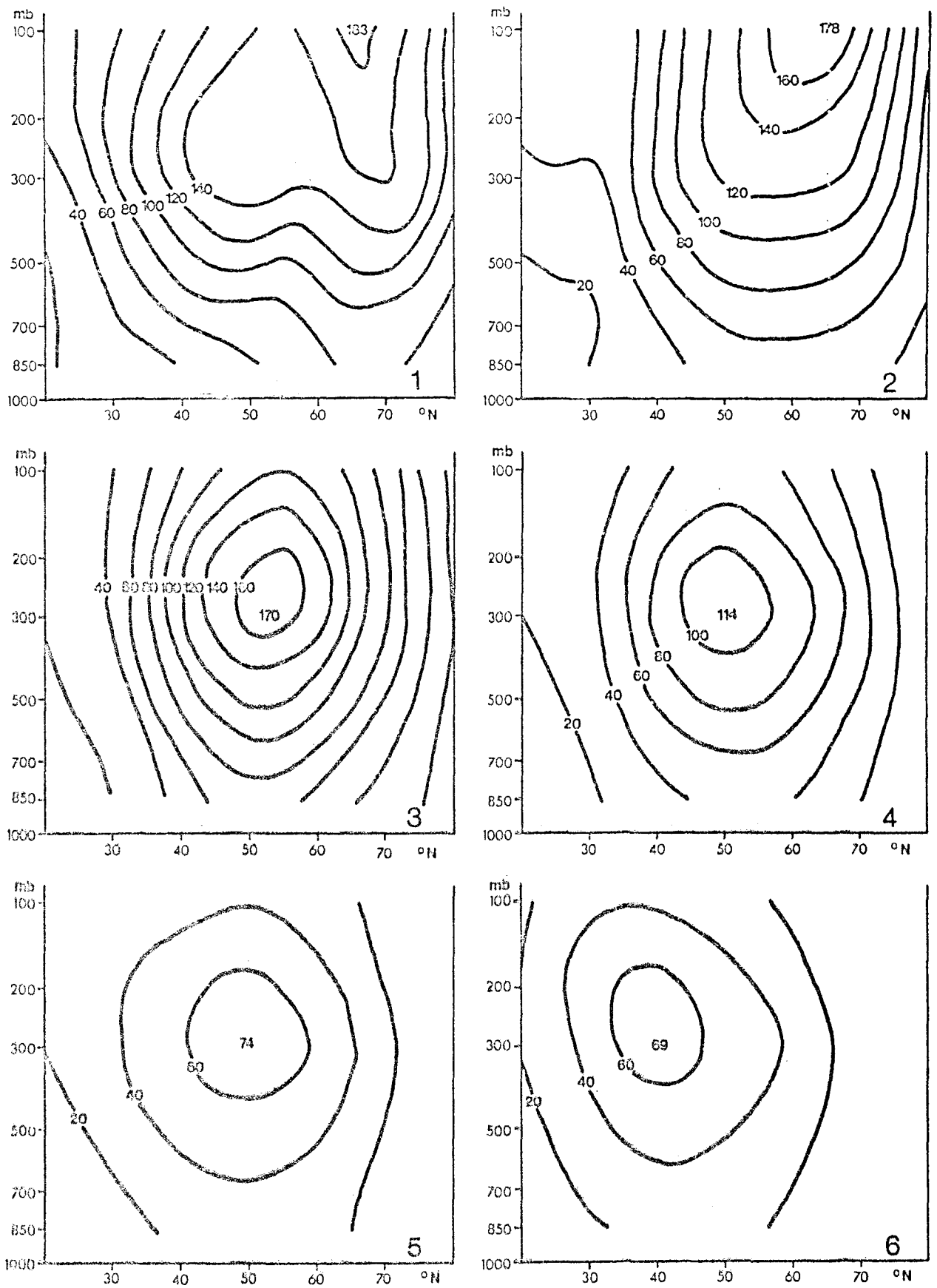
Wellenzahlspektren der mittleren Geopotentialamplituden der atmosphärischen Wellen für verschiedene geographische Breiten, angegeben in gpm.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



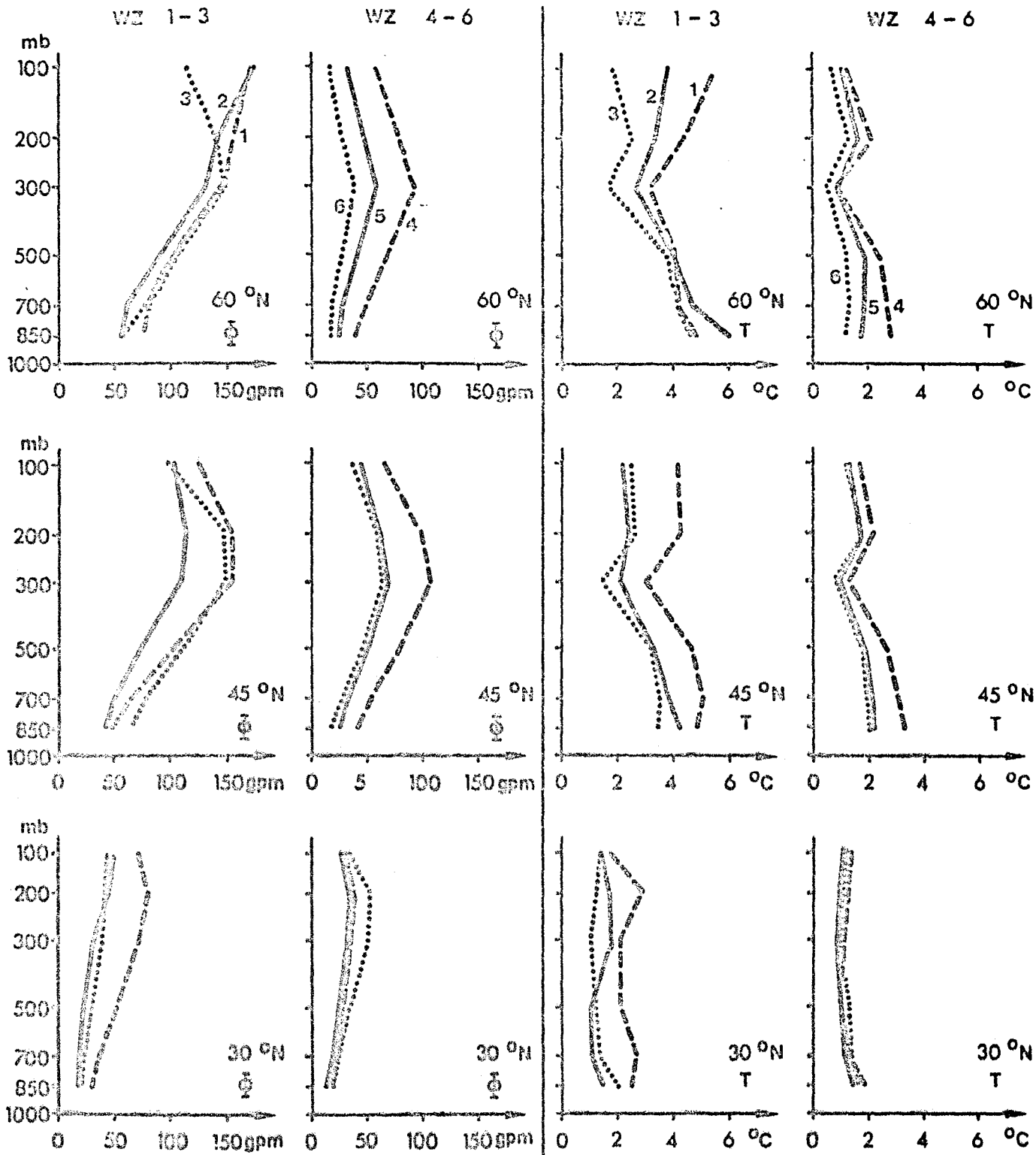
Mittlere Temperaturamplituden der atmosphärischen Wellen für die Wellenzahlen 1 bis 6 in  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



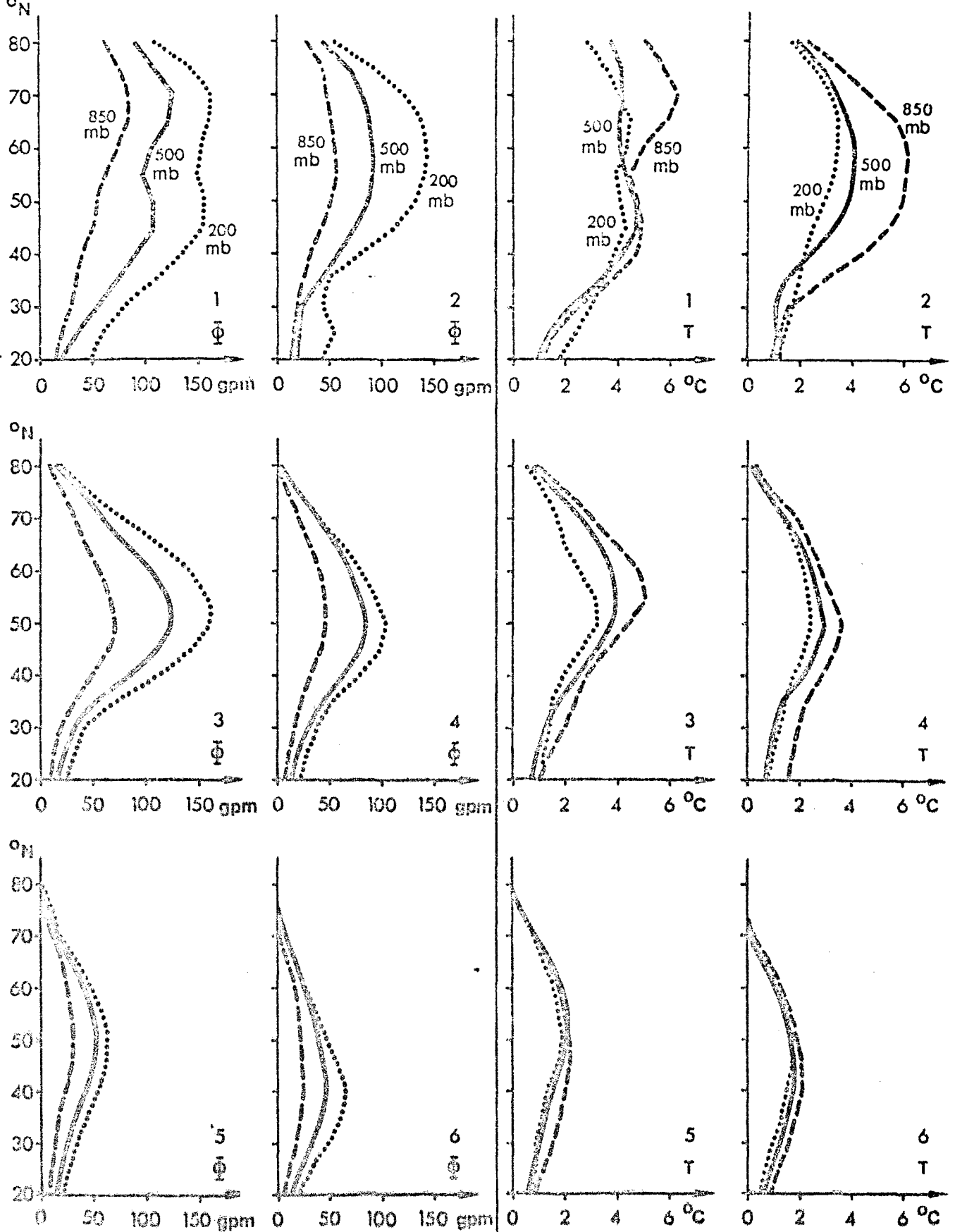
Mittlere Geopotentialamplituden der atmosphärischen Wellen für die Wellenzahlen 1 bis 6 in gpm. Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



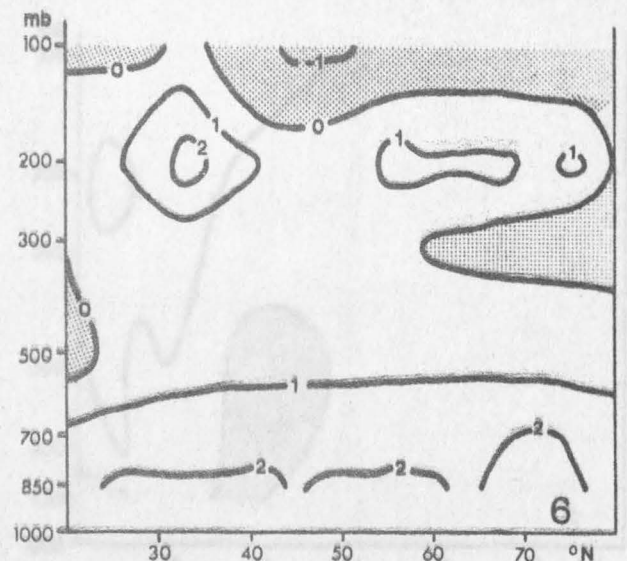
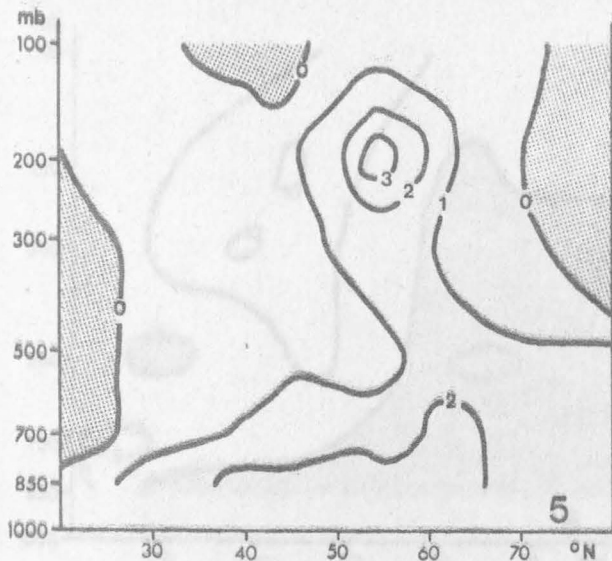
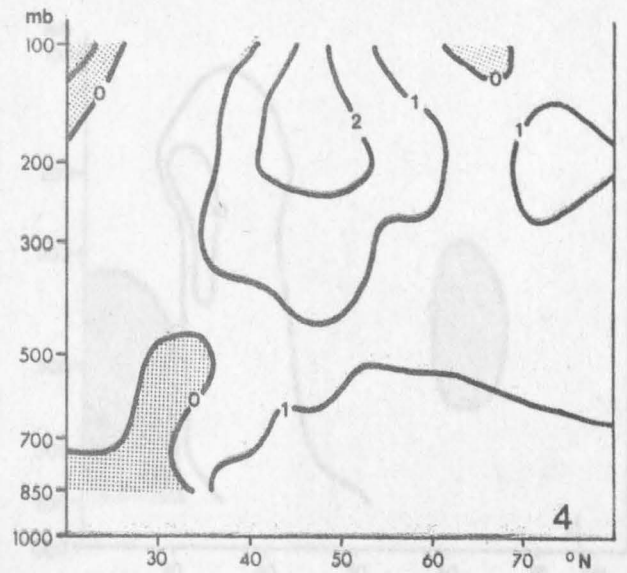
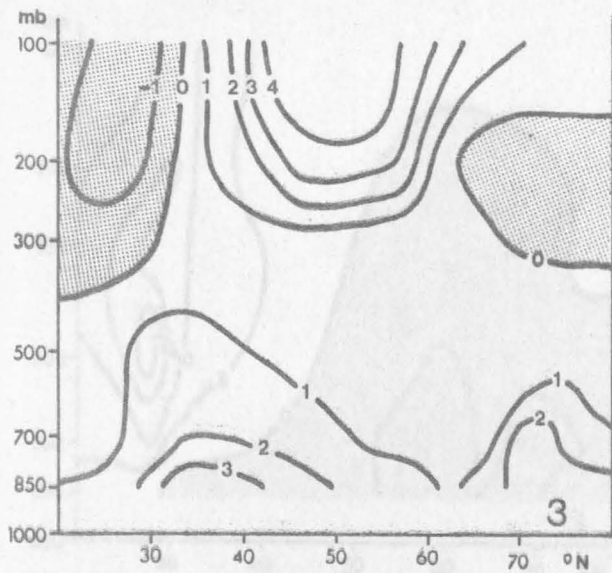
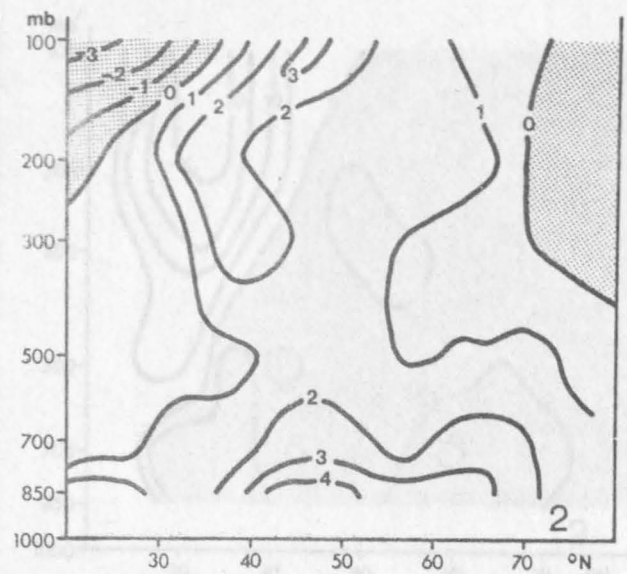
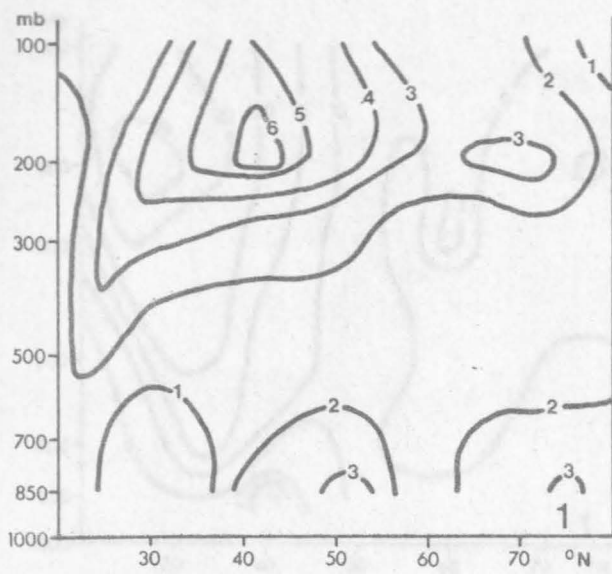
Mittlere Temperatur-(T) und Geopotentialamplituden ( $\Phi$ ) der atmosphärischen Wellen als Funktion des Drucks für die Wellenzahlen 1 bis 6 in verschiedenen geographischen Breiten, angegeben in °C und gpm.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



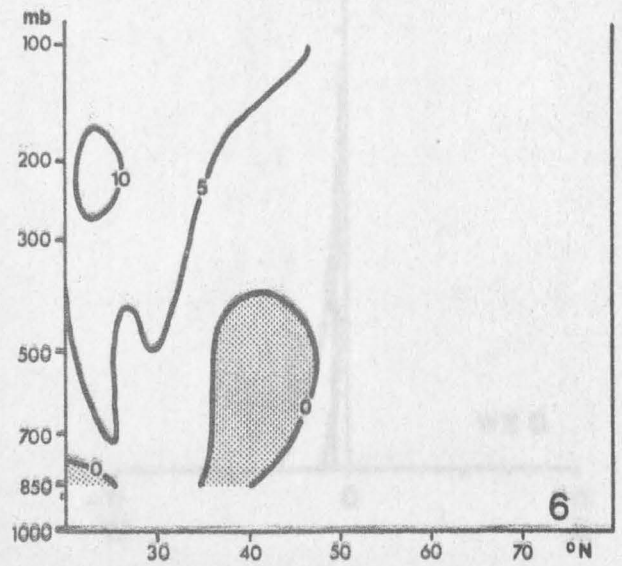
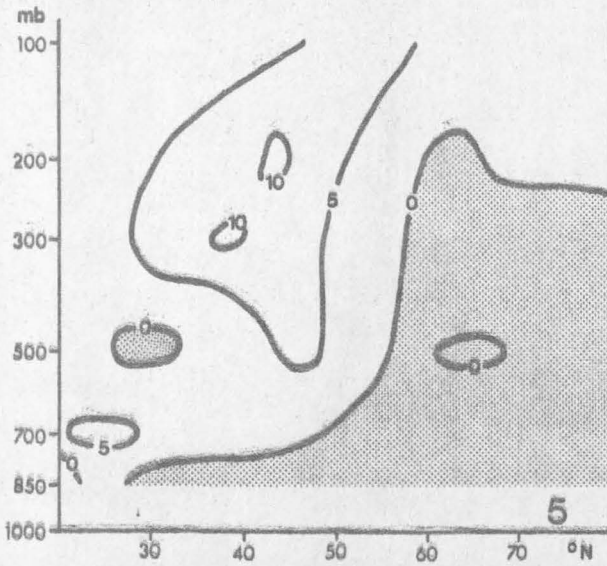
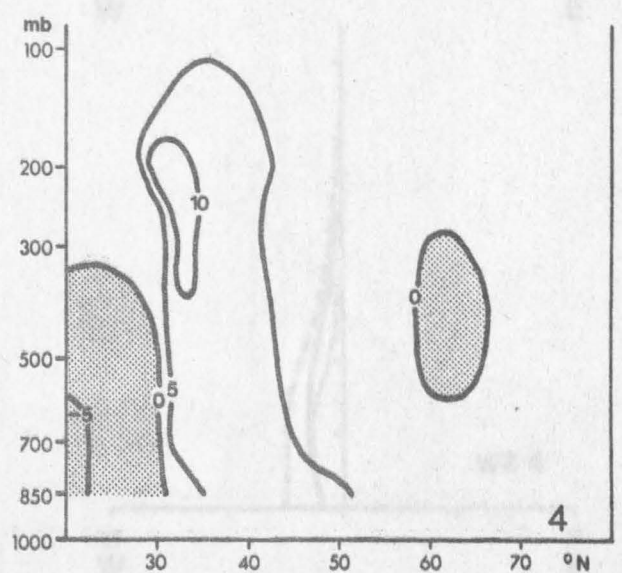
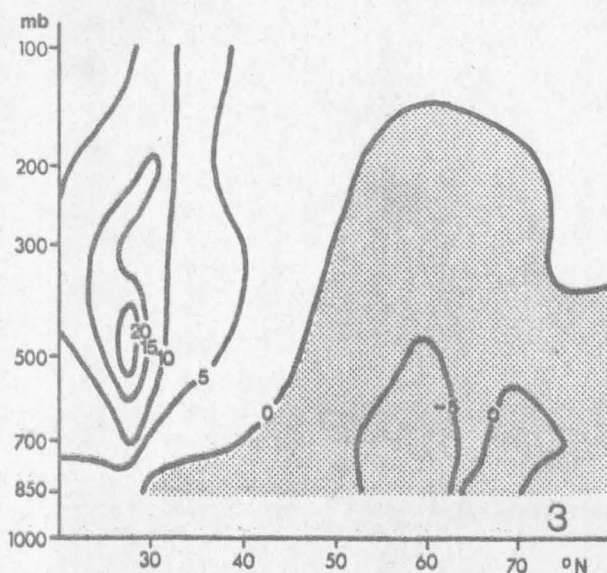
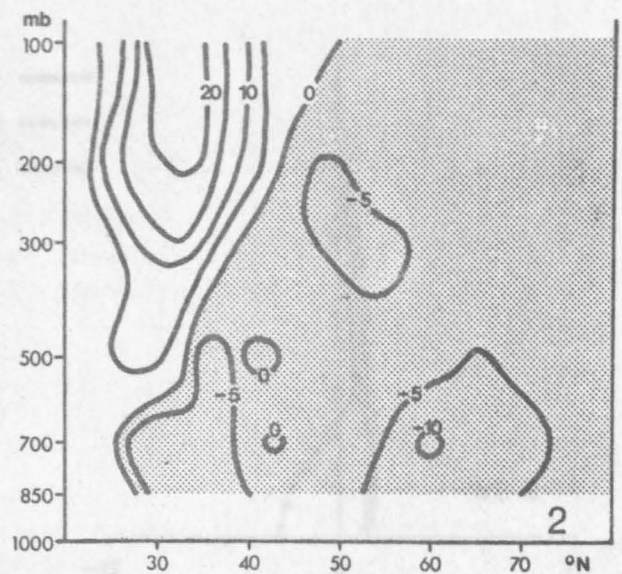
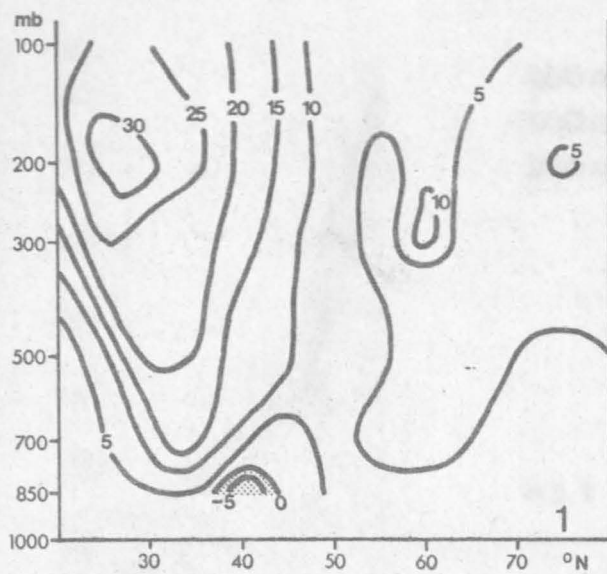
Mittlere Temperatur-(T) und Geopotentialamplituden ( $\Phi$ ) der atmosphärischen Wellen als Funktion der geographischen Breite für die Wellenzahlen 1 bis 6 in verschiedenen Druckflächen, angegeben in  $^{\circ}C$  und gpm.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



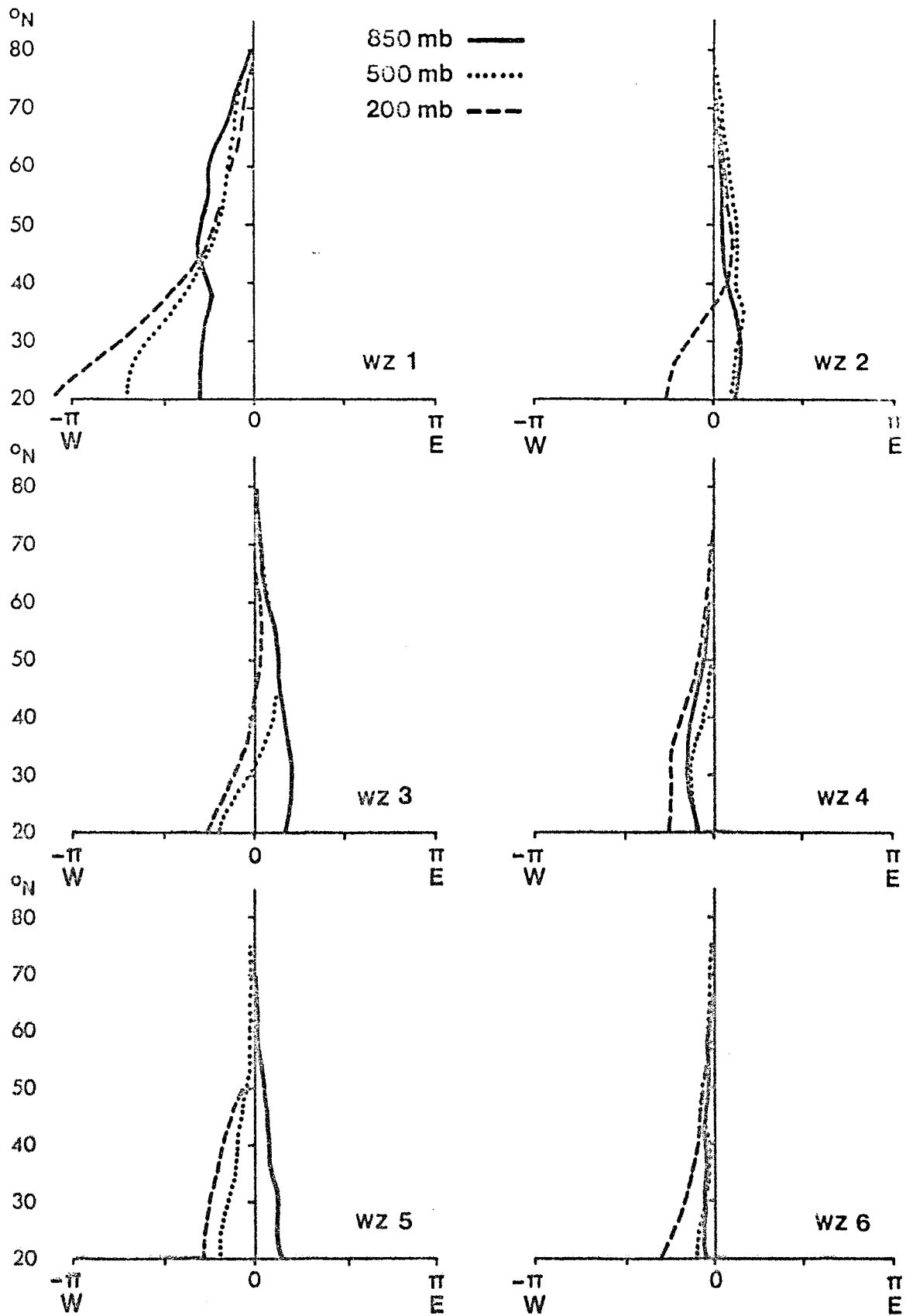
Mittlere Phasendifferenz zwischen den atmosphärischen Temperatur- und Geopotentialwellen für die Wellenzahlen 1 bis 6 in  $\pi/10 (=18^\circ/n)$ . Bei positiven Werten liegt die Temperaturwelle weiter westlich. Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



Mittlere horizontale Achsenneigung der atmosphärischen Geopotentialwellen, berechnet aus der Phasendifferenz zwischen 2 Breitenkreisen im Abstand von  $2,5^\circ$ , für die Wellenzahlen 1 bis 6 in Bogenmaß  $\times 10^{-2}$  ( $10 \approx \pi/30 = 6^\circ/n$ ). Positive Werte entsprechen einer Südwest-Nordost-Neigung. Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

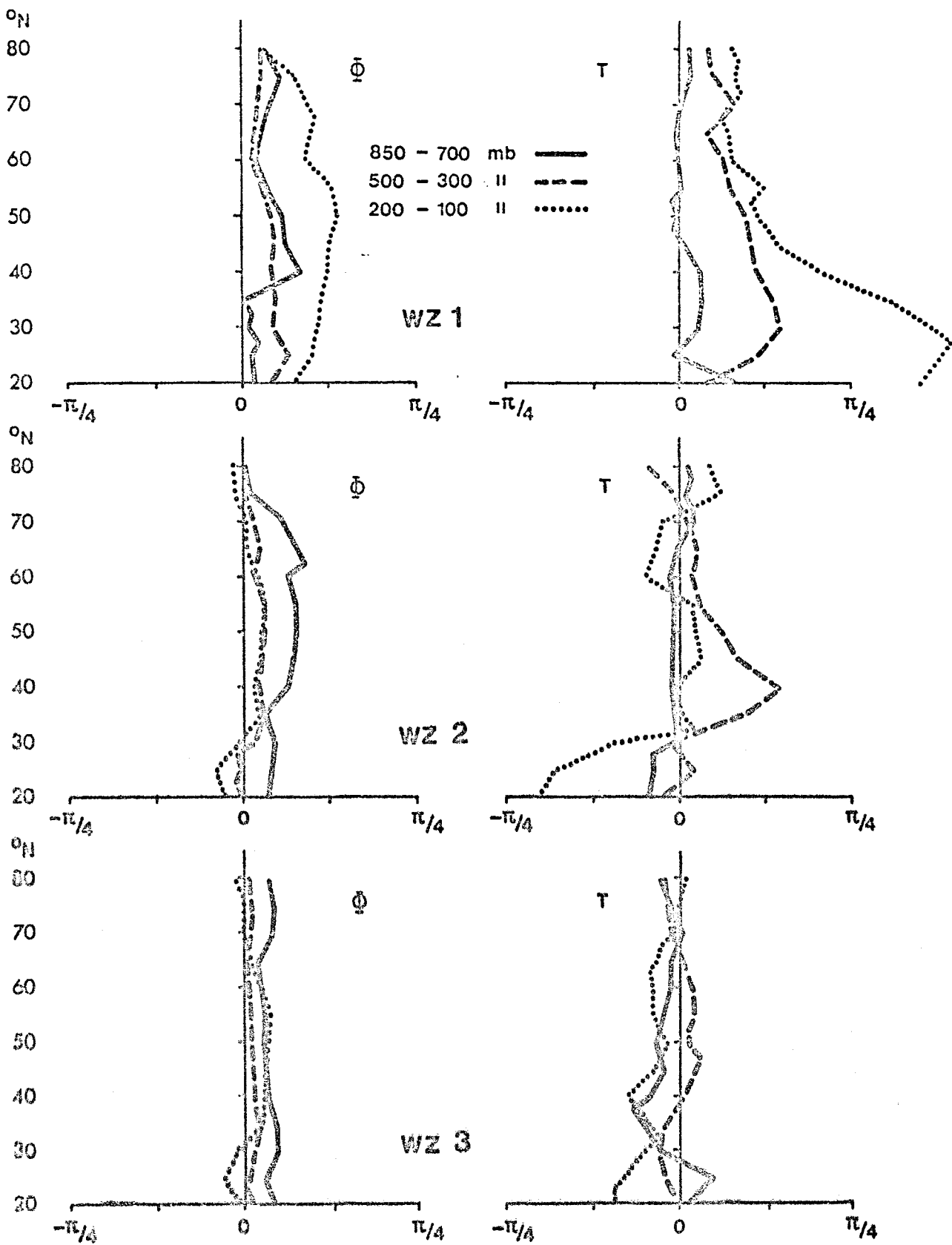
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



Mittlerer horizontaler Trogachsenverlauf im Geopotentialfeld der atmosphärischen Wellen für die Wellenzahlen (WZ) 1 bis 6, dargestellt durch die Phasenlage der Achsen als Funktion der geogr. Breite, bezogen auf die Achsenlage in  $80^{\circ}\text{N}$ .

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968

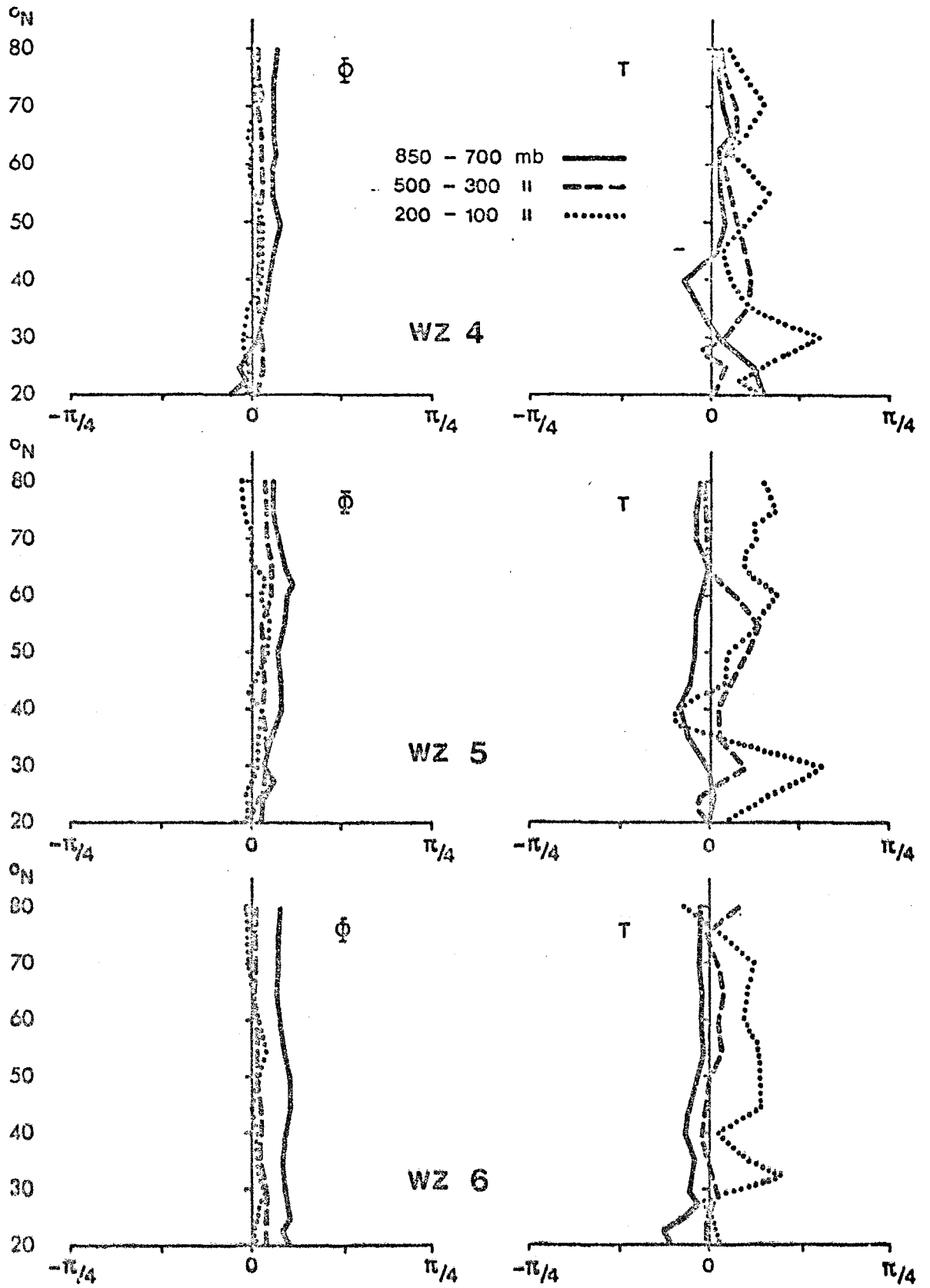


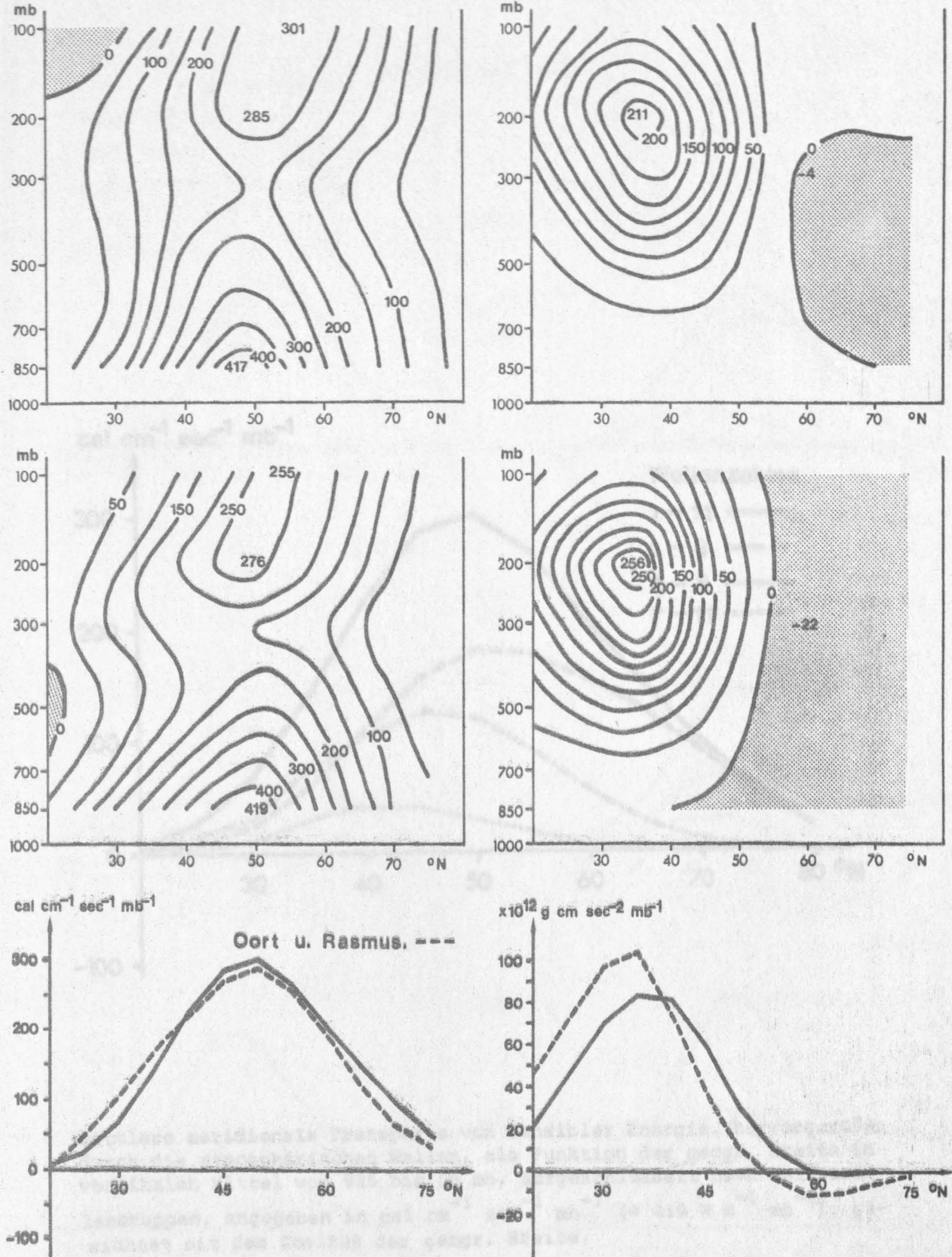


Mittlere Vertikaldifferenzen pro 100 mb der atmosphärischen Temperatur- und Geopotentialwellen als Funktion der geographischen Breite (a) für die Wellenzahlen (WZ) 1 bis 3 und (b) 4 bis 6. Bei positiven Werten, angegeben im Bogenmaß, liegt die Achse im höheren Niveau weiter westlich.

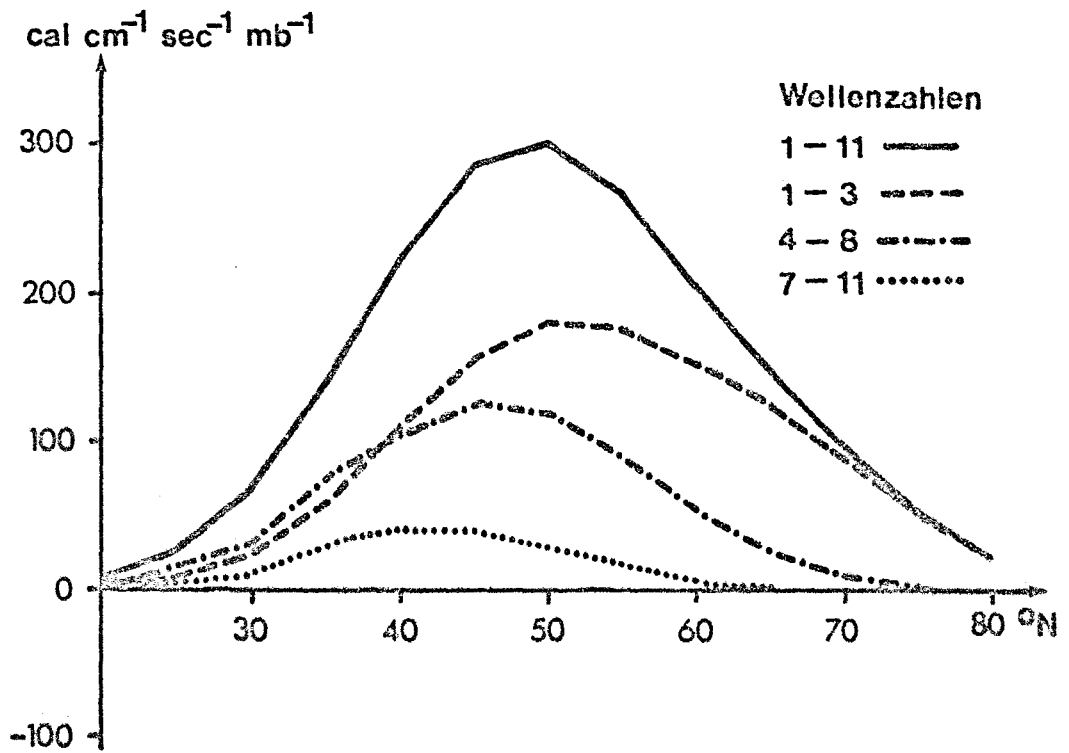
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968

b.





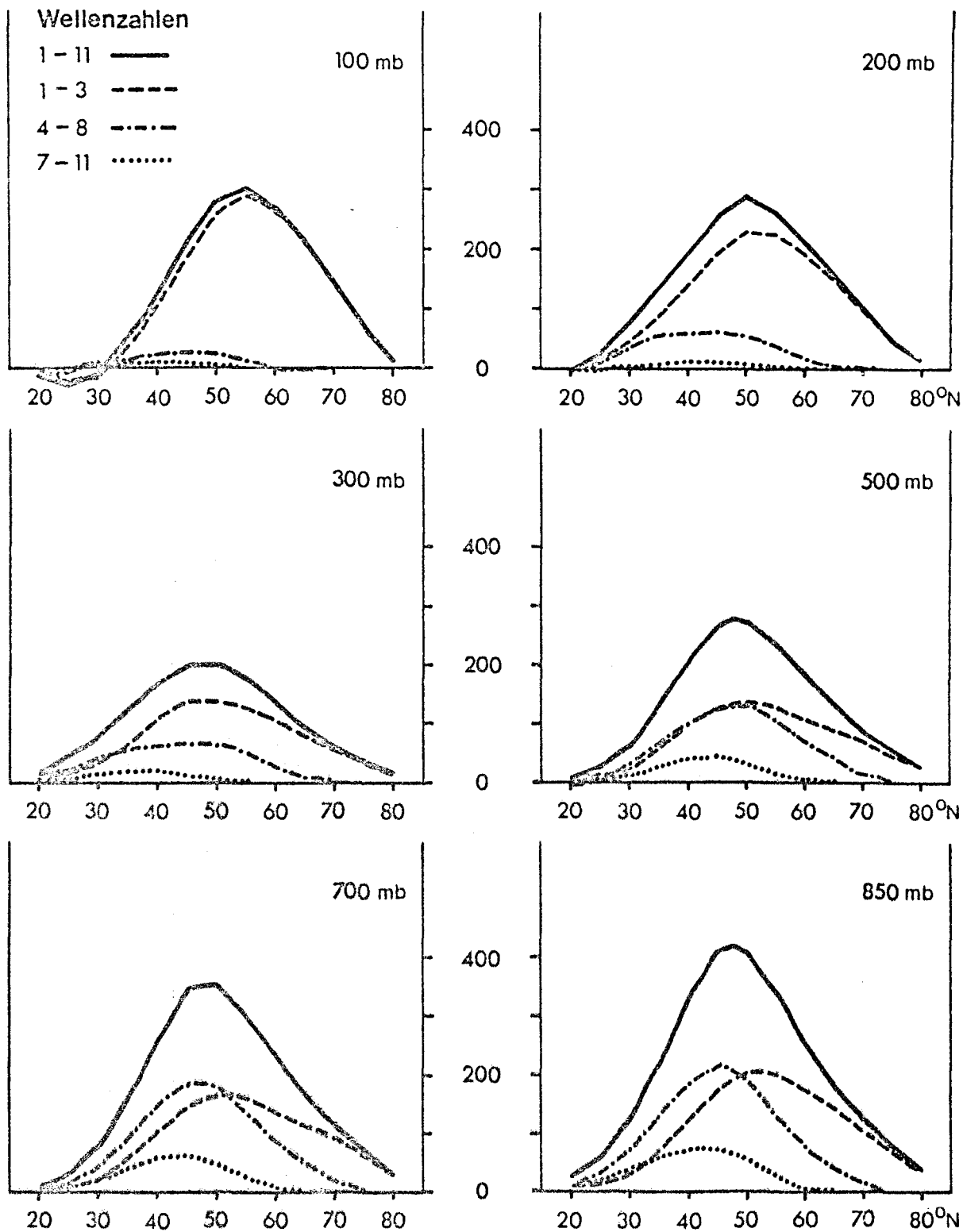
Mittlere meridionale Transporte von sensibler Energie (l.) und Drehimpuls (r.), hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, für den Zeitraum Nov. bis Jan. im Meridionalschnitt im Winterhalbjahr 1967/68, für fünf Winterhalbjahre nach A.H. OORT u. E.M. RASMUSSEN (1971, Mitte) und im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb. Positive Transporte nach Norden, mit dem Cosinus der geogr. Breite gewichtet. Einheiten in  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{mb}^{-1}$  ( $= 419 \text{ W m}^{-1} \text{mb}^{-1}$ ) und  $10^{12} \text{g cm sec}^{-2} \text{mb}^{-1}$ .



Mittlere meridionale Transporte von sensibler Energie, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, als Funktion der geogr. Breite im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, aufgeschlüsselt nach Wellenzahlengruppen, angegeben in  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{mb}^{-1}$  ( $= 419 \text{ W m}^{-1} \text{mb}^{-1}$ ), gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite.

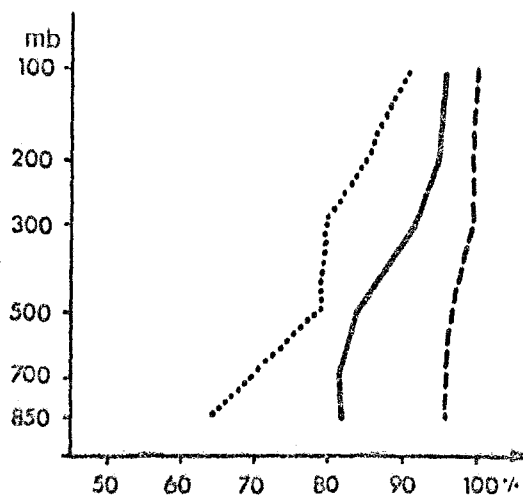
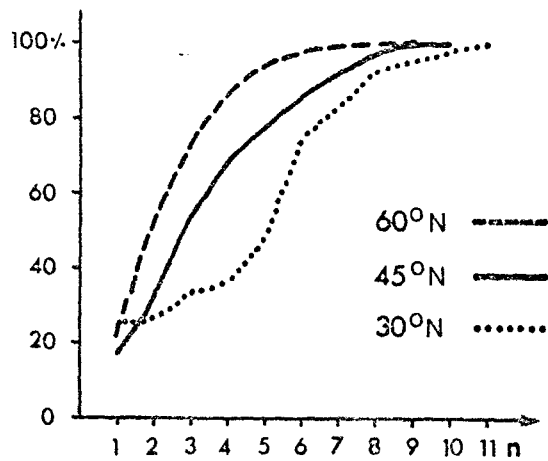
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968

cal cm<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup> mb<sup>-1</sup>



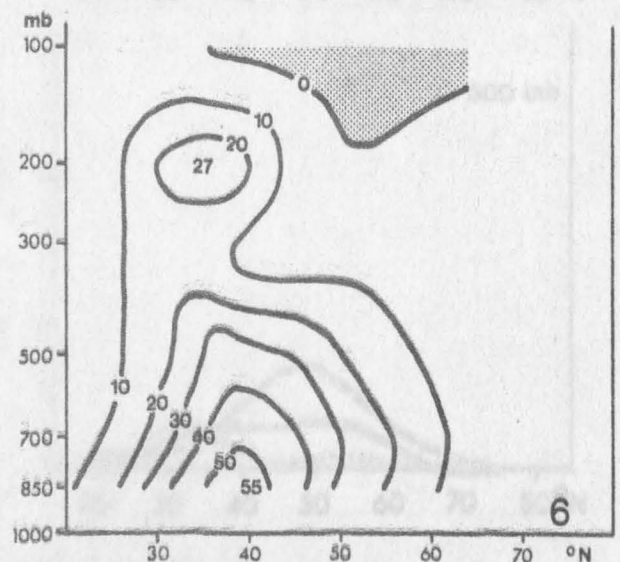
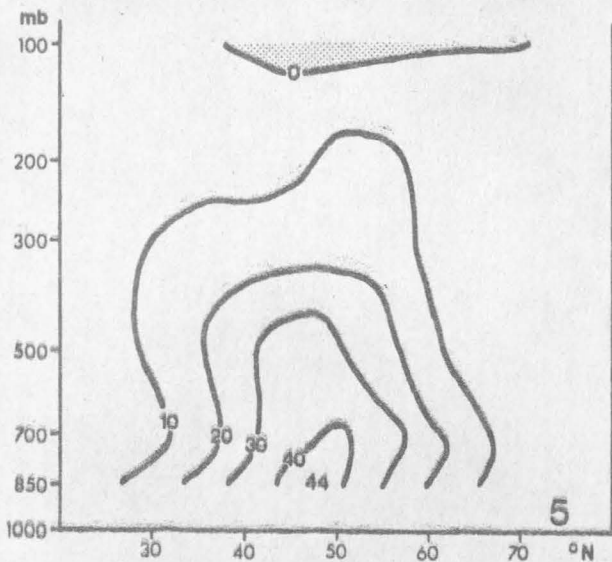
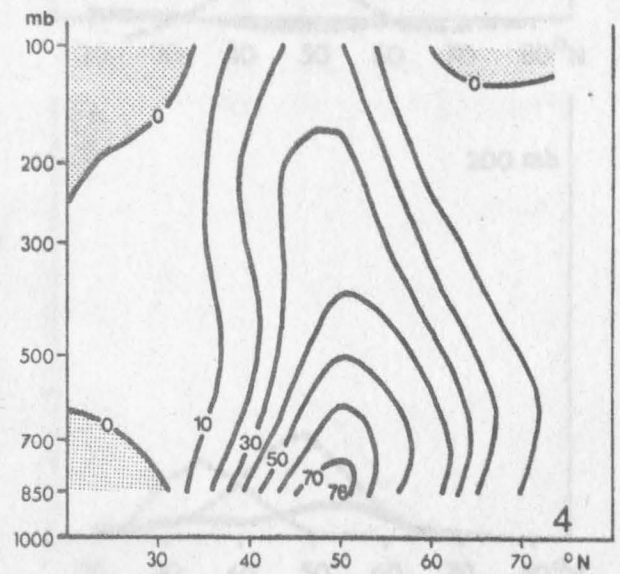
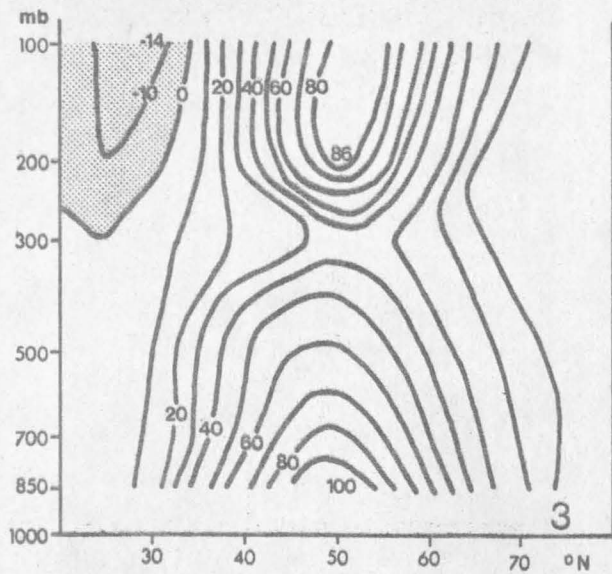
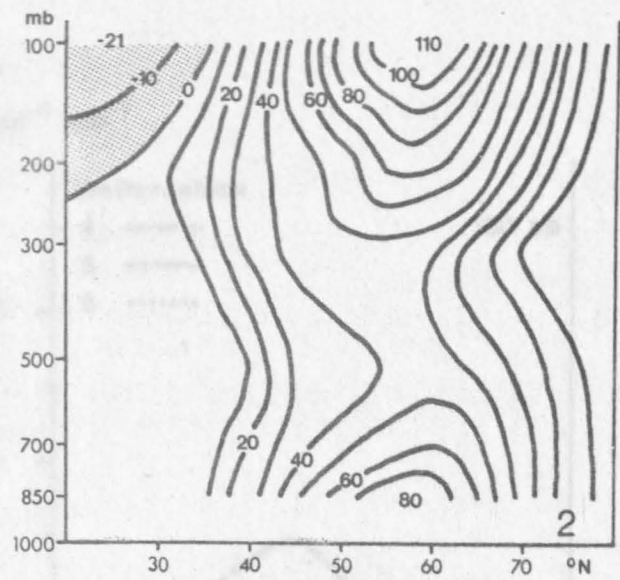
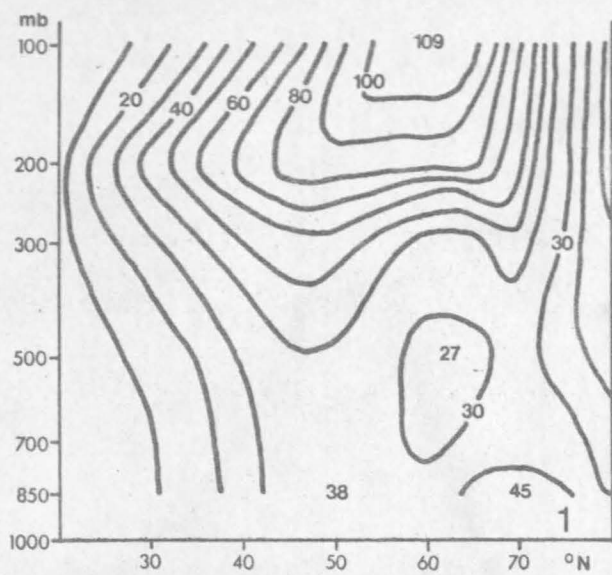
Mittlere meridionale Transporte von sensibler Energie, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, als Funktion der geogr. Breite in den einzelnen Druckflächen zwischen 850 und 100 mb, aufgeschlüsselt nach Wellenzahlengruppen, angegeben in cal cm<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup> mb<sup>-1</sup> (=419 W m<sup>-1</sup> mb<sup>-1</sup>), gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



Mittlerer absoluter Transport von sensibler Energie in meridionaler Richtung, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, angegeben in Prozenten, aufgeschlüsselt nach den Anteilen der Wellenzahlen 1 bis n im vertikalen Mittel (oben) und nach den Beiträgen der Wellenzahlen 1 bis 6 als Funktion des Drucks (unten).

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



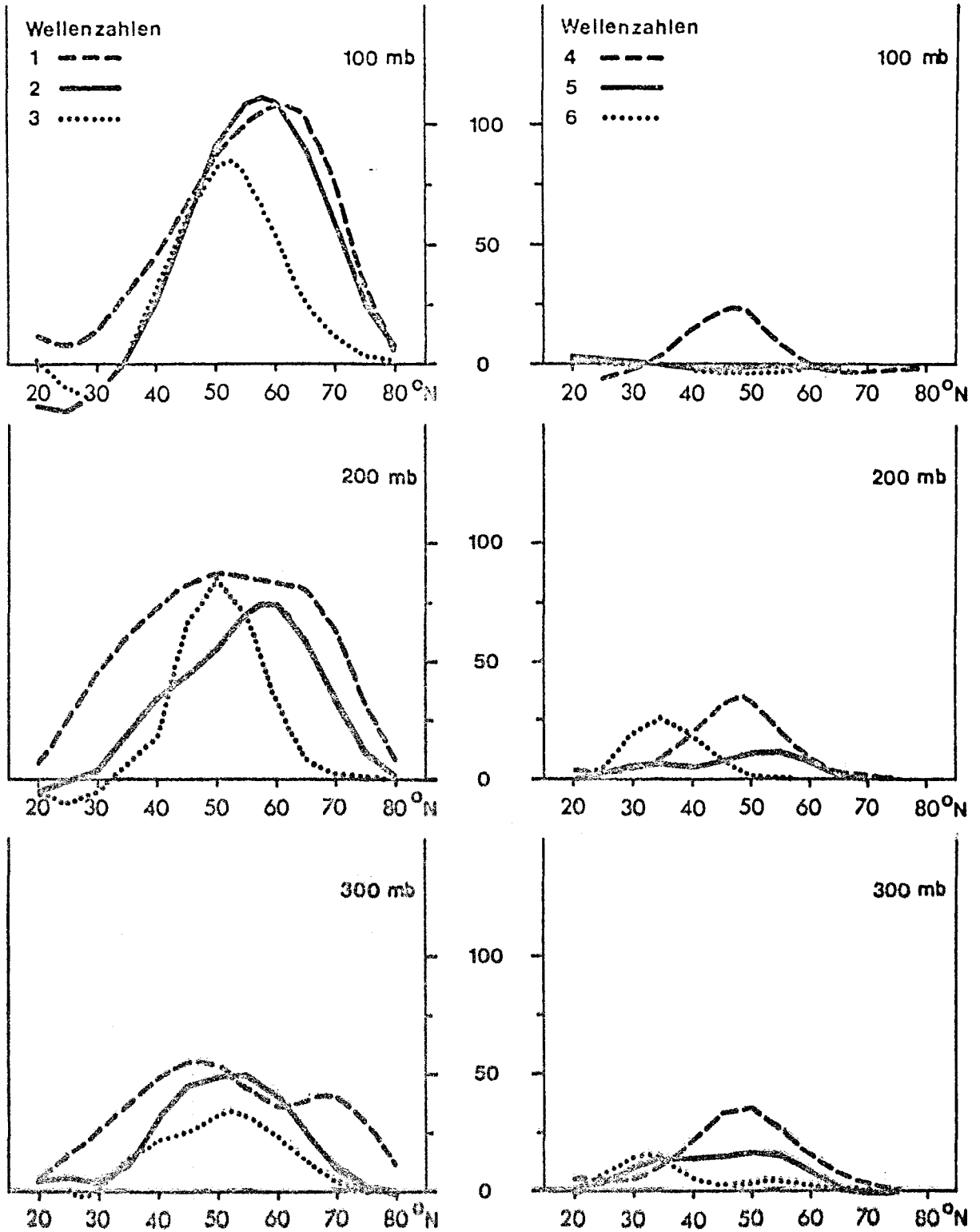
Mittlere meridionale Transporte von sensibler Energie, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, für die Wellenzahlen 1 bis 6, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite. Positive Werte in  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{mb}^{-1}$  ( $= 419 \text{ W m}^{-1} \text{mb}^{-1}$ ) entsprechen nordwärts gerichteten Transporten. Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968

Abb.16

a.

cal cm<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup> mb<sup>-1</sup>



Mittlere meridionale Transporte von sensibler Energie, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, als Funktion der geographischen Breite für die Wellenzahlen 1 bis 6 in 100 bis 300 mb (a) und 500 bis 850 mb (b). Positive Werte, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite, angegeben in cal cm<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup> mb<sup>-1</sup> (= 419 W m<sup>-1</sup> mb<sup>-1</sup>), entsprechen nordwärts gerichteten Transporten.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968

Abb.17a



b.

cal cm<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup> mb<sup>-1</sup>

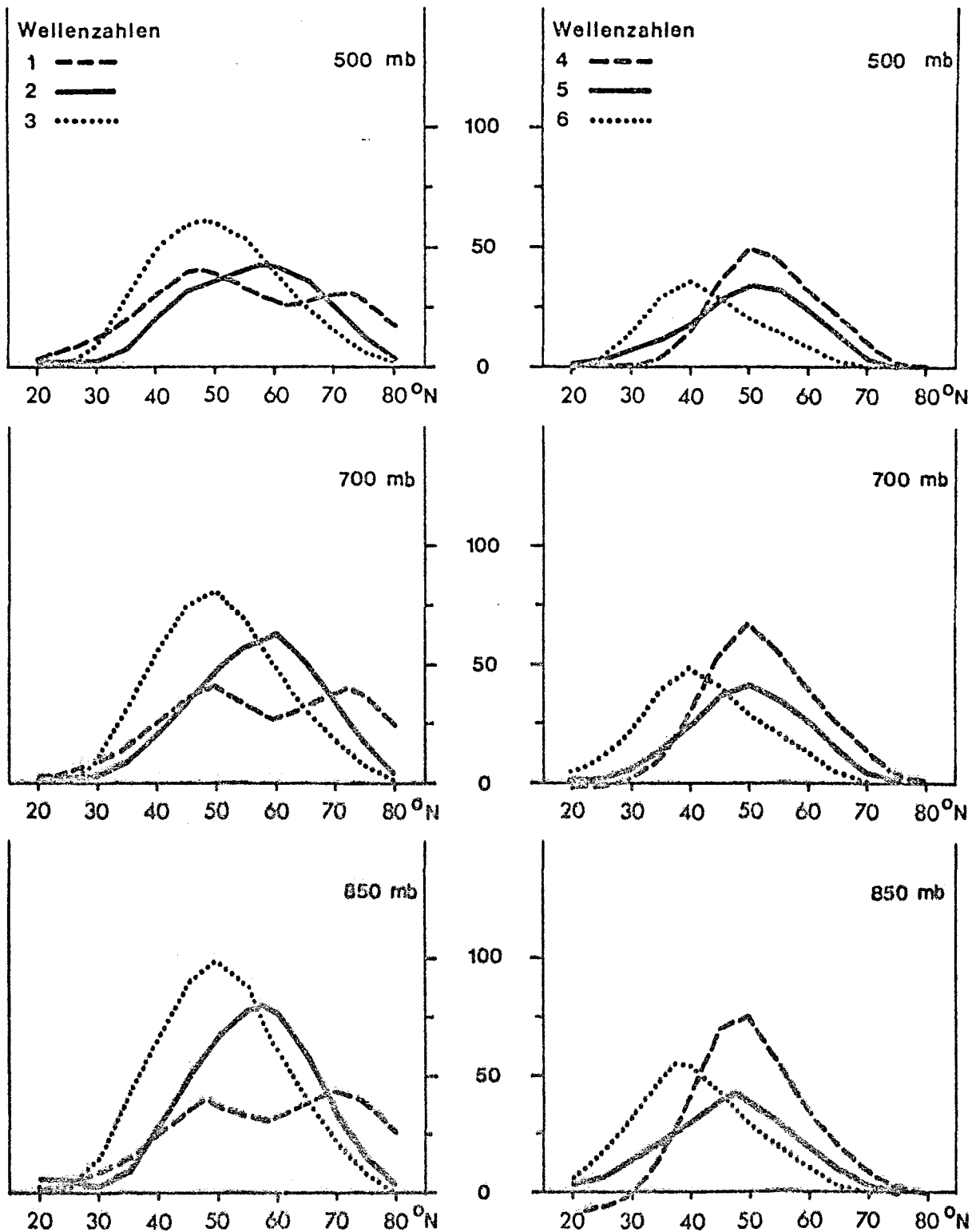
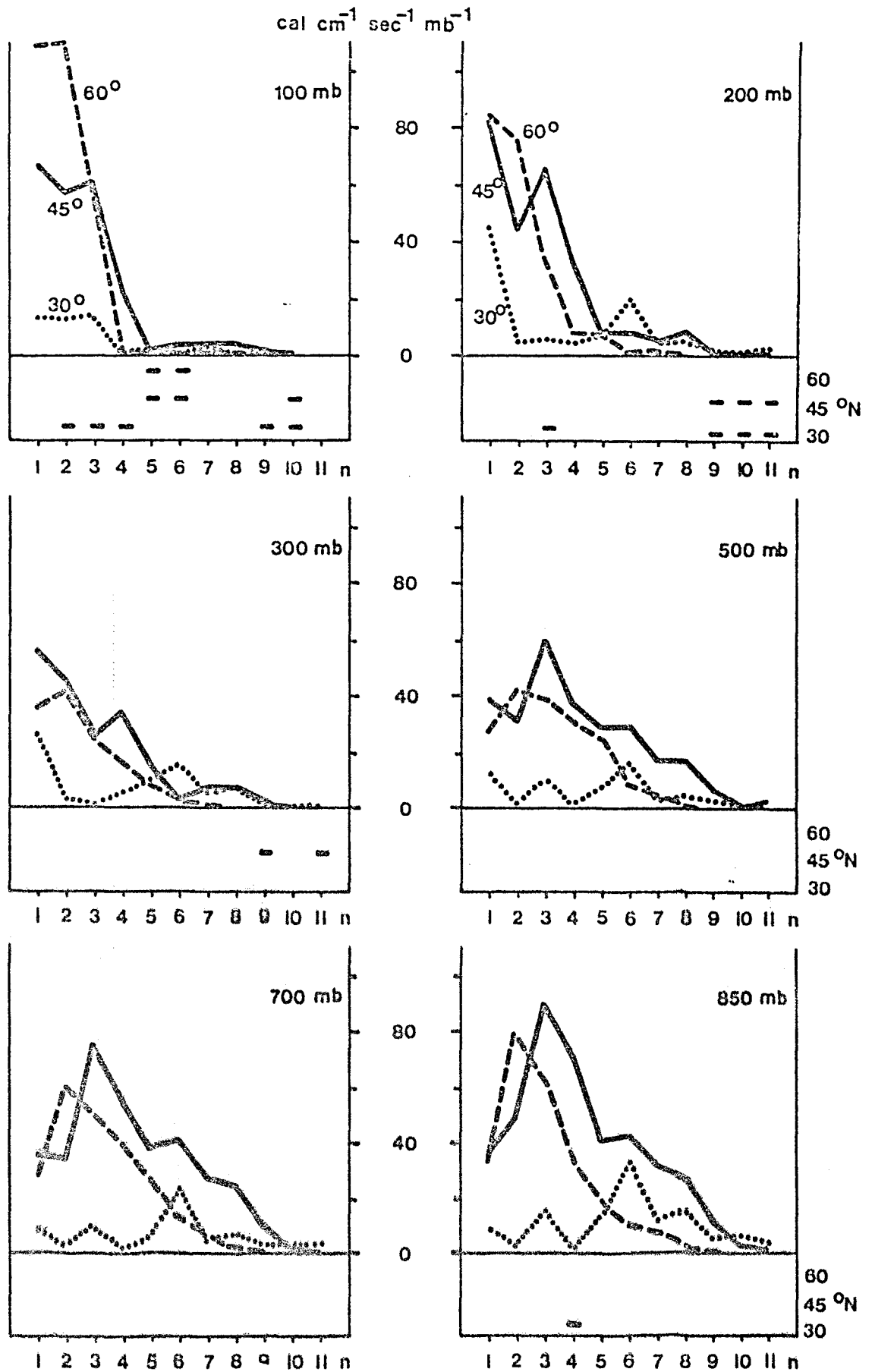
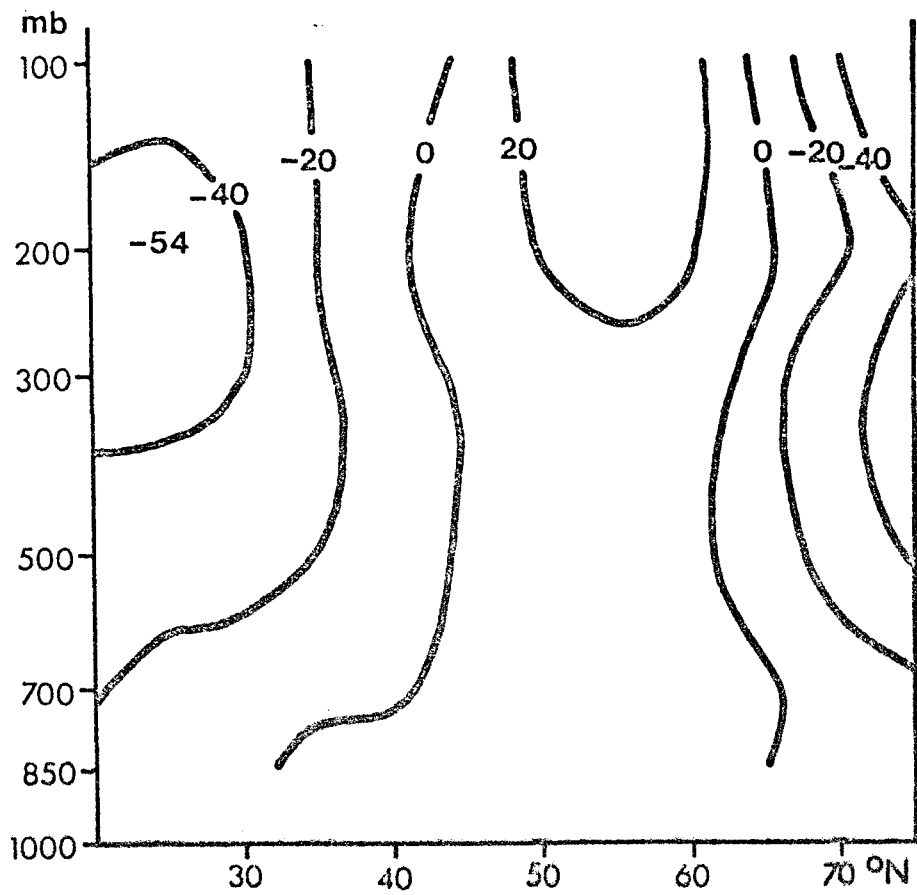


Abb.17b

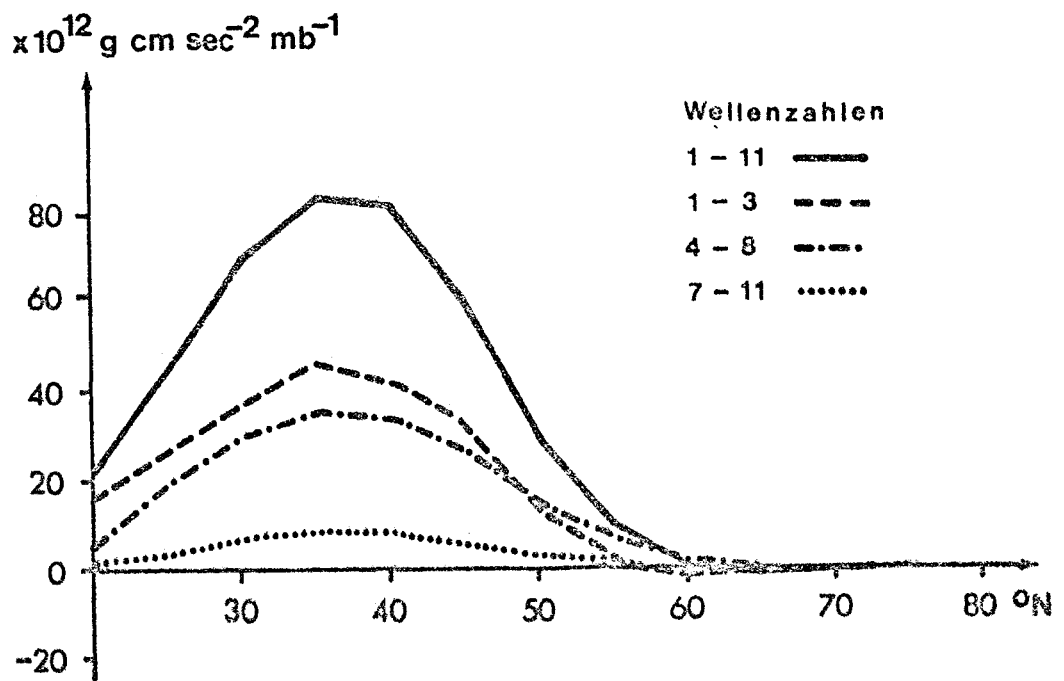


Wellenzahlspektren der mittleren meridionalen Transporte sensibler Energie für verschiedene geographische Breiten, dargestellt in Absolutbeträgen. Negative Transporte sind durch Minuszeichen unterhalb der Spektren gekennzeichnet. Positive Zahlen, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite, entsprechen nach Norden gerichteten Transporten.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



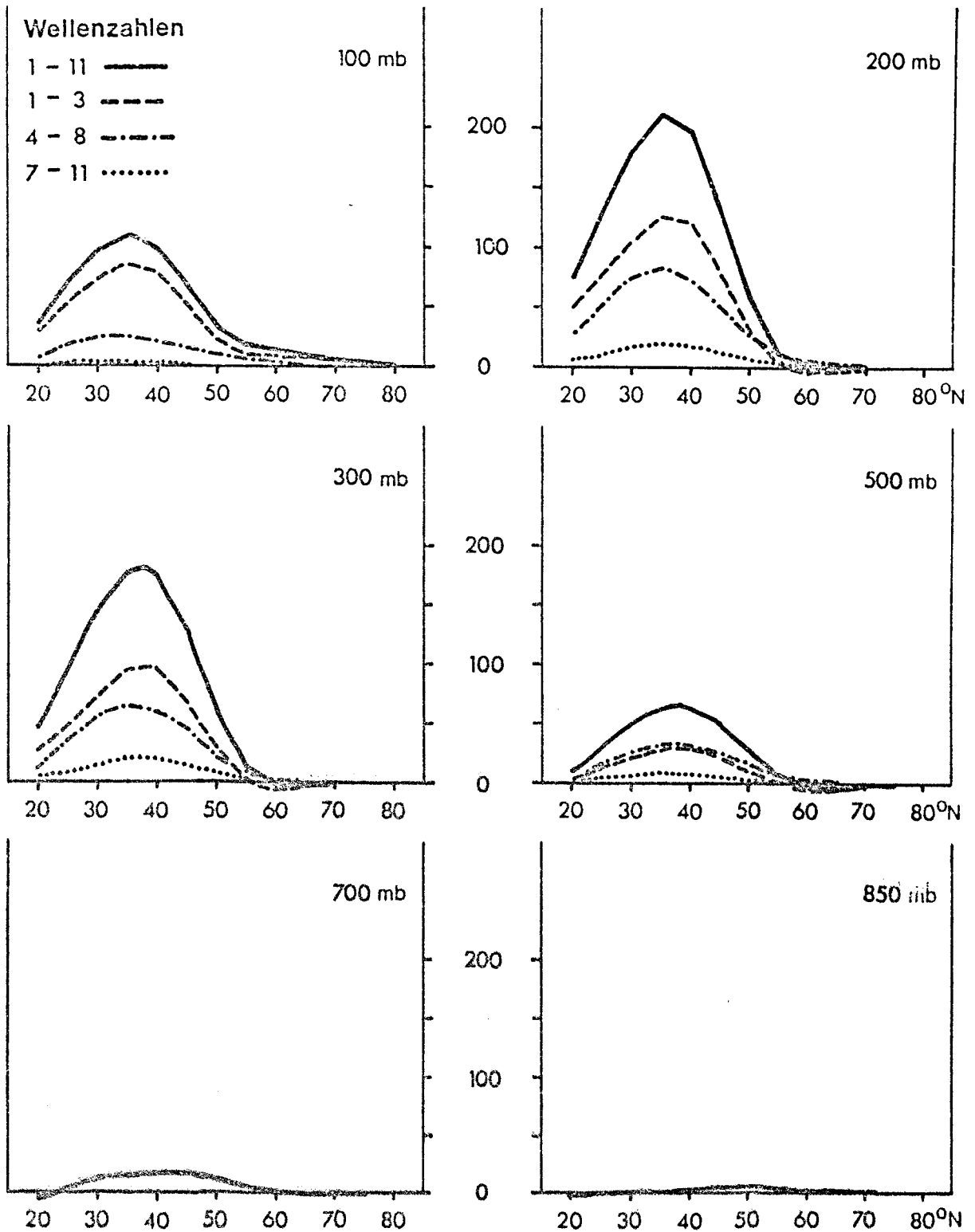
Differenzen in der mittleren geopotentiellen Höhe im Zeitraum November bis Januar zwischen den Werten im Winterhalbjahr 1967/68 und einem Fünf-Jahre-Mittel nach A.H. OORT u. E.M. RASMUSSEN (1971) in gpm. Bei negativen Werten liegen Werte von O.u.R. höher.



Mittlere meridionale Transporte von Drehimpuls, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, als Funktion der geogr. Breite im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, aufgeschlüsselt nach Wellenzahlengruppen, angegeben in  $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ , gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite.

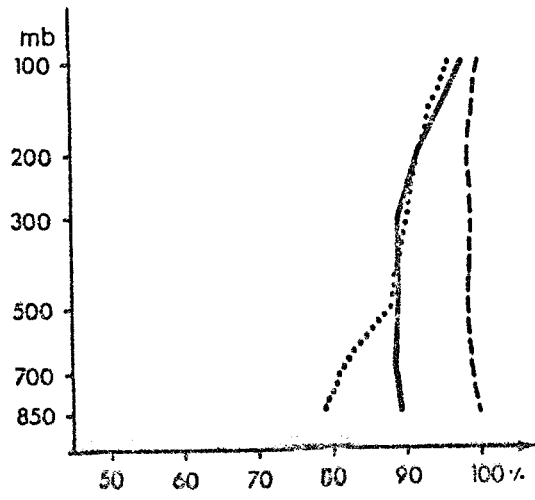
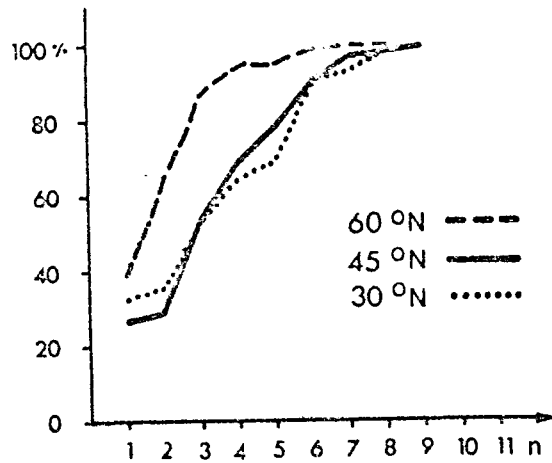
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968

$\times 10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$

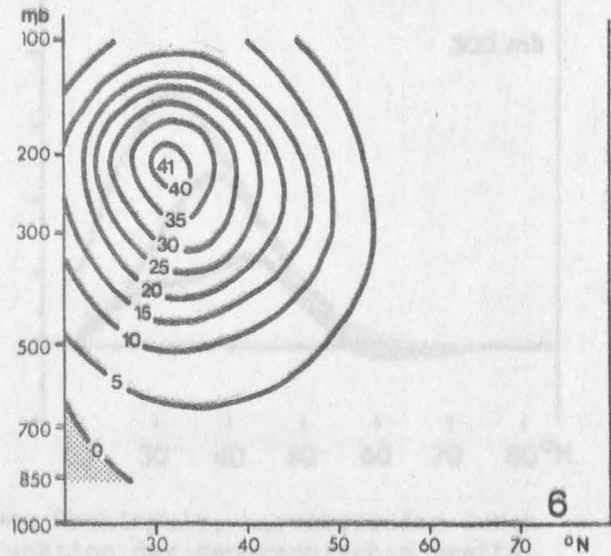
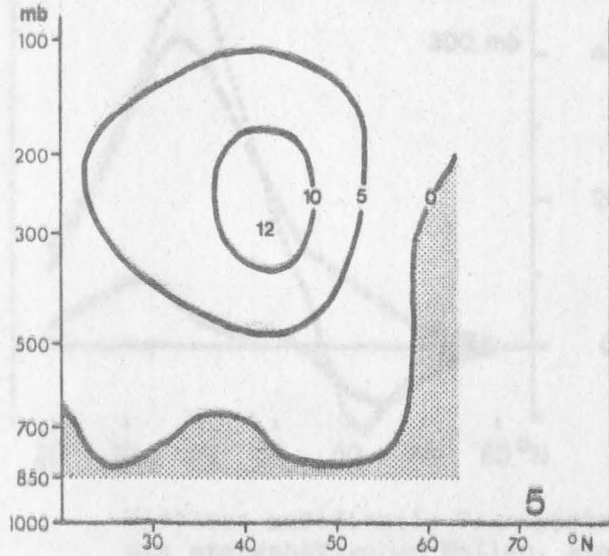
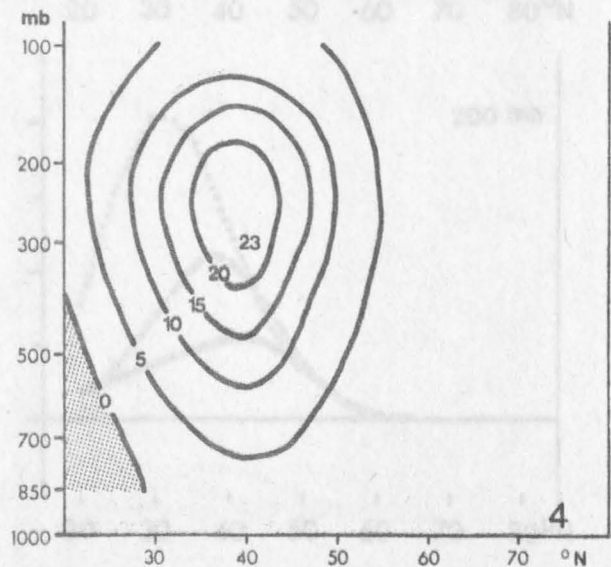
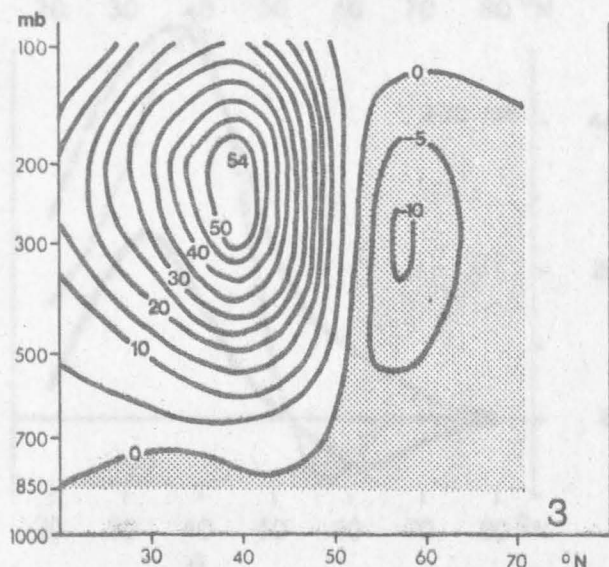
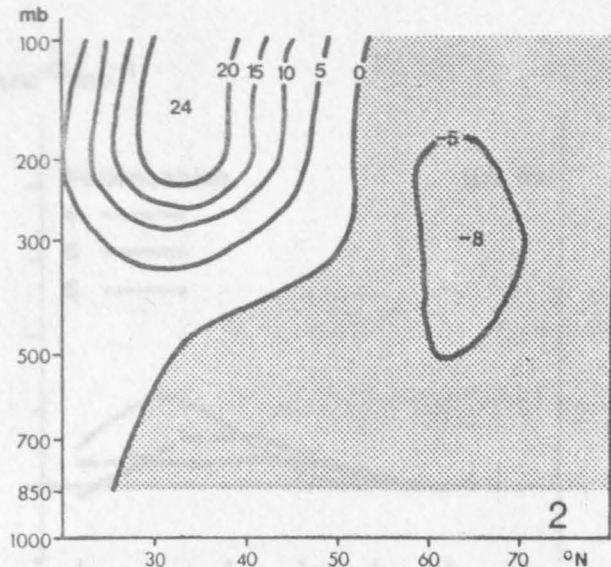
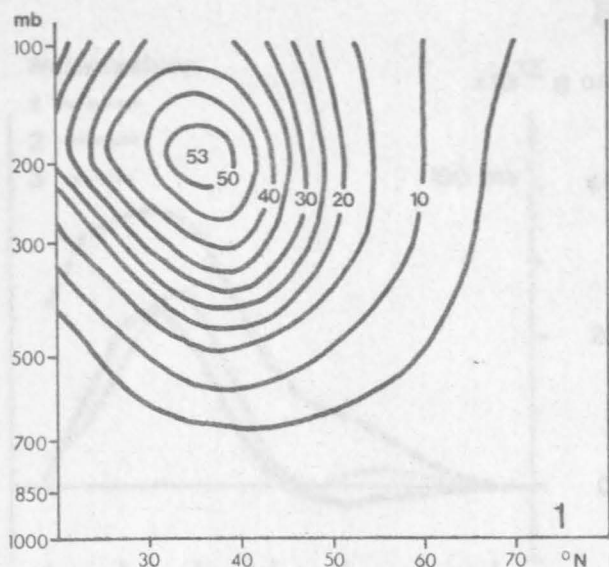


Mittlere meridionale Transporte von Drehimpuls, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, als Funktion der geographischen Breite in den einzelnen Druckflächen zwischen 850 und 100 mb, aufgeschlüsselt nach Wellenzahlengruppen, angegeben in  $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ , gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



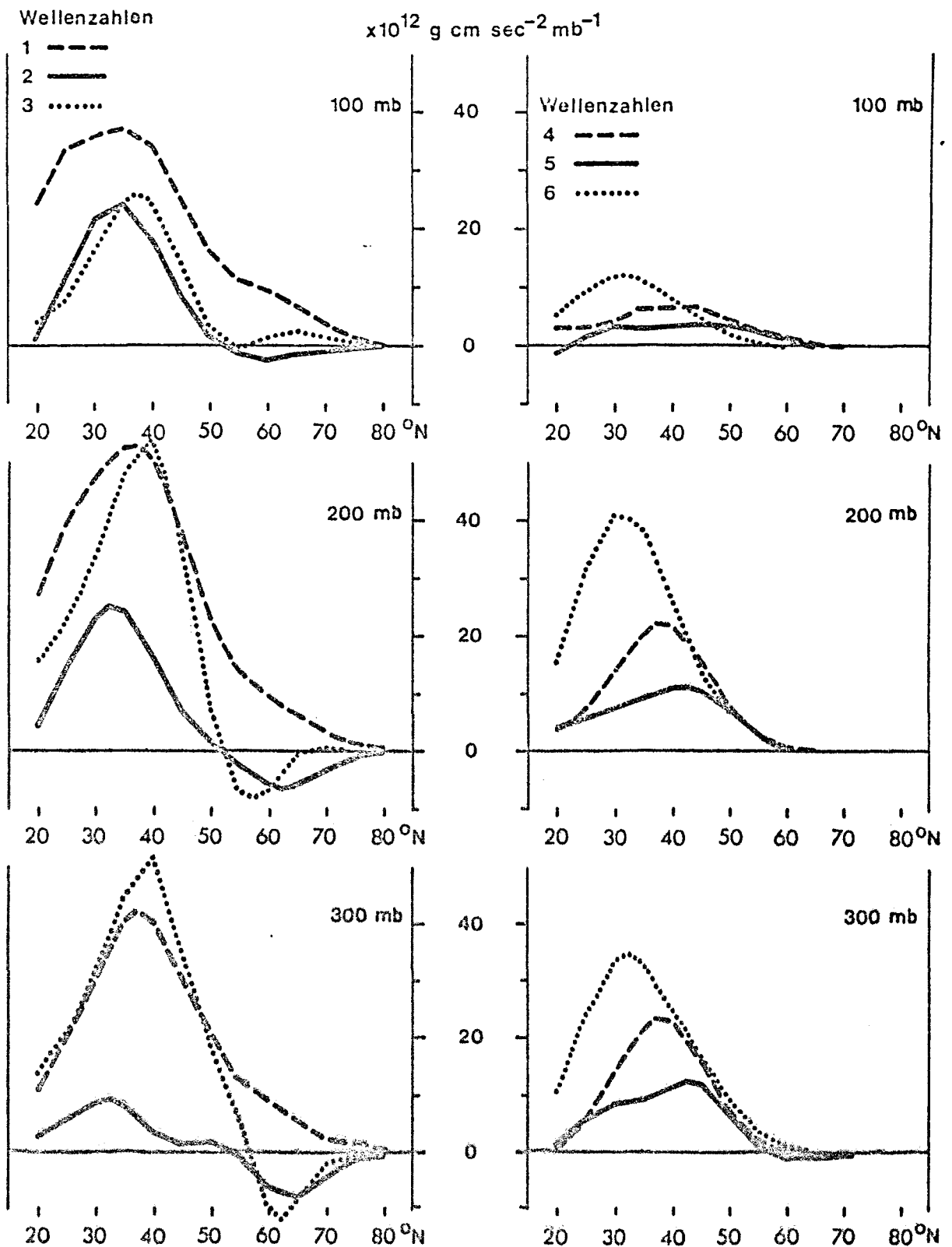
Mittlerer absoluter Transport von Drehimpuls in meridionaler Richtung, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, angegeben in Prozenten, aufgeschlüsselt nach den Anteilen der Wellenzahlen 1 bis n im vertikalen Mittel (oben) und nach den Beiträgen der Wellenzahlen 1 bis 6 als Funktion des Drucks (unten).



Mittlere meridionale Transporte von Drehimpuls, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, für die Wellenzahlen 1 bis 6, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite. Positive Werte in  $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$  entsprechen nordwärts gerichteten Transporten. Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968

a.



Mittlere meridionale Transporte von Drehimpuls, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, als Funktion der geographischen Breite für die Wellenzahlen 1 bis 6 in 100 bis 300 mb (a) und 500 bis 850 mb (b). Positive Werte, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite, angegeben in  $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$ , entsprechen nordwärts gerichteten Transporten.

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



b.

$\times 10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$

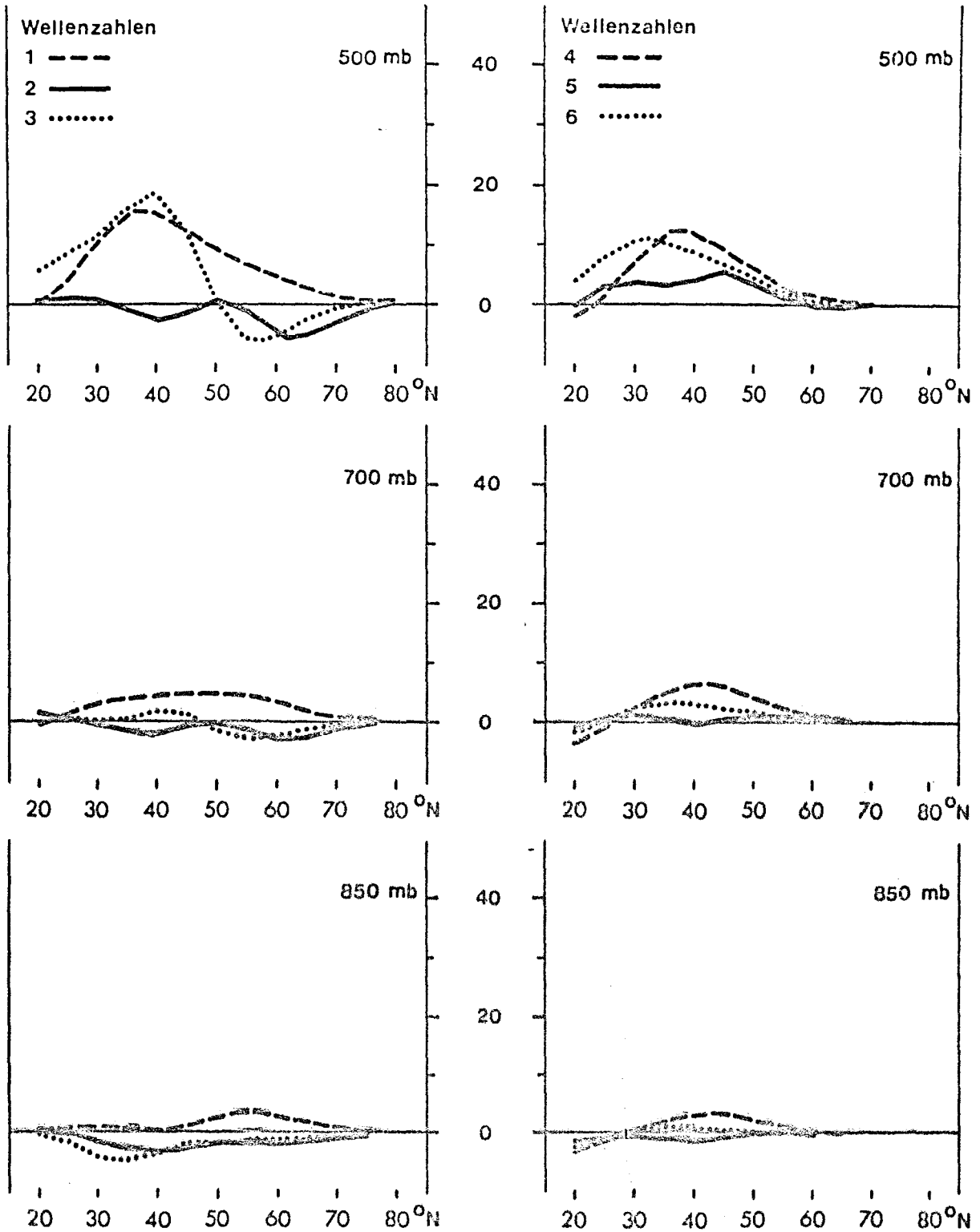
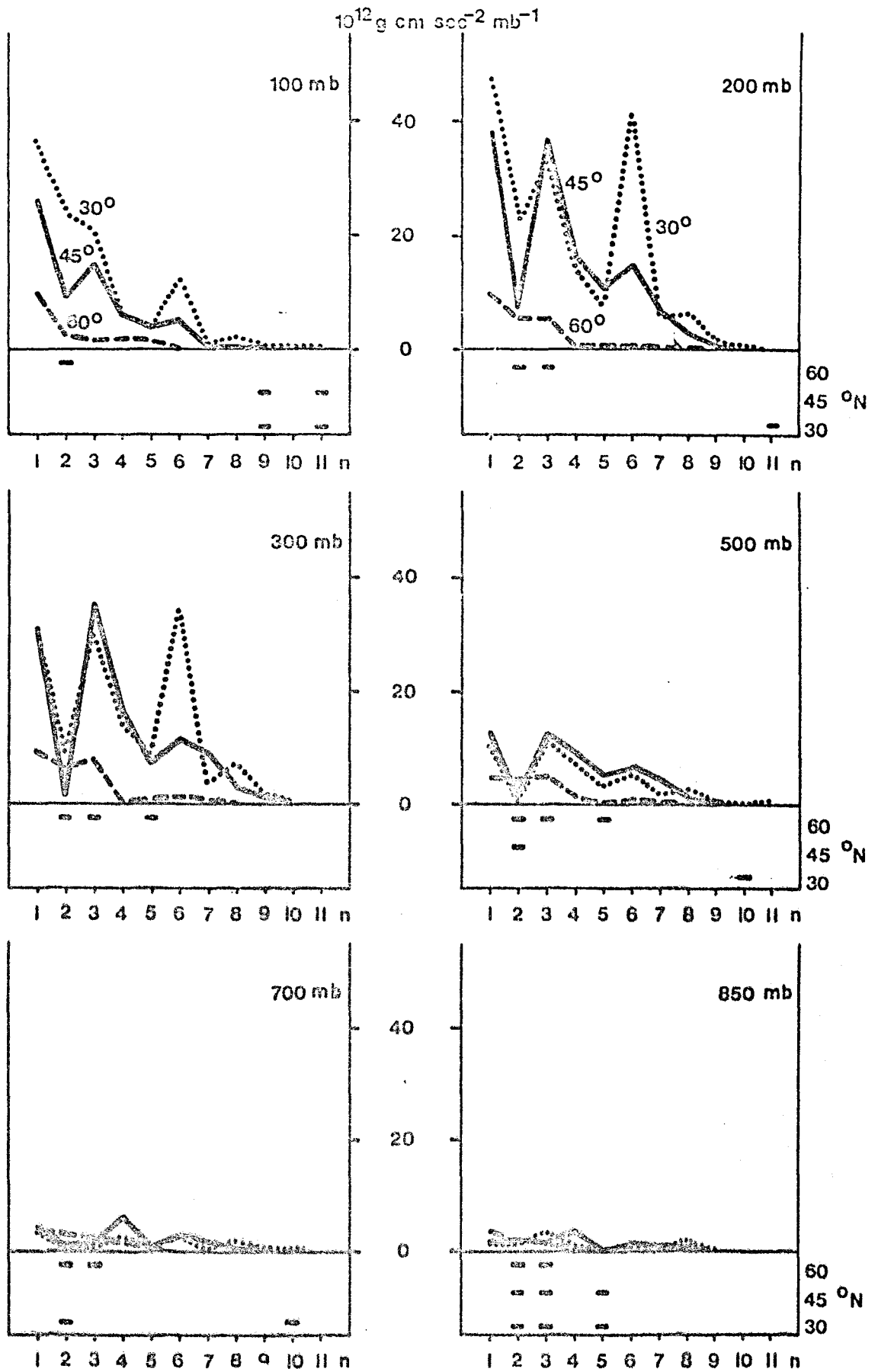
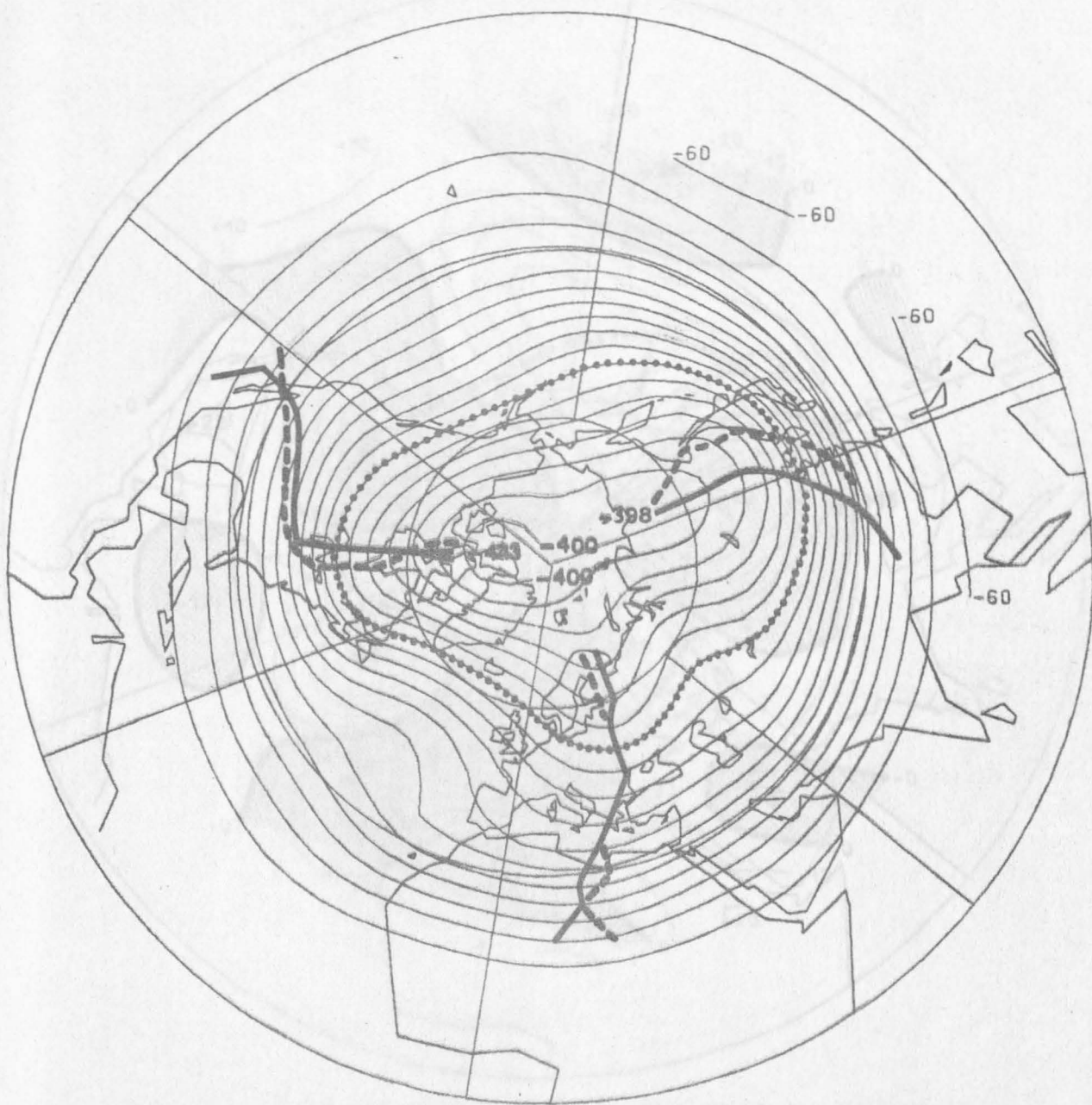


Abb. 24b



Wellenzahlspektren der mittleren meridionalen Transporte von Drehimpuls für verschiedene geographische Breiten, dargestellt in Absolutbeträgen. Negative Transporte sind durch Minuszeichen unterhalb der Spektren gekennzeichnet. Positive Zahlen, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite, entsprechen nach Norden gerichteten Transporten.

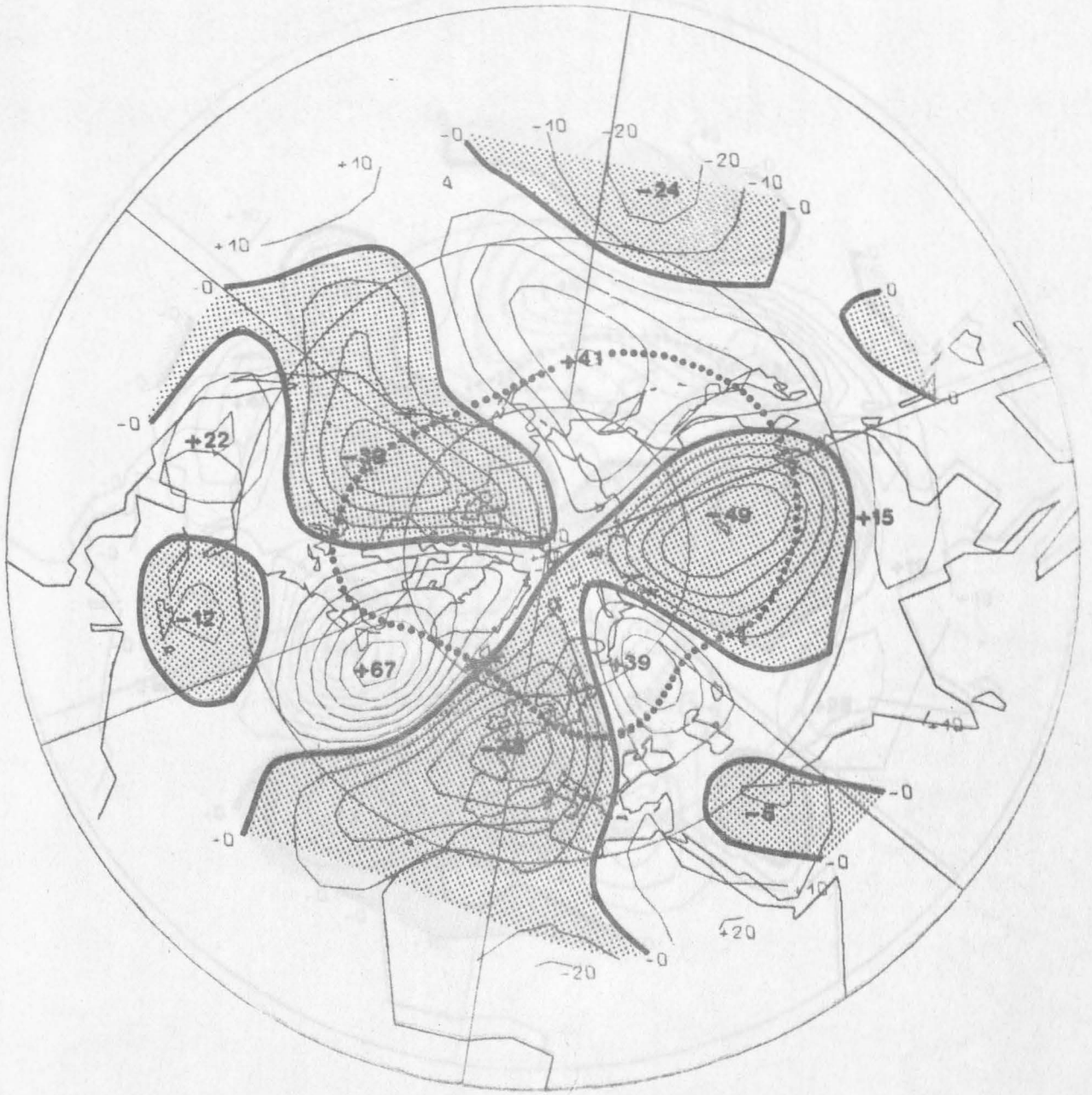
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



Mittlere Temperaturverteilung in 500 mb.  
 Die mittlere Lage der Polarfront ist punktiert wiedergegeben,  
 die Achsen im Geopotentialfeld gestrichelt und die Achsen der Tem-  
 peraturwellen ausgezogen.

Isothermenabstand: 2°C

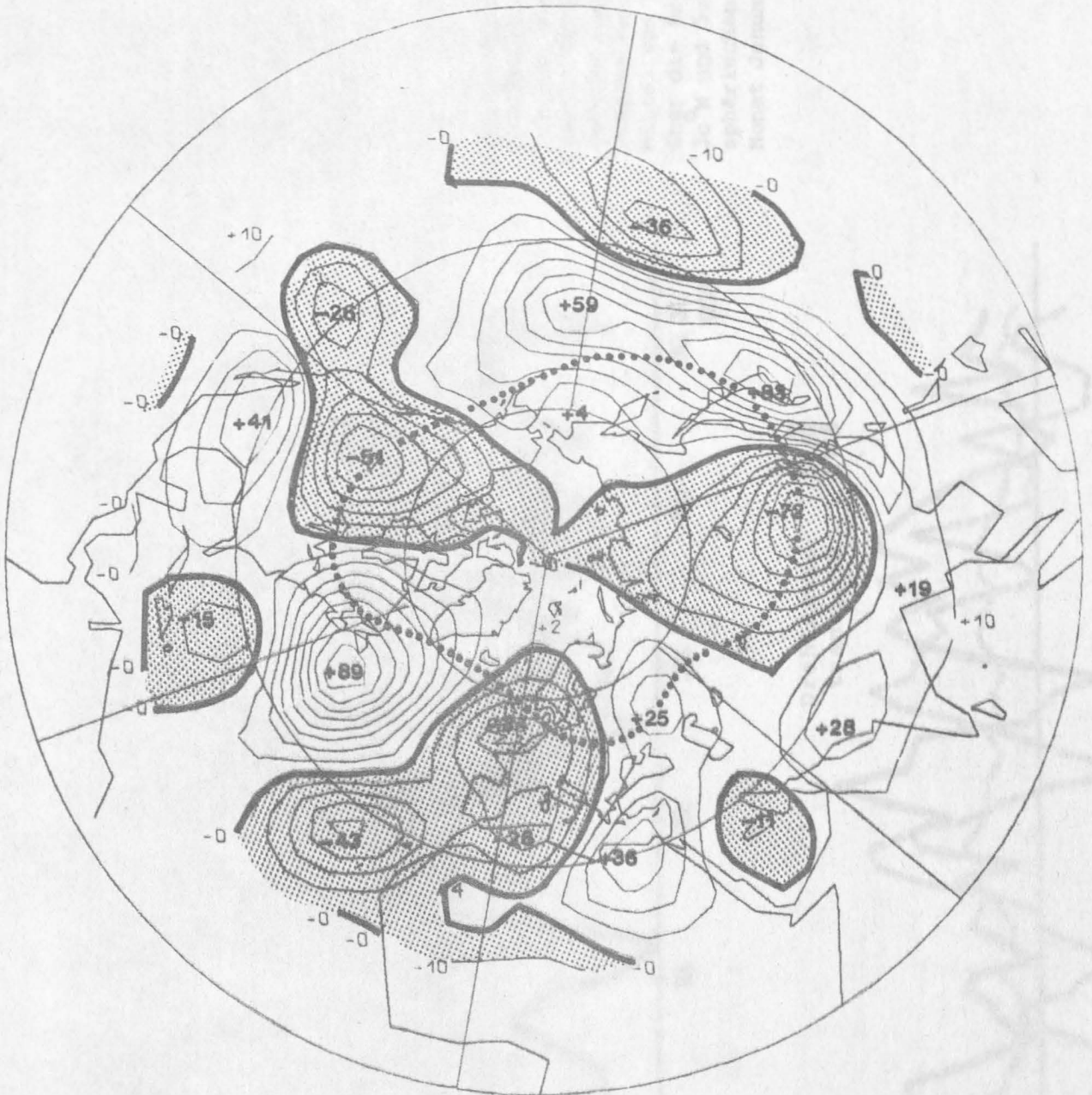
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



Verteilung der mittleren meridionalen Transporte von sensibler Energie im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, hervorgerufen durch die Gesamtzirkulation unter Annahme der Geostrophie. Südwärts gerichtete Transporte sind schattiert. Die Polarfront ist punktiert wiedergegeben.

Isoplethenabstand:  $10^4 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ mb}^{-1}$  ( $= 4,19 \times 10^6 \text{ W m}^{-1} \text{ mb}^{-1}$ )

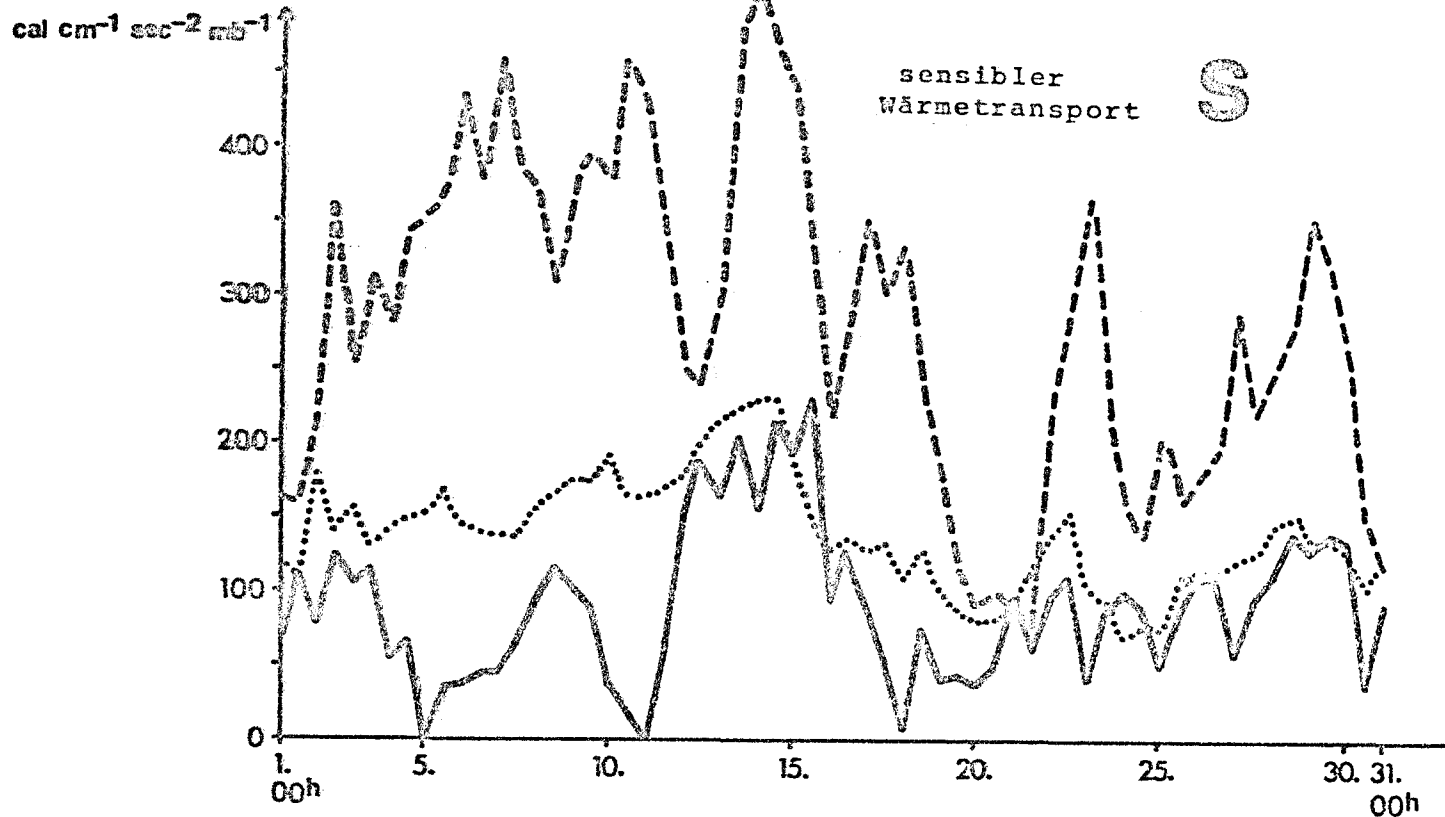
Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



Verteilung der mittleren meridionalen Transporte von Drehimpuls im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, hervorgerufen durch die Gesamtzirkulation unter Annahme der Geostrophie. Südwärts gerichtete Transporte sind schattiert. Die Polarfront ist punktiert wiedergegeben.

Isoplethenabstand:  $10^{13} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$

Mittelungszeitraum: Nov., Dez. 1967, Jan. 1968



30°N ———

50°N - - - -

$\frac{1}{27} \sum_{\gamma=20}^{85} |E|_{\gamma}$  ·····

Zeitreihen der meridionalen Transporte von sensibler Energie (oben, E=S) und Drehimpuls (unten, E=M), hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, über die Breitenkreise von 30°N und 50°N und im hemisphärischen Mittel für den Monat Januar 1968

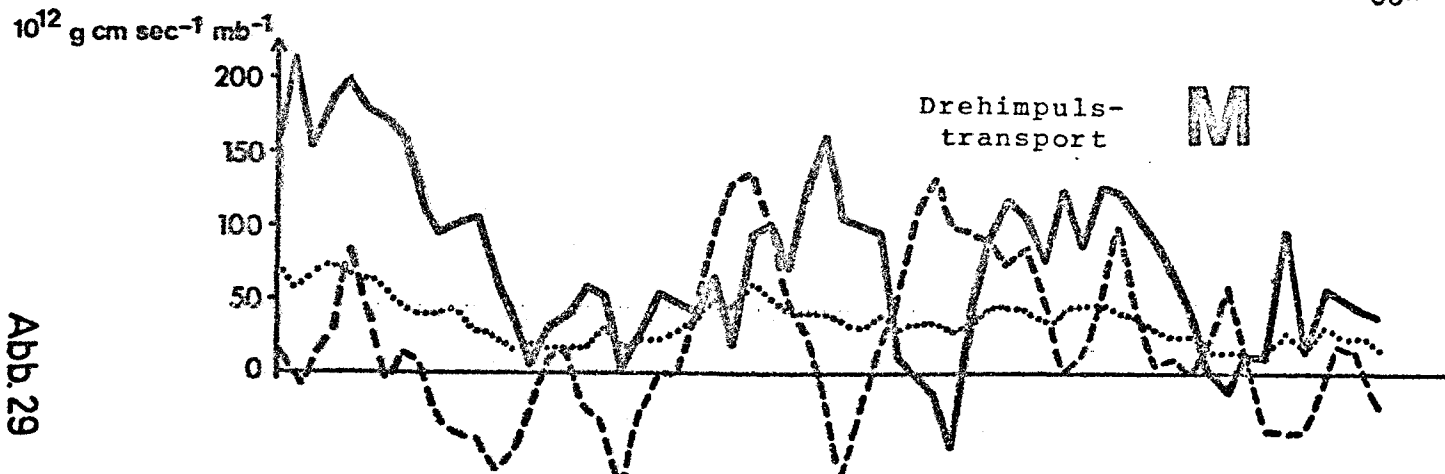
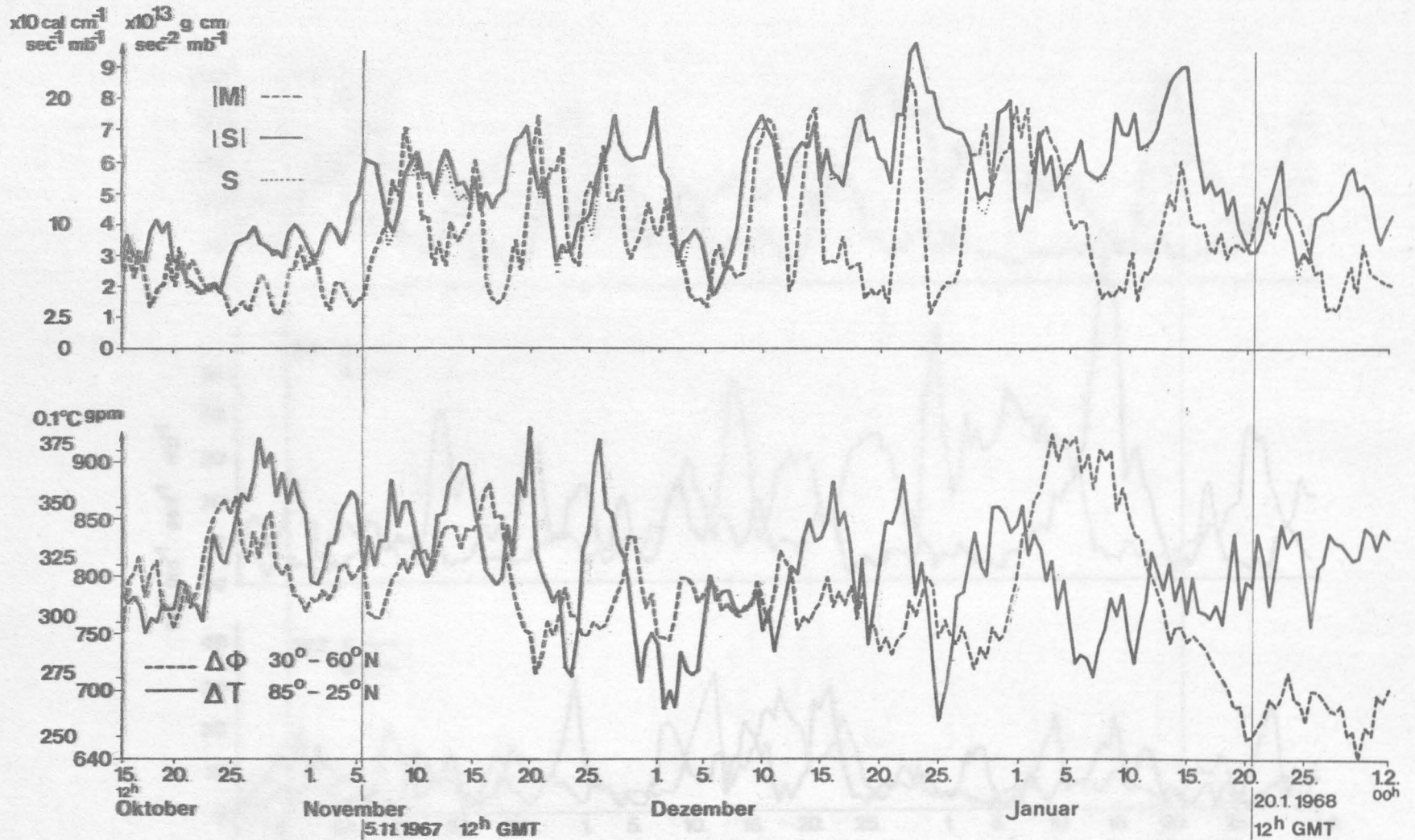
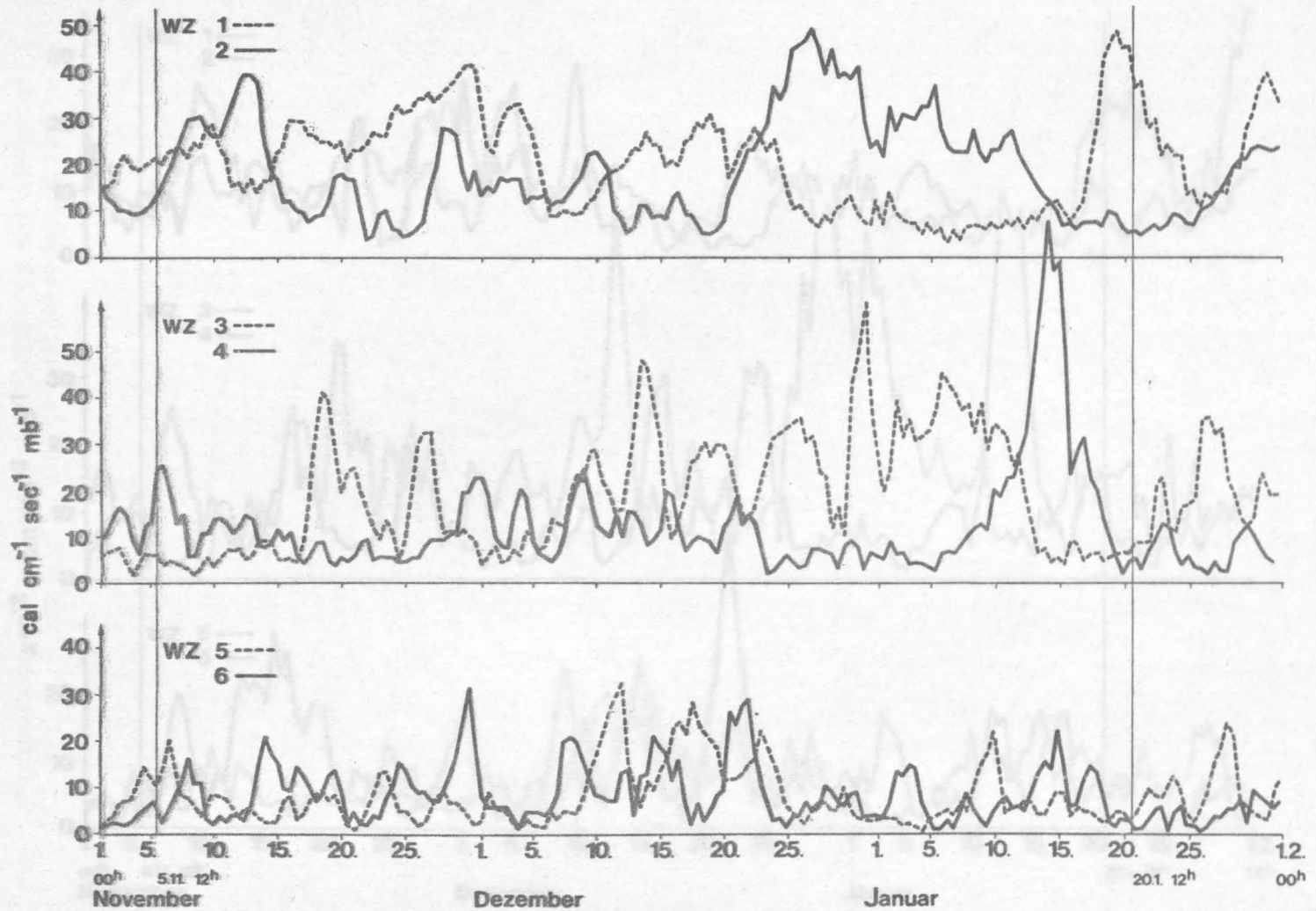


Abb. 29



Zeitreihen der Transporte von sensibler Energie (S) und Drehimpuls (M), hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen (oben), in Relation zur meridionalen Temperaturdifferenz (T) zwischen  $25^\circ$  und  $85^\circ\text{N}$  in 850 mb und zur meridionalen Geopotentialdifferenz ( $\Phi$ ) zwischen  $30^\circ$  und  $60^\circ\text{N}$  in 200 mb (unten). Durch Absolutstriche werden die hemisphärischen Mittel ohne Vorzeichenberücksichtigung dargestellt.

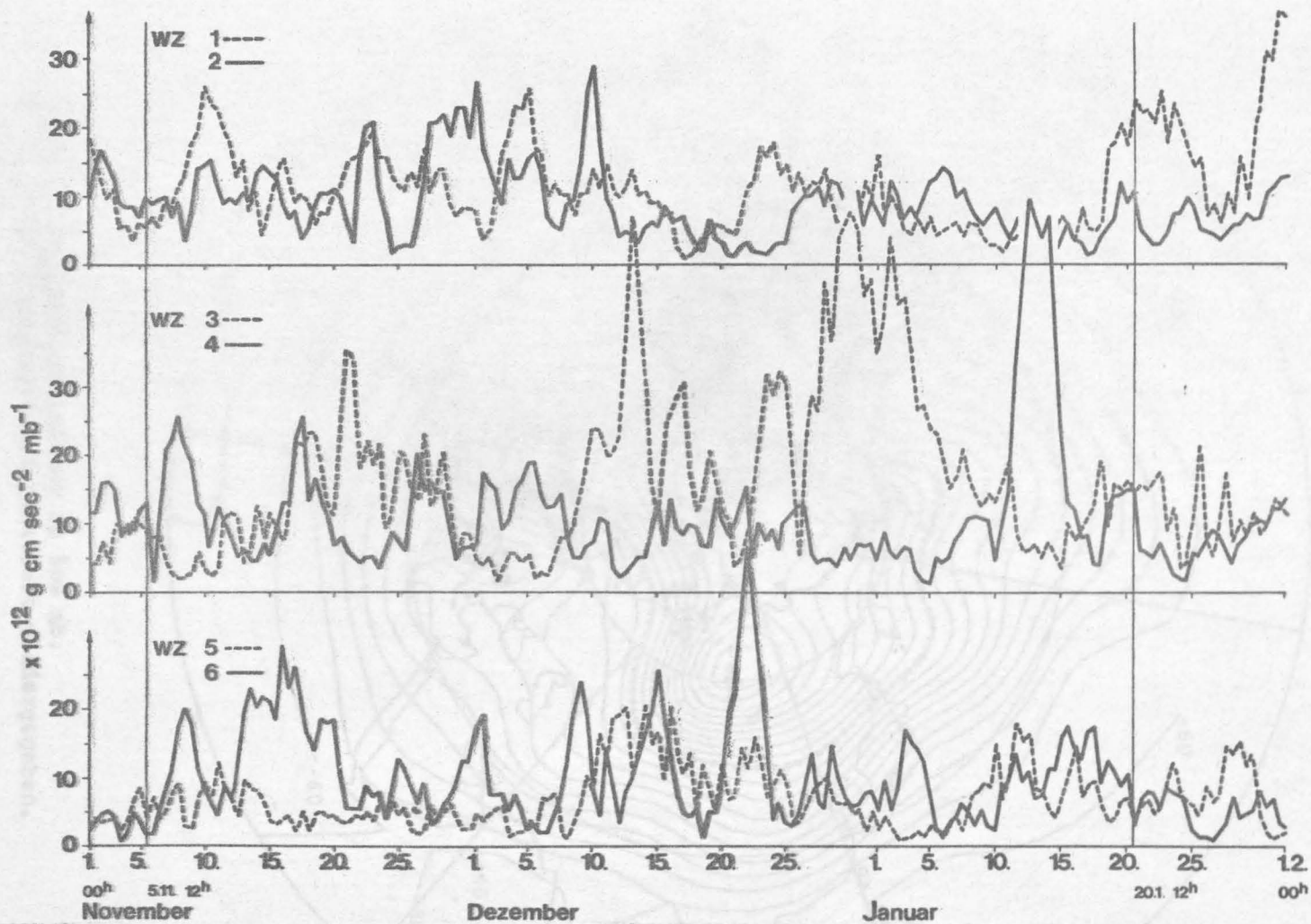
Zeitraum: 15. 10. 1967, 12<sup>h</sup> GMT - 01. 02. 1968, 00<sup>h</sup> GMT



Zeitreihen der Beiträge, die die Wellenzahlen 1 bis 6 zum absoluten hemisphärischen Mittel des meridionalen Transports sensibler Energie, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, in  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{mb}^{-1}$  ( $= 419 \text{ W m}^{-1} \text{mb}^{-1}$ ) leisten.

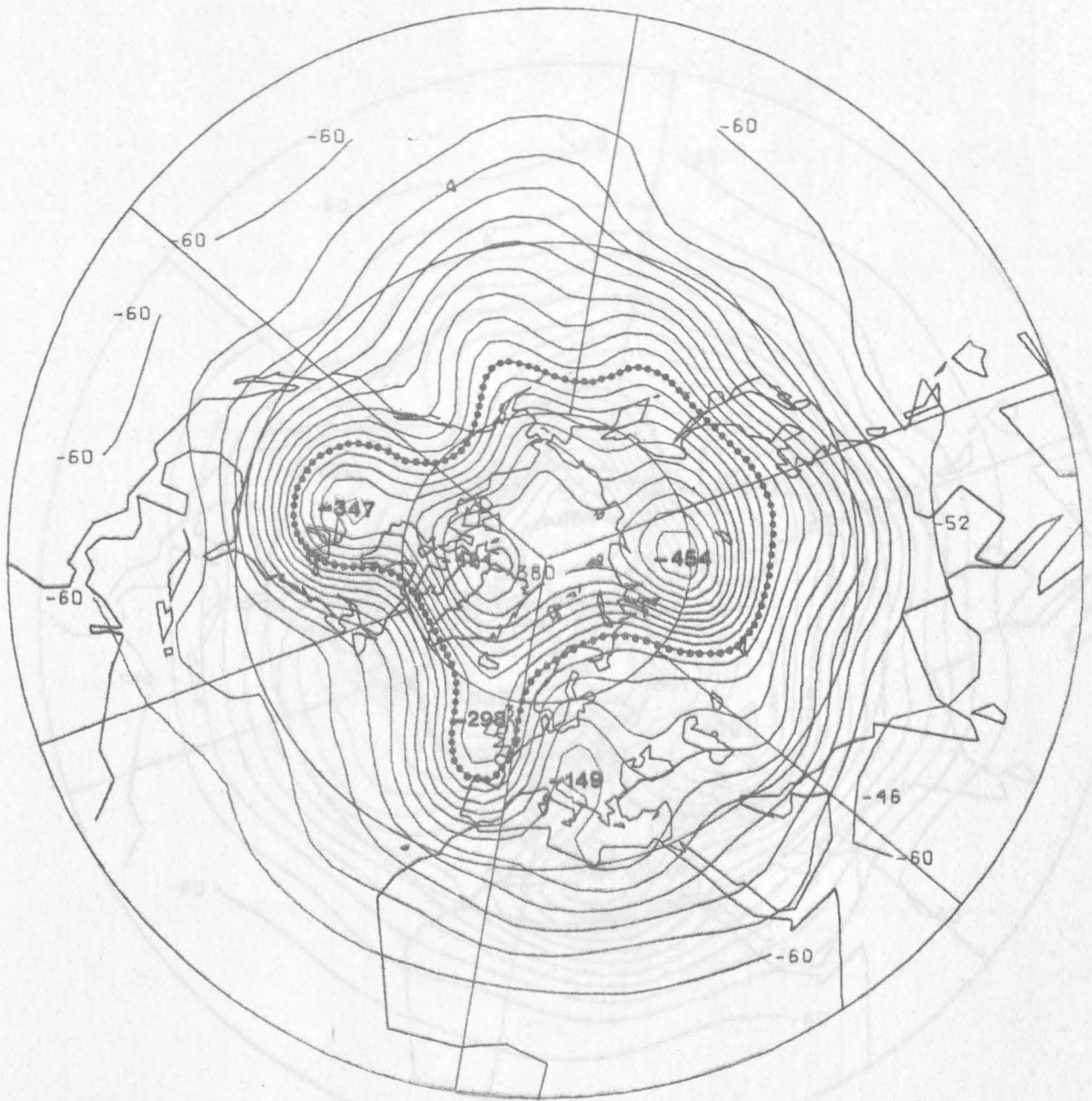
Zeitraum: 1. 11. 1967, 00<sup>h</sup> GMT - 01. 02. 1968, 00<sup>h</sup> GMT





Zeitreihen der Beiträge, die die Wellenzahlen 1 bis 6 zum absoluten hemisphärischen Mittel des meridionalen Transports von Drehimpuls, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, in  $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$  leisten.

Zeitraum: 1. 11. 1967, 00<sup>h</sup> GMT - 01. 02. 1968, 00<sup>h</sup> GMT



Aktuelle Temperaturverteilung in 500 mb.  
 Die Lage der Polarfront ist punktiert wiedergegeben.

Isothermenabstand: 2°C

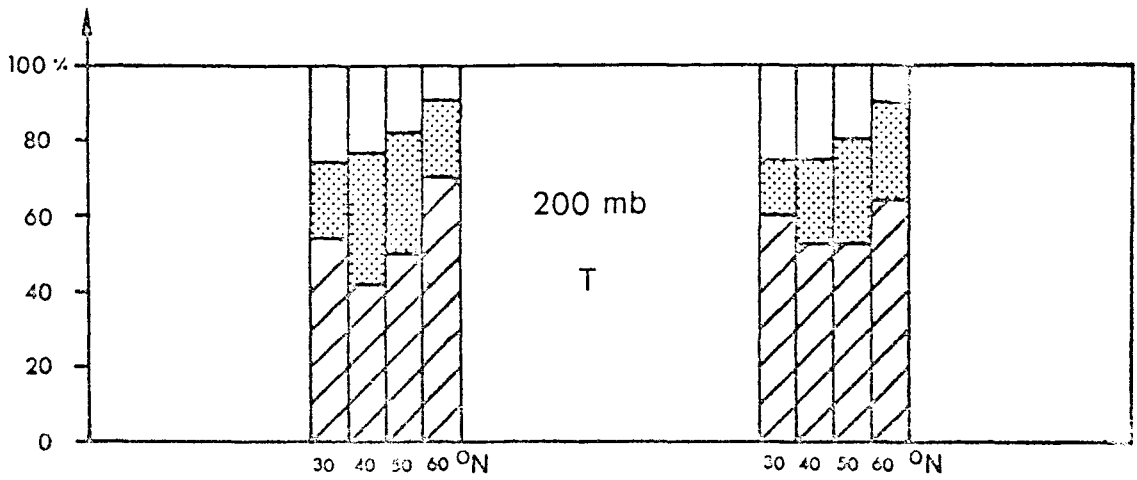
Termin: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT



Aktuelle Temperaturverteilung in 500 mb.  
 Die Lage der Polarfront ist punktiert wiedergegeben.

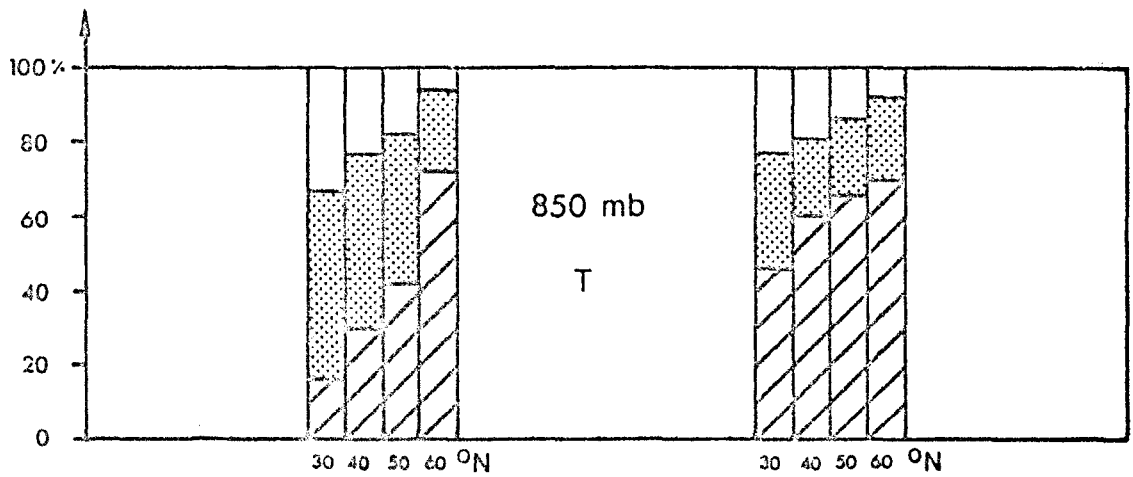
Isothermenabstand: 2°C

Termin: 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT



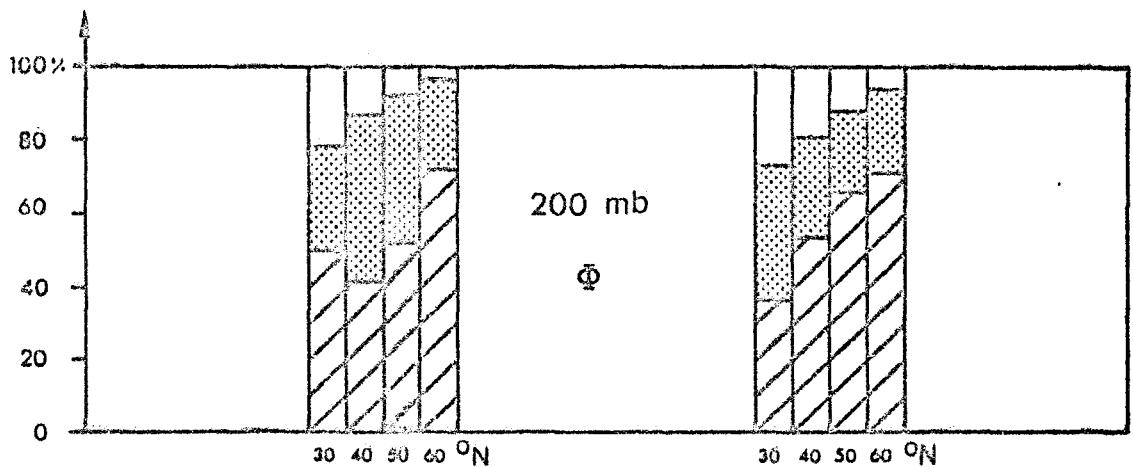
5. 11. 67

20. 1. 68



5. 11. 67

20. 1. 68

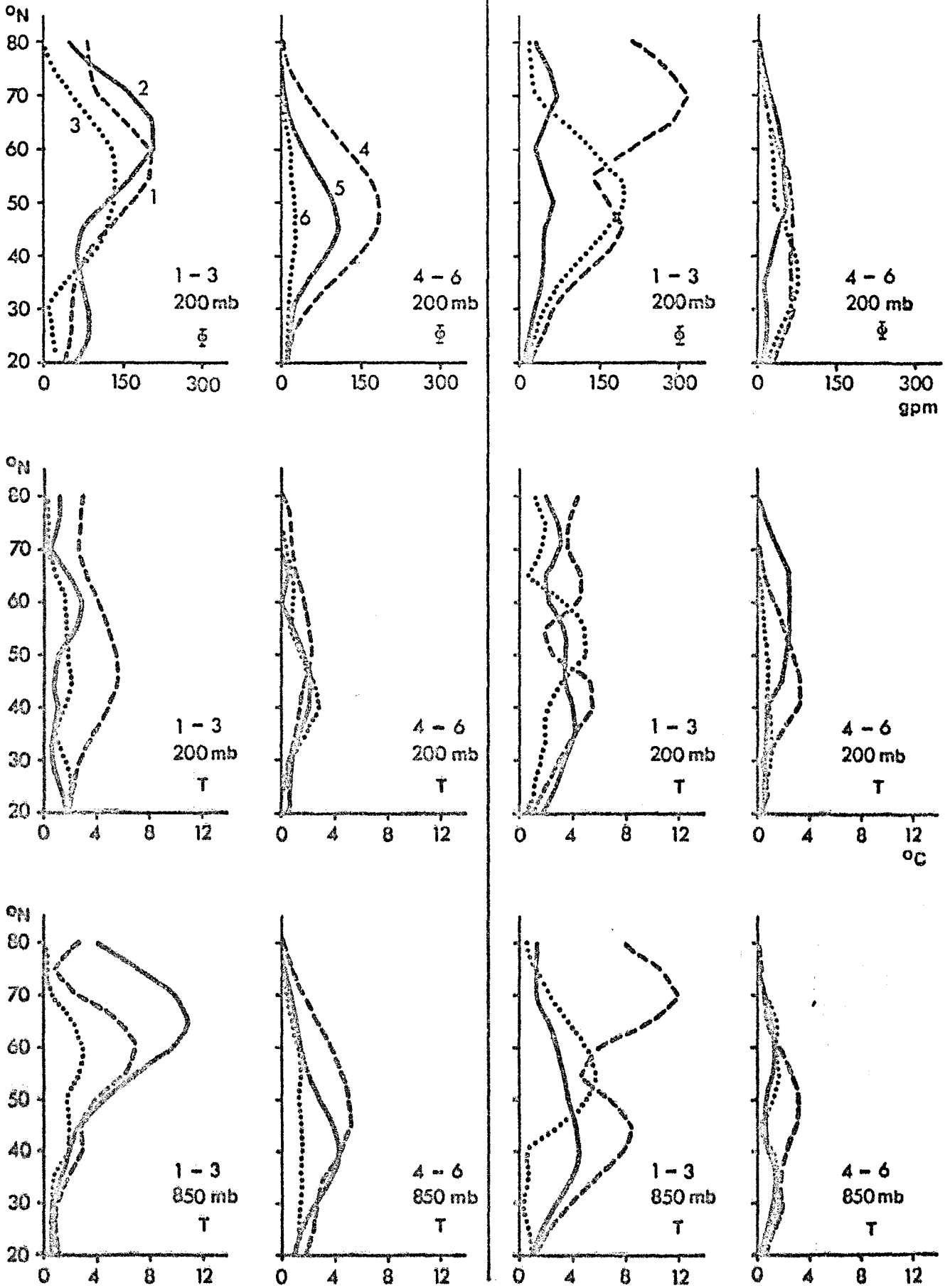


Aktueller prozentualer Anteil der Wellenzahlen 1 bis 3 (schraffiert) und 4 bis 6 (schattiert) an der Gesamtsumme der Amplituden über 11 Wellenzahlen für die atmosphärischen Temperatur- (T) und Geopotentialwellen ( $\Phi$ ) in 200 und 850 mb, bzw. in 200 mb.

Termine: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT und 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT

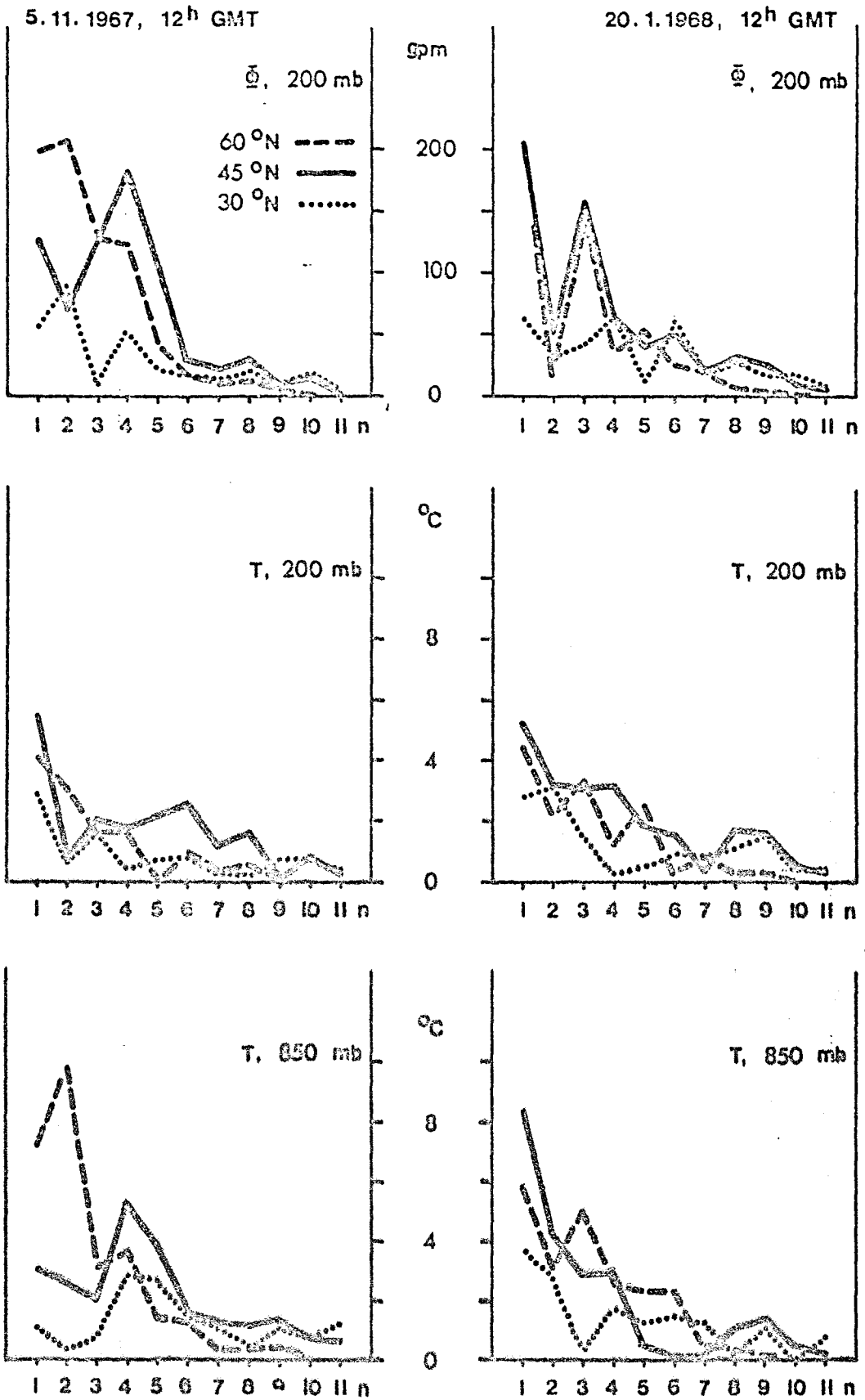
5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT

20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT



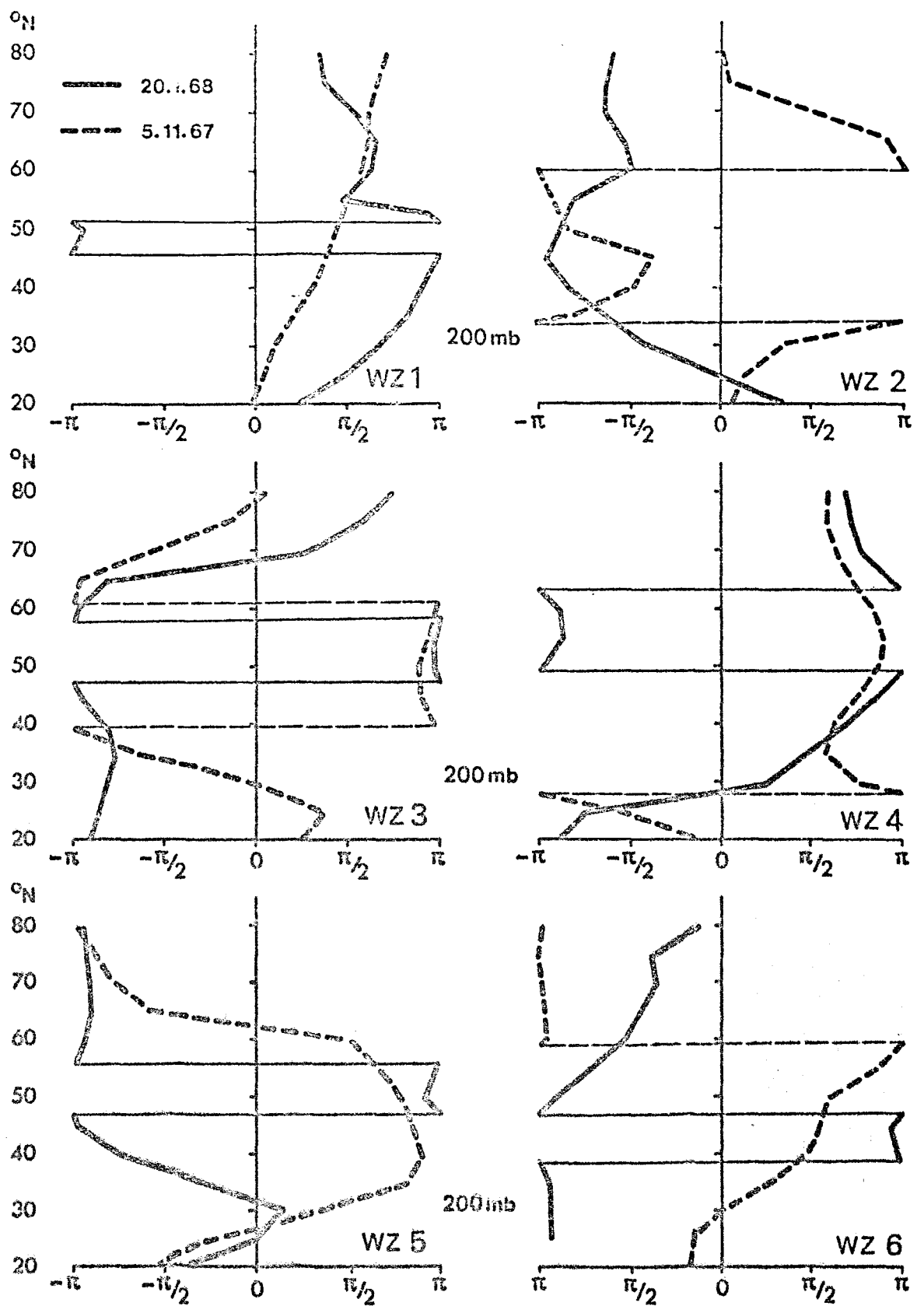
Aktuelle Temperatur- ( $T$ ) und Geopotentialamplituden ( $\phi$ ) der atmosphärischen Wellen als Funktion der geographischen Breite für die Wellenzahlen 1 bis 6 in verschiedenen Druckflächen, angegeben in °C und gpm.

Termine: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT und 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT

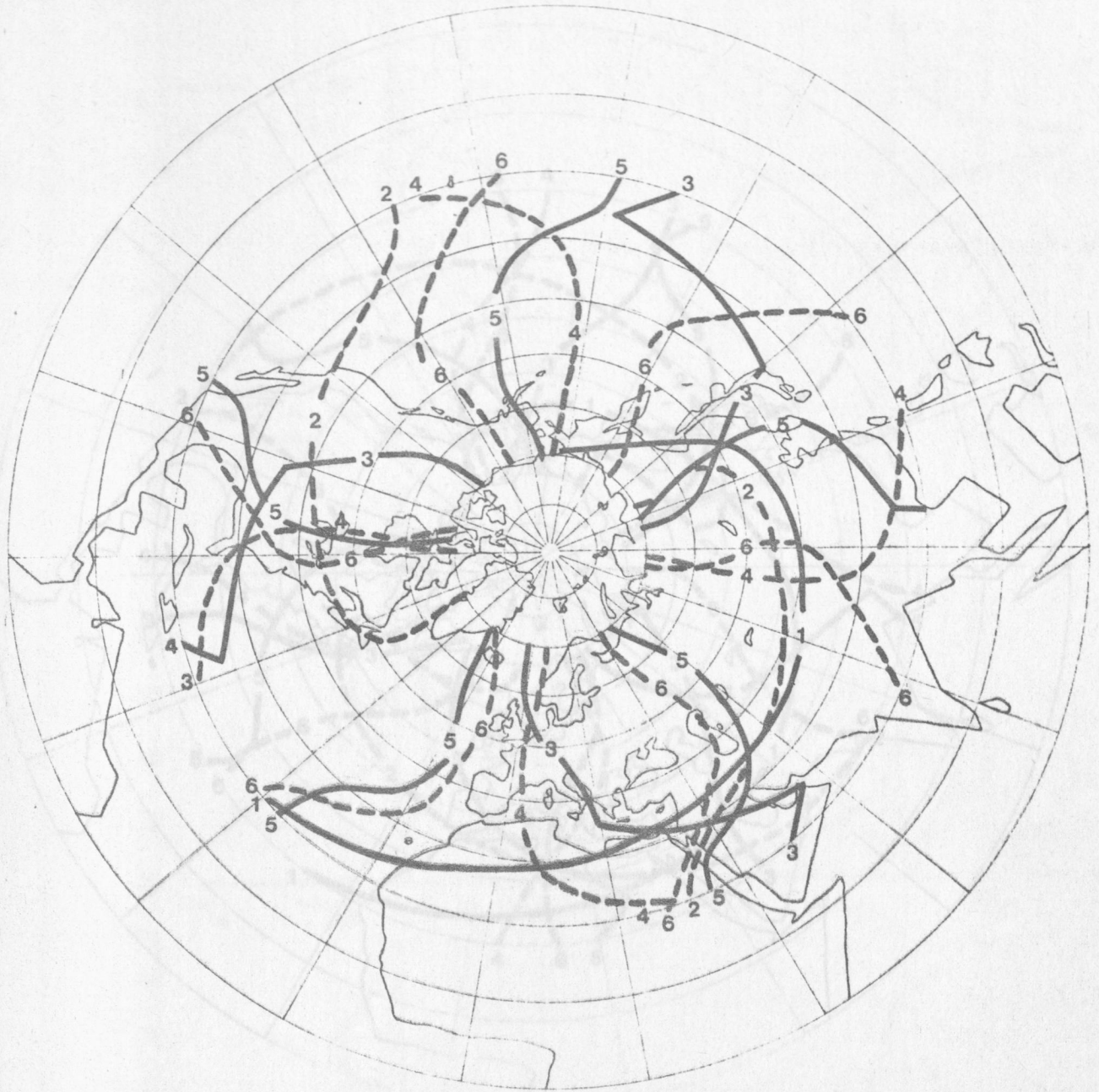


Wellenzahlspektren der aktuellen Temperatur- (T) und Geopotentialamplituden ( $\phi$ ) der atmosphärischen Wellen für verschiedene geographische Breiten, angegeben in °C und gpm.

Termine: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT und 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT



Aktuelle Phasendifferenz zwischen den atmosphärischen Temperatur- und Geopotentialwellen als Funktion der geographischen Breite in 200 mb, angegeben in Bogenmaß. Bei positiven Werten der Wellenzahlen (WZ) 1 bis 6 liegt Temperaturwelle westlicher.

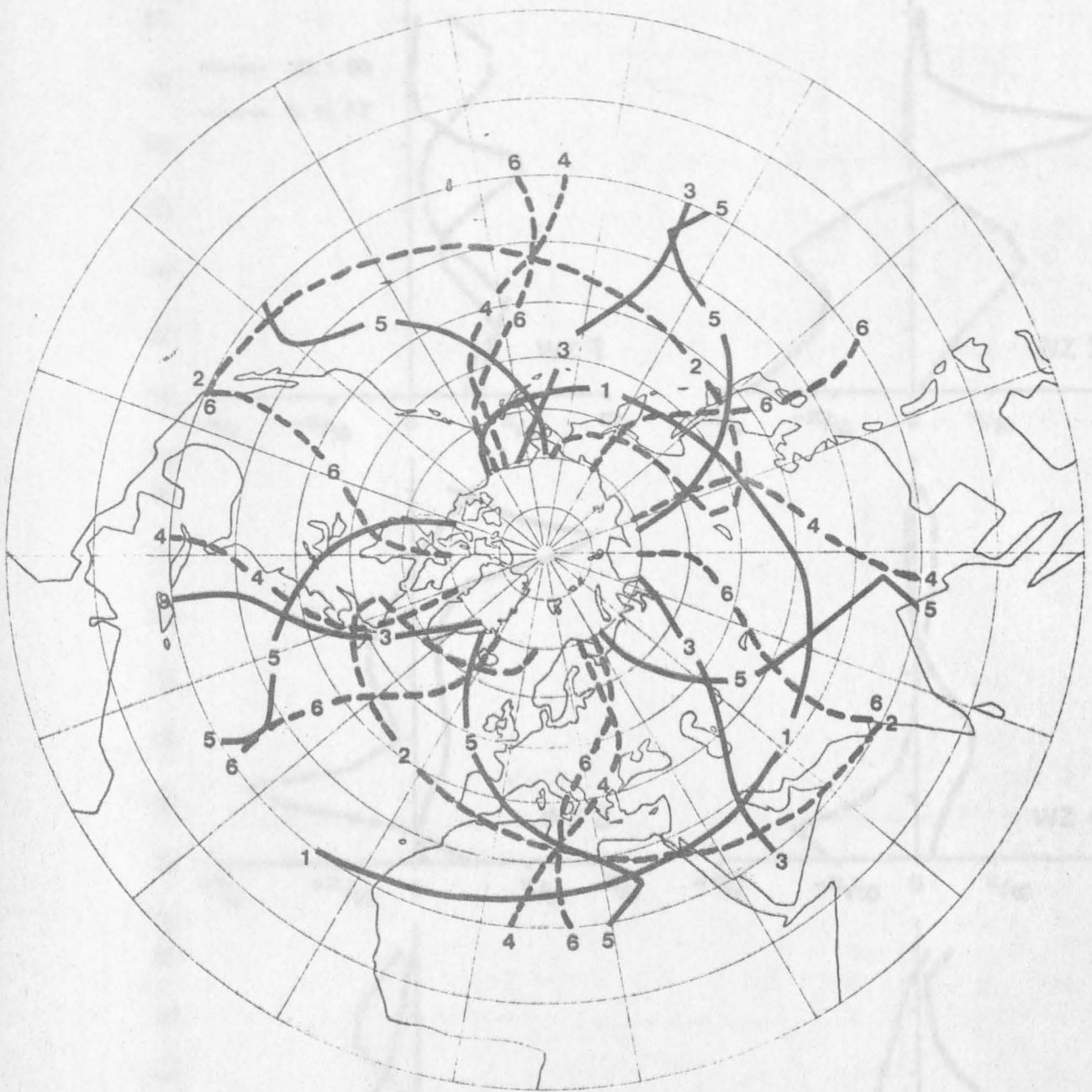


Aktueller Trogachsenverlauf der atmosphärischen Wellen im Geopotentialfeld für die Wellenzahlen 1 bis 6 in 200 mb.

Termin: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT

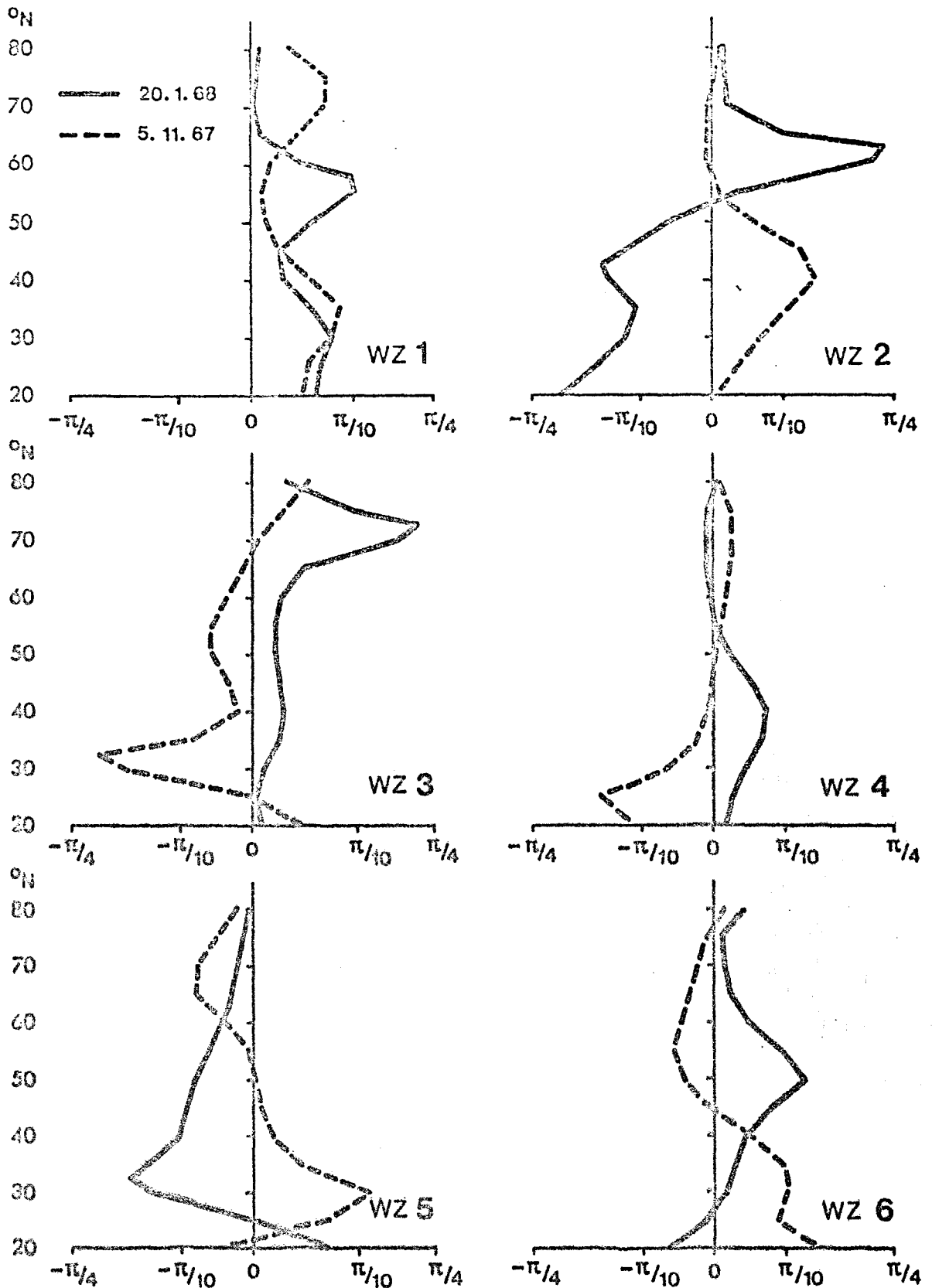
Termin: 29. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT





Aktueller Trogachsenverlauf der atmosphärischen Wellen im Geopotentialfeld für die Wellenzahlen 1 bis 6 in 200 mb.

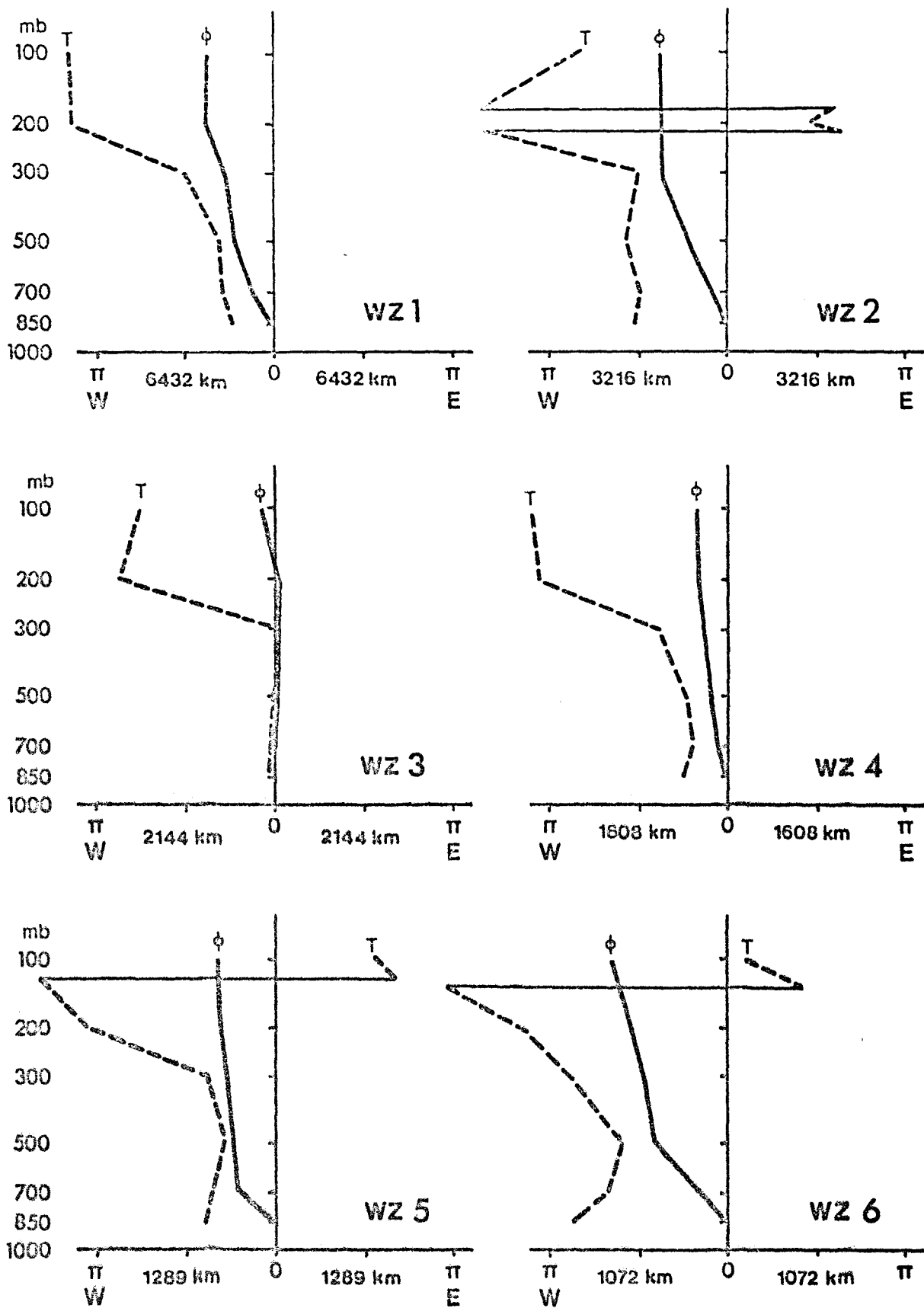
Termin: 26. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT



Aktuelle horizontale Achsenneigung der atmosphärischen Geopotentialwellen als Funktion der geographischen Breite in 200 mb, angegeben in Bogenmaß pro 2,5 Breitengrade. Bei positiven Werten liegt die Welle an der Breite  $\phi + 2,5$  östlicher.

Termine: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT und 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT

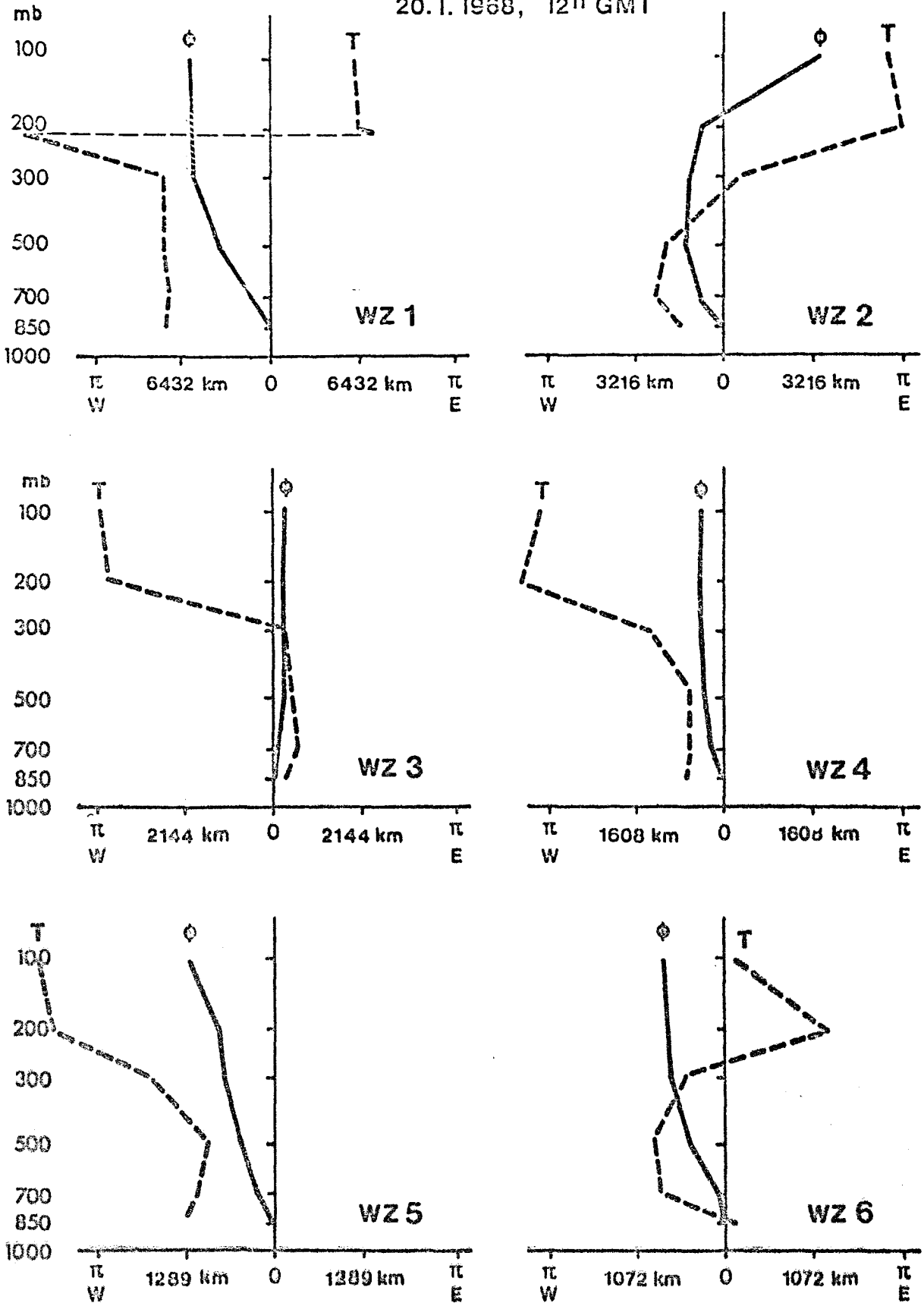
5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT



Aktueller vertikaler Trogachsenverlauf der atmosphärischen Temperatur- und Geopotentialwellen in 50°N für die Wellenzahlen (WZ) 1 bis 6.

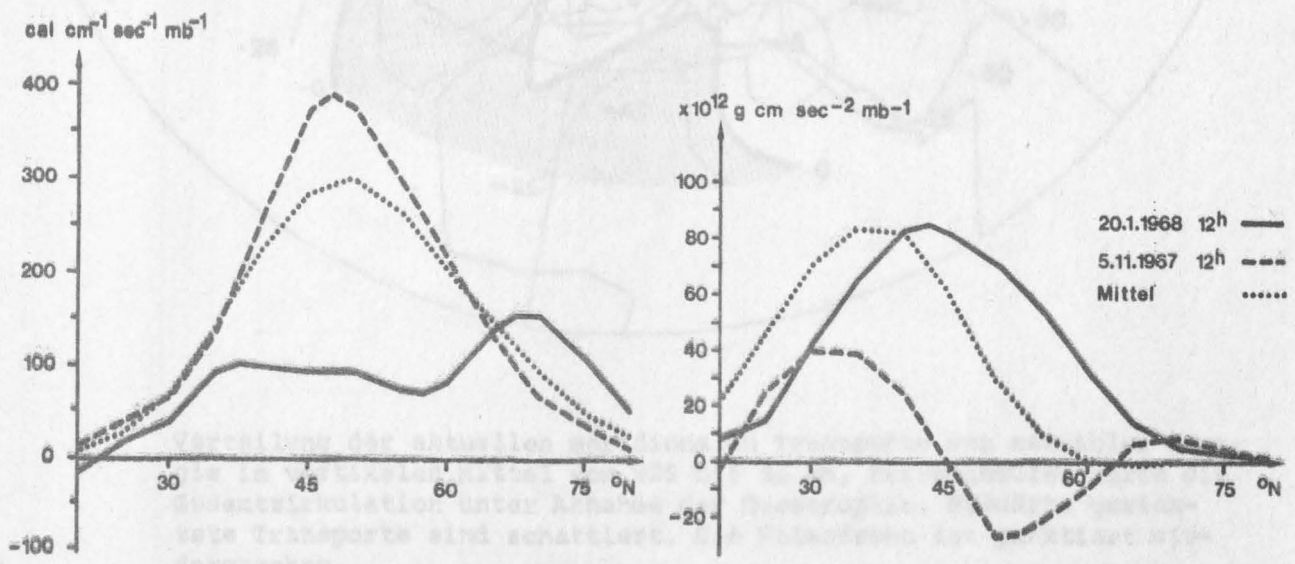
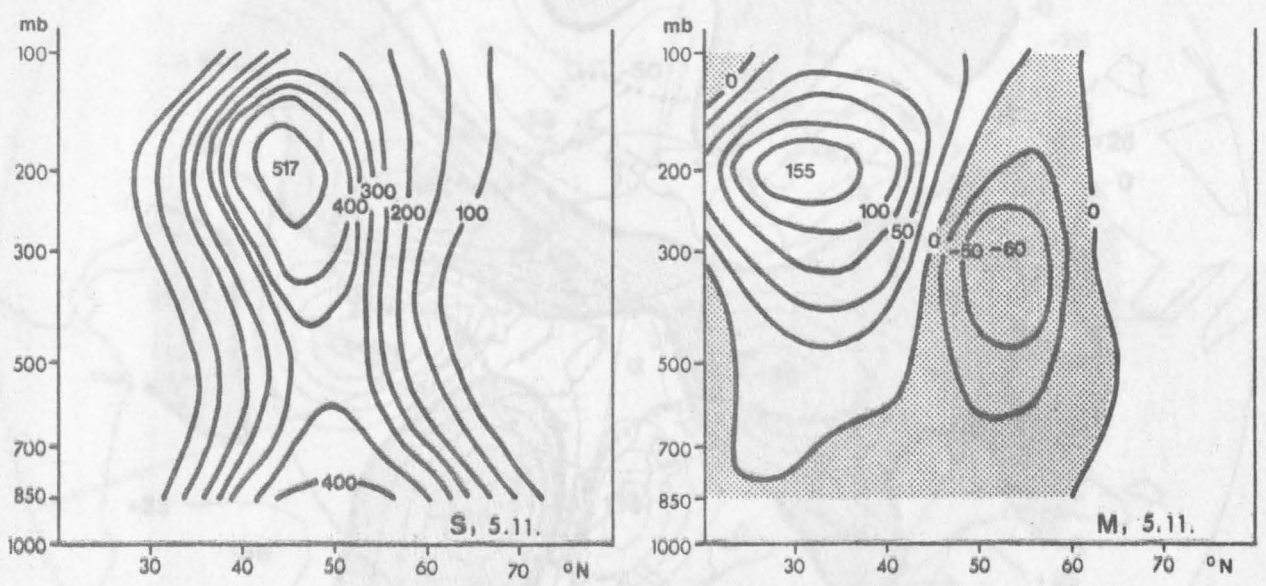
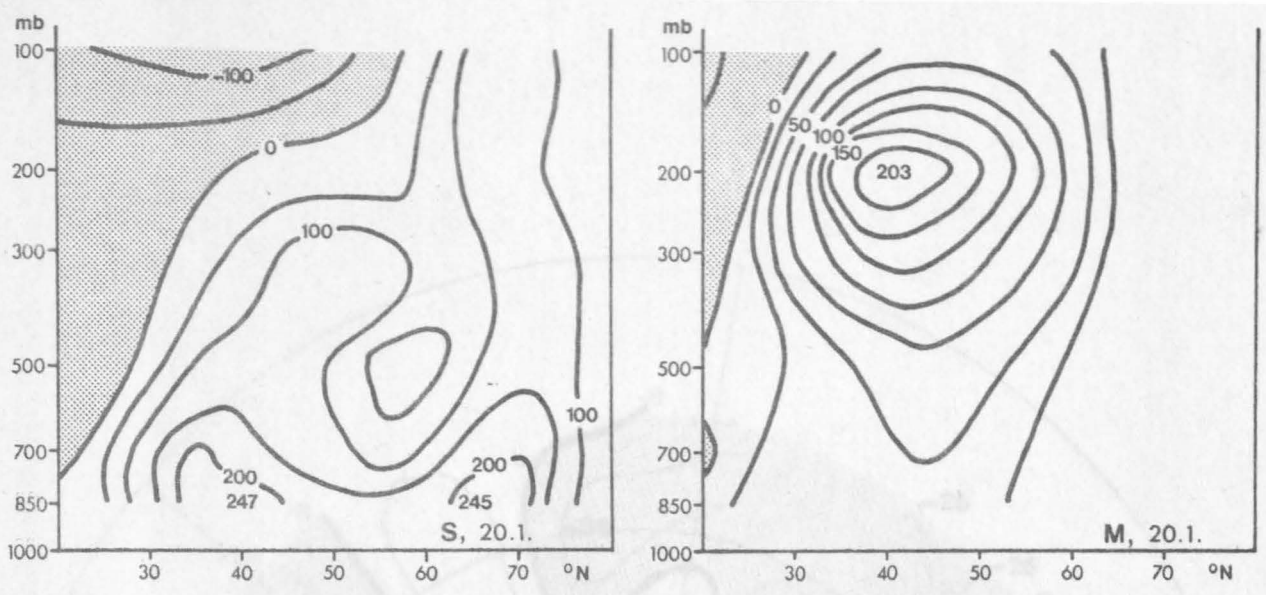
Termin: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT

20. I. 1968, 12<sup>h</sup> GMT

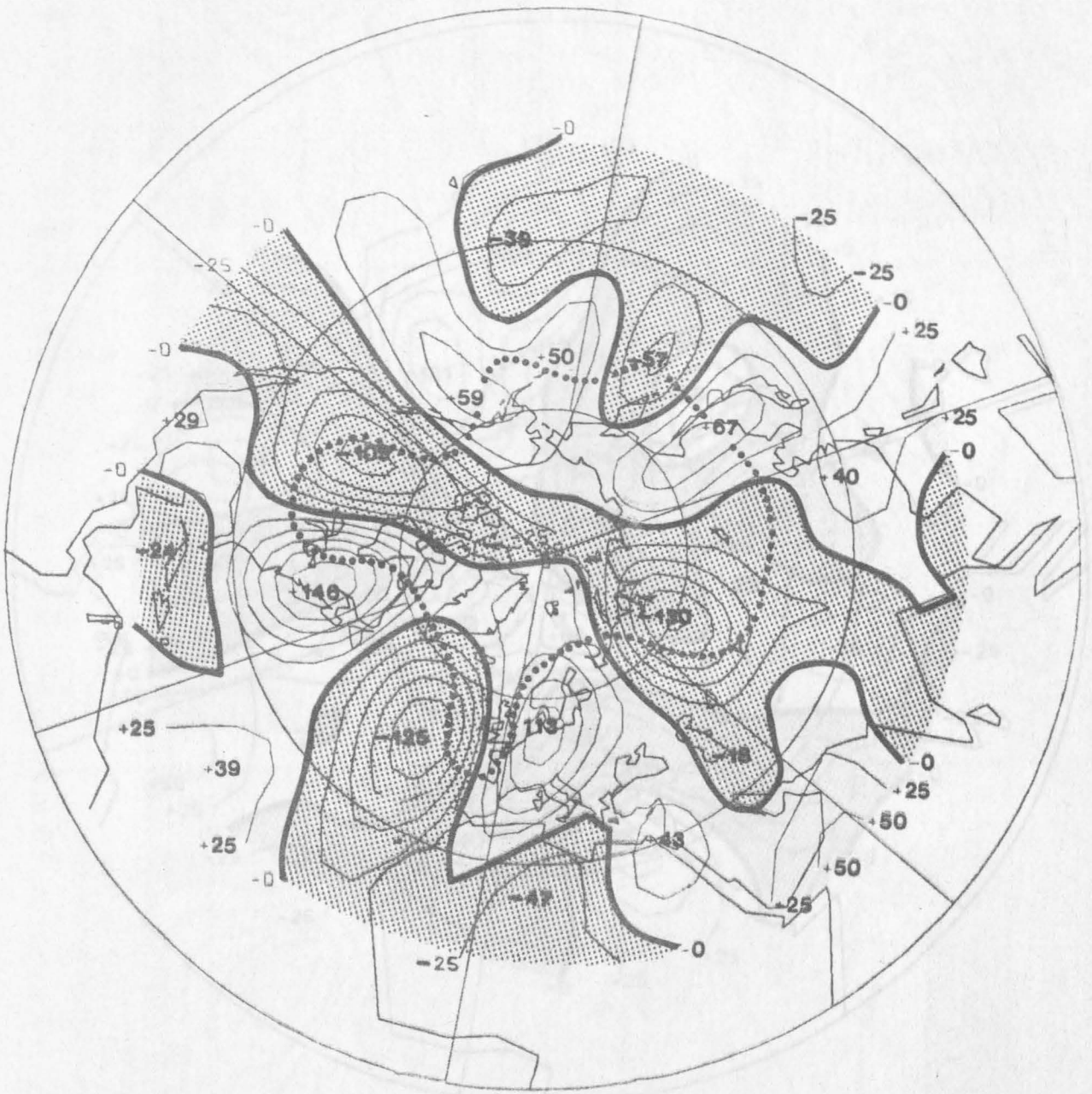


Aktueller vertikaler Trogachsenverlauf der atmosphärischen Temperatur- und Geopotentialwellen in 50°N für die Wellenzahlen (WZ) 1 bis 6.

Termin: 20. I. 1968, 12<sup>h</sup> GMT



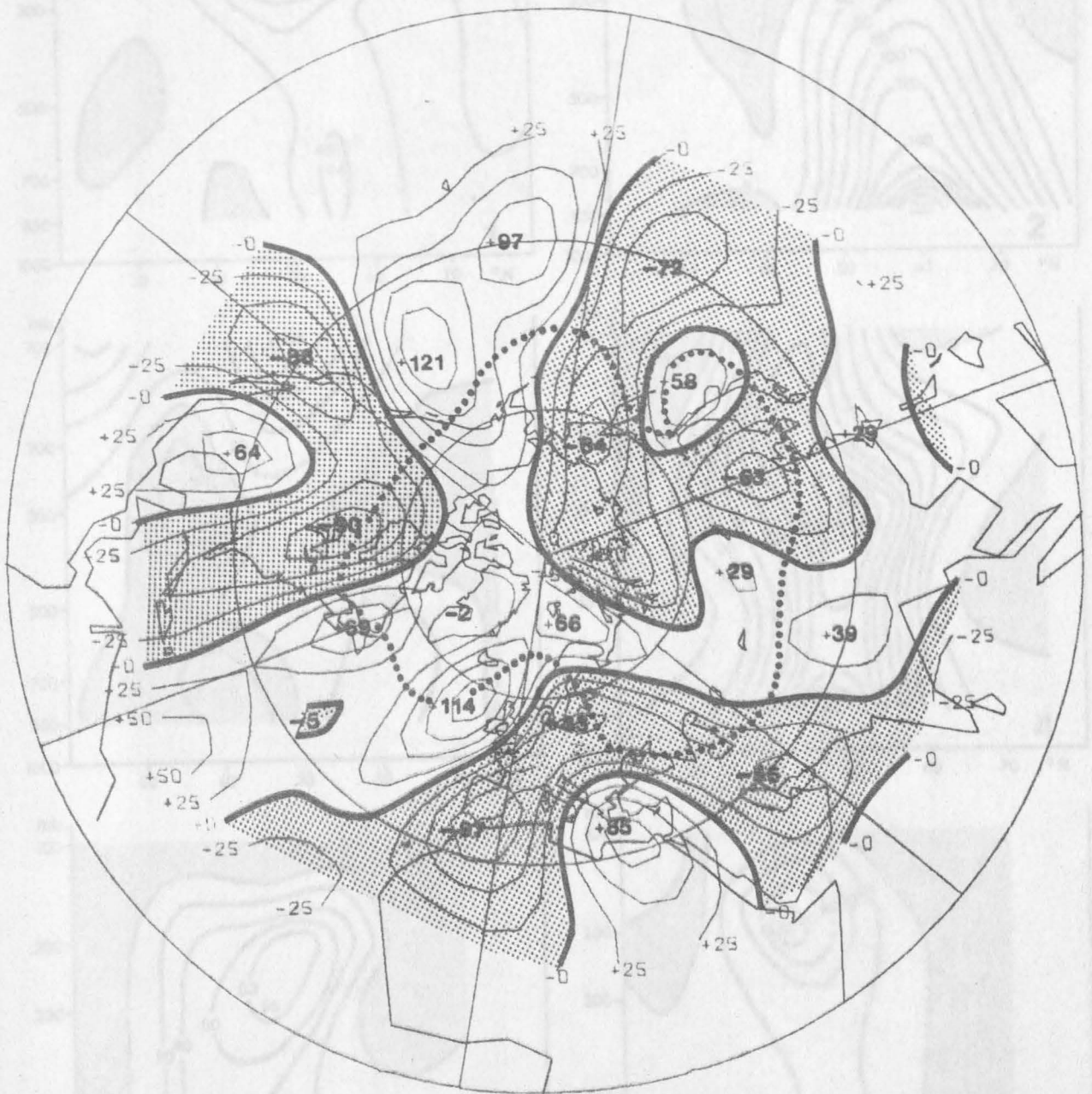
Aktuelle meridionale Transporte von sensibler Energie (S) und Drehimpuls (M), hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, in Meridionalschnitten für den 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT (oben) und den 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT (Mitte) und im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb beider Termine (unten). Positive Transporte nach Norden, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite, angegeben in  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{mb}^{-1}$  ( $= 419 \text{ W m}^{-1} \text{mb}^{-1}$ ) und  $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{mb}^{-1}$ .



Verteilung der aktuellen meridionalen Transporte von sensibler Energie im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, hervorgerufen durch die Gesamtzirkulation unter Annahme der Geostrophie. Südwärts gerichtete Transporte sind schattiert. Die Polarfront ist punktiert wiedergegeben.

Isopletenabstand:  $2,5 \times 10^4 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ mb}^{-1}$  ( $= 4,19 \times 10^6 \text{ W m}^{-1} \text{ mb}^{-1}$ )

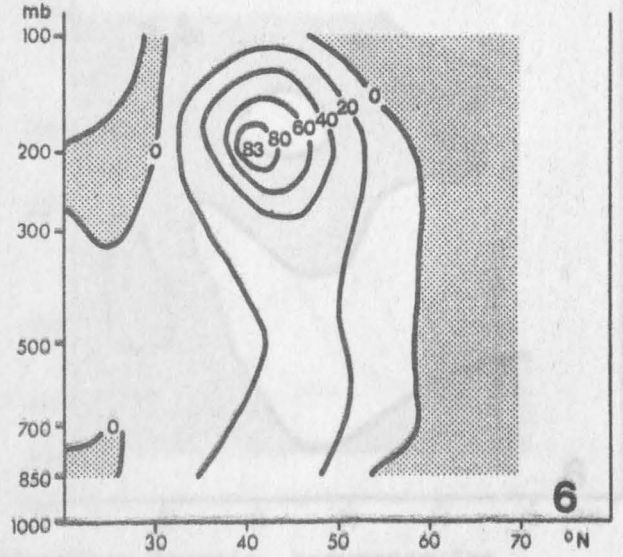
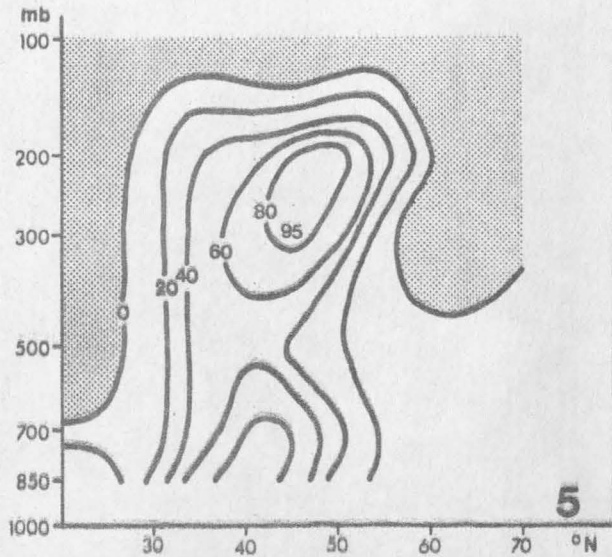
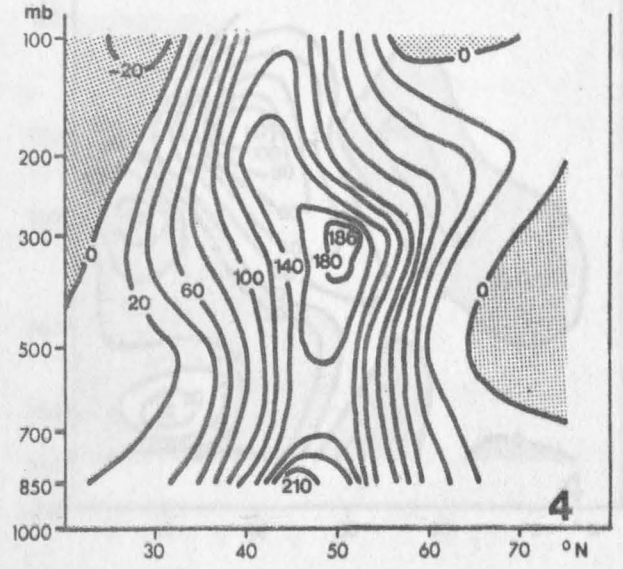
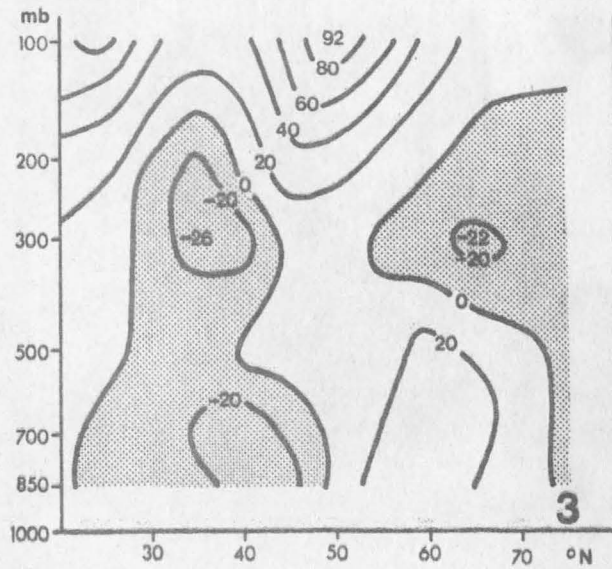
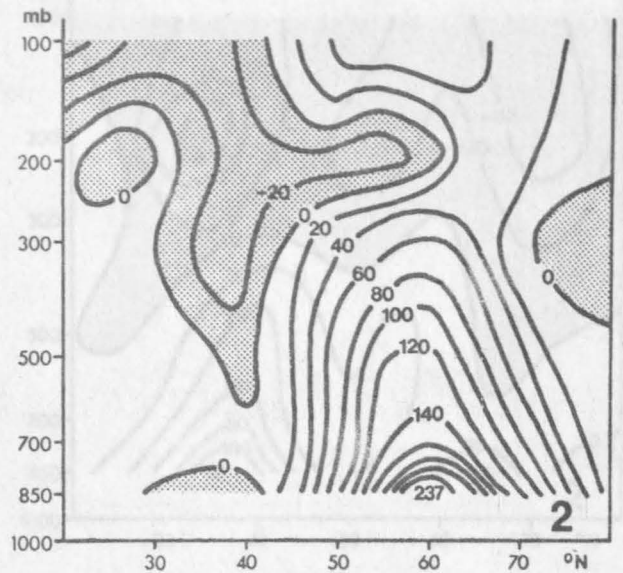
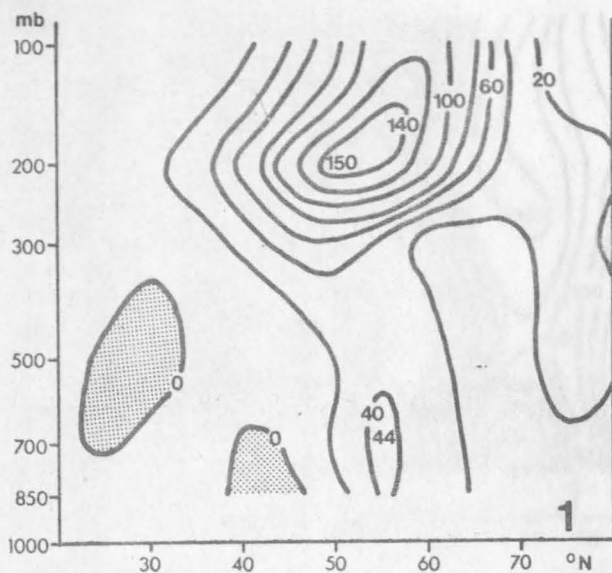
Termin: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT



Verteilung der aktuellen meridionalen Transporte von sensibler Energie im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, hervorgerufen durch die Gesamtzirkulation unter Annahme der Geostrophie. Südwärts gerichtete Transporte sind schattiert. Die Polarfront ist punktiert wiedergegeben.

Isopletenabstand:  $2,5 \times 10^4 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ mb}^{-1}$  ( $= 4,19 \times 10^6 \text{ W m}^{-1} \text{ mb}^{-1}$ )

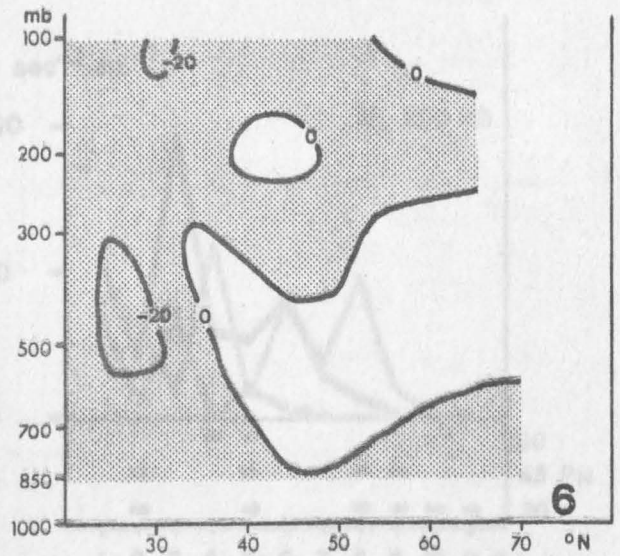
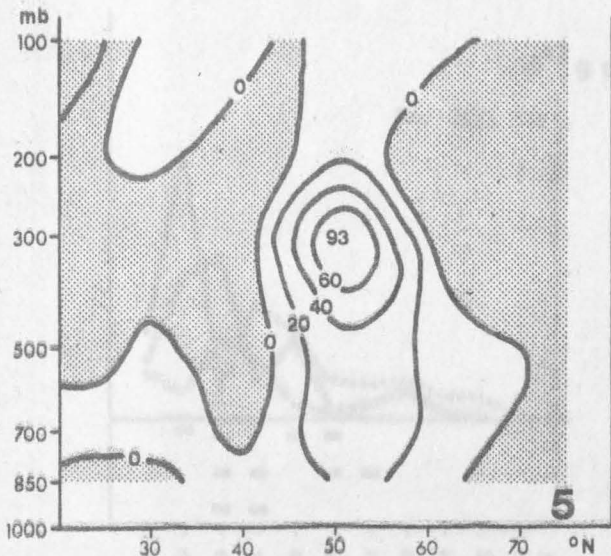
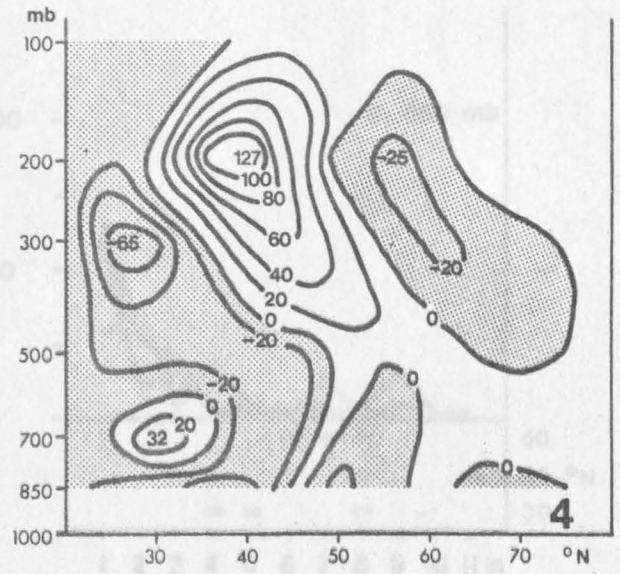
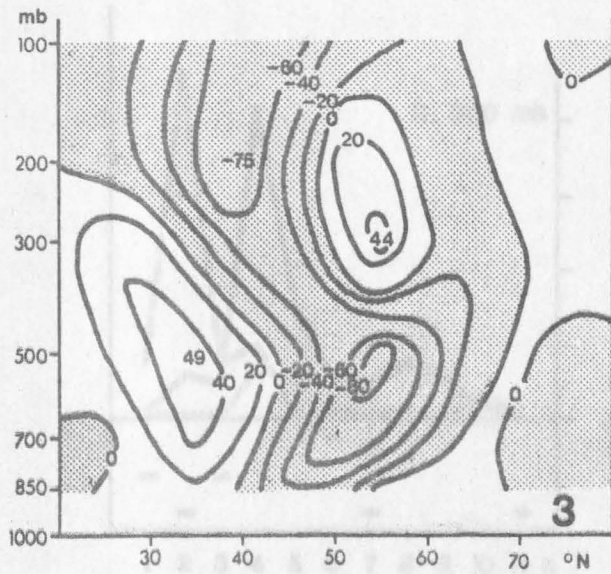
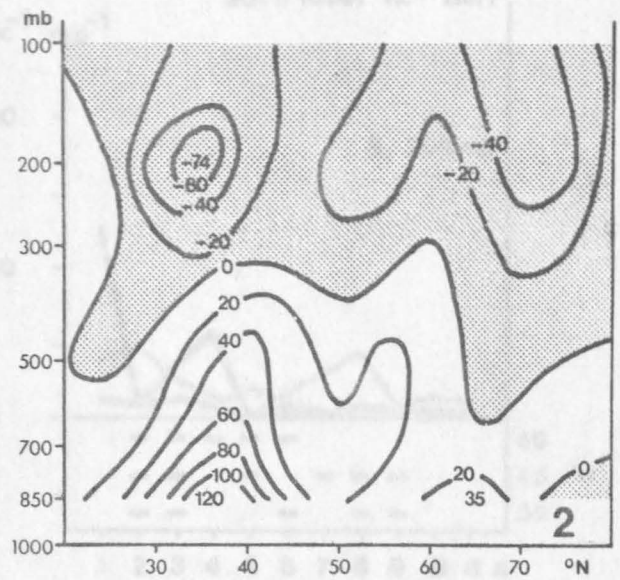
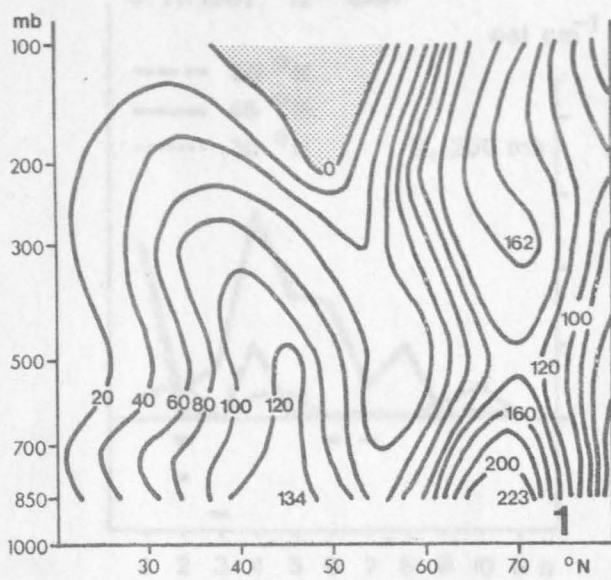
Termin: 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT



Aktuelle meridionale Transporte von sensibler Energie, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, für die Wellenzahlen 1 bis 6, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite. Positive Werte in  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{mb}^{-1}$  ( $=419 \text{ W m}^{-1} \text{mb}^{-1}$ ) entsprechen nordwärts gerichteten Transporten. Die Wellenzahlen sind jeweils unten recht angegeben.

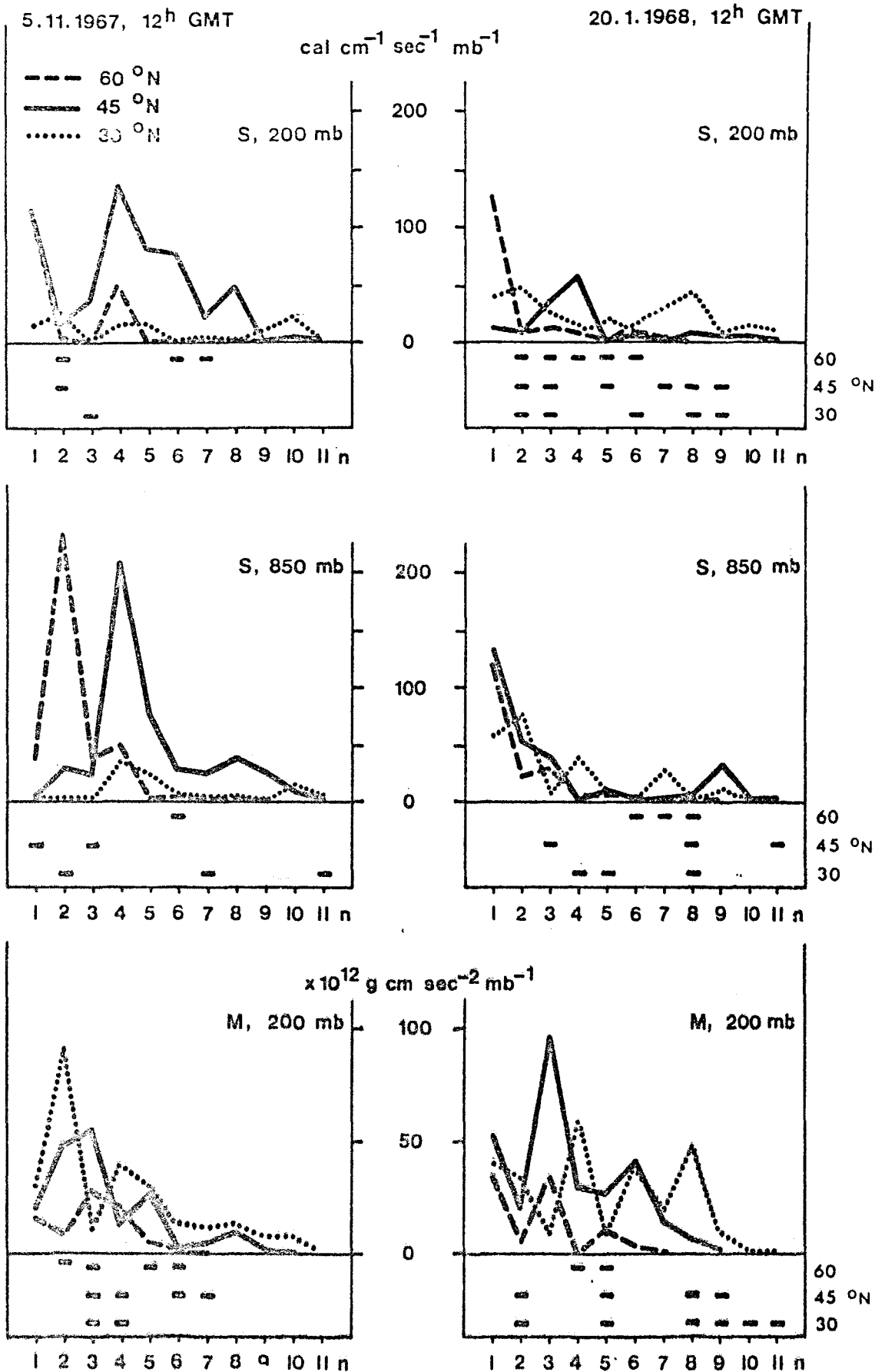
Termin: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT





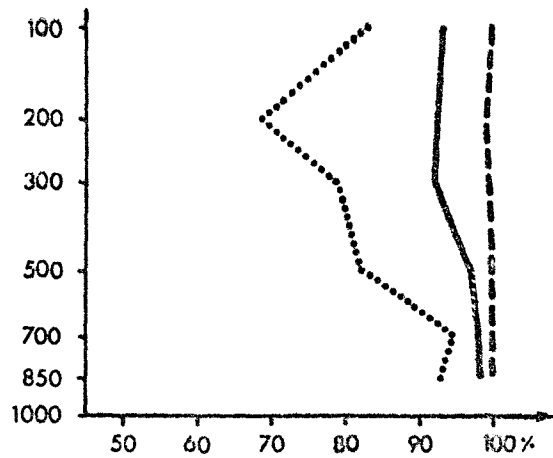
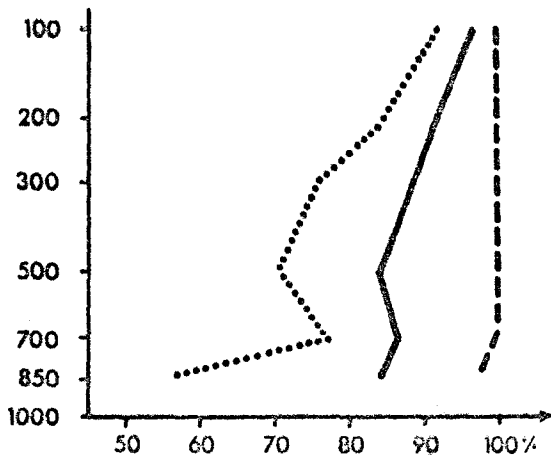
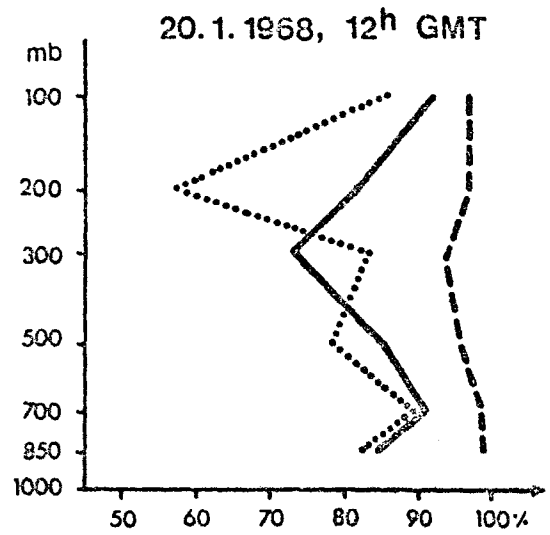
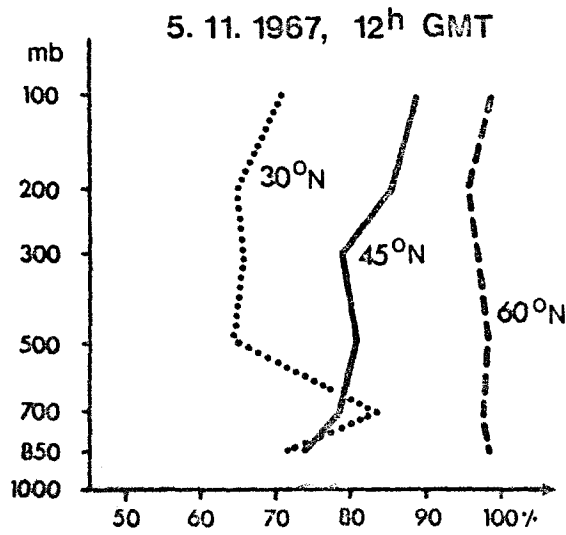
Aktuelle meridionale Transporte von sensibler Energie, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, für die Wellenzahlen 1 bis 6, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite. Positive Werte in  $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{mb}^{-1}$  ( $= 419 \text{ W m}^{-1} \text{mb}^{-1}$ ) entsprechen nordwärts gerichteten Transporten. Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

Termin: 20. 1. 1967, 12<sup>h</sup> GMT



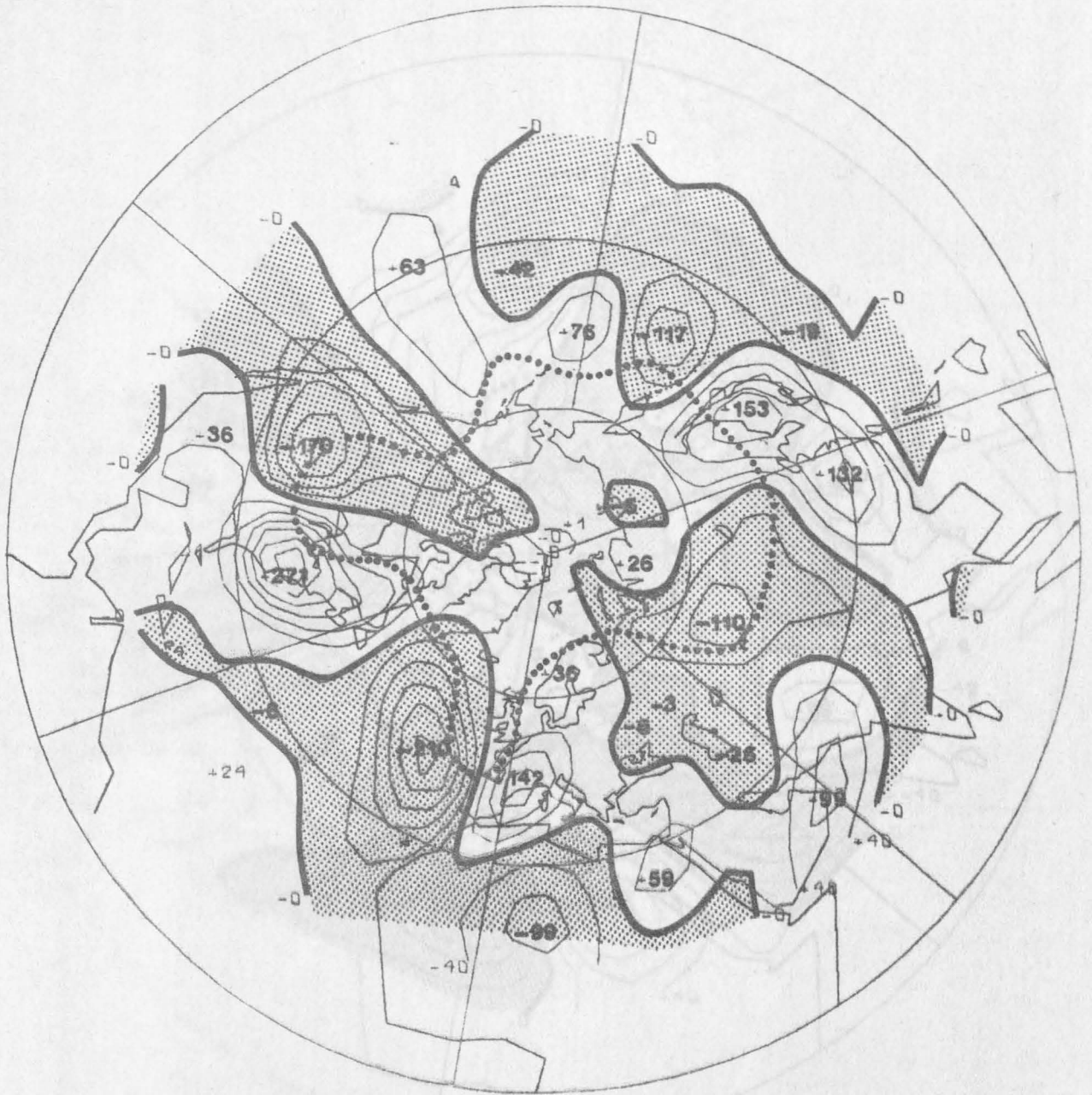
Wellenzahlspektren der aktuellen meridionalen Transporte von sensibler Energie (S) und Drehimpuls (M) für verschiedene geogr. Breiten, dargestellt in Absolutbeträgen. Negative Transporte sind durch Minuszeichen unterhalb der Spektren gekennzeichnet. Positive Zahlen, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite, entsprechen nach Norden gerichteten Transporten.

Termine: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT und 20. 1. 1967, 12<sup>h</sup> GMT



Der durch die Wellenzahlen 1 bis 6 hervorgerufene prozentuale Anteil am absoluten Gesamttransport aller Wellenzahlen für sensible Energie (oben) und Drehimpuls (unten) als Funktion des Drucks.

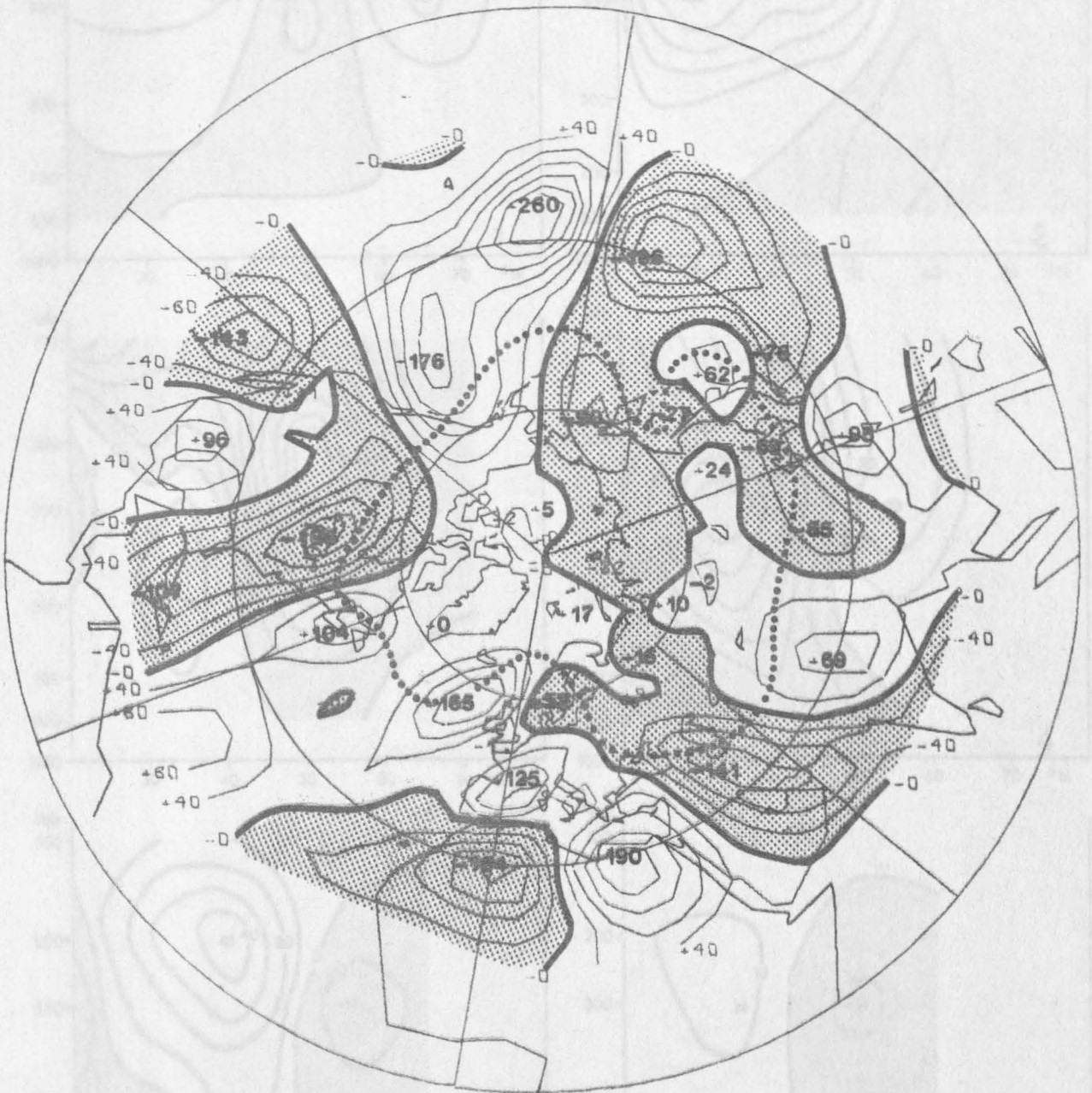
Termine: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT und 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT



Verteilung der aktuellen meridionalen Transporte von Drehimpuls im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, hervorgerufen durch die Gesamtzirkulation unter Annahme der Geostrophie. Südwärts gerichtete Transporte sind schattiert. Die Polarfront ist punktiert wiedergegeben.

Isoplethenabstand:  $4 \times 10^{13} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$

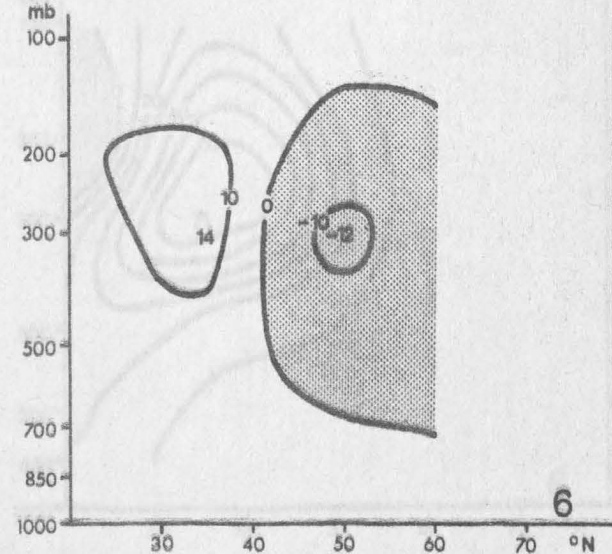
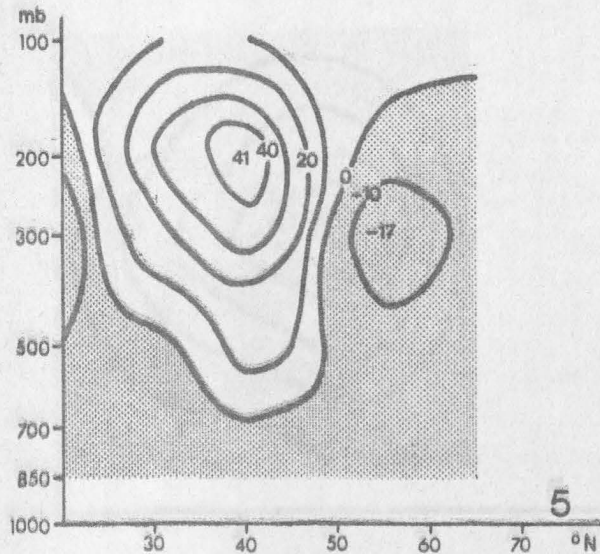
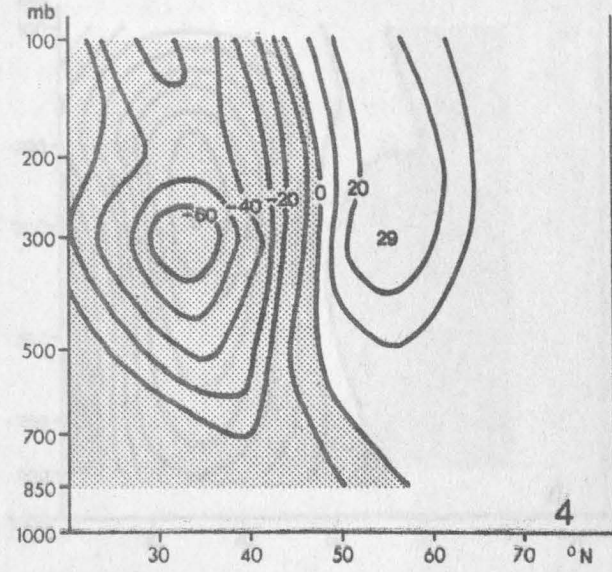
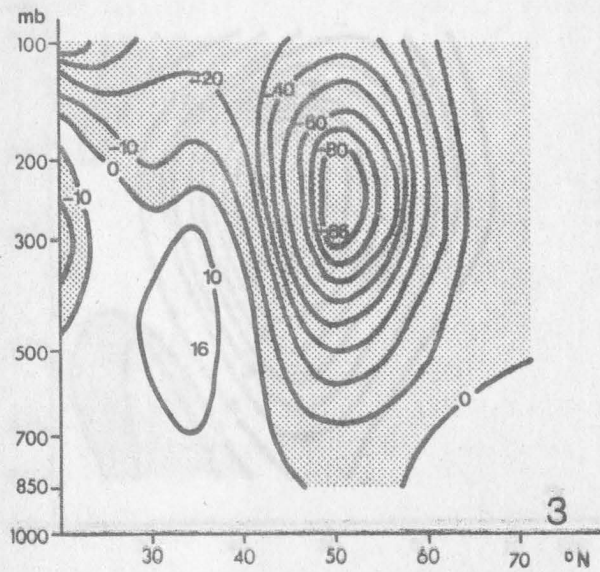
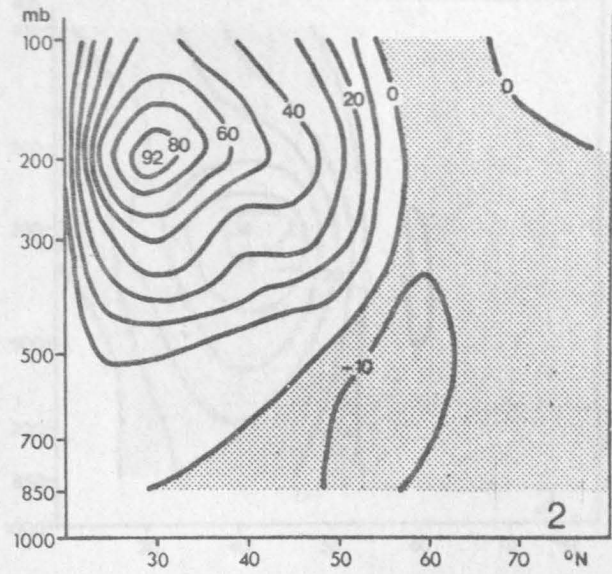
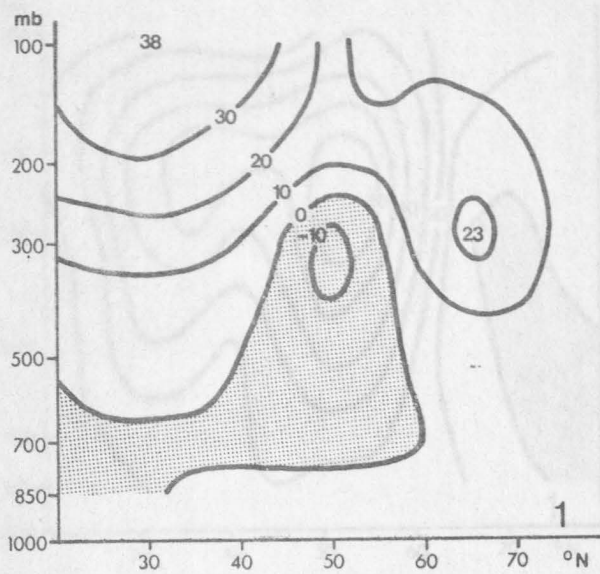
Termin: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT



Verteilung der aktuellen meridionalen Transporte von Drehimpuls im vertikalen Mittel von 925 bis 50 mb, hervorgerufen durch die Gesamtzirkulation unter Annahme der Geostrophie. Südwärts gerichtete Transporte sind schattiert. Die Polarfront ist punktiert wiedergegeben.

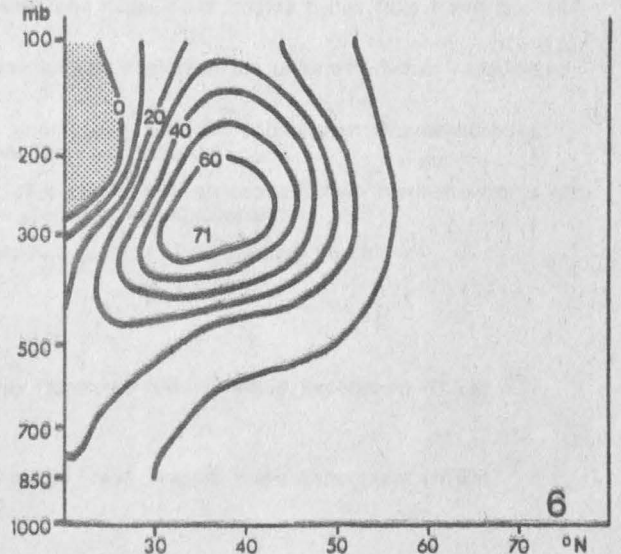
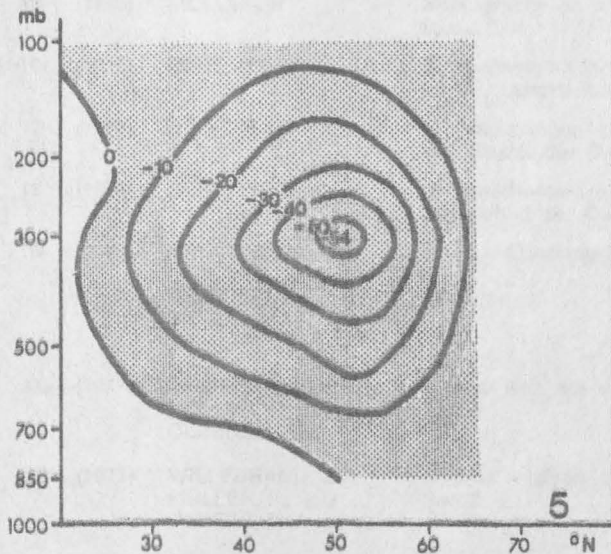
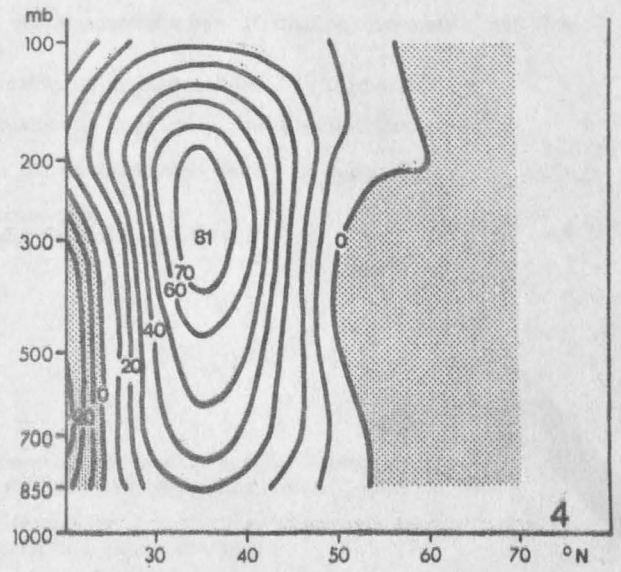
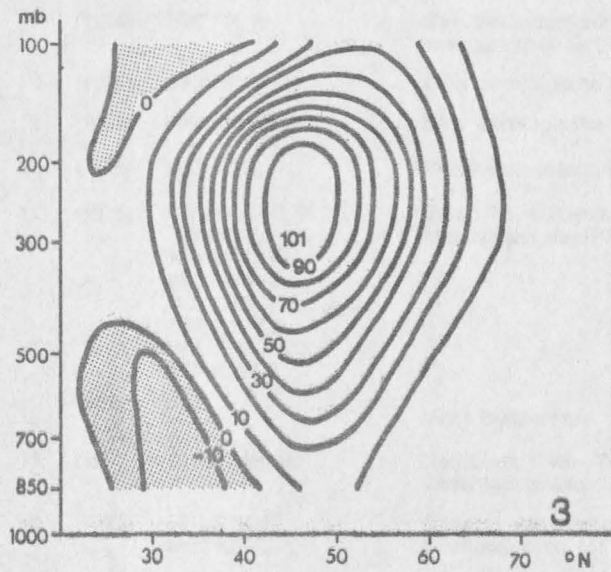
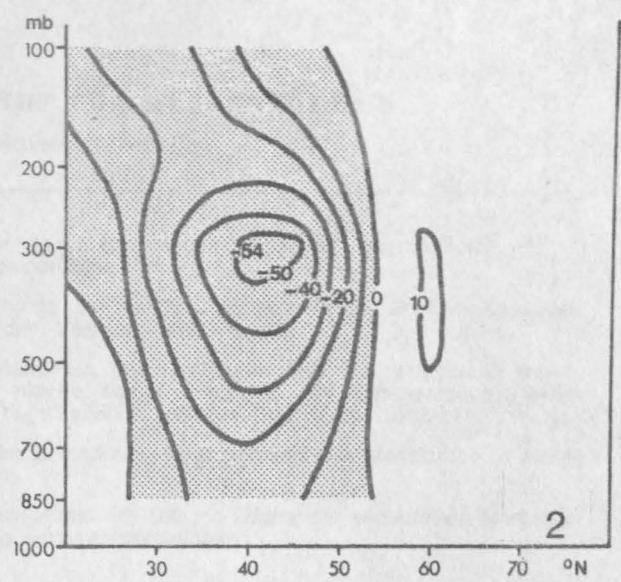
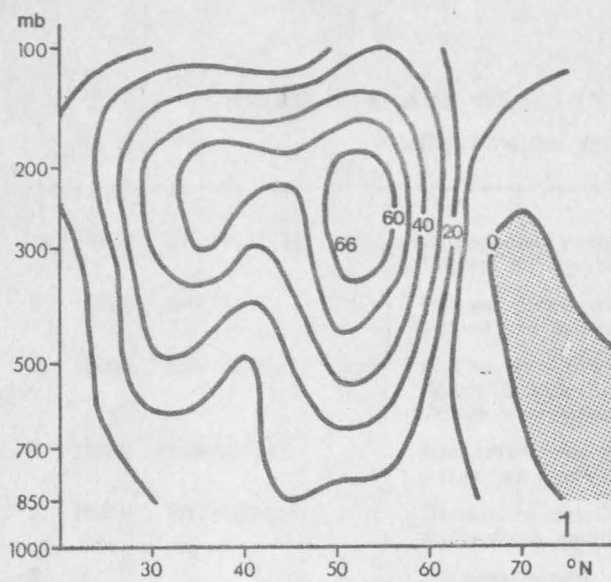
Isopletenabstand:  $4 \times 10^{13} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$

Termin: 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT



Aktuelle meridionale Transporte von Drehimpuls, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, für die Wellenzahlen 1 bis 6, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite. Positive Werte in  $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$  entsprechen nordwärts gerichteten Transporten. Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

Termin: 5. 11. 1967, 12<sup>h</sup> GMT



Aktuelle meridionale Transporte von Drehimpuls, hervorgerufen durch die atmosphärischen Wellen, für die Wellenzahlen 1 bis 6, gewichtet mit dem Cosinus der geogr. Breite. Positive Werte in  $10^{12} \text{ g cm sec}^{-2} \text{ mb}^{-1}$  entsprechen nordwärts gerichteten Transporten. Die Wellenzahlen sind jeweils unten rechts angegeben.

Termin: 20. 1. 1968, 12<sup>h</sup> GMT