

2802

LS

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

Nr. 94

Teil 1

DOI 10.3289/IFM_BER_94A

DIE RÄUMLICHE UND ZEITLICHE VERÄNDERLICHKEIT
DES MERIDIONALEN TRANSPORTES SENSIBLER
ENERGIE IM 850 UND 200 MB-NIVEAU WÄHREND
EINES JAHRES (1975)

Textband

von

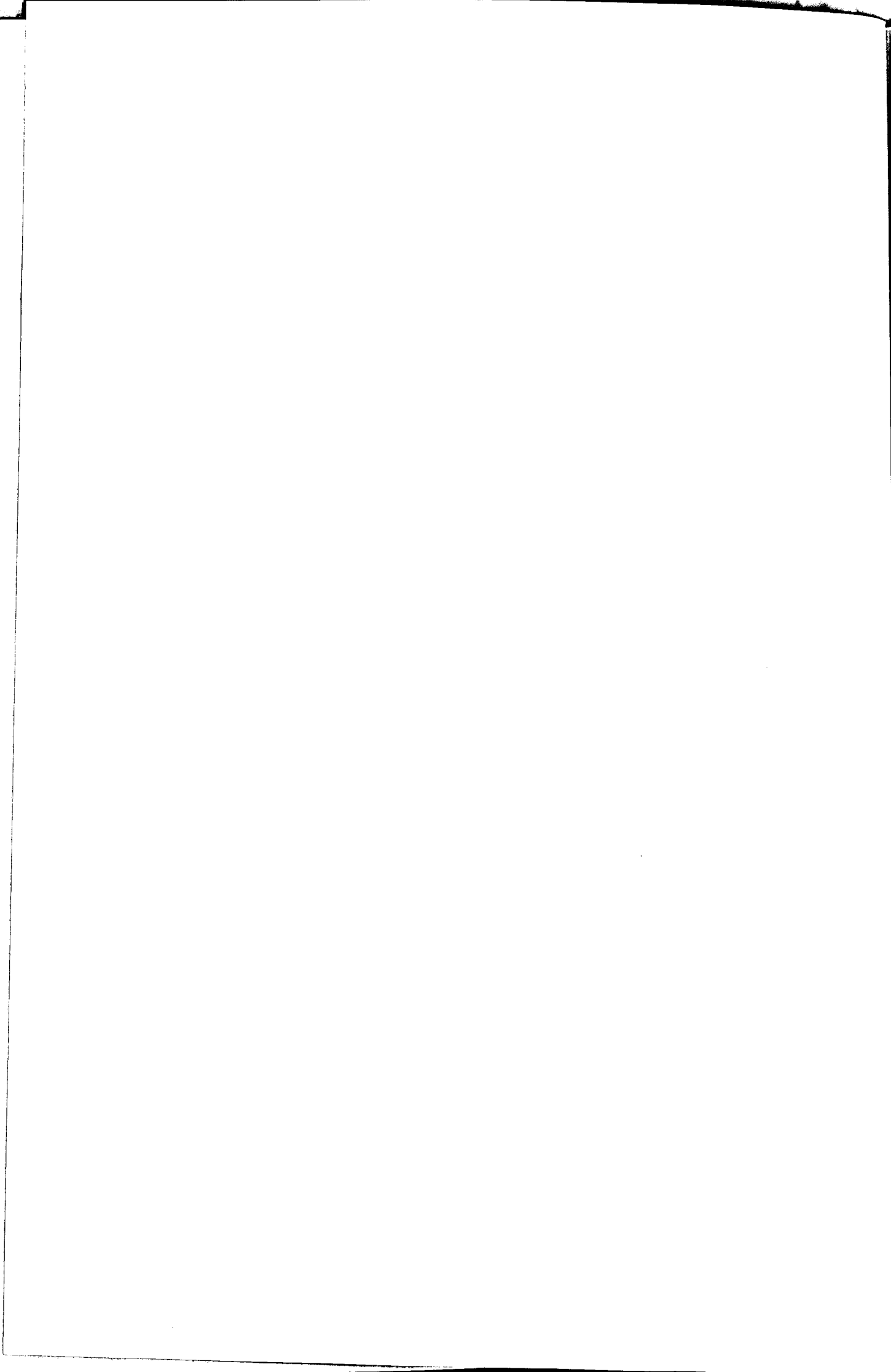
Karl-Werner Rieger



Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von

Institut für Meereskunde
Abteilung Maritime Meteorologie
Düsternbrooker Weg 20
D 2300 Kiel 1

ISSN 0341-8561



KURZFASSUNG

Innerhalb der letzten 20 Jahre gewannen die komplexen Mechanismen, welche den meridionalen Transport sensibler Energie vom Äquator zu den höheren Breiten maßgeblich bestimmen, ein vermehrtes Interesse. Vor allem aufgrund eines lückenhaften Datenmaterials der Meßwerte von Temperatur und Geopotential konnten bisher vorwiegend nur Mittelwerte des Wärmeflusses erstellt und untersucht werden. Dabei wurden wesentliche grundsätzliche Ergebnisse, vor allem über die Zusammenhänge zwischen den stehenden Wellen im Temperatur- und Geopotentialfeld und den durch sie hervorgerufenen Transporten, gewonnen.

Die hauptsächliche Aufgabe dieser Arbeit ist darin zu sehen, mit Verwendung eines umfangreichen Datenmaterials für jeden Tag des Jahres 1975 (Gitterwerte der absoluten Temperatur T und der geopotentiellen Höhe $\phi = gz$ des DWD) die bisher erzielten Ergebnisse durch eine eingehende Beschreibung der meridionalen Transporte sensibler Energie im Jahresgang zu ergänzen und als Pilot-Studie für weitere globale und für mehrere Jahre durchzuführende spezielle Untersuchungen bestimmte Eigenarten und Zusammenhänge zwischen dem Temperatur- und Geopotentialfeld und dem meridionalen Wärmefluß näher zu untersuchen. Dazu wurden für zwei ausgewählte Druckniveaus (850 und 200 mb), für welche die bisher vorliegenden Arbeiten den Transport sensibler Wärme als maximal intensiv ergaben, anhand der FOURIER-Koeffizienten des Geopotentials und der Temperatur für fünf spezielle Breitenkreise der Nordhalbkugel der totale Transport von sensibler Energie und der durch stehende und wandernde Wellen hervorgerufene sensible Wärmefluß berechnet und dessen zeitliche und zonale Veränderlichkeit im Ablauf des Jahres 1975 sowie die entsprechenden zeitlichen und zonalen Mittelwerte desselben berechnet, untersucht sowie bildlich dargestellt.

Durch den Vergleich der zeitlichen und zonalen Variation der verschiedenen Transportarten sensibler Energie mit den dazugehörigen zeitlichen und zonalen Mittelwerten konnten detaillierte Angaben über unterschiedliche Mechanismen des Flusses im

Jahresablauf und über den verschiedenen Breitenkreisen aufgedeckt werden. Sie konnten vor allem dadurch erfaßt werden, daß jeder einzelne Monat des Jahres untersucht wurde und auch Einzelercheinungen, die sich für den Transport oft als wesentlich erwiesen haben, nicht durch Mittelung herausgefiltert waren.

So zeigt zum Beispiel der durch stehende Wellen hervorgerufene Transport im 850 mb-Niveau eine deutliche Abhängigkeit von den zonalen Temperaturgegensätzen über Land und Meer, während der durch wandernde Wellen erzeugte Wärmefluß vor allem durch den meridionalen Temperaturgradienten im Zusammenhang mit dem Windfeld in Zyklonen oder Antizyklonen bestimmt ist. Auch erscheinen Folgen solcher Störungen und ihre Abwandlung bei bestimmten Typen der globalen Strömungsform der Allgemeinen Atmosphärischen Zirkulation wichtig für charakteristische Schwankungen im Transport zu sein.

Im 200 mb-Niveau dagegen sind die unterschiedlichen Temperaturen an der Erdoberfläche - wie zu erwarten ist - nahezu bedeutungslos, während der lokal vorhandene Gegensatz zwischen Stratosphäre und Troposphäre einen wesentlichen Einfluß ausübt.

Auch für die verschiedenen untersuchten Breitenkreise werden auf beiden Druckniveaus ganz typische Mechanismen der verschiedenen Transportarten aufgezeigt, so daß sich oft ein typisch unterschiedlicher Jahresgang des meridionalen Wärmeflusses für jeden Breitenkreis ergibt.

Neben den in der Arbeit selbst zur Führung der Diskussion als Beispiele präsentierten Abbildungen unterschiedlicher Art, wird für speziell interessierte Wissenschaftler der Arbeit ein umfangreicher Bildband beigegeben, welcher über alle Rechenergebnisse in bildlicher Form eine detaillierte Auskunft gibt.

ABSTRACT

Within the past 20 years enlarged interest has been taken in the complex mechanisms which predominately determine the meridional transport of sensible heat energy from the equator towards the higher latitudes. Above all due to incomplete aerological data sets of temperature and geopotential height, so far only mean values of the flux of sensible heat have been computed and examined.

From these studies essential fundamental results were gained. Especially the relations between the standing waves in the temperature field and in the field of geopotential height has been investigated together with the meridional transports caused by these waves.

A main aim of this publication is to widen the above mentioned results by a detailed description of the annual cycle of the meridional transport of sensible heat energy using an extensive data set separately for each day of the year 1975 (data of the absolute temperature T and the geopotential height $\phi = gz$, taken from the conventional radiosonde and radiowind station network of the Deutscher Wetterdienst).

Secondly this publication is to be taken as a preparatory study for a more elaborate global discussion, which has to be carried out using data from a period consisting of several years, aiming at relations between the field of temperature and that of geopotential height and at the meridional flux of sensible heat connected with these waves.

In order to reach this goal the total transport of sensible heat energy and the flux of sensible heat caused by standing and transient eddies were computed by use of FOURIER coefficients of geopotential height and temperature. This was done at two specially selected isobaric-surfaces (850 and 200 mb), for which in previous studies the transport of sensible heat was found to be most intense. These computations were carried out at five latitude circles (60° , 50° , 40° , 30° and 20° N). The daily and zonal variability of the total flux and its

component fluxes caused by either standing or by transient eddies as well as the corresponding monthly and zonal mean values of these transports were computed and examined. The results were also presented in several figures.

By comparing the daily and zonal variability of the different kinds of the transport of sensible heat energy with the corresponding monthly and zonal mean values detailed results concerning different mechanisms of the annual cycle of the meridional transport across the various latitude circles could be obtained. Above all they could be sorted out by a careful examination of every single month of the year and by the fact that single appearances, which often proved essential for the transport, had not disappeared after the application of the averaging process.

Thus in the 850 mb level for instance the transport caused by standing eddies shows a distinct dependence on the temperature contrasts in zonal direction in the atmosphere above land and sea, while the flux of sensible heat caused by transient eddies is mainly dependent on meridional temperature gradients in connection with the wind field in the surroundings of cyclones and anticyclones. Moreover series of such disturbances and their connection with certain types of the global form of the westerlies in the general circulation of the atmosphere seem to be important for characteristic variations in the transport pattern.

However at the 200 mb level - as could be expected - the different temperature contrasts in the atmosphere close to the earth's surface are nearly insignificant, while the local existing contrast between stratosphere and troposphere exerts an important influence.

In addition for different latitude circles typical mechanisms of the individual transport-types are shown to exist, so that distinctive annual cycles of the meridional sensible heat flux are present at different latitudes.

Beside the figures, contained in the text as typical examples needed for assistance in the discussion, a complete set of figures, which allows a more detailed information for interested scientists about all the results obtained during the computational work, is added to the text.



INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1. Einleitung	1
2. Grundlagen für die Untersuchung	3
2.0. Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole	3
2.1. Allgemeine Ausführungen über den meridionalen großturbulenten Transport sensibler Energie	4
2.2. Aufgabenstellung und Datenmaterial	14
2.3. Die mathematischen Grundlagen für die Berechnungen des meridionalen Transportes sensibler Energie	17
3. Ergebnisse von Untersuchungen über den meridionalen Transport sensibler Energie im 850 mb-Niveau	20
3.1. Die monatlichen und zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau	21
3.1.1. Die zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im 850 mb-Niveau	22
3.1.2. Die monatlich und zonal gemittelten Werte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau	28
3.2. Die zonale Veränderlichkeit der meridionalen Transporte sensibler Energie durch stehende Wellen und der monatlich gemittelten Transporte durch wandernde Wellen im 850 mb-Niveau	32
3.2.1. Die zonale Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im 850 mb-Niveau	33
3.2.2. Die zonale Veränderlichkeit des monatlich gemittelten durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau	40
3.3. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau	45
3.3.1. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau	45

	Seite
3.3.2. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des totalen meridionalen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau	50
3.4. Die tägliche und zonale Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen hervorgerufenen und des totalen meridionalen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau	54
4. Ergebnisse von Untersuchungen über den meridionalen Transport sensibler Energie im <u>200 mb-Niveau</u>	68
4.1. Die monatlichen und zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau	68
4.1.1. Die zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im 200 mb-Niveau	69
4.1.2. Die monatlichen und zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau	71
4.2. Die zonale Veränderlichkeit des meridionalen Transportes durch stehende Wellen und der monatlichen Mittelwerte des Transportes durch wandernde Wellen im 200 mb-Niveau	73
4.2.1. Die zonale Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im 200 mb-Niveau	73
4.2.2. Die zonale Veränderlichkeit der monatlichen Mittelwerte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau	78
4.3. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau	83
4.3.1. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau	83
4.3.2. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des totalen meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau.	87

	Seite
4.4. Die tägliche und zonale Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen hervorgeru- fenen und des totalen meridionalen Trans- portes sensibler Energie im 200 mb-Niveau	90
5. Schlußbetrachtung	102
Danksagung	105
Literaturverzeichnis	106
Abbildungen	109



1. EINLEITUNG

Aufgrund der Erdachsenlage zur Strahlungsrichtung der Sonne und der Erdkrümmung entsteht im Gesamtsystem Erde - Atmosphäre ein Strahlungsüberschuß in niederen gegenüber einem Defizit in nördlicheren Breiten.

Würde dieser Überschuß an Strahlungsenergie nicht durch meridionale Transporte von sensibler und latenter Wärme nach Norden und Süden hin abtransportiert, so hätte das eine ständige Aufheizung der Erde und der Atmosphäre in niederen und eine Abkühlung in den polaren Breiten zur Folge.

Dieser meridionale Wärmetransport findet sowohl in den Ozeanen, als auch in der Atmosphäre statt. Dabei liefert also letztendes die Sonne die Energie, die notwendig ist, um durch die atmosphärische und die ozeanische Zirkulation einen Wärmetransport vom Äquator nach Norden derart einzuleiten, daß sich im zeitlichen Mittel ein Gleichgewicht zwischen Strahlungsimbalance und Transport einstellt (s. neben unzähligen anderen Veröffentlichungen z.B. SPETH, 1974).

In niederen Breiten, wo der Einfluß der Corioliskraft mehr und mehr zurückgeht, kann sich vom Äquator bis ca. 30°N eine direkt ablaufende Zirkulationszelle ausbilden, in welcher der meridionale Transport sensibler Energie wesentlich durch die mittlere Meridionalzirkulation bewerkstelligt wird (sogenannte HADLEY-Zelle). In höheren Breiten hingegen richtet sich der meridionale Transport nach ganz anderen Gesetzmäßigkeiten. Durch die Einwirkung der Corioliskraft auf die bewegten Luftmassen wird der Transport derart getätigt, daß die erwärmte Luft, die in Äquatornähe aufsteigt, nicht auf direktem Wege zum Pol gelangt, sondern so abgelenkt wird, daß sie auf der Nordhalbkugel langsam in eine Strömung aus West übergeht, die bei ca. 30°N und nahe dem 200 mb-Niveau ihr Maximum erreicht (Subtropenjet). Über den kalten Polen sinkt die Luft ab und fließt als polarer Kaltluftstrom nach Süden, wo sie erwärmt über relativ nördlichen Breiten wieder aufsteigt. Zwischen diesen beiden äquatorialen und polaren Zirkulationszellen bildet sich über den mittleren Breiten eine dritte Zelle aus, welche als FERREL-

Zelle bezeichnet wird. Die Zirkulationsrichtung in ihr ist prinzipiell jener der anderen beiden Zellen entgegengesetzt, aber ihre Intensität ist oberhalb der planetarischen Reibungsschicht so gering, daß ihre Wirkung gegenüber anderen Transportsystemen vernachlässigbar klein wird.

Durch die komplizierte Land - Meer - Verteilung verursacht, nimmt die Strömung in der Atmosphäre der Nordhalbkugel einen häufig mäandrierenden Verlauf, der besonders in der Breitenzone der atmosphärischen Westwinddrift von Wellen und Wirbelstörungen (Zyklonen und Antizyklonen sowie lange ROSSBY-Wellen) überlagert ist (ROSSBY-Regime). Über diesen mittleren Breiten wird das meridionale Temperaturgefälle oder die vertikale Windscherung so groß, daß die Strömung zeitweilig instabil werden kann. Hier kann die sensible Energie nicht mehr in geordneten Strömungen nach Norden abtransportiert werden. Der meridionale Transport richtet sich vielmehr nach dem Zusammenwirken höchst komplizierter turbulenter Vorgänge, welche maßgeblich durch das Produkt der Temperatur und der meridionalen Windkomponente beschrieben werden können.

Als Transporteur kommen also großskalige atmosphärische Wellenstörungen sowie mittelskalige Wellen und Wirbel zur Wirkung. Ebenso nimmt die Temperaturverteilung über Land und Meer und orographische Hindernisse bestimmenden Einfluß (großskaliger, turbulenter Wärmetransport).

Diese meridionalen großturbulenten Transportprozesse wurden in den letzten zwei Jahrzehnten mit vermehrtem Interesse untersucht. Die immer lückenlosere Versorgung mit Meßdaten - geliefert von Radiosondenstationen - und die verbesserte Computertechnik ermöglichten es, immer detailliertere Aufschlüsse über die Transportsysteme in der Atmosphäre zu gewinnen.

So haben unter anderem so prominente Autoren wie BJERKNES und MINTZ (1947), OORT und RASMUSSEN (1971), HASTENRATH (1968), WIIN-NIELSEN, BROWN und DRAKE (1963), REITER (1969) u.a.m. bedeutende Beiträge über solche wichtigen atmosphärischen Flüsse sensibler Energie geliefert.

Weitere Arbeiten, wie KAO et al. (1970), HSIAO (1979), DEFANT, OSTHAUS, SPETH (1979), OSTHAUS (1978), SPETH und OSTHAUS (1978) und STRÖFING (1978) befaßten sich mit Untersuchungen solcher Transporte im [Wellenzahlen - Zeit] - Spektralbereich, wobei sich die Untersuchungen von DEFANT, OSTHAUS, SPETH (1979), OSTHAUS (1978) und SPETH und OSTHAUS (1978) nur auf jene Transporte beziehen, welche durch stehende Wellen verursacht sind.

2. GRUNDLAGEN

2.0. LISTE DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

x	Koordinate entlang von Breitenkreisen, positiv nach Osten
y	Koordinate entlang der Meridiane, positiv nach Norden
v	meridionale Komponente der Windgeschwindigkeit, positiv nach Norden
ϕ	geographische Breite
λ	geographische Länge
t	Zeit
T	absolute Temperatur [$^{\circ}$ abs]
p	Druck [mb]
Φ	Geopotential (= gz) [$\text{cm}^2\text{sec}^{-2}$]
a	mittlerer Erdradius: $6,371 \times 10^6$ m
R =	$a \cos \phi$
f	Coriolisparameter, $f = 2\Omega \sin \phi$, $\Omega = 7,29 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$
g	1) mittlere Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ 2) als Index: geostrophisch
c_p	spezifische Wärme für trockene Luft bei konstantem Druck, $c_p = 0,24 \text{ cal g}^{-1} \text{ grad}^{-1}$
L	Wellenlänge
S	sensible Energie
H	horizontaler Transport
MSE	stehende Wellen (<u>m</u> ean <u>s</u> tanding <u>e</u> ddies)
TE	wandernde Wellen (<u>t</u> ransient <u>e</u> ddies)
MMC	mittlere Meridionalzirkulation (<u>m</u> ean <u>m</u> eridional <u>c</u> irculation)
[]	Mittel über die als Index in runden Klammern stehende Größe
()	Abweichung vom Mittel über die in runden Klammern stehende Größe

2.1. ALLGEMEINE AUSFÜHRUNGEN ÜBER DEN MERIDIONALEN GROSSTURBULENTEN TRANSPORT VON SENSIBLER ENERGIE

Der meridionale Transport sensibler Energie ist bestimmt durch das Produkt aus der Temperatur T und der meridionalen Windkomponente v . Zwischen zwei beliebig gewählten Druckflächen p_1 und p_2 ($p_2 > p_1$) berechnet sich der Transport über einen Breitenkreis hinweg pro Längeneinheit wie folgt (s. neben vielen anderen Veröffentlichungen auch SPETH, 1976):

$$HvS = \int_{p_1}^{p_2} c_p (T v_g) \frac{dp}{g}$$

Es hat sich erwiesen, daß die Berechnung des Transportes mit der geostrophischen Windkomponente über mittleren und nördlichen Breiten ausreichend genau ist (s. dazu OORT und RASMUSSEN, 1970; ELIASSEN, 1958). OORT und RASMUSSEN haben in ihrer Arbeit den meridionalen Transport sensibler Energie durch die mittlere Meridionalzirkulation berechnet und gezeigt, daß sie über mittleren Breiten nahe 40°N oder 50°N einen offensichtlich nordwärts gerichteten Transport sensibler Energie verursacht, welcher jedoch vom Betrag her nicht ausreicht, um die Transporte durch stehende und wandernde Wellen wesentlich zu ändern. In Breiten südlich von ca. 20°N liefert jedoch der Transport durch die mittlere Meridionalzirkulation einen beträchtlichen südwärts gerichteten Beitrag. Hier, wo der Einfluß der Corioliskraft gegen den Äquator hin schwach wird, tritt eine nicht zu vernachlässigende ageostrophische Windkomponente auf, die - wie im folgenden gezeigt wird - im Produkt mit den hohen Werten der absoluten Temperatur sehr wohl geeignet ist, Transporte zu erzeugen, die sich wesentlich von einer Berechnung mit der rein geostrophischen Windkomponente v_g unterscheiden. Da - wie oben erwähnt - die Größen T und v die einzigen Variablen für die Berechnung des Transportes sensibler Energie darstellen, soll im folgenden der Übersichtlichkeit wegen nur das Produkt $T \cdot v$ behandelt werden.

Das Produkt ist nun in seine Anteile zu zerlegen, die durch die verschiedenen Arten von Wellen erzeugt werden.

Im Gegensatz zu früheren Arbeiten beschränken sich hier die Untersuchungen nicht nur auf räumliche oder zeitliche Mittel, sondern es werden auch räumliche und zeitliche Veränderlichkeiten des gesamten Transportes untersucht. Daher ist eine konsequente Zerlegung des Produktes $T \cdot v$ in alle darin enthaltenen Anteile vorzunehmen, um einen genauen Überblick über die Zusammensetzung der in den Abbildungen dieser Arbeit dargestellten Transporte zu ermöglichen.

Es soll hier die von REITER (1969a) vorgeschlagene Nomenklatur verwendet werden.

So bedeutet eine eckige Klammer einen Mittelwert, der Index in runden Klammern daneben bezeichnet die Größe, über welche gemittelt wird. Dagegen bezeichnet eine Größe in runden Klammern die Abweichung der Größe vom Mittelwert, während der dazugehörige Index in runden Klammern wieder die Bezugsgröße der Abweichung angibt.

Durch die Anwendung eines zeitlichen oder eines zonalen Mittelungsprozesses lassen sich die beiden meteorologischen Elemente: die absolute Temperatur T oder die meridionale Windgeschwindigkeitskomponente v in die folgenden beiden Ausdrücke zerlegen:

$$T = [T]_{(t)} + (T)_{(t)} ; T = [T]_{(\lambda)} + (T)_{(\lambda)} \quad (a) \quad (1)$$

$$v = [v]_{(t)} + (v)_{(t)} ; v = [v]_{(\lambda)} + (v)_{(\lambda)} \quad (b),$$

wobei jeweils eine Zerlegung in den zeitlichen bzw. zonalen Mittelwert und in die entsprechende zeitliche bzw. zonale Abweichung von diesen Mittelwerten erfolgt.

Auch die beiden zeitlichen Mittelwerte und die beiden zeitlichen Abweichungen können einem zonalen Mittelungsprozeß und ähnlich können die beiden zonalen Mittelwerte und die entsprechenden beiden Abweichungen einem zeitlichen Mittelungsprozeß unterworfen werden. Dies liefert dann die folgenden acht Ausdrücke:

$$[T]_{(t)} = [T]_{(t,\lambda)} + ([T]_{(t)})_{(\lambda)} ; (T)_{(t)} = [(T)_{(t)}]_{(\lambda)} + (T)_{(t,\lambda)} \quad (1')$$

$$[v]_{(t)} = [v]_{(t,\lambda)} + ([v]_{(t)})_{(\lambda)} ; (v)_{(t)} = [(v)_{(t)}]_{(\lambda)} + (v)_{(t,\lambda)}$$

$$[T]_{(\lambda)} = [T]_{(\lambda,t)} + ([T]_{(\lambda)})_{(t)} ; (T)_{(\lambda)} = [(T)_{(\lambda)}]_{(t)} + (T)_{(\lambda,t)} \quad (1'')$$

$$[v]_{(\lambda)} = [v]_{(\lambda,t)} + ([v]_{(\lambda)})_{(t)} ; (v)_{(\lambda)} = [(v)_{(\lambda)}]_{(t)} + (v)_{(\lambda,t)}$$

Setzt man die oberen vier Ausdrücke (1') in die Beziehungen (1a) ein, so resultieren für die beiden Elemente T und v zwei Ausdrücke, welche jeweils vier Einzelglieder in Summierung enthalten. Ebenso kann man die unteren vier Ausdrücke (1'') in die Beziehungen (1b) einsetzen und wieder zwei Ausdrücke für T und v gewinnen, welche sich wiederum in Summierung aus vier Einzelgliedern zusammensetzen. Diese vier Ausdrücke haben die folgende Form:

$$T = [T]_{(t,\lambda)} + ([T]_{(t)})_{(\lambda)} + [(T)_{(t)}]_{(\lambda)} + (T)_{(t,\lambda)} \quad (a) \quad (2')$$

$$v = [v]_{(t,\lambda)} + ([v]_{(t)})_{(\lambda)} + [(v)_{(t)}]_{(\lambda)} + (v)_{(t,\lambda)} \quad (b)$$

$$T = [T]_{(\lambda,t)} + ([T]_{(\lambda)})_{(t)} + [(T)_{(\lambda)}]_{(t)} + (T)_{(\lambda,t)} \quad (a) \quad (2'')$$

$$v = [v]_{(\lambda,t)} + ([v]_{(\lambda)})_{(t)} + [(v)_{(\lambda)}]_{(t)} + (v)_{(\lambda,t)} \quad (b)$$

Man kann leicht beweisen, daß einige Terme von (2') und (2'') einander gleich sind. So ist zwischen den folgenden Gliedern Identität nachweisbar:

$$\begin{aligned} [T]_{(t,\lambda)} &\equiv [T]_{(\lambda,t)} && \text{Gleiches gilt für v.} \\ [(T)_{(t)}]_{(\lambda)} &\equiv ([T]_{(\lambda)})_{(t)} && \text{Damit ist (2') } \equiv \text{(2'').} \\ ([T]_{(t)})_{(\lambda)} &\equiv [(T)_{(\lambda)}]_{(t)} ; \\ (T)_{(t,\lambda)} &\equiv (T)_{(\lambda,t)} \end{aligned}$$

Damit ist bewiesen, daß (2') und (2'') jeweils für T oder für v einander gleich und die angewendeten Abweichungs- oder Mittelungsoperationen in jedem einzelnen Glied vertauschbar sind.

Unter Annahme von Geostrophie sind die Glieder $[v]_{(t,\lambda)}$ und $([v]_{(\lambda)})_{(t)}$ gleich Null.

Es sollen jedoch alle Summanden des Produkts $T \cdot v$, welche den gesamten Transport verursachen, aufgeführt werden, um zu zeigen, welche zusätzlichen Transportglieder auftreten können, wenn eine ageostrophische Komponente des Windes an Bedeutung gewinnt. Weiter sollen die Typen der Zirkulation, die einen Transport bewirken, der weder im zeitlichen noch im räumlichen Mittel verschwindet, zu den Summanden des Produkts dazugeschrieben werden, die sie bewirken.

Es werden folgende Bezeichnungen verwendet:

1. die mittlere meridionale Zirkulation
(mean meridional circulation = MMC)
2. die stehenden Wellen
(mean standing eddies = MSE)
3. die wandernden Wellen
(transient eddies = TE)

Außerdem werden die Glieder, die bei Annahme von Geostrophie Null werden, mit der Bezeichnung (~ 0) versehen).

Nach der Zerlegung von T und v in Gleichung (2) unterteilt sich das Produkt $T \cdot v$ also in folgende 16 Teilausdrücke:

$$\begin{aligned} T \cdot v = & \\ & \text{MMC} \\ 1. & [T]_{(t,\lambda)} [v]_{(t,\lambda)} + (\sim 0) \\ & \text{MSE} \\ 2. & ([T]_{(t)})_{(\lambda)} ([v]_{(t)})_{(\lambda)} + \\ & \text{TE} \\ 3. & ([T]_{(\lambda)})_{(t)} ([v]_{(\lambda)})_{(t)} + (\sim 0) \quad (3) \\ 4. & ([T]_{(\lambda)})_{(t)} (v)_{(t,\lambda)} + \\ 5. & (T)_{(t,\lambda)} (v)_{(t,\lambda)} + \end{aligned}$$

MISCHGLIEDER

6. $[T]_{(t,\lambda)} ([v]_{(t)})_{(\lambda)} +$
7. $[T]_{(t,\lambda)} ([v]_{(\lambda)})_{(t)} + \quad (\sim 0)$
8. $[T]_{(t,\lambda)} (v)_{(t,\lambda)} +$
9. $([T]_{(t)})_{(\lambda)} [v]_{(t,\lambda)} + \quad (\sim 0)$
10. $([T]_{(t)})_{(\lambda)} ([v]_{(\lambda)})_{(t)} + \quad (\sim 0) \quad (3)$
11. $([T]_{(t)})_{(\lambda)} (v)_{(t,\lambda)} +$
12. $([T]_{(\lambda)})_{(t)} [v]_{(t,\lambda)} + \quad (\sim 0)$
13. $([T]_{(\lambda)})_{(t)} ([v]_{(t)})_{(\lambda)} +$
14. $(T)_{(t,\lambda)} [v]_{(t,\lambda)} + \quad (\sim 0)$
15. $(T)_{(t,\lambda)} ([v]_{(t)})_{(\lambda)} +$
16. $(T)_{(t,\lambda)} ([v]_{(\lambda)})_{(t)} \quad (\sim 0)$

Ehe diese gesamte Transportgleichung auf jene Summanden reduziert wird, die allein für den geostrophischen Fall wirksam werden können, müssen noch folgende Anmerkungen gemacht werden:

Beachtet man die Summanden 3.1. und 3.7., die unter anderem bei Ageostrophie Bedeutung gewinnen, dann fällt auf, daß sie im Breitenkreismittel nicht verschwinden. Weiterhin ist zu beachten, daß hier die absolute Temperatur mit ihrem vollen Betrag in $^{\circ}\text{K} (^{\circ}\text{abs})$ eingeht, während außer in 3.6. und 3.8., die auch im geostrophischen Fall wirksam sind, nur mit Temperaturdifferenzen gerechnet wird. 3.6. und 3.8. werden aber im Breitenmittel Null.

Aus dieser Betrachtung folgt, daß die in niederen Breiten sehr wirksame ageostrophische meridionale Windkomponente dort zu ganz erheblichen Transporten sensibler Energie im Breitenmittel beitragen kann.

Der besseren Übersicht halber soll nun die Gleichung (3) auf jenen Anteil reduziert werden, der bei Annahme von Geostrophie wirksam ist:

$$T \cdot v_g = \overset{\text{MSE}}{([\overline{T}]_{(t)})_{(\lambda)} ([\overline{v}]_{(t)})_{(\lambda)} +} \quad (\text{a})$$

$$\overset{\text{TE}}{([\overline{T}]_{(\lambda)})_{(t)} (v)_{(t,\lambda)} + (T)_{(t,\lambda)} (v)_{(t,\lambda)} +} \quad (\text{b})$$

$$[\overline{T}]_{(t,\lambda)} ([\overline{v}]_{(t)})_{(\lambda)} + \quad (\text{c})$$

$$[\overline{T}]_{(t,\lambda)} (v)_{(t,\lambda)} + \quad (\text{d}) \quad (4)$$

$$([\overline{T}]_{(t)})_{(\lambda)} (v)_{(t,\lambda)} + \quad (\text{e})$$

$$([\overline{T}]_{(\lambda)})_{(t)} ([\overline{v}]_{(t)})_{(\lambda)} + \quad (\text{f})$$

$$(T)_{(t,\lambda)} ([\overline{v}]_{(t)})_{(\lambda)} + \quad (\text{g})$$

Dieser Ausdruck liefert also den gesamten meridionalen Transport sensibler Energie für jeden Punkt eines Breitenkreises und zu jedem diskreten Zeitpunkt.

Bevor untersucht wird, welche Glieder einen wirklichen Beitrag für den Wärmeenergieausgleich Äquator-Pol liefern, seien noch die Transportglieder 4c und 4d näher untersucht. Diese beiden Glieder enthalten als einzige der ganzen Summe ein Produkt, in das die Temperatur nicht als Temperaturdifferenz, sondern als Absolutwert eingeht. Die absolute Temperatur ist immer positiv, weiterhin ist sie allgemein ihrem Betrag nach um ein bis zwei Zehnerpotenzen größer als die Temperaturdifferenzen. Dadurch wird der Beitrag der Glieder 4c und 4d für den Gesamttransport so dominant, daß die anderen Anteile in einer Darstellung des gesamten Transportes kaum noch erkennbar sind und bezüglich des Vorzeichens der Transportbeträge, also hinsichtlich der Richtung, lediglich das meridionale Windfeld abgebildet wird.

Wie im folgenden gezeigt wird, handelt es sich bei diesen bei-

den Gliedern jedoch um einen Transportanteil, der im Breitenmittel keinen Beitrag liefert.

Diese Tatsache ist bei den Darstellungen des gesamten Transportes besonders zu beachten (s. auch STRÖFING, 1978, Abb. 27). Aus diesem Grunde ist es auch unerläßlich, bei Betrachtungen des gesamten, ungemittelten Transportes zusätzlich immer die herausgefilterten Anteile durch stehende und wandernde Wellen zu untersuchen.

Für den tatsächlichen meridionalen Energieaustausch liefern nur die Glieder der Gleichung (4) einen Beitrag, die weder bei räumlicher noch bei zeitlicher Mittelung des Transportes verschwinden.

Wird Gleichung (4) über die Längengrade eines Breitenkreises gemittelt, so werden die Summanden 4c und 4d gleich Null. Das bedeutet, daß eine Darstellung der zeitlichen Veränderlichkeit der Breitenmittel des gesamten Transportes zusätzlich zu der Summe der Transporte durch stehende und wandernde Wellen noch die Anteile der gemischten Glieder 4e, 4f und 4g beinhaltet, deren Summe offensichtlich dem Betrage nach mit der Summe der Glieder 4a und 4b gleichwertig sein kann.

Um zu testen, wie gut eine zeitliche Mittelung über einen Monat die Anteile der Glieder 4e, 4f und 4g aus der Gesamtsumme des Transports herausfiltert, wurde der folgende Vergleich durchgeführt:

Zuerst wurden die Breitenmittel für jeden Tag des Monats berechnet, so daß sie die Anteile der Glieder 4e, 4f und 4g noch enthielten und dann wurden sie über den Monat gemittelt.

Dann werden nacheinander die Anteile des Transports durch stehende und wandernde Wellen aus dem gesamten Transport herausgefiltert, deren Breitenmittel berechnet, und die über den Monat gemittelten Breitenmittel des Transports durch wandernde Wellen zu den Breitenmitteln durch stehende Wellen addiert.

Diese Summe wies gegenüber dem Monatsmittel der Breitenmittellwerte des gesamten Transports einen Unterschied von maximal 3 % auf.

Erst eine anschließende zeitliche Mittelung des räumlichen Mittels ergibt jenen Beitrag, den der meridionale Transport von sensibler Energie zum Energieaustausch zwischen Äquator und Polen liefert.

Wie zu erwarten war, werden nach räumlicher und zeitlicher Mittelung auch die Summanden 4e, 4f und 4g gleich Null, so daß schließlich nur die folgende Summe übrigbleibt:

$$\begin{aligned}
 [T \cdot v_g](\lambda, t) &= \\
 &\quad \text{MSE} \\
 &[([T](t))(\lambda) ([v](t))(\lambda)](\lambda, t) + \quad (a) \\
 &\quad \text{TE} \\
 &[([T](\lambda))(\lambda) (v)_{(t, \lambda)} + (T)_{(t, \lambda)} (v)_{(t, \lambda)}](\lambda, t) \quad (b)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$



Dieser Ausdruck enthält also die Summe des räumlich und zeitlich gemittelten meridionalen Transports sensibler Energie, getätigt durch stehende Wellen und des räumlich und zeitlich gemittelten Transports, verursacht durch wandernde Wellen.

Wie bereits erwähnt wurde, soll nicht nur der gesamte Transport, sondern auch seine Anteile durch stehende und wandernde Wellen getrennt untersucht werden.

Es müssen also die Glieder c, d, e, f und g der Gleichung (4) zu Null gesetzt und außerdem die Glieder a und b getrennt berechnet werden.

Wie aus Gleichung (4a) zu ersehen ist, bestimmt sich der Transport durch stehende Wellen aus dem Produkt der Abweichung des zeitlichen Mittelwertes von T und v vom Breitenmittelwert.

Führt man nun eine zeitliche Mittelung über die Faktoren T und v durch und setzt dann den zeitlich gemittelten Breitenmittelwert von T, also $[T]_{(t, \lambda)}$, gleich Null, so bleibt von Gleichung (4) nur das Glied (a) übrig.

Das Produkt der zeitlich gemittelten Faktoren T und v, mit $[T]_{(t, \lambda)} = 0$ liefert also automatisch den Transportanteil durch stehende Wellen.

Um den Anteil durch wandernde Wellen zu erhalten, sind andererseits nur die zeitlichen Mittelwerte der beiden Elemente T und v von ihrem Gesamtwert abzuziehen. Dann verschwinden alle Glieder von Gleichung (4) bis auf das Glied 4b, so daß sich durch diesen Schritt zwingend der Transportanteil durch wandernde Wellen ergibt.

Um den Gesamtbeitrag des meridionalen Transports zum Energieaustausch Äquator-Pol zu erhalten, muß also nur noch der Anteil durch wandernde Wellen zeitlich gemittelt werden und zu dem Anteil durch stehende Wellen dazuaddiert werden.

Wie man leicht verstehen kann, ist für die Richtung und den Betrag des Transports die Korrelation von T und v ausschlaggebend.

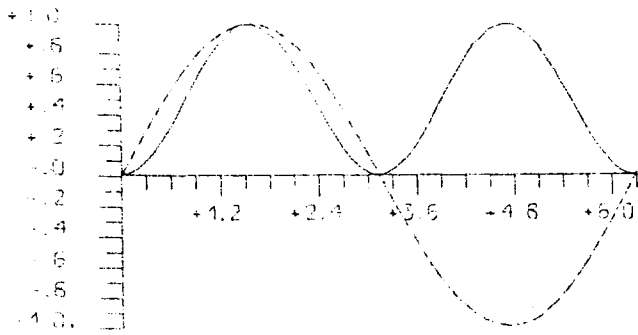
Um zu zeigen, welche Phasendifferenzen der Wellenfunktionen von T und v_g einen maximalen Nordwärtstransport und welche einen maximalen Südwärtstransport von sensibler Energie hervorrufen, ist die Abhängigkeit des Produktes von T und v_g von der Phasendifferenz beider Funktionen auf einem Breitenkreis zu untersuchen.

Zur Vereinfachung seien hier folgende Funktionen angenommen:

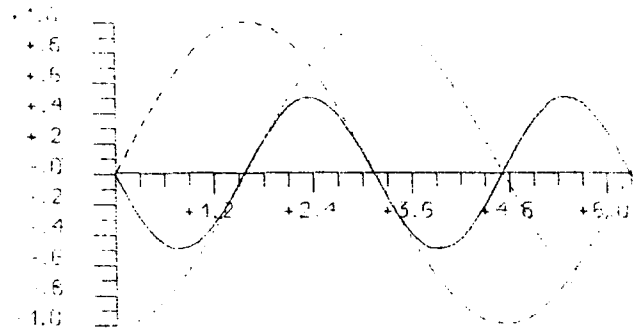
$$T = \sin \lambda, \quad v_g = \sin (\lambda + \alpha) ; \quad \text{mit } \alpha = \text{Phasendifferenz zwischen } f(T) \text{ und } f(v_g)$$

Es werden also Funktionen von T und v_g gewählt, welche harmonische Wellen gleicher Wellenzahl und Amplitude darstellen und eine Phasenverschiebung gegeneinander haben.

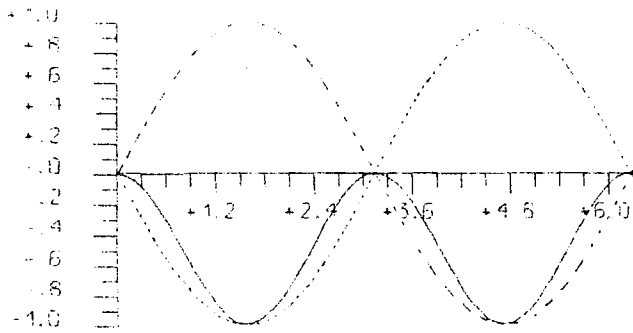
Unter diesen Voraussetzungen erhält man für das Produkt $T \cdot v_g$, also für den Transport sensibler Energie folgende Ergebnisse in Abhängigkeit von der Phasendifferenz α : für $\alpha = 0$ ergeben sich für das Produkt nur positive Werte. Der Nordwärtstransport wird im Breitenmittel zum Maximum. Geht α gegen $\pm L/4$, treten neben den positiven Werten von $T \cdot v_g$ auch negative Werte auf, die sich bei $\alpha = \pm L/4$ gegenseitig aufheben, so daß der Breitenmittelwert des Transports in diesem Bereich von α gegen Null geht. In dem Bereich von $\alpha = L/4$ bis $\alpha = 3 L/4$ wird der mittlere Transport negativ, wobei er bei einer Phasendifferenz von $L/2$ sein Minimum erreicht (s. Abb. 1).



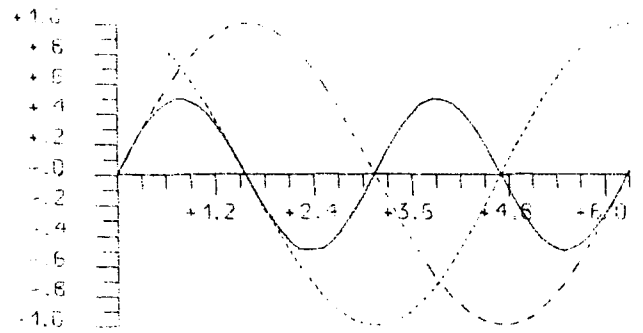
Phasendifferenz: 0



Phasendifferenz: $L/4$



Phasendifferenz: $L/2$



Phasendifferenz: $3L/4$

Abb. 1: Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Produktes Tv (—) von der Phasendifferenz der beiden Größen T (----) und v (.....), welche als zwei Sinusfunktionen gleicher Amplitude und Wellenzahl angenommen werden.

Es gilt

$$(v_g)_{(\lambda)} \sim \partial(\Phi)/\partial x \quad (6)$$

Also ist $(v_g)_{(\lambda)}$ gegenüber der Geopotentialwelle um ein Viertel der Wellenlänge ($L/4$) nach Westen verschoben.

Würden also Isothermen und Isohypsen parallel verlaufen, käme kein Wärmetransport zustande. So sind die Baroklinität der Atmosphäre und eine Phasenverschiebung der Isothermen gegen die Isohypsen unter Voraussetzungen der Geostrophie eine Mindestbedingung für einen meridionalen Transport sensibler Energie.

2.2. AUFGABENSTELLUNG UND DATENMATERIAL

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den gesamten meridionalen Transport sensibler Energie in der Atmosphäre zu untersuchen. Dazu soll der Transport in den beiden Druckniveaus 850 mb und 200 mb über die Breitenkreise 20°N , 30°N , 40°N , 50°N und 60°N hinweg für jeden Tag des Jahres 1975 berechnet, dargestellt und diskutiert werden.

Es sind sowohl die räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des Transportes pro Druckniveau und Breitenkreis, die zeitliche Veränderlichkeit der Breitenmittelwerte, wie auch die monatlichen Mittel der räumlichen Veränderlichkeit und der Breitenmittelwerte darzustellen.

Zusätzlich werden im gleichen Umfang die Anteile des Transportes durch stehende und wandernde Wellen sowie deren Summe berechnet und dargestellt.

Im Gegensatz zu anderen Arbeiten über den Transport sensibler Energie, die sich ausschließlich mit den zeitlichen und räumlichen Mitteln des Transportes befassen, wie A.H. OORT und E.M. RASMUSSEN (1971), A. WIIN-NIELSEN et al. (1963), S.K. KAO et al. (1970), C. HSIAO (1979), A. OSTHAUS (1978), P. SPETH (1976), P. SPETH und A. OSTHAUS (1978), soll in dieser Arbeit anhand der räumlichen und zeitlichen Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie untersucht werden, welche Einflüsse

die Temperaturverteilungen auf der Erdoberfläche sowie orographische Hindernisse auf den Transport haben und wie sich atmosphärische Wellen und Wirbel im einzelnen auf den Transport auswirken.

Die beiden Druckniveaus wurden deshalb für die Untersuchung ausgewählt, weil alle oben genannten früheren Arbeiten zeigen, daß sich im zeitlichen und räumlichen Mittel nahe diesen beiden Niveaus die maximalen Transporte abspielen.

Wie in der allgemeinen Beschreibung des Transportes sensibler Energie im Kapitel 2.1. gezeigt wurde, würde südlich des 20. Breitengrades nördlicher Breite die Annahme der Geostrophie zu starken Verfälschungen der Ergebnisse führen, außerdem würde die geringe Radiosondenstationsdichte weitere Berechnungsunsicherheit verursachen.

Nördlich von 60°N ist das Maximum der meridionalen Transportvorgänge jedoch bereits überschritten, wie aus früheren Untersuchungen bekannt ist.

Deshalb wurde für diese Untersuchung nur die Breitenzone zwischen diesen beiden Breitenkreisen ausgewählt.

Aus eigenen und früheren Untersuchungen - z.B. A.H. OORT und E.M. RASMUSSEN (1971) - geht weiterhin hervor, daß der Einfluß der wandernden atmosphärischen Wellen auf den Transport südlich 40°N nur noch gering ist. Deshalb wurden für die Darstellung der räumlichen und zeitlichen Veränderlichkeit des Transportes durch wandernde Wellen nur die Breitenkreise 40°N und 50°N und teilweise 60°N ausgewählt.

Der Abstand von 10 Breitengraden zwischen den gewählten Breitenkreisen läßt sich deshalb vertreten, weil sich erst in diesem Abstand wesentliche Unterschiede in der räumlichen und zeitlichen Veränderlichkeit des Transportes zeigen.

Für die Berechnungen des meridionalen Transportes sensibler Energie wurden aus den vom DWD zur Verfügung gestellten täglichen Gitterwerten der objektiven Analyse für das Jahr 1975 von P. SPETH und A. OSTHAUS die Fourierkoeffizienten für die Funktion des Geopotentials und der Temperatur für alle 5 Brei-

tengrade von 15°N bis 85°N und die Druckniveaus 850 mb, 700 mb, 500 mb, 300 mb, 200 mb und 100 mb berechnet und auf Magnetband gespeichert.

Die Reihenentwicklung wurde für beide Größen bis zum 15. Glied durchgeführt und dieses Gesamtmaterial lag schließlich für jeden Tag des Jahres 1975 vor.

Nachdem aus den Fourierkoeffizienten des Geopotentials die Koeffizienten der meridionalen geostrophischen Windkomponente v_g ermittelt waren, wurden durch Multiplikation der Reihen von v_g und T die Fourierkoeffizienten des Transports sensibler Energie berechnet. Mithilfe der Fourierreihe wurden im Anschluß daran Funktionswerte für T und v_g für jeden gewählten Breitenkreis in Abständen von jeweils fünf Längengraden bestimmt und die Fourierkoeffizienten wie die Funktionswerte auf Magnetband gespeichert.

Durch monatliche Mittelung der Fourierkoeffizienten des Geopotentials und der Temperatur bzw. durch Abziehen dieser Mittelwerte von den täglichen Werten wurden die stehenden Wellen von T und v_g berechnet und aus ihnen der Transportanteil durch stehende und wandernde Wellen bestimmt. Dabei wurden die Anteile durch wandernde Wellen für jeden Tag ermittelt, der Anteil durch stehende Wellen - wie ersichtlich - für jeden Monat des Jahres 1975. Diese Werte wurden ebenfalls auf Magnetband gespeichert. Auf der Grundlage dieser Rechenergebnisse wurden folgende Darstellungen gezeichnet:

1. Darstellung der räumlichen und zeitlichen Mittel des Transportes durch stehende und wandernde Wellen sowie deren Summe für die Niveaus 850 mb und 200 mb, die Breitengrade 20°N , 30°N , 40°N , 50°N und 60°N und für jeden Monat des Jahres 1975.
2. Darstellung der räumlichen Veränderlichkeit der monatlichen Mittel der Transportanteile durch stehende und wandernde Wellen sowie deren Summe als Funktion über die geographische Länge für die oben genannten Niveaus, Breiten und Monate.
3. Darstellung der zeitlichen Veränderlichkeit der Breitenmittelwerte des gesamten Transportes für die oben genannten Niveaus und Breitengrade und für jeden Tag des Jahres 1975.

4. Darstellung der zeitlichen Veränderlichkeit der Breitenmittelwerte des Transportanteils durch wandernde Wellen wie in Nr. 3.
5. Darstellung der räumlichen und zeitlichen Veränderlichkeit des gesamten Transportes für alle 5 Längengrade eines bestimmten Breitenkreises für die Niveaus und Breitengrade wie in Nr. 3 und für jeden Tag des Jahres 1975.
6. Darstellung der räumlichen und zeitlichen Veränderlichkeit des Transportanteils durch wandernde Wellen wie in Nr. 5 für die Breitenkreise 40°N , 50°N und teilweise 60°N .

Die Darstellungen mit den Nummern 3 bis 6 erfolgten in Form von Feldern mit Linien gleichen Transports als Abhängige von Zeit (y-Achse) und Längengrad bzw. Breitengrad (x-Achse).

Die Darstellungen der Nummern 1 und 2 erfolgten in Form von Funktionen der Transporte in Abhängigkeit von Länge bzw. Breite.

Für alle Darstellungen des Transportes wurde der Einfachheit halber die Einheit $\text{K}^{\circ} \text{ m sec}^{-1}$ gewählt. Für die Umrechnung in vollständige Einheiten des meridionalen Transportes von sensibler Energie gilt folgende Beziehung: $1 \text{ K}^{\circ} \text{ m sec}^{-1} = 24,46 \text{ cal cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ mb}^{-1} = 10,25 \cdot 10^3 \text{ W m}^{-1} \text{ mb}^{-1}$.

2.3. DIE MATHEMATISCHEN GRUNDLAGEN FÜR DIE BERECHNUNGEN DES MERIDIONALEN TRANSPORTS SENSIBLER ENERGIE

Die Funktionen der Temperatur und des Geopotentials entlang eines Breitenkreises sind in jedem Punkt des Breitenkreises stetig. Aufgrund dieser Voraussetzung bietet sich eine harmonische Analyse der Meßdaten für diese beiden Größen an.

Wie im Kapitel über die Ausgangsdaten beschrieben, liegen die Fourierkoeffizienten für die beiden Funktionen als Ausgangsmaterial vor.

Es sind also nur noch die Fourierkoeffizienten der meridionalen Windkomponente v_g zu berechnen und mit den Koeffizienten der Temperatur zu multiplizieren.

Die Formel für die meridionale Windkomponente v_g lautet:

$$v_g = (1/f) (\partial\phi/\partial x) = (1/f) (\partial\phi/R\partial\lambda) , \quad (7)$$

worin $R = a \cos \phi$ mit $a =$ mittlerer Erdradius und ϕ geographischer Breite.

$\phi(\lambda)$ ist eine Fourierreihe der Form:

$$\phi(\lambda) = [\phi](\lambda) + \sum_{n=1}^N a_n^\phi \cos(n\lambda) + b_n^\phi \sin(n\lambda) \quad (8)$$

Differenziert man ϕ nach λ folgt:

$$\begin{aligned} \partial\phi/\partial\lambda &= \sum_{n=1}^N -na_n^\phi \sin(n\lambda) + nb_n^\phi \cos(n\lambda) \\ &= \sum_{n=1}^N b_n^+ \sin(n\lambda) + a_n^+ \cos(n\lambda) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{mit } b_n^+ = -na_n^\phi ; a_n^+ = nb_n^\phi$$

Damit berechnen sich die Fourierkoeffizienten von v_g folgendermaßen:

$$\begin{aligned} a_n^{v_g} &= 1/(fa \cos \phi) nb_n^\phi & (a) \\ b_n^{v_g} &= 1/(fa \cos \phi) na_n^\phi & (b) \end{aligned} \quad (10)$$

Zur Berechnung der Fourierkoeffizienten des Produkts $T \cdot v_g$ werden die beiden Fourierreihen von v_g und T miteinander multipliziert.

Die Fourierreihen besitzen folgende Form:

$$\begin{aligned} T(\lambda) &= a_0^T + \sum_{n=1}^N (a_n^T \cos(n\lambda) + b_n^T \sin(n\lambda)) & (a) \\ v_g(\lambda) &= a_0^{v_g} + \sum_{n=1}^N (a_n^{v_g} \cos(n\lambda) + b_n^{v_g} \sin(n\lambda)) & (b) \end{aligned} \quad (11)$$

Da $\sin(0) = 0$ und $\cos(0) = 1$ ist, können beide Koeffizienten a_0 mit unter das Summenzeichen gezogen werden, und es gilt für das Produkt der beiden Reihen:

$$\begin{aligned}
 T v_g(\lambda) = & \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (a_n^T a_m^v g \cos(n\lambda) \cos(m\lambda) + \\
 & + b_n^T b_m^v g \sin(n\lambda) \sin(m\lambda) + \\
 & + a_n^T b_m^v g \cos(n\lambda) \sin(m\lambda) + \\
 & + b_n^T a_m^v g \sin(n\lambda) \cos(m\lambda))
 \end{aligned} \tag{12}$$

Mithilfe trigonometrischer Umformungen der Summanden von Gleichung (12) lassen sich die einzelnen Produkte den Fourierkoeffizienten des Produktes beider Reihen ($a_k^T v_g$, $b_k^T v_g$) zuordnen. Es gelten folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned}
 1) \quad a_n^T a_m^v g \cos(n\lambda) \cos(m\lambda) &= 1/2 a_n^T a_m^v g (\cos((n-m)\lambda) + \cos((n+m)\lambda)) \\
 2) \quad b_n^T b_m^v g \sin(n\lambda) \sin(m\lambda) &= 1/2 b_n^T b_m^v g (\cos((n-m)\lambda) - \cos((n+m)\lambda)) \\
 3) \quad a_n^T b_m^v g \cos(n\lambda) \sin(m\lambda) &= 1/2 a_n^T b_m^v g (\sin((m-n)\lambda) + \sin((m+n)\lambda)) \\
 4) \quad b_n^T a_m^v g \sin(n\lambda) \cos(m\lambda) &= 1/2 b_n^T a_m^v g (\sin((m-n)\lambda) + \sin((n+m)\lambda))
 \end{aligned} \tag{13}$$

Setzt man die Beziehungen (13) in Gleichung (12) ein, so erhält man die Fourierkoeffizienten des Produktes ($T \cdot v_g$) der Wellenzahl k durch Summieren aller Produkte, die vor $\cos(k\lambda)$ bzw. $\sin(k\lambda)$ stehen, mit $k=m+n$ und $k = |m-n|$:

$$\begin{aligned}
 a_k^T v_g \cos(k\lambda) = 1/2 \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M ((a_n^T a_m^v g - b_n^T b_m^v g) \cos((n+m)\lambda)) + \\
 \text{mit } n+m = k
 \end{aligned} \tag{a}$$

$$\begin{aligned}
 + 1/2 \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M ((a_n^T a_m^v g + b_n^T b_m^v g) \cos((n-m)\lambda)) + \\
 \text{mit } |n-m| = k
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_k^T v_g \sin(k\lambda) = 1/2 \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M ((a_n^T b_m^v g + b_n^T a_m^v g) \sin((m+n)\lambda)) + \\
 \text{mit } m+n = k
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 + 1/2 \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M ((a_n^T b_m^v g - b_n^T a_m^v g) \sin((m-n)\lambda)) \\
 \text{mit } |m-n| = k
 \end{aligned}$$

Wie aus diesen Summen ersichtlich ist, ergibt sich die Wellenzahl des Produktes beider Reihen zu $N+M$. Das bedeutet also für den Fall, wo die harmonische Analyse für T und v_g bis zur Wellenzahl 15 durchgeführt wird, eine Auflösung des Transports von sensibler Energie bis zur Wellenzahl 30, so daß also auf einem Breitenkreis mit seinen 360 Längengraden mit dieser Anzahl von Fourierkoeffizienten eine recht gute Auflösung erzielt wird. Aus den in Gleichung (14) berechneten Fourierkoeffizienten multipliziert mit den entsprechenden Konstanten berechnet sich die Funktion des meridionalen Transportes sensibler Energie für jeden Punkt auf dem zugehörigen Breitenkreis.

Der Fourierkoeffizient $a_0^{T v_g}$ bestimmt den Breitenmittelwert des Transportes.

Der Zusammenhang der einzelnen Sinus- und Cosinusglieder einer Fourierreihe ist linear. Daher ist es möglich, zeitliche Mittelungen für Funktionswerte der Reihe dadurch vorzunehmen, daß man bereits die Fourierkoeffizienten der Reihe mittelt und mit diesen gemittelten Koeffizienten die Funktionswerte des zeitlichen Mittels berechnet.

Das bedeutet, daß sich alle Operationen, die im Kapitel 2.1. zur Bestimmung der einzelnen Transportanteile beschrieben wurden, direkt auf die Fourierkoeffizienten von T und v_g bzw. auf die Fourierkoeffizienten des Transports anwenden lassen, und so die programmiertechnische Seite der Berechnungen wesentlich vereinfacht wird.

3. ERGEBNISSE VON UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN MERIDIONALEN TRANSPORT SENSIBLER ENERGIE IM 850 MB-NIVEAU

In den nachfolgenden Kapiteln sollen bildliche Darstellungen des meridionalen Transportes sensibler Energie, so wie es im Kapitel 2.2. aufgeführt wurde, präsentiert und die auf ihnen erkennbaren Charakteristika untersucht und beschrieben werden.

Für beide Niveaus (850 mb und 200 mb) wird nacheinander bei der Beschreibung eine bestimmte Reihenfolge eingehalten:

1. Beschreibung der zeitlichen und zonalen Mittelwerte des durch stehende und wandernde Wellen hervorgerufenen Transportes.
2. Beschreibung der zeitlichen Mittelwerte des Transportes, verursacht durch stehende und wandernde Wellen und deren zonale Veränderlichkeit.
3. Beschreibung der zeitlichen Veränderlichkeit der zonalen Mittel des totalen Transportes und des Transportes durch wandernde Wellen.
4. Beschreibung der zonalen und zeitlichen Veränderlichkeit des totalen Transportes und des Transportes durch wandernde Wellen.

Alle vier Punkte werden für den Ablauf des Jahres 1975 so behandelt, daß das Transportgeschehen nur für jene Monate eingehend beschrieben und in dieser Arbeit abgebildet wird, für welche sich signifikante Merkmale desselben nachweisen ließen.

Selbstverständlich gehen in die Betrachtungen alle jene Erkenntnisse ein, die sich aus der gesamten Menge aller Darstellungen ergeben. Deshalb sei speziell noch darauf hingewiesen, daß alle während des Ablaufs dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse in Form von Abbildungen gesammelt in einem separaten Bildband der Arbeit beigegeben werden.

3.1. DIE MONATLICHEN UND ZONALEN MITTELWERTE DES MERIDIONALEN TRANSPORTES SENSIBLER ENERGIE IM 850 MB-NIVEAU

Wie im Kapitel 2.1. gezeigt wurde, sind neben dem Transport durch die mittlere Meridionalzirkulation, welcher in dieser Arbeit wegen der Verwendung des geostrophischen Windes zu Null angenommen wurde, die einzigen meridionalen Transporte, die weder im zonalen noch im zeitlichen Mittel verschwinden, jene, welche durch stehende und wandernde Wellen verursacht sind.

Sie sind es auch, die als einzige einen Beitrag zum meridionalen Austausch sensibler Energie vom Äquator zu den Polen hin leisten. Der Transport von sensibler Energie repräsentiert immer nur einen Teil des gesamten Energieaustausches, zu dem noch jener von poten-

tieller, latenter und kinetischer Energie hinzutritt. So sind diese hier vorgenommenen speziellen Untersuchungen über den Fluß sensibler Wärme immer im Rahmen des totalen Energietransportes zu sehen, und es ist z.B. durchaus folgerichtig, wenn in Äquatornähe sensible Wärme im Mittel das ganze Jahr über in Richtung zum Äquator hin verfrachtet wird, weil das Gesamtsystem dort latente Wärme in kinetische Energie umwandelt und diese wiederum zu potentieller Energie umgesetzt wird, was trotz einer starken Konvergenz von Wärme (s. OORT und RASMUSSEN, 1970) eine lokale Abkühlung der Atmosphäre bewirkt.

Dieses gesamte energetische Zusammenwirken findet natürlich an allen Orten der Erde und zu jeder Zeit statt. Es kann naturgemäß in dieser speziellen Untersuchung einer einzigen Energieart nicht Gegenstand der Diskussion sein.

3.1.1. Die zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im 850 mb-Niveau

Die zonalen Mittelwerte des Transportes wurden schon in mehreren früher publizierten Arbeiten eingehend untersucht. Es liegen sowohl 10-jährige Mittel für alle Monate des Jahres wie auch Darstellungen für einzelne Monate im Winter und Sommer vor.

So haben OORT und RASMUSSEN (1970) die Transporte verursacht durch stehende Wellen als zonale Mittel für alle Breitenkreise der Nordhalbkugel für jeden Monat im 10-jährigen Mittel dargestellt. OSTHAUS (1978) und DEFANT, OSTHAUS, SPETH (1979) haben 10-jährige Mittelwerte für die Monate Januar und Juli eingehend auf das Phasenverhalten von Geopotential- und Temperaturwellen und ihre Auswirkungen auf den Transport hin untersucht. Die gleichen Untersuchungen für die Monate April und Oktober finden sich in einer kürzlich in der Abteilung Maritime Meteorologie des Instituts für Meereskunde, Kiel, fertiggestellten Diplomarbeit von VOGL (1979). Weiterhin wurde durch SPETH und OSTHAUS (1978) ein Bildband erstellt, der für die Monate Januar und Juli neben den Untersuchungen von 10-jährigen Mittelwerten auch Einzeluntersuchungen für die Jahre 1967 bis 1976 enthält. Diese Unter-

suchungen wurden für die Beurteilungen der Ergebnisse dieser Diplomarbeit ganz wesentlich herangezogen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind - was das Jahr 1975 betrifft - mit jenen der Arbeit von SPETH und OSTHAUS (1978) logischerweise identisch. Die Abweichung der errechneten Beträge des durch stehende Wellen hervorgerufenen Transportes von jenen, gültig für einen 10-jährigen Mittelungszeitraum, nach OORT und RASMUSSEN (1970) betragen maximal 25 %, sind aber meistens viel kleiner.

Ähnlich verhält es sich mit den 10-jährigen Mittelwerten, vorgelegt für die Monate Januar und Juli in der Arbeit von OSTHAUS (1978) und für die Monate April und Oktober in der Arbeit von VOGL (1979).

Es werden sich also hinsichtlich der stehenden Wellen im Breitenmittelwert keine wesentlich neuen Erkenntnisse ergeben. Jedoch erscheint hier eine Besprechung dieser Transporte vor allem im Hinblick auf die später folgenden Untersuchungen des totalen und des durch wandernde Wellen erzeugten Wärmeflusses unbedingt notwendig.

In Abb. 3a ist der meridionale Transport sensibler Energie verursacht durch stehende Wellen im zonalen Mittel für die einzelnen Monate des Jahres 1975 dargestellt. Die Y-Achse enthält als Zeitachse alle Monate von Januar bis Dezember des Jahres 1975, die X-Achse die Breitengrade von 20°N bis 60°N . Es sind nur Werte exakt auf diesen Breitenkreisen gelegen untersucht worden. Eventuelle Maxima oder Minima im zonalen Mittel, die zwischen diesen Breiten auftreten, können daher nur durch Interpolation erfaßt werden.

In der Abb. 3a ist der stark ausgeprägte Jahresgang des Transportes im 850 mb-Niveau auf allen dargestellten Breitenkreisen deutlich erkennbar.

Während im Winter (Dezember, Januar, Februar) ein signifikantes Maximum bei 50°N auffindbar ist, wird dort im Sommer der Transport nahezu Null und in den niederen Breiten, südlich von 40°N sogar stark negativ; dort findet daher ein südwärts gerichteter Transport sensibler Energie statt. Besonders ausgeprägt ist dieser Südwärtsfluß im Juni über 20°N mit $-4,7^{\circ}\text{C m sec}^{-1}$. Südlich

von 25°N ist der Transport das ganze Jahr über negativ, also zum Äquator hin gerichtet.

Während des Frühlings erfolgt die Abnahme des Nordwärtstransportes über den höheren Breiten vom Winter zum Sommer stärker als die entsprechende Zunahme im Herbst.

In dem so stark ausgeprägten Jahresgang des durch stehende Wellen verursachten Transports spiegelt sich die starke Intensitätsänderung der Allgemeinen Zirkulation vom Winter zum Sommer und der starke Jahresgang der Temperatur in der Nordhemisphäre, besonders in Bodennähe, wieder.

Im Winter bildet sich in der Atmosphäre durch den Sonnenstand am südlichen Wendekreis im Zusammenhang mit der Polarnacht über hohen Breiten ein starkes meridionales Temperaturgefälle zwischen Äquator und Nordpol aus. Die großen Landmassen der Nordhalbkugel kühlen sich im Winterhalbjahr stark ab und verstärken den vorgenannten Effekt besonders in den bodennahen Schichten der Atmosphäre. Im Zusammenhang damit entsteht als Folge der thermischen Windgleichung der Planetarische Wirbel mit seiner für das Winterhalbjahr mit der Höhe bis zur Tropopause zunehmenden intensiven Westwinddrift über den mittleren und nördlichen Breiten. Wie OSTHAUS (1978) in ihren Untersuchungen über die Transporte durch stehende Wellen zeigt, liegen die Phasenverschiebungen der ersten drei Wellen des Geopotentials gegen die der Temperatur über 50°N alle bei $1/4$ der Wellenlänge, so daß hier ein maximaler Nordwärtstransport sensibler Energie zu einem Höchstwert im zonalen Mittel führt, zumal die Transportanteile der ersten drei Wellenzahlen von Temperatur und Geopotential den wesentlichen Fluß fast ausschließlich bestimmen (s. auch OSTHAUS, 1978, Abb. 33). Die Phasenverschiebung vom Betrag $L/4$ der Temperaturwellen gegen die Geopotentialwellen drückt die allgemein bekannte Tatsache aus, daß besonders im Winter Strömungen aus dem Norden meistens kalt und aus dem Süden meistens warm sind.

Eine weitere Erklärung für das Maximum des Transportes über 50°N ist der dort besonders stark ausgeprägte meridionale Temperaturgradient und die große seitliche Windscherung in der Übergangszone von gemäßigter Luft zu Polarluft (Polarfront).

Wie in Gleichung (5a) gezeigt wurde, errechnet sich der meridionale Transport durch stehende Wellen aus dem Produkt der zeitlich gemittelten Abweichungen von den zonalen Mittelwerten der Temperatur und der meridionalen Windkomponente. Unter Voraussetzung eines selbst nur leicht mäandrierenden Verlaufs von Isothermen und Isohypsen über einem Breitenkreis, der ungefähr der mittleren winterlichen Lage der Polarfront entspricht, werden sich wegen des großen meridionalen Temperaturgradienten maximale Abweichungen vom zonalen Mittelwert der Temperatur und der meridionalen Windkomponente einstellen, die dann im Zusammenwirken mit der oben beschriebenen Phasenverschiebung zwischen Temperaturwellen und Geopotentialwellen bzw. Wellen der meridionalen Windkomponente automatisch zu einem maximalen Transport führen.

Je weiter man gegen den Äquator hin fortschreitet, um so geringer wird der meridionale Temperaturgradient und ebenso der meridionale Gradient des Geopotentials.

Südlich von 40°N geht die Phasendifferenz der Wellen von Geopotential und Temperatur der Wellenzahl 1 gegen Null, die der Wellenzahl 2 und 3 gehen gegen $1/2$ der Wellenlänge, was in beiden Fällen eine starke Verringerung des Transportes verursacht. Südlich von 30°N stellen sich gegen die äquatoriale Tiefdruckrinne hin die Nordostpassate ein. Die recht konstante, südwärts gerichtete Windkomponente der Passate hat gegenüber leichten Temperaturschwankungen, die im wesentlichen durch die Land - Meer-Verteilung bedingt sind, offenbar zur Folge, daß häufiger warme Luft nach Süden transportiert wird als kalte Luft. Diese Annahme wird dadurch bestärkt, daß es gerade im 850 mb-Niveau die Wellen der Wellenzahlen 4 - 15 sind, die dort den Südwärtstransport verursachen (s. OSTHAUS, 1978, Abb. 33).

Der Übergang zur sommerlich abgeschwächten Zirkulation macht sich bereits im März deutlich bemerkbar. Das Maximum des Transportes durch die stehenden Wellen bleibt zwar nahe 50°N , aber sein Betrag ist nur noch ein Drittel des Höchstwertes im Februar.

Dieser besonders krasse Übergang ist wahrscheinlich typisch für das Jahr 1975, aber auch die Arbeit von OORT und RASMUSSEN (1970)

weist im 10-jährigen Mittel immerhin noch einen starken Abfall auf die Hälfte des Februar-Betrages auf.

Ein zweiter deutlicher Abfall tritt vom April zum Mai 1975 in Erscheinung. Das Maximum verschiebt sich über 60°N hinaus nach Norden und in den Breiten südlich von ca. 55°N stellt sich bereits ein Südwärtstransport sensibler Energie ein.

Wie sich in den Untersuchungen über die zonale Veränderlichkeit der Transporte durch stehende Wellen zeigen wird, sind es im besonderen die sich durch den höheren Sonnenstand schnell erwärmenden Kontinente, die im Breitenmittel zu dieser un stetigen Veränderung im Transportbild führen. Bei 20°N und 30°N bilden sich aus den Beiträgen von vielen Wellen mit geringer Amplitude plötzlich Transport-Peaks mit hohen Werten aus, deren Beträge sich im März und April im wesentlichen noch gegeneinander aufheben. Aber ab Mai - besonders über den erhitzten Kontinenten - können sie stark negativ werden, so daß also warme Luft gegen den Äquator transportiert wird, was in den Sommermonaten Juni, Juli und August dann zu maximalen Südwärtstransporten von fühlbarer Wärme führt.

Über den nördlichen Breiten geschieht gegen den Sommer hin jetzt genau das Gleiche, was bei 20°N und teilweise noch bei 30°N im Winter zu beobachten ist. Durch den immer nördlicheren Sonnenstand erwärmen sich die Kontinente wieder; starke Nordwärtstransporte, die durch den extrem hohen zonalen Gegensatz der Temperaturen über den kalten Kontinenten und den relativ warmen Meeren im Winter hervorgerufen wurden, bilden sich zurück, die positiven Spitzen im Transportbild verschwinden, und es stellen sich mehr und mehr kürzere Wellen ein. Die Amplituden der großen Wellen werden im März schlagartig geringer und haben im Sommer keine wesentliche Bedeutung mehr, bzw. sie kehren sich teilweise, ähnlich wie über den niederen Breiten, sogar um und sorgen für Südwärtstransport. Auch die kürzeren Wellen verursachen in höheren Breiten ab Mai zunehmend negative Transportwerte.

OSTHAUS (1978) hat in Abb. 38 ihrer Arbeit für das 10-jährige Juli-Mittel die Anteile der Temperatur- und Geopotentialwellen

am Transport nach Wellenzahlen aufgegliedert dargestellt. Hier zeigt sich deutlich der oben beschriebene Vorgang. Die Wellen der Wellenzahlen 1, 2 und 3 führen in hohen Breiten zu leicht südwärts gerichtetem Transport, und die Wellen mit den Wellenzahlen 1 und 2 verursachen in den niederen Breiten den ausgeprägten Wärmetransport in Richtung zum Äquator hin.

Die kurzen Wellen führen in dieser Abbildung zu einem Maximum über ca. 30°N , was allerdings für das Jahr 1975 nicht beobachtet werden konnte.

Beim Übergang vom sommerlichen Transportbild auf das winterliche zeigt sich nur ein krasser Sprung vom November zum Dezember hin, während sich in den übrigen Monaten eigentlich schon ab Juli mehr eine kontinuierliche Entwicklung im umgekehrten Sinne wie im Frühjahr einstellt. Die Amplituden der langen Wellen nehmen aber nicht so schnell wieder zu, wie sie im Frühjahr abgenommen haben, bzw. es bilden sich über den niederen Breiten die negativen Spitzenwerte der langen Wellen nicht so schnell zurück, wie sie sich im Frühjahr einstellten. Besonders die sehr großen Transporte von kalter Luft nach Süden über den großen Landmassen, die im März unständig abbrechen und sich im Mai zu Südwärtstransporten sensibler Energie umkehren, stellen sich erst allmählich im Oktober und November wieder ein, so daß man schließen kann, daß die Abkühlung des Gesamtsystems Landmasse - Atmosphäre im Herbst langsamer und kontinuierlicher vor sich geht, als die Aufheizung durch die Sonne im Frühling.

Zusammenfassung:

Aus der Untersuchung der Breitenmittelwerte des durch stehende Wellen verursachten meridionalen Wärmeflusses im Jahresgang ergeben sich folgende wesentlichen Merkmale:

1. Die maximalen nordwärts gerichteten Transporte sensibler Energie finden im Winterhalbjahr über den Breitenkreisen 40°N und 50°N statt. Sie werden vor allem durch den starken zonalen Temperaturgegensatz zwischen den relativ warmen Ozeanen und den stark abgekühlten Landmassen in Verbindung mit einer ausgeprägten Westwinddrift verursacht. Dabei sind die ersten drei Wellen der Temperatur im Mittel um $1/4$ der Wellenlänge gegen die des Geopotentials verschoben.

2. Im Sommer ist der meridionale Fluß über den höheren Breiten nahezu Null. Als wesentliche Ursache für diese geringen Transportwerte ist hier der Temperatenausgleich zwischen Land und Meer und der allgemein geringe Betrag der meridionalen Windkomponente im Zusammenhang mit der sommerlichen Zirkulation zu sehen.
Ober den niederen Breiten 20°N und 30°N bilden sich im Sommer recht ausgeprägte Wärmeflüsse zum Äquator hin aus. Hier wird die über den aufgeheizten Wüstengebieten Afrikas und Arabiens erwärmte Luft durch die Nordost-Passate nach Süden transportiert und leistet so als relativ warme Nordströmung den weitaus überwiegenden Teil des Südwärtsflusses im Breitenmittelwert.
3. Der Jahresgang des Transportes ist entlang allen Breitenkreisen gut erkennbar. Da offenbar die Erwärmung des Gesamtsystems Kontinente - Atmosphäre zum Sommer hin schneller vor sich geht als dessen Abkühlung im Herbst, zeigt sich besonders über den höheren Breiten im Frühjahr ein starker Abfall der positiven Transportwerte, während im Herbst dagegen ihr Ansteigen kontinuierlich vor sich geht.

3.1.2. Die monatlich und zonal gemittelten Werte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau

Die zonalen und zeitlichen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch wandernde Wellen wurden bereits durch andere Autoren untersucht, wobei besonders die Arbeiten von OORT und RASMUSSEN (1970) und SPETH (1976) für die folgenden Betrachtungen als Vergleich herangezogen wurden.

Die in diesem Kapitel behandelten Transporte sind in der Abb. 3b dargestellt. Für diese Abbildung gilt das gleiche, was schon zu Abb. 3a im vorangegangenen Kapitel gesagt wurde. Die zonalen Mittelwerte der durch wandernde Wellen verursachten Wärmetransporte unterscheiden sich prinzipiell von jenen der durch stehende Wellen erzeugten Flüsse. Es ist zwar ein deutlicher Jahresgang zu erkennen, aber die Flüsse werden - außer im August bei 20°N - nie negativ. Weiterhin gibt es keine scharfen Änderungen von Monat zu Monat, vielmehr ist der Übergang vom winterlichen Transportbild zum sommerlichen und umgekehrt recht kontinuierlich.

Der mittlere Transport nimmt für alle Breitengrade stetig vom Winter zum Sommer hin ab und erreicht im Juli sein Minimum, steigt dann im August wieder an und wird im November und Dezember wieder maximal.

Während für den durch stehende Wellen erzeugten Transport die Maxima von Januar bis März und von Oktober bis Dezember über 50°N nahezu ortsfest verharren und sich von April bis September von Monat zu Monat unstetig verschieben, verlagern sich die Maxima des Transportes durch wandernde Wellen stetig mit der mittleren Lage der Polarfront.

Im Januar findet sich der maximale Fluß bei 40°N , von März bis Mai verschiebt sich das Maximum mit Abschwächung langsam nach 50°N , während über 40°N immer noch relativ hohe Beträge feststellbar sind. Im Juni stellt sich immer noch bei Intensitätsabschwächung der stärkste Transport über 50°N ein, während im Juli sich der sommerlich höchste Wert des Flusses nach 60°N polwärts verschiebt. Vom August an bis zum Dezember hin findet die oben beschriebene Entwicklung im umgekehrten Sinne statt.

Weiterhin fällt auf, daß die Transporte durch wandernde Wellen das ganze Jahr hindurch intensiver sind als die durch stehende Wellen, nur im Februar wird dieses allgemein gültige Bild durch einen extrem großen, durch stehende Wellen erzeugten Wärmefluß über 50°N kombiniert mit einem sekundären Minimum des durch wandernde Wellen verursachten Flusses unterbrochen.

Im Winter übernehmen in den Breiten südlich von 30°N die wandernden Wellen den gesamten Nordwärtstransport sensibler Energie, so daß der totale Fluß, also die Summe beider Transportarten, dort erst im Mai negativ wird. Im Juni und Juli sorgen ausschließlich die wandernden Wellen dafür, daß nördlich von 35°N überhaupt noch ein nordwärts gerichteter Wärmefluß zustandekommt. Südlich von 30°N nehmen die wandernden Wellen nur im Winter noch einen sichtbaren Einfluß, im Sommer ist der Transport durch sie dort nahezu Null.

Nach diesen Feststellungen stellt sich vorerst die Frage, wie es dazu kommt, daß die zeitlich und zonal gemittelten Transporte, verursacht durch wandernde Wellen, so gut wie nie ein negatives Vorzeichen haben, d.h. südwärts gerichtet sind.

Wie sich aus den Berechnungsgrundlagen für wandernde Wellen ergibt, (s. Gleichung (5b)), sind sie ausschließlich durch eine Korrelation der Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert der Temperatur und der meridionalen Komponente des geostrophischen Windes verursacht. Für einen positiven Wert des Produktes $(T)_{(t)} (v_g)_{(t)}$ ist es also notwendig, daß die Abweichungen vom zeitlichen Mittel ein gleiches Vorzeichen besitzen. Nun ist es aber eine altbekannte Tatsache, und das gleiche Ergebnis werden spätere Betrachtungen der zeitlichen und räumlichen Veränderlichkeit des Flusses deutlich zeigen, daß fast immer eine Winddrehung auf die Nordrichtung, also $(v_g)_{(t)} < 0$, eine Abkühlung zur Folge hat, also auch $(T)_{(t)} < 0$. Das gleiche gilt für den umgekehrten Fall mit positiven Abweichungen.

Südwärtstransporte durch wandernde Wellen sind also nicht die Regel, und sie treten äußerst selten in Erscheinung. Dazu kommt noch, daß Südwärtstransporte fast nur in jenen Grenzgebieten entstehen, wo die Meridional Komponente des Windes sehr klein ist. Dieses Transportverhalten wird in späteren Kapiteln noch genauer betrachtet werden.

Aus dem oben Dargestellten ergibt sich also die Tatsache, daß die Flüsse durch wandernde Wellen das ganze Jahr über meist positiv ausfallen und daß außerdem als eine Begründung für den stetigen Jahresgang im Breitenmittelwert die Abnahme der Beträge des Transportes vom Winter zum Sommer hin nur in untergeordneter Rolle durch ein Zunehmen von Südwärtstransporten bedingt wird. Wesentlich ist dabei die abnehmende Amplitude der Nordwärtsflüsse.

Gleichfalls läßt sich die Verschiebung der Maxima im Jahresgang durch dieses Verhalten deuten. Wie auch SPETH (1976) in seiner Arbeit feststellt, finden die maximalen Nordwärtsflüsse durch wandernde Wellen in den Gebieten mit größter zeitlicher Variation von T und v_g statt, also in der Nähe der Polarfront, wobei das Austropfen polarer Kaltluftmassen besonders im Winter im zonalen Mittel eine leichte Verschiebung dieser Region nach Süden verursacht. So findet man im Winter, Frühjahr und Herbst den Höchstwert des Nordwärtstransportes nahe 40°N . Im Sommer

dagegen, wo sich die Polarfront polwärts zurückzieht, verlängert sich auch das Maximum des Transportes nach Norden.

Zusätzlich zu diesen Ausführungen muß hier noch besonders darauf hingewiesen werden, daß sie nur für die bodennahen Schichten der Atmosphäre gültig sind. Bei der Untersuchung der Verhältnisse im 200 mb-Niveau (s.später) wird es sich zeigen, daß vor allem auch durch die zeitweilige Einflußnahme der Stratosphäre sich durchaus auch Südwärtstransporte durch wandernde Wellen von beträchtlicher Größe einstellen können.

Zusammenfassung:

Die Definition der wandernden Wellen und des durch sie hervorgerufenen meridionalen Transportes (s. Gleichung (5b)) beinhaltet einen ganz wesentlichen Unterschied zu dem durch stehende Wellen erzeugten Wärmefluß, der sich auch deutlich in den Untersuchungen ausdrückt.

1. Die maximalen, durch wandernde Wellen erzeugten Flüsse finden sich zu den Zeiten und an den Orten stärkster zeitlicher Variation von Temperatur und meridionaler Windkomponente, und zwar im Winter, Frühjahr und Herbst über den Breitenkreisen 40°N und 50°N .

Dabei werden die höchsten Transportwerte im Winter vor allem durch einen starken meridionalen Temperaturgradienten und im Frühjahr und Herbst durch stark wechselnde meridionale Windkomponenten im Bereich der Polarfront bewirkt. Aufgrund der relativ konstanten Temperatur- und Strömungsverhältnisse sind die Transportbeträge über niederen Breiten gering.

2. Die durch wandernde Wellen erzeugten Flüsse sind im zeitlichen und zonalen Mittelwert nahezu ausschließlich positiv, also polwärts gerichtet. Dies ist eine Eigenheit der Transporte in den bodennahen Schichten und läßt sich auf einen festen Zusammenhang zwischen zeitlichen Schwankungen der Temperatur und der meridionalen Windkomponente zurückführen, was in späteren Kapiteln noch gezeigt wird.

3.2. DIE ZONALE VERÄNDLICHKEIT DER MERIDIONALEN TRANSPORTE SENSIBLER ENERGIE DURCH STEHENDE WELLEN UND DER MONATLICH GEMITTELTEN TRANSPORTE DURCH WANDERENDE WELLEN IM 850 MB- NIVEAU

In diesem Abschnitt soll auf die zonale Veränderlichkeit zeitlicher Mittel des Transportes eingegangen werden.

Die täglichen Werte der Flüsse durch wandernde Wellen wurden über den jeweiligen Monat gemittelt, um einen Vergleich mit den Transporten durch stehende Wellen zu erhalten, und in Form von Kurven für jeden, für die Untersuchung gewählten, Breitenkreis und Monat zusammen mit den Kurven der Transporte durch stehende Wellen und der Summe beider Anteile dargestellt (s. Abb. 9-11). Die jeweilige Darstellung der Abb. b) darunter zeigt die Verteilung der restlichen Glieder des totalen Transportes entlang des betreffenden Breitenkreises, so daß eine Addition beider Darstellungen a. und b. jeweils den totalen Transport im Monatsmittel ergibt.

Wie auf den ersten Blick ersichtlich ist, sind die Beträge der Restglieder bis zu drei Zehnerpotenzen größer als die Summe der Transporte durch stehende und wandernde Wellen. Das liegt an dem eingangs schon erwähnten Umstand, daß in diese Glieder der volle Betrag der absoluten Temperatur in K^0 eingeht, was auch bewirkt, daß bezüglich des Vorzeichens dieser Transporte lediglich das mittlere meridionale Windfeld des Monats abgebildet wird.

Wie anhand der vollständigen Kontinuitätsgleichung für T und v nachgewiesen werden kann, liefern diese Glieder nur einen scheinbaren meridionalen Transportbeitrag auf einer Druckfläche über einem bestimmten Ort eines Breitenkreises. Betrachtet man dort jedoch nicht nur den meridionalen Anteil des Flusses sensibler Energie, so stellt man fest, daß diese scheinbar sehr bedeutenden meridionalen Flüsse durch zonale und vertikale Transporte kompensiert werden, so daß lediglich die turbulenten Transporte, also die durch stehende und wandernde Wellen erzeugten, einen Beitrag zum meridionalen Energieaustausch liefern. Dieser physikalische Zusammenhang, der durch die vollständige Kontinuitätsgleichung gegeben ist, drückt sich folglich auch

rein mathematisch darin aus, daß diese scheinbaren Transportanteile bei zonaler Mittelung zu Null werden. Sie dienen für die Untersuchung der durch stehende und wandernde Wellen erzeugten Transporte also nur zur Beschreibung der Richtung der meridionalen Windkomponente.

Eine für das ganze Jahr zusammengefaßte Darstellung der Wertekurven, getrennt nach Transporten, getätigt durch stehende und wandernde Wellen, zeigen die Abbildungen 4 - 8.

3.2.1. Die zonale Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im 850 mb-Niveau

Wie sich im Kapitel 3.1.1. bei der Untersuchung der zonalen Mittelwerte des Flusses durch stehende Wellen schon gezeigt hat, ist eine Beschreibung der zonalen Veränderlichkeit dieser Transporte sehr aufschlußreich, um ihre Mechanismen besonders bezüglich der Auswirkungen der Temperaturunterschiede zwischen Land und Meer zu verstehen.

Die zonale Veränderlichkeit der Transporte, getätigt durch stehende Wellen, ist natürlich ausschließlich durch die zeitlich gemittelte Zirkulation und die zugehörige mittlere Temperaturverteilung beeinflußt. Im gleichen Maße, wie sich diese Zirkulationseigenheiten im Jahresgang ändern, ändern sich auch die Transporte, verursacht durch stehende Wellen. Dabei fällt besonders in jenen Gebieten, in denen zonal häufig Land und See abwechseln, der Einfluß der Temperatur des Untergrundes auf den Wärmefluß ins Auge.

Landmassen heizen sich im Sommer unter Wirkung der Sonneneinstrahlung auf und erwärmen die Luft über ihnen, in der Nähe der Meeresoberfläche jedoch kühlt sich die Atmosphäre relativ dazu ab. Im Winter ist es umgekehrt. Es läßt sich über allen betrachteten Breitenkreisen, besonders im Sommer, über den niederen Breiten und im Winter über den mittleren und höheren Breiten, beobachten, wie die Transporte diesen Temperaturegensätzen entsprechend relative Maxima und Minima aufzeigen.

Im folgenden wurden die meridionalen Wärmeflüsse, die durch stehende Wellen hervorgerufen werden, einzeln für die Breitenkreise 20°N , 30°N , 40°N , 50°N und 60°N bestimmt und im Anschluß genauer untersucht. Die Ergebnisse sind in den Abb. 4 - 6 und 9 - 11 dargestellt.

Über dem 20° Breitenkreis (s. Abb. 4, oben) sind die Transporte im Winter über allen Längengraden recht schwach. Die Sonneneinstrahlung ist noch nicht geeignet, die afrikanischen, asiatischen und kalifornischen Wüstengebiete aufzuheizen, andererseits fehlen dort Kaltlufteinflüsse, die in nördlichen Breiten für starke zonale Temperaturgegensätze sorgen. So sind die Flüsse sensibler Energie über 20°N im Winter vor allem durch die stehenden Wellen des schwach ausgebildeten meridionalen Windfeldes beeinflusst und richten sich nach dessen Stärke und Richtung. Lediglich das asiatische Kältehoch reicht im Winter so weit nach Süden, daß an seiner Südwestflanke über Hinterindien recht kalte Luft nach Norden geführt wird, was dort zu einem ausgeprägteren negativen Transport führt.

Bis zum April folgt der Transport noch weitgehend der Richtung der meridionalen Windkomponente, weil die zonale Temperaturverteilung noch recht ausgeglichen ist. Im Mai macht sich jedoch schon deutlich die beginnende Erwärmung der Wüstengebiete bemerkbar. Relativ geringe meridionale Windgeschwindigkeiten erzeugen besonders über Land maximale Transporte.

Die allgemeine Nordströmung über dem Atlantik, Afrika und Arabien (Passate) führt über dem relativ kalten Atlantik zu positiven Transportwerten und zu maximalen negativen Beträgen über den Wüsten, während über Mexico der Wärmefluß auch im Sommer weiterhin der Richtung der meridionalen Windkomponente entspricht. Dieser schmale Landstreifen ist zwischen den großen Ozeanen für die zonale Temperaturverteilung bedeutungslos. Über der weiten Wasserfläche des Pazifiks richtet sich der Transport nach den ungefähren Begrenzungen der über ihm lagernden Hoch- und Tiefdruckgebiete. Die Tatsache, daß auch hier teilweise Wärmefluß und meridionale Windkomponente entgegengerichtet sind, zeigt, daß besonders im Sommer offenbar wolkenfreie Gebiete und Wolkenfelder in Tiefdruckwirbeln zu starken zonalen

Temperaturgegensätzen und relativ großen Transporten führen. Man beachte die beiden relativ ausgeprägten Extrema zwischen 165°W und 135°W im Sommer.

Der Herbst zeigt ein ähnliches Bild wie das Frühjahr. Allgemein fällt jedoch auf, daß der Jahresgang des Transportes nicht symmetrisch ist. Das dominierende Maximum des negativen Transportes über Arabien tritt erst im August ein. Das ist offenbar die Folge der zeitlich gegenüber dem Sonnenstand verzögerten Erwärmung der arabischen Wüste.

Die entsprechende Transportverteilung über dem $30.$ Breitenkreis (s. Abb. 4, unten) ist im Prinzip ähnlich wie über 20°N , jedoch sind die relativen Maxima und Minima im Winter bereits stärker ausgeprägt und der Einfluß der Wüstengebiete über Afrika und Arabien im Sommer verliert wesentlich an Bedeutung.

Von Januar bis März zeigen sich die Auswirkungen des asiatischen Kältehochs mit negativen Flüssen an seiner Südwestflanke zwischen 90°E und 110°E und nahezu kompensierenden positiven Werten an seiner Südostflanke zwischen 110°E und 150°E .

Interessant ist das Maximum des nordwärts gerichteten Transportes westlich der nordamerikanischen Küste über dem Pazifik im März und April. Durch die Erwärmung des Südtails von Nordamerika bildet sich dort langsam ein Wärmerücken zwischen den beiden großen Ozeanen aus, der jetzt im Gegensatz zum Winter die Lufttemperatur über dem Ostpazifik plötzlich als sehr kalte zonale Abweichung vom Breitenmittelwert der Temperatur erscheinen läßt. Die Zirkulation über diesem Gebiet verändert sich jedoch gegenüber dem Winter kaum. Es wird also aufgrund der Veränderung des Temperaturfeldes gegenüber der des Geopotentialfeldes an der Westküste Nordamerikas jetzt statt relativ warmer Luft sehr kalte Luft nach Süden transportiert, also ein maximaler nordwärts gerichteter Wärme fluß erzeugt. Diese einen solch bedeutenden Wärmeaustausch bewirkende Phasenverschiebung zwischen Temperatur- und Geopotentialwellen besteht für das Jahr 1975 nur im März und April. Sie kann jedoch auch im 10-jährigen Mittel für den April nachgewiesen werden (s. VOGL, 1979, Abb. 4, 17), so daß sie zumindest im Frühjahr vermutlich die Regel

ist.

Im Sommer zeigt sich eine ähnliche zonale Transportverteilung wie über 20°N mit einem Unterschied, daß die negativen Transporte über den Küstengebieten Afrikas und Arabiens wesentlich weniger intensiv sind. Aufgrund der Aufheizung der nordamerikanischen Landmasse entstehen dort bei Südwind größere positive Transporte, welche die Südwärtsflüsse weitgehend überkompensieren, so daß im zonalen Mittelwert über 30°N schon wesentlich geringere negative Werte auftreten.

Zum Winter hin bleiben die Transporte im Breitenmittelwert im Gegensatz zum Frühjahr leicht südwärts gerichtet. Im Herbst werden die Temperaturgegensätze Land - Meer schwächer, der Fluß sensibler Wärme wird daher allgemein geringer, eine Phasenverschiebung der Temperaturwelle gegen die des Geopotentials über dem Ostpazifik und Nordamerika, die im April dort das Maximum hervorrief, tritt nicht auf.

Im November und Dezember ist das Bild ähnlich wie im Januar, jedoch überwiegen die negativen Beträge, weil vor allem am Ostrand des asiatischen Kältehochs die Transporte kalter Luft nach Süden geringer sind als im Januar und Februar. Hier und über den nördlicheren Breiten ist also die geringere Zunahme der Transporte über den Herbst hinweg offenbar eine Folge davon, daß sich die Landmassen langsamer abkühlen als sie sich im Frühjahr erwärmen.

Der Transport über 40°N (s. Abb. 5, oben) unterscheidet sich in wesentlichen Punkten von jenem über dem 30° Breitenkreis.

Im Winter tritt über Ostasien nur ein einziges Maximum an nordwärts gerichtetem Transport fühlbarer Wärme auf. Dort wird Kaltluft aus dem Kältehoch heraus nach Süden geführt. Über Europa und dem westlichen Teil Asiens ist der Transport nahezu Null. Ein weiteres Maximum findet man am Ostrand des winterlichen Tiefdruckgebietes über dem Pazifik nahe der nordamerikanischen Küste, wo relativ warme, maritime Luft nach Norden geführt wird. Der Transport über Nordamerika ist im Vorzeichen gleich der Strömungsrichtung. Die winterliche, kontinentale Kaltluft Nordamerikas, die für die höheren Breiten einen wesentlichen Transportanteil ausmacht, reicht offen-

bar als stehende Welle nicht bis zum 40. Breitenkreis nach Süden, so daß im Winter lediglich der Temperaturegensatz Europa, Asien - Pazifik von Bedeutung ist. Die Nordwärtstransporte über Ostasien und an der Westküste Nordamerikas sind jedoch so bedeutend, daß sie im zonalen Mittelwert für den Winter und für das Frühjahr viel höhere Transportbeträge bewirken als über 30°N (s. auch Abb. 9).

Etwa ab Mai und über den Sommer hinweg bis zum Oktober zeigt sich ein ganz anderes Bild als im Winter, Frühjahr und Spätherbst. Dabei erfolgt der Übergang vom Frühjahr zum Sommer un stetig, während sich das Bild im Herbst allmählich vom sommerlichen zum winterlichen wandelt, da sich die Landmassen langsamer abkühlen, als im Frühjahr erwärmen.

Im Sommer ist der Temperaturegensatz Pazifik - Amerika - Atlantik ausschlaggebend für den Transport. Besonders im Juni und Juli haben die aufgeheizten kalifornischen Wüstengebiete die Luft über ihnen so erwärmt, daß sich ein doppeltes Maximum über dem westlichen Pazifik durch einen Fluß kalter Luft nach Süden und über Nordamerika mit einem Warmlufttransport nach Norden ausbildet. Diese Erscheinung führt im August zu einem relativen Maximum über 40°N im zeitlichen und zonalen Mittelwert. Die Transporte über Europa und Asien bleiben im Sommer sehr schwach. Gegenüber 20°N und 30°N fehlt vor allem der Einfluß der afrikanischen und arabischen Wüste.

Während über den niederen Breiten vor allem polwärts gerichtete Warmluftvorstöße im Zusammenhang mit den aufgeheizten Kontinenten für den Transport durch stehende Wellen von Bedeutung sind, Energietransporte mit hohen Absolutwerten vor allem also im Sommer auftreten, sind es in mittleren und höheren Breiten vor allem Ausbrüche kalter Luft, die im Winter einen hohen Wärmeaustausch erzeugen.

Über 40°N sind beide Erscheinungen teilweise von Bedeutung. Mittelte man also zonal über die Absolutwerte, so ergäbe sich für die nördlichen Breiten genau der umgekehrte Jahresgang wie für die niederen Breiten. Der 40. Breitenkreis hätte als Mischtyp beider das ganze Jahr über hohe Werte.

Die Transporte über den 50. und 60. Breitenkreis hinweg sind im Prinzip ähnlich, sie sollen deshalb gemeinsam besprochen werden (s. Abb. 5, unten; Abb. 6). Gegenüber 40°N zeigt sich im Winter deutlich der Einfluß Nordamerikas und Kanadas als Quelle von Kaltluft (s. auch Abb. 10). Über 50°N erreicht der winterliche Transport an der Ostflanke des asiatischen Kältehochs zudem sein Maximum, während über dem 60. Breitenkreis vor allem eine geringere meridionale Windkomponente dort zu wesentlich niedrigeren Werten führt, so daß auch im zonalen Mittelwert sich das Transportmaximum über 50°N einstellt.

Das mittlere meridionale Windfeld ist in einer solchen Weise mit dem Temperaturfeld korreliert, daß alle intensiven Flüsse sensibler Energie positiv ausfallen. Von den zwei bedeutenden Kältepolen (NE-Kanada bzw. NE-Asien) ausgehend, fließt Kaltluft nach Süden und über dem Pazifik und durch den Einfluß des Golfstroms besonders über dem Atlantik Warmluft nach Norden. Dies führt auch dort im Winter zu intensiven polwärts gerichteten Transporten.

Bereits im März verliert das asiatische Kältehoch wesentlich an Bedeutung, während über Nordamerika immer noch so niedrige Temperaturen herrschen, daß maximale Transporte kalter Luft nach Süden bis zum April stattfinden. Über dem Atlantik und Europa sind die Temperaturen jedoch schon soweit ausgeglichen, daß der Wärmefluß über Land und Meer die gleiche Richtung wie die meridionale Windkomponente hat (s. auch Abb. 11).

Im Sommer bleiben die Transporte wegen allgemein schwacher Winde und geringer zonaler Temperaturgegensätze sehr schwach. Lediglich über 50°N bewirkt die allgemeine Erwärmung Asiens, daß sich die Temperatur im Pazifik und im Atlantik als etwas kälter vom Breitenmittelwert abhebt und dort an den Ostflanken der stationären Tiefdruckgebiete über den Ozeanen stärkere Flüsse kalter Luft nach Norden stattfinden.

Die Abkühlung der Kontinente setzt über beiden Breitenkreisen erst im Spätherbst ein. Über Nordamerika liegt die Temperatur sogar erst im November und Dezember niedriger als über dem Pazifik, so daß sich auch die maximalen Transporte entsprechend

spät einstellen und die Breitenmittelwerte im Herbst niedriger liegen als im Frühjahr.

Zusammenfassung:

Hinsichtlich der Resultate für die zonale Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch die stehenden Temperatur- und Geopotentialwellen können folgende wesentlichen Merkmale angeführt werden:

1. Neben der zeitlich gemittelten Zirkulation leistet vor allem die zonale Temperaturverteilung mit Temperaturgegensätzen zwischen Land und Meer einen wesentlichen Beitrag zur Richtung und Intensität des Flusses von sensibler Wärme. Dabei erzeugt in den niederen Breiten die Aufheizung der Landmassen im Sommer hohe absolute Transportwerte, während es in den höheren Breiten die Abkühlung der Kontinente gegenüber den Ozeanen im Winter ist, die zu maximalen Flüssen fühlbarer Wärme führt.
2. Die jahreszeitlich bedingte mittlere Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete stellt sich der Sonneneinstrahlung und der Land - Meerverteilung zufolge so ein, daß in niederen Breiten vor allem im Sommer das Feld der meridionalen Windkomponente und das Temperaturfeld vorwiegend negativ und im Winter über den höheren Breiten hauptsächlich positiv korreliert sind. Dadurch entsteht, dem Sonnenstand im Jahresgang folgend, im zonalen Mittel ein Fluß fühlbarer Wärme, der einen wesentlichen Teil sensibler Energie aus den Breiten mit Strahlungsüberschuß in die Gebiete mit Strahlungsdefizit abtransportiert und so eine zu starke Aufheizung der Atmosphäre unter dem jeweiligen Höchststand der Sonne sowie eine zu große Abkühlung in höheren Breiten verhindert.
3. Während - wie oben beschrieben - für den Sommer und den Winter vor allem die zonalen Temperaturgegensätze Land - Meer den Transport sensibler Energie bestimmen, sind diese Gegensätze in den Übergangsmonaten im Frühjahr und Herbst weit weniger ausgeprägt. In diesen Jahreszeiten sind es wesentlich auf einzelne Monate und Gebiete beschränkte Phasenverschiebungen zwischen den stehenden Wellen des Temperaturfeldes und jenen der meridionalen Windkomponente, welche im Breitenmittel den Wärmefluß erzeugen. Sie entstehen durch zeitlich unterschiedliche Verlagerungen des Temperatur- und Windfeldes im Übergang von der winterlichen zur sommerlichen Temperaturverteilung und Zirkulation. Außerdem übernehmen gerade in diesen Monaten, wie bereits im Kapitel 3.1.2. beschrieben, dann die wandernden Wellen den wesentlichen Anteil am Transport.

3.2.2. Die zonale Veränderlichkeit des monatlich gemittelten, durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie

Die durch wandernde Temperatur- und Geopotentialwellen hervorgerufenen meridionalen Transporte sensibler Energie sind in den Abb. 7 und 8 sowie 9 bis 11 dargestellt.

Im Gegensatz zu dem durch stehende Wellen erzeugten Fluß fühlbarer Wärme läßt sich für den Transport durch wandernde Wellen keine direkte Beziehung mehr zur zeitlich gemittelten Zirkulation und Temperaturverteilung herstellen. Der Energietransport, der durch wandernde Geopotential- und Temperaturwellen hervorgerufen wird, berechnet sich aus dem Produkt der zeitlichen Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert der Temperatur und der meridionalen Windkomponente (s. Gleichung (5b)).

Wie im Kapitel 3.1.2. bereits ausgeführt wurde und wie es später bei den Untersuchungen der täglichen Veränderlichkeit des Transportes durch wandernde Wellen noch gezeigt werden wird, ist das Produkt der zeitlichen Abweichungen von Temperatur und meridionaler Windkomponente meistens positiv und die nordwärts gerichteten Transporte sind allgemein im Absolutwert wesentlich größer als die südwärts ablaufenden. So wird eine starke zeitliche Veränderlichkeit des Temperatur- und Windfeldes im zeitlichen Mittelwert immer große positive Transporte, getätigt durch wandernde Wellen, zur Folge haben. Die Richtigkeit dieser Folgerung zeigen sowohl die Abb. 7 und 8 sowie auch das Bild 3b. Im monatlichen Mittelwert treten weder in der zonalen Veränderlichkeit noch im Breitenmittel bedeutende negative Transportwerte auf, während über allen Längengraden die positiven Flüsse dominieren.

Die Transporte über den niederen Breiten sind allgemein sehr schwach, weil dort nur relativ niedrige Windgeschwindigkeiten in der Atmosphäre auftreten und somit auch keine große zeitliche Variation der meridionalen Windkomponenten entstehen kann.

Aus diesem Grund wurde die zonale Veränderlichkeit des Flusses fühlbarer Wärme durch wandernde Wellen nur für die Breitenkreise 40°N , 50°N und 60°N untersucht, wo maximale Werte zu beobachten sind.

Wie aus Abb. 3b zu ersehen war, ist der Transport im Winter und Frühjahr über den 40. Breitenkreis hinweg maximal, während quer über 50⁰N und 60⁰N die Transporte allgemein schon weniger intensiv sind. Die Darstellung der zonalen Veränderlichkeit des Transportes über den 40. Breitenkreis hinweg (s. Abb. 7, oben), zeigt in diesen Jahreszeiten vor allem relativ große Nordwärtsflüsse fühlbarer Wärme und eine nur sehr geringe Anzahl von Südwardstransporten, während über 50⁰N und 60⁰N und besonders im Winter über Nordamerika und dem Ostpazifik negative Transport-Werte auftreten, die geeignet sind, einen zu großen positiven zonalen Mittelwert zu verhindern.

Der 40. Breitenkreis durchquert im Winter, Frühjahr und Herbst jene Zone der Nordhemisphäre, in welcher die meridionale Temperaturverteilung so geartet ist, daß im zeitlichen Mittelwert über alle Längengrade der meridionale Temperaturgradient relativ stark negativ ist, d.h. ein polwärts gerichtetes Temperaturgefälle vorhanden ist. In 50⁰N führt jedoch das Kältezentrum über Nordamerika und in 60⁰N jenes über Alaska und Asien dort relativ häufig zu einer Umkehrung des meridionalen Temperaturgefälles, wodurch an den Flanken dieser Kältezentren oft recht warme Nordwinde bzw. relativ kalte Südwinde auftreten.

So ist also der relativ zonale Verlauf der Isothermen über 40⁰N im Winter, Frühjahr und Herbst die wesentliche Ursache für die maximalen Nordwärtsflüsse sensibler Energie durch wandernde Wellen. In dieser mehr zonalen Temperaturverteilung finden sich natürlich die höchsten Transportwerte in den Gebieten stärkster und häufigster Zyklontätigkeit über dem Pazifik, an der West- und Ostküste Nordamerikas sowie über dem westlichen Atlantik (s. auch Abb.9).

Im Frühjahr und Herbst ist der Einfluß der Tiefdruckstörungen innerhalb der Westwinddrift ebenfalls so stark, daß sich auch in den Übergangsjahreszeiten intensive Nordwardstransporte zusätzlich über Europa, West-Asien und über Nordamerika (also über den Kontinenten) einstellen, was dann dazu führt, daß im zonalen Mittel die höchsten Transportbeträge im März, April und November über 40⁰N hinweg auftreten.



Im Sommer sind die Flüsse sensibler Energie durch wandernde Wellen über den 40. Breitenkreis hinweg recht gering, da zu dieser Zeit dieser Breitenkreis im wesentlichen im Bereich des sommerlichen subtropischen Hochdruckgürtels liegt, wo nur geringe Windgeschwindigkeiten oder Calmen auftreten. Durch die Ausbildung von Wärmerücken über den Kontinenten wird im Sommer der meridionale Temperaturgradient stark abgeschwächt, so daß auch die zeitliche Variation der Temperatur klein bleibt.

Wie beim Vergleich mit dem Breitenkreis 40°N bereits festgestellt wurde, besteht der wesentliche Unterschied im Transport sensibler Wärme über den 50. Breitenkreis hinweg im Winter darin, daß der Kältetrog über Nordamerika negative Flüsse erzeugt (s. Abb.7, unten). Jedoch auch in den Frühjahrs-Monaten März, April findet sich das Maximum des zonalen Mittelwertes weiterhin über dem 40. Breitenkreis, obwohl das nordamerikanische Kältezentrum sich zu dieser Zeit bereits so weit nach Norden zurückgezogen hat, daß über 50°N keine Südwardtransporte, verursacht durch wandernde Wellen, im monatlichen Mittelwert mehr feststellbar sind. Ein Vergleich der Gegebenheiten an beiden Breitenkreisen zeigt auch, daß im März über Asien der Wärmefluß wesentlich geringer ist als über 40°N , was offenbar eine Folge geringer Windgeschwindigkeiten im asiatischen Kältehoch ist, durch welches der 50. Breitenkreis noch über eine weite Strecke hindurchführt, während 40°N bereits außerhalb seines Einflusses liegt. Im April nehmen zwar über 50°N die Transporte über Asien bedeutend zu, jedoch fächern gegenüber 40°N über dem westlichen Pazifik die Isothermen so stark auf, daß über 50°N der meridionale Temperaturgradient dort nur noch gering ist und die Transporte über einer relativ weiten Region dort sehr zurückgehen (s. auch VOGL, 1979, Abb. 3.8).

Erst im Mai verlagert sich das Transportmaximum im zonalen Mittel zum 50. Breitenkreis hin und bleibt dort bis zum Oktober anwesend. In diesen Sommer-Monaten liegt der 50. Breitengrad nördlich des sommerlichen Hochdruckgürtels, so daß dort allgemein größere Windgeschwindigkeiten vorherrschen als über 40°N , außerdem ist über dem gesamten 50. Breitenkreis der meridionale

Temperaturgradient viel stärker als über 40°N . Besonders über Nordamerika verengt sich der Isothermenabstand (s. OSTHAUS, 1978, Abb. 10a). So entstehen im Sommer und Frühherbst über 50°N allgemein größere Transporte mit relativen Maxima über Nordamerika und dem westlichen Atlantik und der Jahresgang ist weniger stark ausgeprägt als über 40°N .

Was den 60. Breitenkreis betrifft (s. Abb. 8), so verläuft er im Winter auf großen Strecken durch die Kälteregeion über Asien, Nordamerika und Nordeuropa hindurch.

In ihrem Innern und an ihren Flanken ist der meridionale Temperaturgradient relativ gering, nur der Wärmerücken über dem mittleren Pazifik verursacht im Winter an seinem Nordrand nahe 60°N über dem Bering Meer eine starke Isothermendrängung, die in Verbindung mit einer ausgeprägten Zyklontätigkeit über diesem Gebiet zu maximalen, durch wandernde Wellen erzeugten Nordwärtstransporten von sensibler Energie führt.

An der Ostflanke des Kältezentrum über Nordamerika ist zwar der meridionale Temperaturgradient relativ schwach, jedoch ist hier ebenso wie über dem Bering Meer eine starke Tiefdrucktätigkeit feststellbar, welche bis weit in den Sommer hinein andauert und so zum Auftreten eines sekundären Transportmaximums über dem Atlantik Veranlassung gibt.

Im April und Mai nehmen die Transporte über dem Bering Meer stark ab, während sich größere Nordwärtsflüsse fühlbarer Wärme über Europa, Asien und der Hudsonbay einstellen. Die Maxima sind im wesentlichen auf eine verstärkte Zyklontätigkeit und auf stärkere Temperaturschwankungen in der Übergangszeit vom Winter zum Sommer zurückzuführen.

Im Sommer ist das Bild ähnlich wie für den 50. Breitenkreis, jedoch sind die Transporte allgemein schwächer. Dies liegt offenbar daran, daß der 60. Breitenkreis bereits nördlich der Zone des stärksten meridionalen Temperaturgradienten verläuft. Auffallend ist außerdem ein Gebiet mit relativ starken negativen Transporten im Juni/Juli zwischen 150°E und 180° . Hier reicht der sommerliche Wärmerücken im zeitlichen Mittelwert weit über Alaska nach Nordwesten, während der Pazifik, bzw. das Bering Meer südlich davon relativ kalt sind. Der meridio-

nale Temperaturgradient ist also häufig positiv, so daß dementsprechend negative Transporte durch wandernde Wellen entstehen.

Der herbstliche Übergang vom Sommer zum Winter geschieht - wie auch über den südlichen Breiten - stetiger als im Frühjahr. Vor allem dadurch, daß sich die Kältezentren über Asien und Europa erst allmählich ausprägen, entstehen im Herbst keine negativen Transporte durch wandernde Wellen. Der Isothermenverlauf ist im Vergleich zum Winter über den höheren Breiten relativ zonal (vergl. VOGL, 1979, Abb. 3.8., 3.14).

Zusammenfassung:

Nach der Betrachtung der Darstellungen für den Transport durch wandernde Wellen im Monatsmittel als auch hinsichtlich seiner Variation mit der geographischen Länge und der Zeit lassen sich die folgenden wesentlichen Aussagen machen:

1. Flüsse sensibler Energie durch wandernde Wellen sind im 850 mb-Niveau überwiegend positiv, also nordwärts gerichtet. Negative Flüsse entstehen vorwiegend in windschwachen Gebieten mit geringem meridionalen Temperaturgradienten, bleiben also vom Betrag her schwach.
2. Im Gegensatz zu den Transporten, die durch stehende Wellen hervorgerufen werden, sind für die Flüsse, getätigt durch wandernde Wellen, vor allem ein starker meridionaler Temperaturgradient und eine große zeitliche Veränderlichkeit der meridionalen Windkomponente wesentlich. So finden sich die Transportmaxima vorwiegend in jenen Zonen und Gebieten, wo eine ausgeprägte Zyklogenese mit großen meridionalen Temperaturoegenständen gekoppelt ist (große Baroklinität).
3. Hochdruckwetterlagen verhindern aufgrund der schwachen Zirkulation und zeitlich recht konstanter Temperaturverhältnisse große meridionale Transporte durch wandernde Wellen. So finden sich im Winter nördlich von 50°N , also über Breitenkreisen, die wesentlich von den winterlichen Kältehochs über Asien und Nordamerika beeinflusst sind, und im Sommer im Bereich des sommerlichen Hochdruckgürtels über ca. 40°N nur relativ geringe, durch wandernde Wellen erzeugte Flüsse. Die maximalen Transporte entstehen jedoch in den Zonen starker Zyklonentätigkeit im Bereich der Polar- und Subtropenfront im Frühjahr und Herbst.

3.3. DIE TÄGLICHE VERÄNDERLICHKEIT DER ZONALEN MITTELWERTE DES MERIDIONALEN TRANSPORTES SENSIBLER ENERGIE IM 850 MB-NIVEAU

In diesem Abschnitt wird die tägliche Variation der Breitenmittelwerte des durch wandernde Wellen erzeugten Transports und des totalen Flusses sensibler Energie untersucht. Die Abb. 12 - 15 enthalten die Breitenmittelwerte des durch wandernde Wellen erzeugten und die Abb. 16 - 19 jene des totalen Transportes für jeden Tag des Jahres 1975 und für die Breitenkreise 20°N , 30°N , 40°N , 50°N und 60°N . Dabei ist jeweils ein Monat in einer Darstellung zusammengefaßt und wiederum drei Monate, die den Jahreszeiten entsprechen, zu je einer Abbildung. Auf der Y-Achse sind die Tage des jeweiligen Monats aufgeführt, auf der X-Achse die Breitengrade von 20°N bis 60°N .

Die Betrachtung der täglichen Veränderlichkeit der Breitenmittelwerte des Transportes kann im wesentlichen Aufschluß über die Andauer maximaler Transporte und ihre meridionale Verteilung zu verschiedenen Monaten und Jahreszeiten geben. Im Zusammenhang mit den Untersuchungen über die zeitliche und zonale Variation können die Abb. 12 - 15 zusätzlich zeigen, welche Auswirkungen einzelne Transporte über bestimmten Längen- und Breitengraden auf den zonalen Mittelwert haben. Für die Abb. 16 - 19, also den totalen Transport ist ein derartiger Zusammenhang nur mittelbar herzustellen.

3.3.1. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie, verursacht durch wandernde Wellen im 850 mb-Niveau

Die in diesem Abschnitt behandelten Transporte sind in den Abb. 12 - 15 dargestellt.

Die Abbildungen enthalten im Gegensatz zu jenen, die den totalen Transport betreffen, keine Beiträge durch Glieder, die bei zeitlicher Mittelung verschwinden. Sie zeigen also in Verbindung mit den durch stehende Wellen erzeugten Wärmeflüssen tatsächlich jenen Anteil, der einen wirklichen Beitrag zum to-

talen meridionalen Energieaustausch zwischen Äquator und Nordpol liefert.

Vom Januar bis zum April (s. Abb. 12 und 13) ist aus den Bildern deutlich erkennbar, daß sich die Maxima des Transportes hauptsächlich auf die Breitenkreise 40°N und 50°N verteilen. Negative Flüsse treten sowohl hier, als auch über den niederen Breiten überhaupt nicht oder nur mit unbedeutenden Beträgen in Erscheinung.

Vergleicht man die monatlichen Mittelwerte mit der täglichen Veränderlichkeit, so fällt auf, daß die größten Nordwärtstransporte durch wandernde Wellen offenbar in der Kernzone der Westwinddrift auftreten, welche im Januar und Februar im Mittel bei 40°N verläuft und im Dezember zwischen 40°N und 50°N , was gut mit der Häufigkeit der auftretenden Maxima des Wärmeflusses im Einklang steht.

Bereits im Mai ist auch für diesen Transportanteil deutlich der Übergang zur sommerlichen Zirkulation erkennbar. Während im April die Beträge der höchsten Transporte zwar schon allgemein geringer werden, sorgt doch ihr häufiges Auftreten noch für einen so großen zeitlichen Mittelwert, welcher durchaus mit jenem des Februar vergleichbar ist. Im Mai verringern sich die Nordwärtsflüsse jedoch so stark, daß sich im monatlichen Mittelwert nur noch ca. $2/3$ des April-Betrages über 40°N und 50°N ergeben. Sehr deutlich ist auch die Häufung der Transportmaxima über 50°N in der zweiten Hälfte des Monats.

Die Sommermonate (s. Abb. 14) sind dadurch gekennzeichnet, daß größere Flüsse und stärkere zeitliche Schwankungen ausschließlich über 50°N und im Juli auch über 60°N stattfinden. Hier machen sich die sommerlich nördlichere Lage der Polarfront und der damit verbundene maximale meridionale Temperaturgradient, also die nordwärts verschobene Westwinddrift bemerkbar.

Über den niederen Breiten, im August sogar nordwärts bis 40°N , treten vermehrt Südwärtsflüsse auf, die offensichtlich durch das dort allgemein schwach ausgeprägte Strömungsfeld und den geringen meridionalen Temperaturgradienten im Sommer zustandekommen.

Im August beginnen bereits, bevor sich die Nulllinie wieder nach Süden zurückzieht, die Nordwärtstransporte über 50°N und 60°N zuzunehmen, während die negativen Werte über den niederen Breiten erst im Herbst stark abnehmen, so daß im November (s. Abb. 15) nur noch unbedeutende negative Beträge ganz im Süden über 20°N auftreten. Die polaren Regionen scheinen sich also bereits im August stärker abzukühlen, aber es bilden sich erst im November stationäre Kältezentren aus, die auch über 60°N und 50°N hinaus nach Süden reichen, während der sommerliche Hochdruckgürtel über 30°N und 40° im August seinen Einflußbereich noch weit nach Norden ausdehnt.

In der zweiten Hälfte des November treten auch über 40°N ausgeprägte Transportmaxima auf. Die Polarfront beginnt allmählich im zonalen Mittelwert die typische winterliche Lage einzunehmen.

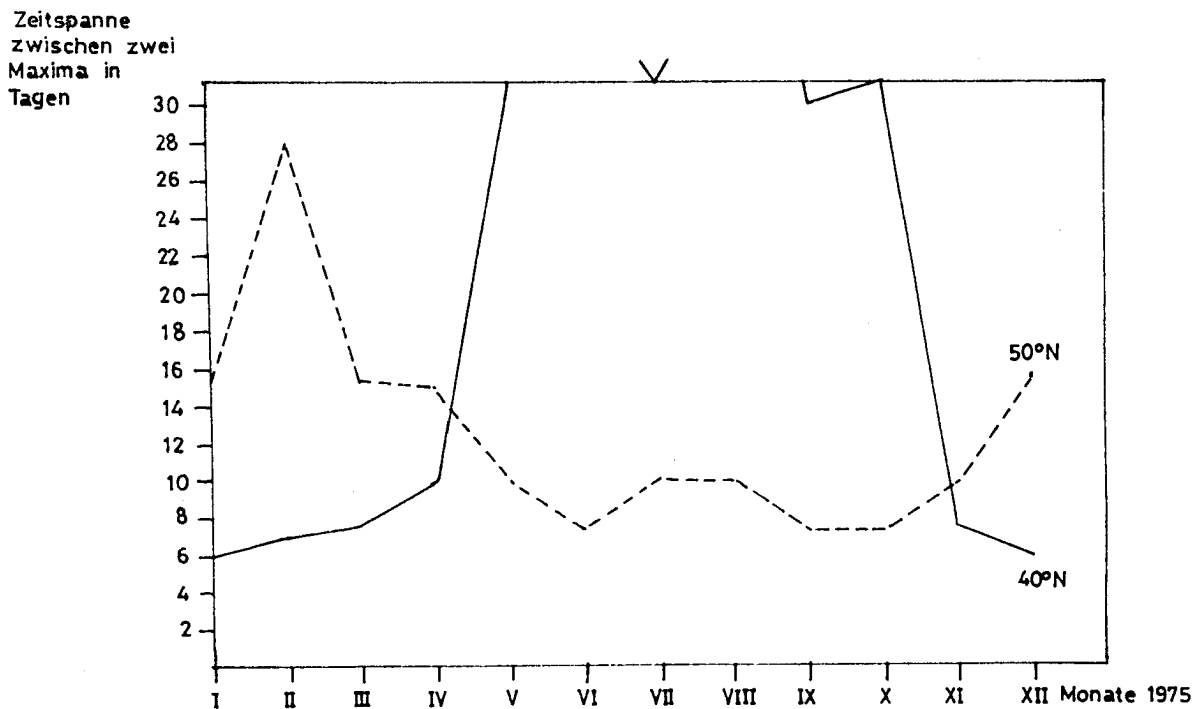
Eine Analyse der zeitlichen Abstände zwischen den jeweils pro Monat auftretenden Transportmaxima für die Breitenkreise 40°N und 50°N (s. Tabelle 1 und Grafik 1a) zeigt deutlich eine Abhängigkeit der Frequenz, mit der die Maxima auftreten, von der Lage der Zone der Polar- und Subtropenfront bzw. der Westwinddrift. Sobald einer der Breitenkreise in jener Zone liegt, sind die Zeiträume zwischen den Transportmaxima wesentlich kürzer als in solchen Monaten, in denen die Fronten im Mittel südlich oder nördlich davon verlaufen.

So ist die starke Veränderlichkeit von Temperatur und Geopotential im Bereich der Westwinddrift für das Jahr 1975 durch eine kurze Periode von ca. 1 Woche zwischen zwei Extremwerten charakterisiert, während dieser Zeitraum nördlich und südlich der Zone der Westwinddrift zwischen ca. 10 Tagen und mehr als einem Monat schwankt.

Betrachtet man die Grafik 1a, so findet man für den 40° Breitenkreis von Januar bis März und von November bis Dezember besonders kurze Perioden und für 50°N im Frühsommer und im Frühherbst. Nur im Hochsommer, im Juli und August, scheint die Westwinddrift eindeutig nördlich von 50°N zu verlaufen oder sich insgesamt stark abgeschwächt zu haben.

Monat	Anzahl der pro Monat auftretenden Maxima		mittlere Periode zwischen zwei Maxima in Tagen	
	40°N	50°N	40°N	50°N
I	5	2	6	15.5
II	4	1	7	28
III	4	2	7.5	15.5
IV	3	2	10	15
V	1	3	31	10
VI	0	4	-	7.5
VII	1	3	31	10
VIII	0	3	-	10
IX	1	4	30	7.5
X	1	4	31	7.5
XI	4	3	7.5	10
XII	5	2	6	15.5

Tabelle 1



Grafik 1a Wertekurven zu Tabelle 1 aus Spalte 4 und 5

Ein Vergleich der Kurven in der Grafik 1a mit den monatlichen und zonalen Mittelwerten des durch wandernde Wellen erzeugten Wärmeflusses (s. Abb. 3b) läßt folgende Schlüsse zu: Eine starke Zyklonentätigkeit im Zusammenwirken mit einem ausgeprägten meridionalen Temperaturgradienten, also starke Baroklinität, erzeugt auf jeden Fall maximale Transportwerte durch wandernde Wellen. Hiermit lassen sich, wie auch in Kapitel 3.1.2. bereits festgestellt, die Transportmaxima im Januar, März und November begründen.

Ist der meridionale Temperaturgradient gering, finden auch in der Zone der Westwinddrift nur schwache Transporte statt (vergleiche die niedrigen Werte in Abb. 3b über 50°N im Juni und September mit der dort großen Anzahl der auftretenden Maxima in Tabelle 1).

Trotz relativ geringer Tiefdrucktätigkeit kann jedoch bei starkem meridionalen Temperaturgradienten der Transport über einem Breitenkreis allgemein so groß sein, daß davon der monatliche Mittelwert bedeutend angehoben wird (vergl. Abb. 12 und das Transportmaximum über 50°N im Dezember in Abb. 3b mit der dort geringen Anzahl der auftretenden Maxima in Tabelle 1).

Zusammenfassung:

Die Untersuchung der täglichen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen erzeugten meridionalen Wärmeflusses im Breitenmittelwert weist folgende wesentliche Ergebnisse auf:

1. Der weitaus überwiegende Teil dieses Transportes geschieht in polwärtige Richtung. So hat der durch wandernde Wellen hervorgerufene Wärmefluß im Sommer eine ausgleichende Wirkung auf den weitgehend äquatorwärts gerichteten, durch stehende Wellen erzeugten Transport.
2. Im Frühjahr und Spätherbst findet der durch wandernde Wellen hervorgerufene Transport ein zweites Maximum neben dem im Winter. Dieses kommt vor allem durch die Summe einer großen Anzahl höherer Transportwerte in den jeweiligen Monaten und einem gut ausgeprägten meridionalen Temperaturgradienten zustande. So tragen die wandernden Wellen dazu bei, daß trotz des im Frühjahr und Herbst jeweils schon weitgehend fortgeschrittenen Temperatenausgleichs zwischen den Kontinenten und den Ozeanen die Summe des durch stehende und wandernde Wellen erzeugten Flusses

einem wesentlich geringeren Jahresgang unterliegt, als der durch stehende Wellen erzeugte Transport allein.

Außerdem macht das oben Gesagte deutlich, wie wichtig neben den zonalen Temperaturgegensätzen auch die Zyklontätigkeit und der starke meridionale Temperaturgradient im Kern der Westwinddrift für den meridionalen Wärmefluß ist. Durch sie wird auch dann der Transport bewerkstelligt, wenn die zonalen Temperaturunterschiede nur noch geringen Einfluß haben.

3.3.2. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des totalen meridionalen Transportes sensibler Energie im 850 mb-Niveau

Zu den Abb. 16 - 19 ist allgemein folgendes zu bemerken: Die tägliche Variation des totalen Transportes sensibler Energie enthält nicht nur die Beiträge der Summe des Transportes durch wandernde und stehende Wellen, wie sie sich nach einer zeitlichen und zonalen Mittelung ergibt, sondern weitere Beiträge durch Mischterme entsprechend der Gleichung (4), die im zeitlichen Mittel verschwinden (s. die Summanden 4e und g).

In dem Ausdruck 4e sind die stehenden Wellen der Temperatur mit der täglichen und zonalen Veränderlichkeit der meridionalen Windkomponente korreliert. Der Wert der Temperatur stellt in diesem Produkt also für jeden Breitenkreis und jeden Monat gesondert eine zeitliche Konstante dar, welche je nach Höhe ihres Absolutbetrages die tägliche Variation der meridionalen Windkomponente verstärkt oder abschwächt. Das gleiche gilt für den Ausdruck 4g mit vertauschten physikalischen Größen Temperatur und meridionaler Windkomponente. Ist also die Amplitude der täglichen Variation des totalen Transportes im Breitenmittel größer als jene des durch wandernde Wellen erzeugten, so kann das nur auf starke zonale Veränderlichkeit des Temperatur- und/oder Geopotentialfeldes zurückzuführen sein.

Der Einfluß der stehenden Wellen auf den totalen Transport verschiebt die Lage der Transportmaxima derartig gegenüber jenen des durch wandernde Wellen allein erzeugten Flusses, daß zwar die Gesamtzahl der Maxima pro Monat für alle Breitenkreise er-

halten bleibt, jedoch das Bild für die Anzahl pro Breitenkreis und Monat verzerrt wird. Eine Analyse der zeitlichen Zwischenräume zwischen den auftretenden Maxima, wie es im vorherigen Kapitel vorgenommen wurde, erscheint daher für den totalen Transport sinnlos.

Im Winter (s. Abb. 16) zeigt sich eine deutliche Konzentration aller Transportmaxima über 50°N . Hohe Werte treten über 40°N nur vereinzelt auf. Hier erhöhen ganz offenbar die stehenden Wellen die Beträge des totalen Flusses gegenüber dem allein durch wandernde Wellen erzeugten Transport.

Im Januar und Februar treten über 60°N vereinzelt auch negative Transportwerte im Breitenmittel auf, was im Dezember nicht der Fall ist. Das ist offenbar die Folge des Transportbeitrages durch die Mischterme 4e und g, die hier wohl durch einen hohen Mittelwert der zonalen Temperaturabweichung aufgrund der ausgeprägten Kältezentren gegenüber den Wärmeregionen über dem Atlantik und dem Bering Meer die Schwankungen der durch wandernde Wellen erzeugten Flüsse verstärken.

In den niederen Breiten verläuft die Nulllinie des totalen Transports in allen drei Monaten zwischen 20°N und 30°N . Für die negativen Transportwerte, die südlich von 30°N auftreten, sind offenbar jene Beiträge zum Wärmefluß verantwortlich, welche die stehenden Wellen liefern.

Im Frühjahr (s. Abb. 17) werden die Transporte im allgemeinen geringer. Während in der ersten Hälfte des Monats März die großen Nordwärtsflüsse im wesentlichen noch über 50°N liegen, tauchen in der zweiten Hälfte des Monats bereits vermehrt relative Maxima über 40°N auf. Vergleicht man die monatlichen Mittelwerte des Wärmeflusses, getätigt durch wandernde Wellen, mit jenen, verursacht durch stehende Wellen, im April, so zeigt sich, daß der Betrag des Transportes durch stehende Wellen vom März zum April stark abnimmt, während die wandernden Wellen weiterhin relativ große Mengen sensibler Energie nach Norden führen. Die maximalen Transporte verlagern sich also durch den Einfluß der wandernden Wellen in die Zone stärkster zeitlicher Veränderlichkeit der Temperatur und der meridionalen Windkomponente nahe des 40. Breitenkreises.

Breits in der zweiten Hälfte des Mai zeigt sich ein deutlicher Übergang zum sommerlichen Transportbild. Die Nulllinie im totalen Transportbild verschiebt sich nach Norden, so daß sich vom 27. Mai an von 20°N bis 60°N überall negative Werte einstellen.

Im Sommer (s. Abb. 18) verschiebt sich die Nulllinie an allen Tagen weiter nach Norden. Häufig treten auch negative Werte über 50°N und 60°N auf. Die Transporte werden allgemein wesentlich schwächer, so daß die Maximalbeträge etwa nur noch ein Drittel von jenen im Mai ausmachen. Dazu treten über den niederen Breiten verstärkt Südwärtstransporte in Erscheinung. Ein Vergleich der Abb. 18 mit der vorher präsentierten Abb. 14, also des totalen Transportes mit dem durch wandernde Wellen erzeugten, zeigt für den totalen Wärmefluß über den niederen Breiten eine weitaus stärkere tägliche Veränderlichkeit, während über den höheren Breiten kaum ein Unterschied feststellbar ist. Hier geht wiederum die hohe mittlere zonale Veränderlichkeit der Temperatur über den niederen Breiten im Sommer über das Glied der Gleichung (4e) in die Berechnung ein.

Im Herbst (s. Abb. 19) fällt besonders die von Monat zu Monat relativ stetige rückläufige Verlagerung der Nulllinie nach Süden auf. Es findet also im Herbst kein so unstetiger Rückzug statt verglichen mit dem Vorstoß in der zweiten Maihälfte. Vom August an bis zum September verschwinden die großen Südwärtstransporte. Im September verlagert sich die Nulllinie von ca. 35°N nach 30°N äquatorwärts und im Oktober noch weiter bis ca. 25°N , und es treten jetzt wieder stärkere Nordwärtsflüsse über den höheren Breiten auf, die sich im Oktober und November wieder deutlich auf den 50. Breitenkreis konzentrieren.

Im November werden die täglichen Schwankungen des totalen Transportes über 50°N und 60°N gegenüber jenen des durch wandernde Wellen hervorgerufenen Flusses über die Mischterme 4e und g wieder sehr verstärkt. Es bilden sich also im Norden allmählich wieder die winterlichen Kältezentren aus, welche ein verstärktes Mäandrieren der Isothermen und Isohypsen im zeitlichen Mittel zur Folge haben.

Zusammenfassung:

1. Die Betrachtung der täglichen Veränderlichkeit der Breitenmittelwerte des totalen Transportes zeigt einen gut erkennbaren Zusammenhang zwischen dem durch stehende und wandernde Wellen hervorgerufenen Fluß sensibler Energie. Dabei spielt für die tägliche Variation auch die Wechselwirkung zwischen den stehenden Wellen der Temperatur und den wandernden Wellen der meridionalen Windkomponente und umgekehrt eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Wie eingangs in diesem Kapitel dargelegt wurde, wird dadurch die Schwankung des totalen Transportes umso mehr verstärkt, je ausgeprägter die Isohypsen und Isothermen im monatlichen Mittel mäandrieren. Die Tatsache, daß in nördlichen Breiten diese Verstärkung im Winterhalbjahr und in niederen Breiten im Sommerhalbjahr geschieht, unterstreicht die in früheren Kapiteln dieser Arbeit gewonnene Erkenntnis, daß im Winter im Norden vor allem die großen Kältezentren der Kontinente gegenüber den warmen Ozeanen maximale Transporte erzeugen, während es im Sommer in den niederen Breiten die aufgeheizten Wüstengebiete sind.
2. Die Verlagerung der Nulllinie des totalen Transportes im Jahresablauf zeigt folgende wesentliche Merkmale:
Die Erwärmung des Gesamtsystems Erde - Atmosphäre geht im Frühjahr schneller vor sich, als dessen Abkühlung im Herbst und beginnenden Winter. Im Sommer treten über allen Breitenkreisen häufig auch Transporte sensibler Energie in Richtung zum Äquator auf. Offenbar heizt sich dann die gesamte Nordhemisphäre auch unter dem Einfluß der ganztägigen wirksamen Sonneneinstrahlung über den Polarregionen derart auf, daß eine konstante polwärtige Richtung des Transportes nicht mehr möglich ist und diese im Sommer gespeicherte Wärme erst im Winterhalbjahr nach Norden abtransportiert wird.

3.4. DIE TÄGLICHE UND ZONALE VERÄNDERLICHKEIT DES DURCH WANDERENDE WELLEN HERVORGERUFENEN UND DES TOTALEN MERIDIONALLEN TRANSPORTES SENSIBLER ENERGIE IM 850 MB-NIVEAU

Die Abbildungen der in diesem Kapitel zu besprechenden Transporte umfassen insgesamt 84 Seiten, die alle in dem bereits erwähnten, gesondert beigefügten Bildband enthalten sind.

In der Arbeit selbst können nur jene Abbildungen auszugsweise aufgenommen werden, welche für den Transport sensibler Wärme im betrachteten Jahr beispielhaft sind. Dabei wurde besonders auf jene Darstellungen Wert gelegt, die in typischer Weise den Jahresgang des Transportes beschreiben.

Der totale Transport enthält in seiner mathematischen Darstellung nicht allein die Transportbeiträge, die durch wandernde und stehende Temperatur- und Geopotentialwellen erzeugt werden, sondern eine weitere Anzahl Mischterme, welche die absolute Temperatur in K^0 als Faktor enthalten, während die wandernden und stehenden Wellen nur durch Temperaturgradienten repräsentiert sind. So kommt es, daß die Absolutbeträge des totalen Transportes, in welchem diese großen Glieder enthalten sind, um mehrere Zehnerpotenzen größer sind, als jene des durch wandernde und stehende Wellen hervorgerufenen Wärmeflusses. Da die absolute Temperatur in K^0 immer positiv ist, richtet sich auch das Vorzeichen des totalen Transportes nur nach dem der meridionalen Windkomponente. Ebenfalls werden in der täglichen und zonalen Veränderlichkeit des totalen Wärmeflusses auch nur die Schwankungen der meridionalen Windkomponente entlang eines bestimmten Breitenkreises abgebildet, weil der Einfluß der durch wandernde und stehende Temperatur- und Geopotentialwellen erzeugte Wärmefluß gegenüber den hohen Beträgen der oben erwähnten Mischglieder viel zu gering ist.

Wie bereits in dieser Arbeit dargelegt wurde, stellt die tägliche und zonale Veränderlichkeit des totalen meridionalen Wärmetransportes für einen Abschnitt auf einem Breitenkreis und zu einer begrenzten Zeit nur einen scheinbaren meridionalen Wärmefluß dar. Diese großen Absolutbeträge werden faßt gänzlich durch zonale und vertikale Flüsse kompensiert, wie an-

hand der vollständigen Kontinuitätsgleichung bewiesen werden kann. Folglich werden diese Glieder auch bei zonaler und zeitlicher Mittelung zu Null, so daß nur noch die turbulenten, also nur die durch stehende und wandernde Wellen erzeugten meridionalen Flüsse sensibler Energie einen wirklichen Beitrag zum Wärmeaustausch zwischen Äquator und Pol leisten.

Aus diesen Gründen erscheint eine gesonderte Untersuchung des totalen Flusses nicht sinnvoll. Seine Darstellung liefert jedoch im Zusammenhang mit der täglichen und zonalen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen erzeugten Transportes wertvolle Auskünfte über die Veränderlichkeit des meridionalen Windfeldes und der Zirkulation in der Atmosphäre, die zur genauen Erklärung der Mechanismen, welche den durch wandernde Wellen hervorgerufenen Wärmefluß bestimmen, unerläßlich sind.

Selbstverständlich wurden außerdem auch die täglichen Wetterkarten des DWD für das Jahr 1975 zur Beschreibung des Transportes herangezogen.

Die Untersuchung der täglichen und zonalen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen erzeugten meridionalen Flusses sensibler Energie hat in der 850 mb-Fläche einige, für das ganze Jahr zutreffende, prinzipielle Zusammenhänge zwischen dem Temperaturfeld und der groß- und mittelskaligen Zirkulation ergeben. Ihre Kenntnis erleichtert es dem Leser dieser Arbeit wesentlich, die Beschreibung und Erklärung jener Transporte zu verstehen. So werden zuerst anhand eines typischen Beispiels die oben genannten Zusammenhänge aufgezeigt und anschließend daran wird der Jahresgang der täglichen und zonalen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen erzeugten Flusses sensibler Wärme beschrieben, wobei jeweils die entsprechende Darstellung des totalen Transportes als Ergänzung dient.

Wie im Kapitel 3.2.2. bereits angesprochen wurde, sind die durch wandernde Wellen hervorgerufenen Wärmeflüsse im 850 mb-Niveau meistens nach Norden gerichtet, weiterhin liegen die südwärts gerichteten Flüsse sensibler Energie im Absolutbetrag allgemein wesentlich niedriger als die Nordwärtstransporte, so daß die wandernden Wellen der Temperatur und des Geopotentials

das ganze Jahr über fühlbare Wärme im zonalen und zeitlichen Mittel nahezu ausschließlich nach Norden verfrachten.

Dieser Erscheinung liegt eine Regelmäßigkeit des Wärmeflusses durch wandernde Wellen in bodennahen Schichten der Atmosphäre zugrunde, die hier als Beispiel für einen speziellen Tag besprochen werden soll.

Als Beispiel wird der meridionale Transport sensibler Energie durch wandernde Wellen am 12. Januar 1975 über 50°N (s. auch Abb. 22) gewählt und in der Abb. 2 dargestellt:

Der obere Teil der Abbildung enthält die folgenden Kurven:

ganz durchgezogen: meridionaler Transport sensibler Energie,
hervorgerufen durch wandernde Wellen

grob gestrichelt: wandernde Wellen der Temperatur

fein gestrichelt: wandernde Wellen der meridionalen Komponente des geostrophischen Windes.

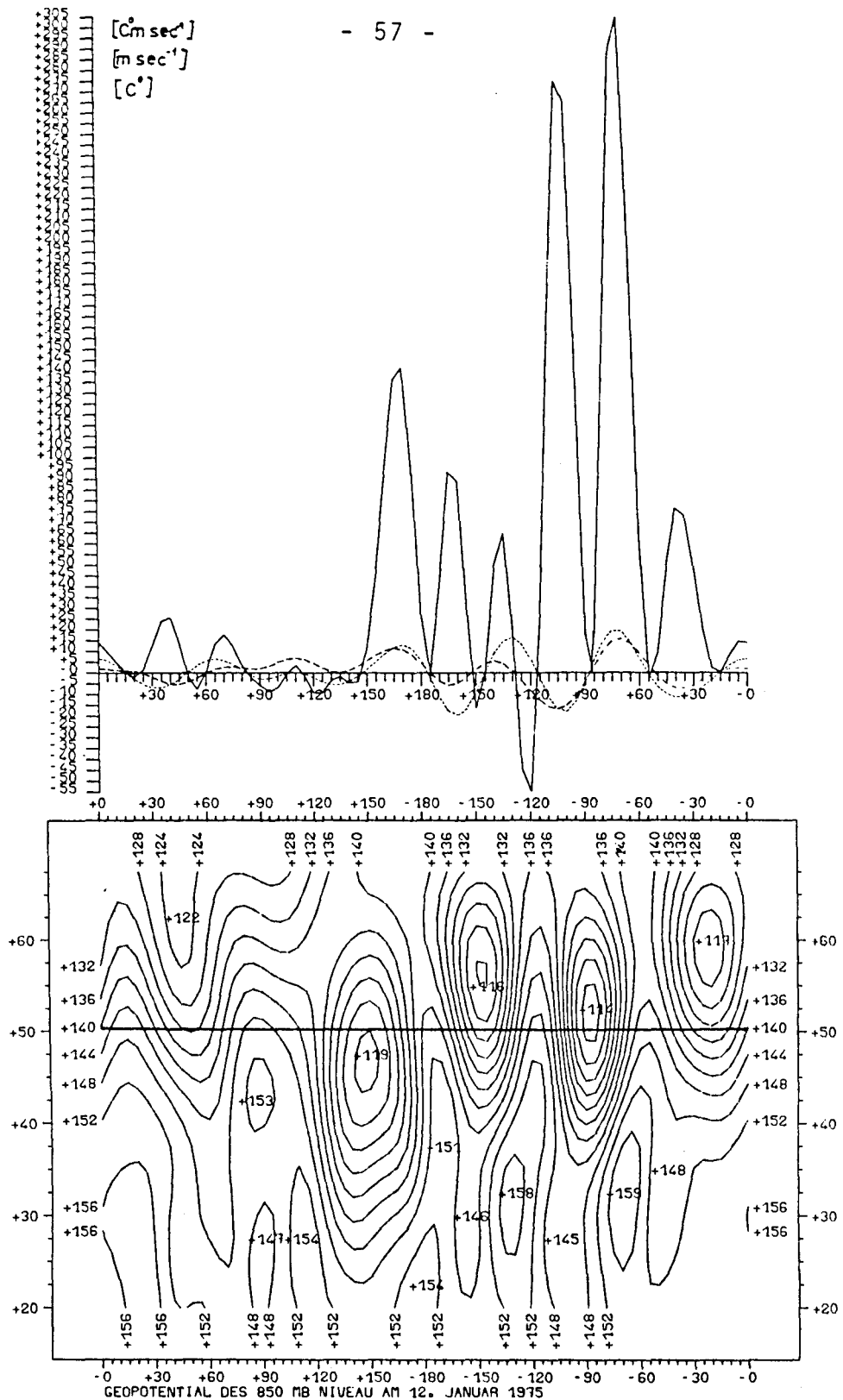
Auf der Y-Achse sind jeweils für die drei Kurven als Einheiten: C° , m sec^{-1} und $\text{C}^{\circ} \text{ m sec}^{-1}$ gewählt worden.

Dabei wurde der Maßstab der drei Veränderlichen so gewählt, daß die Beträge der Y-Achse für alle Einheiten gelten.

Die X-Achse enthält die Längengrade entlang des 50° Breitenkreises der nördlichen Hemisphäre.

Der untere Teil der Abb. 2 präsentiert in Form von Isohypsen das Geopotentialfeld des 850 mb -Niveaus am 12. Januar 1975 zwischen 20°N und $67,5^{\circ}\text{N}$. Dabei sind die Breitengrade auf der Y-Achse und die Längengrade auf der X-Achse aufgetragen. Der 50° Breitenkreis, zu dem die oberen Wertekurven gehören, ist im Geopotentialfeld zusätzlich durch einen waagerechten Strich markiert.

Vergleicht man nun den meridionalen Transport sensibler Energie durch wandernde Wellen mit dem entsprechenden Geopotentialfeld, so fällt allgemein auf, daß alle wesentlichen Transporte nach Norden gerichtet sind. Weiterhin ist zu erkennen, daß die maximalen Flüsse an den Flanken von Tiefdruckwirbeln stattfinden. Im Bereich von Antizyklonen sind die Flüsse gering, und es fin-



Oben: Der durch wandernde Wellen hervorgerufene, meridionale Transport sensibler Energie (—), die wandernden Wellen der Temperatur (-----) und der meridionalen Windkomponente (.....) am 12.1.1975 über 50°N im 850 mb - Niveau.

Unten: Das den obigen Kurven zugehörige Geopotentialfeld (in geopot. Dezimetern) zwischen 20°N und 67,5°N. Isohypsenabstand: 4 gpm

Abb. 2

den sich regelmäßig negative Werte im östlichsten Bereich eines Hochs (man beachte das Gebiet zwischen 0° und 120°E). Der relativ starke südwärts gerichtete Fluß um 120°W und das Fehlen der Peaks zwischen 120°E und 135°E sowie zwischen 15°W und 0° haben besondere Ursachen, welche zuletzt besprochen werden.

Der Grund dafür, daß gerade an den Flanken von Tiefdruckwirbeln maximale Nordwärtstransporte sensibler Energie durch wandernde Wellen stattfinden, liegt darin, daß sich einerseits in den Randgebieten einer Zyklone notwendigerweise besonders starke meridionale Winde einstellen müssen, welche allgemein auch starke Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert darstellen. Andererseits findet man gerade im Bereich reger Zyklonentätigkeit, nämlich in der Zone der Polar- und Subtropenfront auch einen starken meridionalen Temperaturabfall von Süd nach Nord in bodennahen Schichten. Beide Erscheinungen bedingen sich bekanntlich sogar gegenseitig. Daher wird es gerade beim Entstehen einer Zyklone und bei deren Fortentwicklung meistens im Norden wesentlich kälter sein als im Süden. An der Westflanke eines Tiefdruckwirbels wird also kalte Luft nach Süden geführt werden und an seiner Ostflanke warme Luft nach Norden. Konzentriert man sich auf die typische Phasenverschiebung in wandernden Wellen zwischen der Temperatur und der meridionalen Windkomponente zwischen 150°E und 150°W sowie zwischen 115°W und 0° , so findet man, daß sie um Null schwankt, wodurch das oben Gesagte belegt wird.

Zwischen 15°E und 90°E , also im Bereich höheren Drucks ist die Temperaturwelle etwa um $1/4$ der Wellenlänge gegenüber jener der meridionalen Windkomponente nach Osten verschoben. Hier wird offenbar durch Absinken im Hochdruckgebiet erwärmte Luft um dessen Nordbereich herum eine Wegstrecke nach Süden geführt. Dies ist eine Erscheinung, welche sich besonders oft und deutlich in sommerlichen Hochdrucklagen zeigt, aber allgemein durch geringe Wind- und Temperaturschwankungen gekennzeichnet ist und daher nur geringe Beträge des Transportes erzeugt. Auch die positiven Flüsse sind dort recht schwach.

Schließlich können zu den weiteren Merkmalen, nämlich den feh-

lenden Peaks am Westrand der winterlichen Tiefdruckzone über dem Pazifik über 120°E und über Europa bei 0° sowie zum relativ starken Südwärtsfluß fühlbarer Wärme über 120°W folgende erklärende Bemerkungen gemacht werden.

Diese Erscheinungen sind durch das Zusammenwirken von stehenden und wandernden Wellen zu erklären. Im Grenzgebiet zwischen dem asiatischen Kältehoch und dem winterlichen Tief über dem Westpazifik, im Gebiet um 120°E , herrscht im monatlichen Mittelwert eine starke Nordströmung. Wie der hohe Nordwärtsfluß durch stehende Wellen über 120°E beweist (s. Abb. 10), ist dort der zonale Temperaturgradient hoch und der meridionale daher relativ gering und aufgrund des Einflusses des asiatischen Kältehochs am 12. Januar offenbar sogar leicht positiv von Süd nach Nord gerichtet. Daher erzeugt die Zyklone am 12.1. an ihrer Ostflanke weder eine starke zeitliche Abweichung der meridionalen Windkomponente vom monatlichen Mittelwert, noch eine große Abweichung der Temperatur. Die stehenden Wellen von Geopotential und Temperatur über 120°E kompensieren also den Transport durch wandernde Wellen. Das gleiche geschieht über Europa in etwas geringerem Maße, während zwischen 55°W und 115°W der umgekehrte Effekt den Transport durch wandernde Wellen verstärkt.

Über Nordamerika liegt im monatlichen Mittelwert das Zentrum eines Kältehochs, dessen Flanken etwa bei 120°W und 80°W liegen. Bildet sich nun über dem Ostpazifik eine Zyklone aus, deren eine Flanke das Hochdruckgebiet nach Osten verdrängt, so wird sich das vor allem durch eine starke Zunahme der meridionalen Windkomponente in nördlicher Richtung über 120°W bemerkbar machen, während eine Erwärmung relativ zu den höheren Temperaturen im Hochdruckrücken erst später eintritt, so daß kurzzeitig zwischen 130°W und 115°W ein relativ starker Transport von kalter Luft nach Norden stattfindet, der jedoch durch die positiven Transporte, die eben durch diesen Vorgang östlich und westlich davon erzeugt werden, bedeutend überkompensiert wird. Diese relativ komplizierte Wechselwirkung zwischen der Zyklonenbildung über dem Ostpazifik und den stehenden Wellen über dem nordamerikanischen Kontinent wurde deshalb

so genau geschildert, weil sie für dieses Gebiet im Winter, Frühjahr und Herbst typisch ist und häufig vorkommt (s. auch Abb. 7, unten; Abb. 8).

Zusammenfassende Betrachtung zu Abb. 2:

- 1) Maximale Nordwärtstransporte durch wandernde Wellen finden vor allem in Tiefdruckwirbeln in Bereichen starker meridionaler Temperaturgradienten statt. Diese Wärmeflüsse können durch stehende Wellen der Temperatur und des Geopotentials kompensiert oder besonders verstärkt werden. Über Nordamerika ist in den kalten Jahreszeiten besonders eine Wechselwirkung zwischen der Zyklonenbildung über dem Ostpazifik und Vorstößen polarer Kaltluft über Kanada und Nordamerika von Bedeutung, welche über dem Kontinent selbst zu sehr hohen Nordwärtsflüssen sensibler Energie führt und im Bereich der Westküste häufig negative Werte erzeugt.
- 2) In der Einflußzone von Hochdruckgebieten bleiben die meridionalen Transporte durch wandernde Wellen recht schwach, und es treten dort oft auch negative Flüsse in Erscheinung.

Nach diesen prinzipiellen Feststellungen wird nun der Jahresgang der täglichen und zonalen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen erzeugten Wärmeflusses untersucht. Dieser Transport und der entsprechende totale Fluß sind in den Abb. 20 - 33 dargestellt. Dabei enthält immer die erste Abbildung, also die mit der geraden Nummer, den durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transport sensibler Energie und die jeweils darauf folgende den dazugehörigen totalen Wärmefluß.

Alle Abbildungen sind derart gestaltet, daß ein Bild die tägliche und zonale Veränderlichkeit des Transportes eines Monats für einen speziellen Breitenkreis enthält. Auf der Y-Achse sind die Tage des betreffenden Monats aufgeführt und auf der X-Achse die Längengrade des speziellen Breitenkreises. Der meridionale Wärmefluß ist auf dieser Zeit-/ Raumbene in Form von Linien gleichen Transportes in Einheiten von $C^{\circ} m sec^{-1}$ bzw. $K^{\circ} m sec^{-1}$

dargestellt. Hierbei sind für den durch wandernde Wellen erzeugten sensiblen Energietransport jeweils die Felder mit südwärts gerichtetem Fluß schraffiert und für den totalen Transport jene mit nordwärts gerichtetem Wärmefluß.

Wie bereits in den Kapiteln 3.1.2. und 3.2.2. festgestellt wurde, finden die maximalen, durch wandernde Wellen erzeugten Wärmetransporte über den Breitenkreisen 40°N und 50°N statt. Aus diesem Grund werden hier auch nur diese beiden speziellen Breitenkreise allein zur Untersuchung herangezogen.

Bei einer ersten Inspektion der Bilder für den durch wandernde Wellen erzeugten Transport fällt eine sehr fleckhafte, unzusammenhängende Verteilung der Maxima auf der Zeit-/Raumbene auf. Jedoch, wie ein Vergleich mit den Bildern des jeweils dazugehörenden totalen Transportes ergibt, sind diese eng an eine Änderung der Richtung und vor allem des Betrages der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente geknüpft. Die Fleckenhaftigkeit der Verteilung jener Maxima hat offenbar seine Begründung darin, daß die wandernden Wellen der Temperatur und der meridionalen Windkomponente meistens in Phase liegen und so das Produkt beider, also der Transport, sehr schnell zu großen Beträgen ansteigt und auch wieder abfällt, wenn größere zeitliche und zonale Abweichungen von T und v von den entsprechenden Mittelwerten auftreten.

Im zonalen und monatlichen Mittel weist der durch wandernde Wellen hervorgerufene meridionale Wärmefluß im Januar ein Maximum über 40°N auf, während der Betrag über 50°N etwas kleiner ausfällt (s. Abb. 3). Eine Analyse seiner täglichen und zonalen Veränderlichkeit für den Januar 1975 (s. Abb. 20, 21 für 40°N und Abb. 22, 23 für 50°N) weist für beide Breitenkreise eine hohe Anzahl von relativen Transportmaxima mit großen Beträgen an nordwärts gerichtetem Fluß aus, die sich besonders auf die Bereiche über dem mittleren Pazifik, Nordamerika und den Westatlantik konzentrieren. Vergleicht man nun den durch wandernde Wellen erzeugten Wärmefluß mit dem dazugehörigen totalen Transport (auf Abb. 21 und 23 dargestellt), dann ergeben sich zwei für das winterliche Transportbild typische Merkmale:

Ober Nordamerika liegt das winterliche Kältezentrum, welches in Abb. 21 und 23 durch eine zeitlich relativ konstante Strömungsrichtung charakterisiert ist. Dieses Kältezentrum steht in engem Kontakt mit den relativ dazu sehr warmen Luftmassen über dem Pazifik und dem Atlantik, so daß sich an den Flanken dieses Kältezentrums ein extrem hoher zonaler Temperaturgradient ausbildet. Jede ausgeprägtere Störung im Feld der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente führt damit gleichzeitig zu hohen Temperaturänderungen, welche im Zusammenwirken mit der Abweichung von v nach den eingangs geschilderten Prinzipien einen maximalen, nordwärts gerichteten Transport verursacht. So kann hier der Wärmefluß innerhalb eines Tages um über $150 \text{ grad m sec}^{-1}$ ansteigen, also um ca. 50 % des höchsten, im ganzen Jahr 1975 durch wandernde Wellen getätigten Transportbetrages.

Im Bereich der Flanken des weiteren Kältezentrums über Sibirien, das auf den Abb. 21 und 23 ebenfalls durch die dort zeitlich recht konstante Strömungsrichtung zu erkennen ist, sind die durch wandernde Wellen erzeugten Transporte wesentlich geringer, da dort die zonalen Temperaturgegensätze viel weniger ausgeprägt sind.

Ober dem Pazifik zeigt sich ein anderer Zusammenhang zwischen der Zirkulation und dem durch wandernde Wellen hervorgerufenen Wärmefluß. Hier stellen sich die Transportmaxima weniger an den Flanken eines stationären Troges ein, sondern sie sind verursacht durch großräumige Kaltluftvorstöße, die ein zeitlich oft wechselndes Vorzeichen der meridionalen Windkomponente zur Folge haben (s. Abb. 21 und 23). Ein Vergleich der Abb. 20 und 21 miteinander zeigt, daß über dem mittleren Pazifik besonders auf dem 40. Breitenkreis die maximalen Transporte gerade in dem Bereich der stärksten zeitlichen Veränderlichkeit der meridionalen Windkomponente auftreten.

Für den durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Wärmetransport sind im Winter also vor allem

1. Schwankungen der Windgeschwindigkeit, verbunden mit einem extrem starken zonalen Temperaturgradienten an den Flanken des Kältezentrums über Nordamerika und

2. arktische Kaltluftvorstöße über dem mittleren Pazifik maßgebend, welche eine häufige Richtungsänderung der meridionalen Windkomponente und große zeitliche Temperaturänderungen zur Folge haben.

Es handelt sich also im Winter vor allem um Transporte, bei denen die Abweichungen der Temperatur und der meridionalen Windkomponente durch den indirekten Einfluß von stehenden Wellen extrem verstärkt werden.

Im beginnenden Frühjahr schwächt sich das Kältezentrum über Nordamerika deutlich ab, und der Transport erfolgt jetzt auch dort im wesentlichen durch gelegentliche Kaltluftvorstöße, ähnlich wie im Winter über dem Pazifik. In gleicher Weise entstehen jetzt zusätzlich über Asien maximale, durch wandernde Wellen erzeugte Transporte besonders über 40°N , weil sich dort ebenfalls das stationäre Kältehoch aufzulösen beginnt. Diese zusätzlichen Wärmeflüsse über Asien führen offenbar zu dem Transportmaximum im monatlichen und zonalen Mittel über 40°N im März (s. Abb. 3).

Zwischen den Monaten März und Mai erfolgt im zonalen und monatlichen Mittel der stärkste Abfall der Transportwerte im Jahresgang. Während der März noch stark von der winterlich intensiven Zirkulation in der Atmosphäre geprägt ist, zeigt der Mai bereits eindeutig die Eigenschaften des sommerlichen Transportbildes. Damit ist der April, in welchem zwischen März und Mai der stärkste Transportabfall zum Sommer hin eintritt als typischer Vertreter des Übergangsstadiums zwischen dem winterlichen und sommerlichen Bild des durch wandernde Wellen erzeugten meridionalen Wärmeflusses einzustufen. Er soll daher hier genauer beschrieben werden.

Über 40°N (s. Abb. 24 und 25) verschwinden die im März immer noch verstärkt auftretenden Transporte über Asien fast ganz. Sie sind nur noch über 50°N (s. Abb. 26 und 27) mit einigen wenigen Maxima vertreten. Der für den Sommer charakteristische Wärmerücken über Asien hat sich bereits über 40°N nach Norden hin ausgedehnt (s. VOGL, 1979, Abb. 3.8.) und damit ist dort

auch die Frontalzone der Subtropen- und Polarfront nach Norden verschoben, so daß eine erkennbare Tiefdrucktätigkeit mit den damit verbundenen, durch wandernde Wellen erzeugten Wärme-flüssen nur noch in geringem Maße über 50°N auftritt.

Ebenfalls lassen über dem 40. Breitenkreis in der zweiten Hälfte des April die im Winter maximalen Flüsse über dem mittleren Pazifik an Intensität fast ganz nach, während sie über 50°N weiterhin wenigstens noch mit einzelnen Transportmaxima vertreten sind.

Vergleicht man hier das Bild des totalen Transportes über 40°N (s. Abb. 25) mit dem über 50°N (s. Abb. 27), so ist anhand der konstanten Strömungsrichtung über 40°N von der zweiten Hälfte des April an ein bereits gut ausgeprägter Hochdruckrücken zwischen ca. 120°W und 165°W auszumachen, welcher eindeutig mit der über den kalifornischen Wüstengebieten Nordamerikas einsetzenden Erwärmung der Atmosphäre im Zusammenhang steht.

Über 50°N ist die zeitliche Veränderlichkeit der meridionalen Windkomponente noch wesentlich größer, und sie bleibt bis zum Ende des Monats bestehen. Der Hochdruckeinfluß wirkt sich hier im April noch nicht aus.

Über dem Ostteil Nordamerikas ist in den Abb. 25 und 27 eine ganz ausgeprägte zeitliche Variation der meridionalen Windkomponente feststellbar, welche mit den im April noch immer über 40°N hinaus nach Süden wandernden Grönlandtiefs zusammenhängt und dort maximale Transporte durch wandernde Wellen erzeugt.

Prinzipiell läßt sich der Typus des meridionalen, durch wandernde Wellen erzeugten Wärme-flusses für den Übergangsmonat April folgendermaßen darstellen:

Die Zirkulation über den 40. Breitenkreis wird zum Sommer hin immer mehr durch den Einfluß von Hochdruckrücken über Asien und der Westküste Nordamerikas geprägt, in denen stationäre Wind- und Temperaturverhältnisse bemerkenswerte, durch wandernde Wellen hervorgerufene Transporte verhindern.

Über 50°N ist der Einfluß der Westwinddrift über dem gesamten

Breitenkreis noch vorhanden, jedoch schwächen sich auch hier, offenbar aufgrund eines zum Sommer hin verringernden meridionalen Temperaturgradienten die Transporte schon sichtbar ab.

Wandernde Wellen erzeugen aber weiterhin hohe Wärmeflüsse an der Ostküste Nordamerikas im Bereich der Grönlandtiefausläufer.

Bereits in der zweiten Hälfte des Mai tritt über 40°N auch an der Ostküste Nordamerikas ein deutlicher Rückgang der Transporte ein, und in den Sommermonaten Juni, Juli und August bis in den September hinein schwanken die Wärmeflüsse durch wandernde Wellen nur noch wenig um $0^{\circ}\text{C m sec}^{-1}$, während über 50°N noch stärkere Flüsse über Nordamerika auffindbar sind. Eine Inspektion der Wetterkarten dieser Zeit zeigt, daß der ganze 40° Breitenkreis im Einflußbereich des sommerlichen Hochdruckgürtels liegt, der eine derart stationäre Verteilung der Strömung und Temperatur verursacht, daß keine wandernden Wellen der Temperatur und des Geopotentials mit großer Amplitude mehr entstehen.

Als besonders typisch für die Gestaltung des sommerlichen Transportbildes wurde hier der Monat August ausgewählt (s. Abb. 28 - 31). Die Abb. 29 läßt den oben erwähnten stationären Strömungsverlauf über 40°N gut erkennen und die Abb. 28 den damit verbundenen, außerordentlich geringen, durch wandernde Wellen erzeugten Wärmefluß.

Der 50° Breitenkreis gerät im August bereits wieder in den Einflußbereich, der sich allmählich verstärkenden Westwinddrift, welche allerdings vorerst noch recht langsam wirksam wird. Die Strömung weist einen zeitlich wesentlich stärkeren Richtungswechsel auf als über 40°N (s. Abb. 31), jedoch sind die Schwankungen des Betrages der meridionalen Windkomponente noch gering, so daß die Transporte (s. Abb. 30) allgemein zwar erkennbar aber nicht wesentlich größer sind als über 40°N .

Der Herbstmonat Oktober zeichnet sich besonders über dem 50° Breitenkreis dadurch aus, daß er, was die monatlichen und zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen erzeugten Transportes (s. Abb. 3b) betrifft, zentral in die herbstliche ste-

tige Zunahme der Transportbeträge vom Sommer zum Winter einzustufen ist.

Das Bild des totalen Transportes (s. Abb. 33) weist für den Oktober auf eine rege Zyklontätigkeit und eine recht hohe zonale Verlagerungsgeschwindigkeit dieser Wirbel über dem gesamten Breitenkreis hin. Eine Ausbildung von stationären Trögen und Rücken im Geopotentialfeld, wie sie dann langsam im November und Dezember vor sich geht, ist über 50°N noch nicht erkennbar. Eine recht große Anzahl von Transportmaxima über allen Längengraden und vor allem ein kaum durch südwärts gerichtete Flüsse unterbrochenes Feld von positiven Transporten in der Raum-/Zeitebene des durch wandernde Wellen hervorgerufenen Transportes (s. Abb. 32), weist darauf hin, daß die wandernden Wellen der Temperatur und der meridionalen Windkomponente gut in Phase sind. Während also im Frühjahr der starke Transportabfall zum Sommer hin im wesentlichen durch die schnelle Ausbildung von Wärmerücken über Asien und Kalifornien verursacht ist, scheint sich die inverse Entwicklung zum winterlichen Strömungsbild viel kontinuierlicher zu vollziehen. So stellt auch VOGL (1979) in ihrer Arbeit für den Oktober allgemein größere Amplituden der hohen Wellenzahlen des Geopotentials fest als für den April. Als Folge dieser Gegebenheiten erweist sich dann auch der Anstieg des durch wandernde Wellen erzeugten Wärmetransportes im Herbst zumindest über 50°N als stetiger als der rapide Abfall im Frühjahr (vom März/April auf Mai).

In den Monaten November und Dezember entwickelt sich dann langsam wieder das durch den Januar als typisch beschriebene winterliche Bild des meridionalen Wärmeflusses. In der Zirkulation und der damit verbundenen, durch wandernde Wellen hervorgerufenen Transporte lassen sich mehr und mehr die Auswirkungen von zeitweisen Vorstößen arktischer Kaltluft nach Süden erkennen. Dann bildet sich als erstes in der zweiten Hälfte des November das Kältezentrum über Nordamerika stärker aus und erzeugt bedeutende Transportmaxima an seinen Flanken, welche im November über 40°N und im Dezember über 50°N im monatlichen und zonalen Mittel wesentlich zu den extrem großen nordwärts gerichteten Flüssen beitragen (s. Abb. 3).

Zusammenfassung:

1. Wie abschließend an die Besprechung der Abb. 2 bereits gesagt wurde, finden maximale, durch wandernde Wellen hervorgerufene Transporte an den Flanken von Tiefdruckwirbeln statt und können durch den Einfluß der stehenden Wellen verstärkt oder abgeschwächt werden.
Dieser Zusammenhang ist für das winterliche Transportbild charakteristisch. Die durch wandernde Wellen hervorgerufenen Transporte an den Flanken des stationären Kältezentrums über Nordamerika werden durch die in diesem Kältetrog vorhandenen stehenden Wellen der Temperatur und des Geopotentials zu extrem großen Beträgen verstärkt. Weitere maximale, nordwärts gerichtete Flüsse ergeben sich durch arktische Kaltluftausbrüche in den an sich stationären Wärmerücken über dem mittleren und östlichen Pazifik hinein.
2. In Hochdruckgebieten werden wandernde Wellen hinsichtlich ihrer Amplitude stark abgeschwächt und durch sie hervorgerufene größere Transporte verhindert. So ist für das Frühjahr besonders charakteristisch, daß vor allem über 40°N der sommerliche Hochdruckgürtel schnell an Einfluß gewinnt und der Transport dort stark abfällt.
3. Während im Sommer die durch wandernde Wellen erzeugten Transporte über 40°N aufgrund der stationären Hochdruckwetterlagen über dem gesamten Breitenkreis vollkommen unbedeutend sind, wird über 50°N im Bereich der dort wirksamen, wenn auch geschwächten Westwinddrift der Wärmefluß noch erkennbar aufrecht erhalten.
4. Der Anstieg der Transportbeträge geht im Herbst über 50°N kontinuierlicher vor sich als ihr Abfall im Frühjahr.
Das liegt offenbar daran, daß sich die stationären, winterlichen Kältezentren nicht so schnell wieder ausbilden, wie sie sich im Frühjahr auflösten. Somit können die durch wandernde Wellen erzeugten Transporte innerhalb einer sich recht stetig verstärkenden Westwinddrift über dem gesamten Breitenkreis kontinuierlich zunehmen.

4. ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN DES MERIDIONALEN TRANSPORTES VON SENSIBLER ENERGIE IM 200 MB-NIVEAU IM JAHRE 1975

Während die globalen Strömungsvorgänge der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre einen sichtbaren Zusammenhang zwischen dem 850 mb-Niveau und dem 200 mb-Niveau zeigen, ist die Temperaturverteilung auf diesen beiden Druckflächen jedoch so verschieden, daß sich für den Ablauf und die Eigenheiten des meridionalen Wärmetransportes bedeutende, prinzipielle Unterschiede ergeben und dies, obwohl sich entlang der Vertikalen im zonalen Mittel gerade in diesen beiden Niveaus maximal große solcher Transporte bestimmen lassen. Daher erfolgt die Besprechung der Ergebnisse für beide Niveaus getrennt.

Es soll für die 200 mb-Fläche nach der gleichen Gliederung vorgegangen werden, so daß die Unterkapitel von Nr. 4 jenen von Nr. 3 entsprechen.

Ebenso ist die Abfolge der ausgewählten Abbildungen, die für das 200 mb-Niveau erstellt wurden, die gleiche, wie jene für die 850 mb-Fläche, so daß auf eine erneute Legende verzichtet werden kann.

4.1. DIE MONATLICHEN UND ZONALEN MITTELWERTE DES MERIDIONALEN TRANSPORTES SENSIBLER ENERGIE IM 200 MB-NIVEAU

Die zonalen Mittelwerte des Transportes im Ablauf des Jahres 1975, hervorgerufen durch stehende Wellen, sind in der Abb. 34a und die monatlichen und zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen erzeugten Flusses in der Abb. 34b dargestellt.

Allgemein ist zu beobachten, daß die Transporte durch stehende sowie durch wandernde Wellen nahezu gleiche Größenordnungen besitzen wie im 850 mb-Niveau. Das könnte fälschlicherweise zu der Vermutung führen, daß in beiden Druckflächen sich die meridionalen Transporte sensibler Energie auch auf ähnliche Grundursachen zurückführen lassen. Das ist jedoch nicht der Fall, wie auch ein Vergleich der Wärmeflüsse durch stehende Wellen für beide Druckflächen in den einzelnen Jahren 1967 - 1976 für Januar und Juli zeigt, wo sich von Jahr zu Jahr unterschiedlich

große Differenzen zwischen beiden Niveaus bemerkbar machen (s. SPETH, OSTHAUS, 1978, Abb. 136 - 145).

4.1.1. Die zonalen Mittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im 200 mb-Niveau

Der Jahresgang der Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen ist in Abb. 34a wiedergegeben.

Führen die stehenden Wellen im 200 mb-Niveau zwar sensible Energie mit ähnlich großen Beträgen über die Breitenkreise hinweg wie in der 850 mb-Fläche, so sind doch im Jahresgang bedeutende Unterschiede vorhanden.

Negative Werte treten nur im Winter über 20°N und im Sommer über 60°N auf, sonst ist der Transport überall und in jedem Monat nach Norden gerichtet.

Die Maxima im Winter finden sich in 200 mb- ebenso wie in der 850 mb-Fläche nahe von 50°N , jedoch sind sie weniger intensiv. Im Sommer sind die Transportbeträge vor allem über den mittleren und niederen Breiten größer, so daß der Jahresgang zwar erkennbar, jedoch nicht so deutlich ausgeprägt ist wie im 850 mb-Niveau.

Wie anhand der zonalen Veränderlichkeit des Transportes noch eingehend beschrieben wird, liegt die wesentliche Ursache für den Transport sensibler Energie im 200 mb-Niveau in der Wechselwirkung zwischen Stratosphäre und Troposphäre. Dadurch werden zonale Temperaturgegensätze erzeugt, wie sie in den bodennahen Schichten durch unterschiedlich große Erwärmung und Abkühlung der Kontinente verglichen mit den Meeren entstehen. Diese Temperaturabweichungen vom zonalen Mittelwert, die für den meridionalen Wärmefluß durch stehende Wellen verantwortlich sind, richten sich jedoch nach ganz anderen Gesichtspunkten als in der 850 mb-Fläche und sie sind über dem gleichen Ort sogar häufig von umgekehrten Vorzeichen.

Beachtet man die Phasendifferenzen der stehenden Wellen für

die ersten drei Wellenzahlen der Temperatur und des Geopotentials bzw. des sich daraus ergebenden, meridionalen geostrophischen Windfeldes, so sind daraus im wesentlichen die Lage der Maxima und die Südwardstransporte, verursacht durch stehende Wellen, erklärbar.

Im Winter über 20°N (s. SPETH, OSTHAUS, 1978, Abb. 129) beträgt die Phasendifferenz der Welle mit der Wellenzahl 1 des Geopotentials und der Temperatur nahezu Null. Die Wellen der Zahlen 2 und 3 des Geopotentials sind um etwa $1/4$ der Wellenlänge nach Westen hin gegen die Temperaturwellen verschoben, was zu maximalen negativen Transporten führt. Über 50°N liegen jedoch alle drei Wellen des Geopotentials $1/4$ bis $1/2$ der Wellenlänge östlich von jenen der Temperatur, so daß die Transporte, getätigt durch diese Wellen, im zonalen Mittelwert zwischen maximalen Nordwärtsflüssen und Null liegen. So erklärt sich die Lage der stärksten Flüsse über 50°N im Winter.

Im Frühjahr und Herbst findet die Wechselwirkung von Stratosphäre und Troposphäre, die im Winter über 40°N und 50°N zu maximalen Transporten führte, aufgrund der nördlicheren Lage der Polar- und Subtropenfront im wesentlichen über 60°N statt. So finden sich in der ersten Hälfte des Frühjahrs und der zweiten Hälfte des Herbstes über dem 60. Breitenkreis sowohl die stärksten zonalen Temperaturgegensätze sowie eine den maximalen Nordwärtsfluß erzeugende Phasendifferenz zwischen den Wellen der Temperatur und des Geopotentials (s. VOGL, 1979, Abb. 3.38 und 3.35).

Im Sommer nehmen allgemein die meridionalen Windgeschwindigkeiten ab. Die Breitenkreise 20° bis 50°N verlaufen vorwiegend innerhalb der Troposphäre. Für den 40. und 50. Breitenkreis ergibt sich ein relativ hoher zonaler Temperaturgegensatz zwischen der stark erwärmten höheren Troposphäre über Südasien und den vergleichsweise relativ kalten übrigen Gebieten. Dieser Einfluß ist für den 60. Breitenkreis nicht mehr festzustellen.

Vergleicht man die Amplitude der ersten drei Wellen der Temperatur miteinander (s. SPETH, OSTHAUS, 1978, Abb. 189), so ist deutlich zu erkennen, daß die Wellenzahl 1 über den niederen

und mittleren Breiten die größte Amplitude aufweist, welche über 65°N wesentlich geringer ist.

Auch sind im Juli die maximalen Transporte über 30°N zu finden.

Zusammenfassung:

1. Der Jahresgang des durch stehende Wellen erzeugten Transportes im 200 mb-Niveau ist deutlich geringer ausgeprägt, als der auf der 850 mb-Fläche.
2. Im Winter, Frühjahr und Herbst bewirken vor allem in den mittleren und höheren Breiten starke Nord- und Südströmungen im Bereich der Starkwindbänder sowie hohe Temperaturgegensätze zwischen Troposphäre und Stratosphäre maximale nordwärts gerichtete Flüsse.

Im Sommer sind vor allem über den mittleren Breiten die zonalen Temperaturgegensätze wesentlich geringer, da hier die Stratosphäre nur noch selten Einfluß auf die Temperaturverteilung nimmt. Der durch stehende Wellen erzeugte Transport verringert sich. Lediglich über 30°N und 40°N führt die relativ warme Troposphäre über dem asiatischen Hitzetief noch zu recht hohen meridionalen Wärmeflüssen.

3. Das ganze Jahr über sind trotz der komplizierten Wechselwirkung zwischen Stratosphäre und Troposphäre die Wellen der Temperatur so gegen die des Geopotentials verschoben, daß der meridionalen Wärmetransport im zonalen Mittelwert vorwiegend nach Norden gerichtet ist.

4.1.2. Die zeitlichen und zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Wärme im 200 mb-Niveau

Die in diesem Kapitel behandelten Transporte sind in der Abb. 34b dargestellt.

Während für die durch stehende Wellen hervorgerufenen Flüsse vor allem die zonale Temperaturverteilung maßgebend war, hat für den meridionalen Wärmetransport durch wandernde Wellen vor allem der meridionale Temperaturgradient Bedeutung.

Besonders über den höheren Breiten treten im 200 mb-Niveau häufig wärmere Temperaturen im Norden auf als im Süden. Der Transport durch wandernde Wellen auf der 200 mb-Druckfläche ist also

wesentlich komplizierter als der in bodennahen Schichten. Es treten durchaus Südwärtsflüsse sensibler Energie in Erscheinung, die geeignet sind, positive Transporte ganz oder weitgehend zu kompensieren. Die Windgeschwindigkeiten und damit auch die zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen Windfeldes ist besonders in dem Höhenintervall mit Strahlströmen (Jetstreams) wesentlich größer als im 850 mb-Niveau. Die Tatsache, daß trotzdem im zonalen und zeitlichen Mittelwert überwiegend positive Werte entstehen, ist dem Zusammenhang von Trögen und Rücken im Geopotential- und Temperaturfeld zu verdanken.

Höhenrücken gehen allgemein mit Vorstößen potentiell warmer troposphärischer Luft nach Norden einher, während Tröge meist stratosphärische Luft enthalten.

Dabei sind die wandernden Wellen des Geopotentials größtenteils gegenüber jenen der Temperatur zwischen Null und einem geringen Bruchteil der Wellenlänge nach Osten verschoben, was dazu führt, daß im zonalen Mittelwert überwiegend leicht positive Transportbeträge resultieren.

Lediglich über 20°N , wo der meridionale Temperaturgradient im 200 mb-Niveau außerordentlich gering ist, findet man im Jahresgang der zonalen und monatlichen Mittelwerte im Winter negative Flüsse. Ein Vergleich mit den 10-jährigen Mittelwerten, die von OORT und RASMUSSEN (1971) gewonnen wurden, zeigt jedoch, daß die Werte im Jahresgang in niederen Breiten von Jahr zu Jahr sehr verschieden ausfallen und demnach die für 1975 beobachtbaren negativen Werte wahrscheinlich nicht von prinzipieller Bedeutung sind.

Nahe 50°N ist ein Jahresgang des Transportes durch wandernde Wellen kaum mehr erkennbar. Die maximalen Werte konzentrieren sich zwar im wesentlichen auf diesen Breitenkreis, sind jedoch von Monat zu Monat stark schwankend und eine allgemeine Abnahme des Flusses vom Winter zum Sommer ist nicht mehr feststellbar. Der Hauptgrund dafür, daß besonders über 50°N sowohl im Winter als auch im Sommer hohe Wärmeflüsse auftauchen, dürfte darin zu suchen sein, daß im Winter vor allem die Wechselwirkung von Stratosphäre und Troposphäre zu großen Transporten

durch wandernde Wellen führt, während im Sommer bei relativ hohen Windgeschwindigkeiten in der Nähe des Subtropenjets maximale Wärmeflüsse stattfinden, wobei bereits geringe Unterschiede in der Phasendifferenz der Temperatur- und Geopotentialwellen die Beträge im zonalen Mittelwert entweder rasch zunehmen lassen oder sie vermindern.

4.2. DIE ZONALE VERÄNDERLICHKEIT DES MERIDIONALEN TRANSPORTES DURCH STEHENDE WELLEN UND DER MONATLICHEN MITTELWERTE DES SENSIBLEN WÄRMETRANSPORTES DURCH WANDERENDE WELLEN IM 200 MB-NIVEAU

Die zonale Veränderlichkeit des durch stehende und wandernde Wellen hervorgerufenen Transportes ist in den Abb. 35 - 39 und 40 - 43 dargestellt.

Die durch stehende Wellen erzeugten Transporte sind für die Breitenkreise 20°N , 30°N , 40°N , 50°N und 60°N abgebildet und jene, getätigt durch wandernde Wellen, für die Breitenkreise 30°N , 40°N , 50°N und 60°N . Die zusätzlichen Abbildungen enthalten wieder die Wertekurven für die Flüsse durch stehende und wandernde Wellen sowie für deren Summe für einige ausgewählte Monate und Breitenkreise zusammen mit den Kurven für die Beiträge der restlichen Glieder des Transportes in der jeweiligen Darstellung darunter.

4.2.1. Die zonale Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im 200 mb-Niveau

In diesem Kapitel werden die Darstellungen mit den Nummern 35 - 37 und 40 - 43 untersucht.

Vergleicht man die zonale Veränderlichkeit der Transporte, die durch stehende Wellen hervorgerufen werden, im 200 mb-Niveau mit jenen auf der 850 mb-Fläche, dann fällt vor allem auf, daß über dem 20. und 30. Breitenkreis in 200 mb (s. Abb. 35) die starken negativen Transportwerte fehlen, welche in

bodennahen Schichten - wie bereits erwähnt - durch den Einfluß der Wüstengebiete über Afrika und Asien im Sommer erzeugt werden. Es treten dort im Gegenteil häufiger Maxima mit positiven Werten in Erscheinung. Der Jahresgang richtet sich prinzipiell invers zu jenem in der 850 mb-Fläche ein, wenn er auch von wesentlich geringerer Amplitude ist. Der Einfluß der Bodentemperatur spielt also, wie zu erwarten ist, in den höheren Druckflächen keine Rolle mehr. Wesentlich sind in den niederen Breiten vielmehr die langen atmosphärischen Wellen im Temperatur- und im Geopotentialfeld für den Transport, wobei die zonalen Temperaturgegensätze relativ gering bleiben. Höhere Werte stellen sich nur im Winter ein, wo die Beträge der meridionalen Windkomponenten höher liegen als im Sommer.

Über dem 30. Breitenkreis (s. Abb. 35, unten) fallen besonders im Sommer starke Transporte über Asien auf, wobei die positiven Werte überwiegen. Hier zeigt sich der Einfluß der erwärmten Atmosphäre über dem Südteil Asiens. Die Obergrenze der Troposphäre wird durch die starke Erwärmung der bodennahen Luftschichten über dem sommerlichen, asiatischen Hitzetief derart angehoben, daß im 200 mb-Niveau über diesem Gebiet die Temperaturen wesentlich höher liegen als über den angrenzenden Regionen. Je nach Korrelation dieser zonalen Abweichung der Temperatur mit der meridionalen Windkomponente treten hier also relativ große Transportmaxima mit negativem oder positivem Vorzeichen auf. Im Breitenmittelwert ist die Temperatur durch die warme Atmosphäre über Südasien derart angehoben, daß alle Temperaturen über den restlichen Längengraden als negative zonale Abweichungen erscheinen und somit dort der Transport jeweils das entgegengesetzte Vorzeichen trägt wie die meridionale Komponente des Windes (s. auch Abb. 40).

Im Winter und in den Übergangsmonaten verursacht nur ein Trog über dem Pazifik und der Ostküste Asiens, der Luft der Stratosphäre enthält, eine größere zonale Abweichung der Temperatur vom Breitenmittelwert. Über den restlichen Längengraden findet man zu diesen Zeiten nur relativ kalte Troposphärentemperaturen. Die Temperaturen innerhalb dieses einen Troges sind jedoch nicht so hoch, daß sie den Breitenmittelwert wesentlich

beeinflussen. Die stehenden Wellen der meridionalen Windkomponente sind überwiegend positiv mit jenen der Temperatur korreliert und hohe Transporte entstehen im Winter vor allem durch starke Strömungen in der Nähe der Jetstreams.

Über 40°N (s. Abb. 36, oben) zeigen sich im Winter und in den Übergangsmonaten im Gegensatz zu 30°N viel höhere Transporte und im Sommer treten neben den großen, positiven Beträgen über Asien auch über dem Atlantik und Nordamerika maximale Flüsse in Erscheinung.

Die Temperaturen der Stratosphäre innerhalb der beiden primären Trogbereiche über dem Westpazifik und über der Ostküste Kanadas und dem Atlantik im Winter, Frühjahr und Herbst liegen bereits wesentlich höher als über 30°N und zusammen mit der in den Rückenbereichen über der Westküste Nordamerikas und über Europa kalten Troposphäre stellen sich bedeutende zonale Temperaturgegensätze ein, welche im Zusammenwirken mit recht hohen Windgeschwindigkeiten maximale Transporte erzeugen.

Im Sommer verstärkt über 40°N neben den warmen Temperaturen über Asien die sehr kalte Troposphäre über dem Atlantik den zonalen Temperaturgegensatz in der Atmosphäre, wodurch zusätzlich intensive Flüsse zwischen 0° und 90°W hervorgerufen werden (s. auch Abb. 40).

Der 50. Breitenkreis (s. Abb. 36, unten) durchquert im Winter im 200 mb-Niveau drei bedeutende Tröge im Geopotentialfeld über

- 1) der Ostküste Asiens und dem westlichen Pazifik,
- 2) Nordamerika und dem Atlantik und
- 3) über Osteuropa, welche der 40. Breitenkreis nur im Süden berührt. Die Isothermen verlaufen jedoch dergestalt, daß über dem Ostatlantik, Europa und Asien relativ kalte Temperaturen herrschen, während sich warme Temperaturen im Mittel etwa von der Ostküste Asiens bis über Nordamerika und über den Westatlantik hin erstrecken. Dieses Zusammenwirken der stehenden Wellen der Temperatur und des Geopotentials erzeugt sowohl durch Phasenverschiebungen, als auch durch den wesentlichen Unterschied der Amplituden der Temperaturwellen und der Wellen

des Geopotentials gleicher Wellenzahl, daß die Wärmeflüsse im Januar, Februar und März hauptsächlich nach Norden gerichtet sind und wesentlich weniger als über 40°N durch negative Transporte kompensiert werden (s. auch Abb. 41).

Im April beginnend verliert die Stratosphäre an Einfluß und die Subtropenfront verlagert sich deutlich nach Norden, so daß sich in der zweiten Hälfte des Frühjahrs nur noch ein einziger im Innern warmer Trog über dem Pazifik bis über den 50. Breitengrad hinaus nach Süden erstreckt. Dazu gewinnen die höheren Wellenzahlen im Geopotentialfeld an Amplitude. Diese Veränderungen führen dazu, daß häufig negative Transporte verursacht werden, welche die positiven Beträge im Breitenmittelwert wesentlich stärker kompensieren als im Winter, was die starke Abnahme der durch stehende Wellen verursachten Wärmeflüsse zum Sommer hin einleitet, obwohl vom Absolutwert her betrachtet, die Transporte in der zonalen Verteilung noch beträchtlich sind (s. auch Abb. 42).

Im Sommer durchquert der 50. Breitenkreis im Mittel nur noch die Stratosphäre innerhalb des Troges über dem zentralen Pazifik. Die warmen Temperaturen über dem sommerlichen Hitzetief über Südasien, die für 30°N und 40°N von wesentlicher Bedeutung waren, haben über 50°N nur noch im Juli einen leichten Einfluß auf die zonale Temperaturverteilung. So führt im Sommer über dem 50. Breitenkreis vor allem eine allgemeine Abnahme der zonalen Temperaturgegensätze im Breitenmittelwert zu einer deutlichen Verringerung des Transportes, während die Transporte über 30°N und 40°N in dieser Jahreszeit erkennbar höher liegen.

Der Herbst zeigt ein sehr ähnliches Bild des meridionalen Flusses sensibler Energie wie das Frühjahr, wobei jedoch die relativen Transport-Maxima nicht so groß sind.

Der Jahresgang über dem 60. Breitenkreis (s. Abb. 37) ist viel deutlicher ausgeprägt als über den südlicheren Breiten.

Im Winter und in den Übergangsmonaten verläuft der Breitenkreis von ca. 150°E bis 30°W im 200 mb-Niveau durch die Stratosphäre hindurch und von 30°W bis 150°E durch die Troposphäre.

Im Winter zeigt sich ein Strömungsverlauf ähnlich wie über 50°N ,

was auch eine ähnliche zonale Verteilung des Transportes verursacht. Während jedoch über 50°N im Frühjahr die Amplituden der kürzeren Wellen im meridionalen Windfeld zunehmen und sich im Herbst die langen Wellen noch nicht wieder durchgesetzt haben, sind über 60°N nur im Sommer die kurzen Wellen von größerem Einfluß. Im März (s. auch Abb. 43) und November stellt sich die Strömung so ein, daß über Europa und Asien, also innerhalb der Stratosphäre, deutlich die Südkomponente des meridionalen Windfeldes überwiegt und innerhalb der Troposphäre zwischen dem Bering Meer die Nordkomponente, so daß das Produkt der stehenden Wellen im Temperatur- und im Windfeld zu überwiegend positiven Transporten im Breitenmittelwert führt. Daher verlagert sich das Maximum des meridionalen Wärmeflusses in diesen Monaten über 60°N .

In den Monaten April und Mai ist die zonale Temperaturverteilung einer viel stärkeren Variation unterworfen als über 50°N .

Während sich dort die kalte Troposphäre über den Atlantik, ganz Europa und Asien hinweg erstreckt, findet entlang des 60. Breitenkreises in 200 mb ein ständiger Wechsel zwischen Stratosphäre und Troposphäre statt. Dabei bleiben jedoch die zonalen Temperaturgegensätze gering, so daß der Breitenmittelwert des Transportes gegenüber 50°N stark abfällt. Im Sommer gewinnt zwar die Troposphäre über 60°N an Einfluß, jedoch bleibt die zonale Veränderlichkeit der Temperatur erhalten, so daß der Trog über dem Pazifik keine so bedeutende Abweichung der Temperatur vom Breitenmittelwert mehr zur Folge hat wie über 50°N und somit die Transporte an den Flanken des Troges viel geringer sind.

Diese Erscheinungen verursachen im wesentlichen den stärker ausgeprägten Jahresgang über 60°N verglichen mit jenem über den südlicher gelegenen Breiten.

Als Zusammenfassung über die Merkmale betreffend die zonale Veränderlichkeit des durch stehende Wellen hervorgerufenen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau sind die nachfolgenden wesentlichen Punkte aufzuführen:

1. Von der indirekten Auswirkung des sommerlichen Hitzetiefs über Südasien abgesehen, lassen sich keinerlei Einflüsse des Bodens auf die zonale Temperaturverteilung im 200 mb-Niveau

mehr feststellen. Der Wärmefluß ist deshalb auf dieser hoch gelegenen Druckfläche von der Land - Meerverteilung unabhängig.

2. Bestimmend für die zonale Temperaturverteilung und in der Korrelation mit dem zonalen Windfeld auch für den Transport, ist die Wechselwirkung von Stratosphäre und Troposphäre über den nördlichen Breiten im Winter und Sommer.
3. Über 20°N , 30°N und 40°N hat die Stratosphäre nur im Winter, Frühjahr und Herbst einen ausschlaggebenden Einfluß auf den Transport, während im Sommer die zonale Temperaturverteilung durch die warme Atmosphäre über dem asiatischen Hitzetief bestimmt wird. Dieser Einfluß ist so groß, daß über 30°N und 40°N gerade im Sommer größere, positive Transporte stattfinden als über den höheren Breiten und daher der Jahresgang dort viel weniger ausgeprägt ist als über 50°N und 60°N .

4.2.2. Die zonale Veränderlichkeit der monatlichen Mittelwerte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau

Die in diesem Kapitel behandelten Wärmeflüsse sind in den Abb. 38 und 39 sowie 40 - 43 bildlich dargestellt.

Vergleicht man die durch wandernde Wellen erzeugten Flüsse sensibler Energie im 200 mb-Niveau mit jenen auf der 850 mb-Druckfläche, so fällt vor allem auf, daß in der 200 mb-Fläche weitaus häufiger negative Transporte, also südwärts gerichtete Flüsse fühlbarer Wärme auftreten als im 850 mb-Niveau. Die negativen Beträge sind in der 200 mb-Fläche außerdem durchaus mit den positiven vergleichbar und haben daher im zonalen Mittelwert eine stärker kompensierende Wirkung auf die Nordwärtstransporte, so daß trotz der höheren Absolutwerte in der zonalen Veränderlichkeit die Breitenmittelwerte geringer ausfallen als im bodennahen 850 mb-Niveau.

Eine Phasenverschiebung der wandernden Wellen des Geopotentials um $1/4$ der Wellenlänge nach Osten gegen die der Temperatur ist

in den höheren Schichten der Atmosphäre nicht mehr die Regel. Vielmehr zeigt sich bei der Untersuchung der täglichen und zonalen Veränderlichkeit der Transporte durch wandernde Wellen, daß neben positiven Maxima von hoher Intensität meistens kompensierend Südwärtstransporte mit kaum niedrigeren Beträgen in Erscheinung treten.

Die Phasendifferenz der Geopotentialwellen zu den Temperaturwellen geht offenbar im Mittelwert mehr gegen Null als gegen $L/4$. Betrachtet man die Breitenkreise im einzelnen, so sind folgende, wesentliche Merkmale des Transportes sensibler Energie durch wandernde Wellen festzustellen:

Neben dem 20. Breitenkreis, der nur äußerst geringe Transporte dieser Art aufweist, zeichnet sich auch der meridionale Fluß über dem 30. Breitenkreis (s. Abb. 38, oben) allgemein durch deutlich niedrigere Beträge aus als der über den höheren Breiten. Das ist vor allem im Sommer zu beobachten, wo das 200 mb-Niveau über 30°N vorwiegend in der Troposphäre verbleibt, und die Subtropenfront so weit nördlich verläuft, daß nur geringe meridionale Temperaturgegensätze entstehen und auch die meridionalen Windkomponenten zu schwache Beträge aufweisen, um größere Flüsse durch wandernde Wellen zu erzeugen.

Lediglich im Winter, Frühling und in geringerem Umfang auch im Herbst treten großskalige Austauschprozesse im 200 mb-Niveau auch über den 30. Breitenkreis hinweg auf. Dadurch wird die Amplitude der wandernden Geopotential- und Temperaturwellen und damit der durch sie hervorgerufene Transport erhöht.

Die meridionalen Transporte sensibler Energie durch wandernde Wellen weisen über 40°N und 50°N ähnliche Charakteristika auf, nur im Sommer zeigen sich große Unterschiede.

Daher sollen die Wärmeflüsse über diese Breitenkreise gleichzeitig besprochen werden. Sie finden sich auf den Abb. 38, unten (40°N) und 39, oben (50°N).

Im Winter, Frühjahr und Herbst lassen sich im 200 mb-Niveau über dem 40. und 50. Breitenkreis im Geopotentialfeld drei große Tröge erkennen, die ihre Lage kaum verändern. Einer liegt über Nordamerika, einer über Europa und dem westlichen Asien und der dritte über Ostasien. Über dem Pazifik und dem Atlantik befinden

sich ausgeprägte Höhenrücken. Die Breitenkreise 40°N und 50°N verlaufen knapp südlich der Trogspitzen, liegen dort also im monatlichen Mittelwert genau in der Zone der stärksten Isohypsendrängung (s. OSTHAUS, 1978, Abb. 17a). Ebenso findet sich über diesen Gebieten der stärkste meridionale Temperaturgradient, der hier allerdings im Gegensatz zur 850 mb-Fläche positiv von Süd nach Nord gerichtet ist. Verständlicherweise finden an den Trogspitzen die stärksten täglichen Veränderungen der meridionalen Windkomponente sowie der Temperatur statt und so entstehen auch dort die maximalen Transporte durch wandernde Wellen, wobei allerdings neben jedem positiven Maximum ein weitgehend kompensierender Südwärtstransport zu finden ist.

Über beiden Breitenkreisen sind der das ganze Jahr über nahezu festliegende Bereich mit negativen Transportwerten zwischen ca. 120°W und 150°W und die starken positiven Beträge östlich davon auffällig. Diese Transporte werden im Einflußbereich des Höhenrückens über dem Ostpazifik und an der Südspitze des Troges über Nordamerika erzeugt, deren konstante Lage bis in das Frühjahr hinein die konstanten Vorzeichen des Transportes über diesem Gebiet bewirkt. Im Sommer sind es nicht mehr der Rücken und der Trog selbst, sondern es sind vor allem Austropfungsprozesse über Nordamerika, welche dort den Transport im gleichen Maße aufrecht erhalten, wie in den übrigen Jahreszeiten.

Wie bereits eingangs bemerkt wurde, weist der Fluß durch wandernde Wellen im Sommer einige wesentliche Unterschiede zwischen 40°N und 50°N auf. Diese beziehen sich vor allem auf das Gebiet über Europa und Asien. Während der 40. Breitenkreis im sommerlichen Mittelwert fast durch das Zentrum des Gebietes mit den warmen Temperaturen über Südasien im 200 mb-Niveau hindurch verläuft, liegt der 50. Breitengrad eindeutig nördlich davon.

Über diesem Gebiet nimmt die Temperatur also über 40°N häufig von Süd nach Nord zu, während sie über 50°N eindeutig abnimmt. Wie in der 850 mb-Fläche treten also über 50°N zwischen 0° und 150°W nur positive Flüsse durch wandernde Wellen auf, die wegen des stärkeren Windfeldes im 200 mb-Niveau auch im Sommer relativ hohe Beträge aufweisen. Über 40°N finden sich dagegen über weiten Bereichen Asiens negative Werte, welche die positiven Flüsse

offenbar so stark kompensieren, daß die Transporte im zonalen Mittelwert im Sommer deutlich geringer sind als über 50°N . Im August gerät der 50° . Breitenkreis jedoch bereits wieder in den Einflußbereich der Stratosphäre, so daß sich im zonalen Mittelwert über 50°N ein relatives Maximum des durch wandernde Wellen erzeugten Transportes herausbildet.

Das Bild des meridionalen Wärmeflusses über dem 60° . Breitenkreis (s. Abb. 39, unten) unterscheidet sich weitgehend von dem über 40°N und 50°N . Das rührt vor allem daher, daß sich der 60° . Breitenkreis sowohl im Winter als auch im Sommer im Einflußbereich der Stratosphäre befindet. Ein Vergleich der durch stehende und wandernde Wellen hervorgerufenen Transporte über 60°N zeigt, daß diese Flüsse sich vom Januar bis zum April über Alaska, Kanada und dem Atlantik gegenseitig kompensieren und über den restlichen Längengraden um ca. $1/4$ der Wellenlänge gegeneinander verschieben (s. auch Abb. 43). Weiterhin erweist sich, daß die maximalen Wärmeflüsse nicht wie über 40°N und 50°N im Bereich der Trogachsen des Geopotentialfeldes stattfinden, sondern an den Flanken der Tröge und Rücken. Beides deutet darauf hin, daß über 60°N vor allem groß- und mittelskalige Austauschprozesse zwischen Stratosphäre und Troposphäre die Transporte durch wandernde Wellen verursachen. Dabei geht folgendes vor sich:

Im Trog des Geopotentials über Nordamerika und dem Westatlantik herrschen im monatlichen Mittelwert sehr warme Temperaturen der Stratosphäre, und es bilden sich, der mittleren Strömung folgend, an seiner Westflanke ein Südwardtransport und an seiner Ostflanke über dem Atlantik ein Nordwardtransport sensibler Energie durch stehende Wellen aus. Dringt nun troposphärische Luft kurzzeitig von beiden Flanken her gegen das Innere des Troges vor und verursacht schließlich sogar eine Abtrennung seines südlichen Teiles von seinem kalten Nordteil (cut off process), so hat das vor allem eine sehr starke zeitliche Abweichung der Temperatur vom Mittelwert zur Folge, und die meridionale Komponente des Windes nimmt durch die verstärkte Drängung der Isohypsen zu. Dadurch kommt für die Abweichung der Temperatur vom zeitlichen Mittelwert gerade das entgegengesetzte Vorzeichen zustande, welches der zeitliche Mittelwert für diese Längengrade selbst inne hat, während das Vorzeichen der zeitlichen Abweichung der meri-

dionalen Windkomponente gleich jenem des Mittelwertes bleibt. Der Transport, der durch diesen Vorgang erzeugt wird, trägt also das entgegengesetzte Vorzeichen wie der durch stehende Wellen über dem gleichen Gebiet und so kommt es, daß sich beide Transportarten häufig gegenseitig aufheben. Im Sommer verläuft der 60. Breitenkreis weiterhin wechselnd durch Stratosphäre und Troposphäre hindurch, was über 50°N nur noch über Nordamerika der Fall ist. So steigt die Temperatur im Bereich der sommerlichen Tröge des Geopotentialfeldes über dem Atlantik, Westrußland, dem Pazifik und Kanada von Süd nach Nord an. Die Phasenverschiebung zwischen den wandernden Geopotential- und Temperaturwellen liegt offenbar in diesen Gebieten bei fast Null, so daß dort neben relativ hohen positiven Transporten immer kompensierende negative Flüsse in Erscheinung treten, wodurch keine maximalen Werte im zonalen Mittel zustandekommen.

Zusammenfassung:

1. Im Gegensatz zu den Transporten durch stehende Wellen treten die durch wandernde Wellen hervorgerufenen maximalen Flüsse im zonalen Mittelwert über der mittleren Breitenzone auf und verlieren über 20°N und 30°N stark an Intensität. Der Grund ist darin zu suchen, daß hohe Transportwerte durch wandernde Wellen vor allem durch hohe zeitliche Schwankungen der Temperatur wie des Windes bedingt sind, sich also in natürlicher Weise im Breitenmittelwert auf die jeweilige Lage der Polar- und Subtropenfront konzentrieren. Diese verlaufen das ganze Jahr über im Durchschnitt nördlich von 30°N .
2. Die absoluten Werte des Flusses sind im 200 mb-Niveau allgemein größer, als die in der 850 mb-Fläche, jedoch werden meistens die nordwärts gerichteten Flüsse durch starke negative Transporte kompensiert, so daß im zeitlichen und zonalen Mittelwert meist geringere Werte auftauchen als im 850 mb-Niveau.

Diese Wechselwirkung von positiven und negativen Transportwerten kommt vor allem im Winter durch den Einfluß der Stratosphäre und den dadurch umgekehrten meridionalen Temperaturgradienten zustande, so daß bereits eine geringe Änderung der Phasenverschiebung zwischen den Wellen der Temperatur und des Geopotentials im Bereich der Fronten bedeutende Auswirkungen auf den Wärmefluß hat. Daher ist über dem 50. Breitenkreis, der in allen Monaten im Mittel nahe der Subtropenfront liegt, kaum ein Jahresgang des Flusses erkennbar.

3. Während über 40°N und 50°N hohe Transporte vor allem in Regionen häufigster zeitlicher Veränderungen der meridionalen Windkomponente und maximalen meridionalen Temperaturgradienten auftreten, sich also vor allem durch eine starke zeitliche und zonale Veränderlichkeit auszeichnen, entstehen diese über 60°N überwiegend durch groß- und mittelskalige Austauschprozesse zwischen Stratosphäre und Troposphäre. Daher ist die zonale und zeitliche Variation über 60°N geringer als über den südlicheren Breiten.

4.3. DIE TÄGLICHE VERÄNDERLICHKEIT DER ZONALEN MITTELWERTE DES MERIDIONALEN TRANSPORTES SENSIBLER ENERGIE IM 200 MB-NIVEAU

Die tägliche Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen erzeugten Flusses ist auf den Abb. 44 - 47 und die des totalen Transportes auf den Abb. 48 - 51 dargestellt. Zur Erklärung der Abbildungen gilt das unter Kapitel 3.3. für die 850 mb-Fläche Gesagte.

4.3.1. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau

Die in diesem Kapitel zu behandelnden Transporte sind auf den Abb. 44 - 47 dargestellt.

Ein Gesamtüberblick über den Jahresgang der zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen hervorgerufenen Transportes läßt allgemein sehr starke zeitliche Schwankungen zwischen positiven und negativen Flüssen über allen Breitenkreisen erkennen. Daher erscheint hier eine Diskussion des Verlaufs der Nulllinie des Transportes im Jahresgang nicht angebracht.

Diese Untersuchung sowie die Beschreibung der Lage der maximalen nordwärts und südwärts gerichteten Transporte im Jahresgang wird im folgenden Kapitel anhand des totalen Wärmeflusses vorgenommen, wo sich aufgrund der darin enthaltenen Transportbeiträge durch die stehenden Wellen ein wesentlich klareres Bild ergibt.

Für die durch wandernde Wellen allein erzeugten Transporte scheint neben einer Untersuchung ihrer Abhängigkeit von der mittleren zo-

nen Abweichung der Temperatur und des Geopotentials bzw. der meridionalen Windkomponente eine Analyse der Häufigkeit der pro Monat auftretenden Transportmaxima im Jahresgang ergiebiger für das Verständnis der durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Flüsse sensibler Energie im 200 mb-Niveau zu sein.

Im Winter und Frühjahr sind die zeitlichen Schwankungen des Wärmeflusses durch wandernde Wellen wesentlich geringer als die des totalen Transportes, woraus zu ersehen ist, daß die Mischterme der Gleichung (4e) und (4g) die tägliche Variation der Flüsse durch wandernde Wellen vorwiegend verstärken. Das deutet auf hohe mittlere zonale Abweichungen der Temperatur und des meridionalen Windfeldes hin, wie sie im Winter und Frühjahr durch den Einfluß der Stratosphäre gegeben sind. Im Januar treten in der täglichen Variation der durch wandernde Wellen erzeugten Flüsse weit häufiger positive Werte auf, als für den totalen Transport. Das zeigt den wesentlichen Einfluß der stehenden Wellen auf den totalen Transport, während im Februar die negativen Transporte durch wandernde Wellen überwiegen.

Im Sommer gleichen sich die Amplituden der zeitlichen Schwankungen des totalen Transportes und des durch wandernde Wellen erzeugten weitgehend aneinander an. Zonale Gegensätze der Temperatur und der meridionalen Windkomponente sind also im zeitlichen Mittelwert sehr ausgeglichen. Erst im November beeinflussen sie wieder verstärkt den totalen Transport.

Wie für das 850 mb-Niveau im Kapitel 3.3.1., wurde auch für das 200 mb-Niveau eine Untersuchung der mittleren Zeitspannen zwischen den pro Monat auftretenden Maxima durchgeführt. Die entsprechenden Werte wurden wieder für 40°N und 50°N getrennt ausgezählt und berechnet und auf der Tabelle 2 sowie in der Grafik 2a dargestellt.

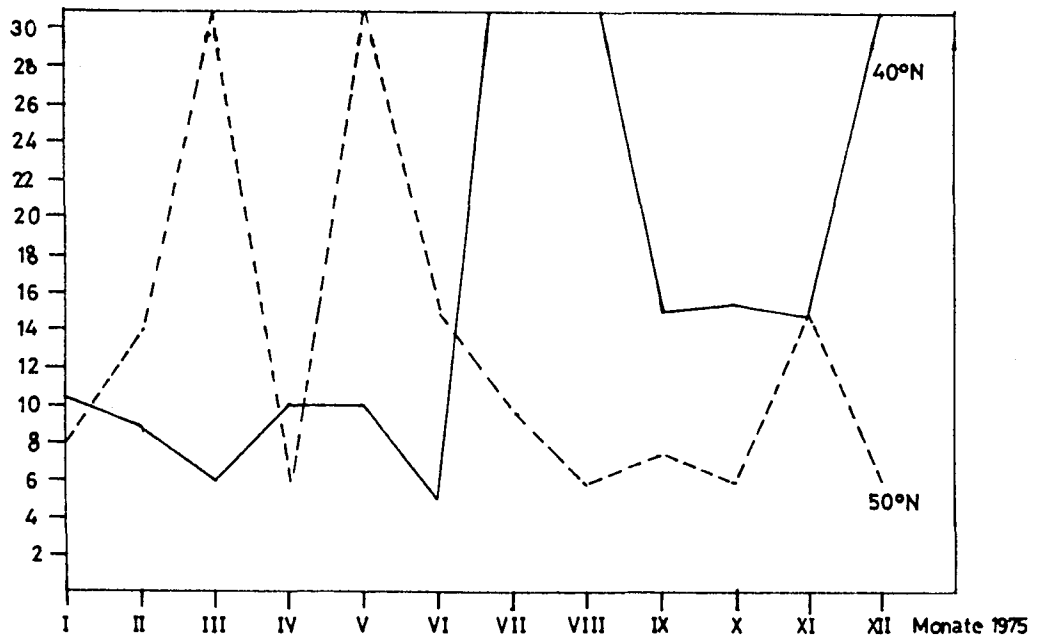
Ein Vergleich der Grafik 1a für das 850 mb-Niveau mit den Kurven 2a für die 200 mb-Fläche läßt eine prinzipielle Übereinstimmung der Perioden in zwei Punkten erkennen:

1. Wie auf der 850 mb-Fläche drückt sich auch im 200 mb-Niveau eine Gegenläufigkeit der Kurven für 40°N und 50°N aus; sind die Perioden für 40°N kurz, so sind sie für 50°N lang und umgekehrt. Dabei bewegen sich im Mittel auch hier die kurzen

Monat	Anzahl der pro Monat auftretenden Maxima		mittlere Periode zwischen zwei Maxima in Tagen	
	40°N	50°N	40°N	50°N
I	3	4	10.5	8
II	3	2	9	14
III	5	1	6	31
IV	3	5	10	6
V	3	1	10	31
VI	6	2	5	15
VII	0	3	-	10
VIII	0	5	-	6
IX	2	4	15	7.5
X	2	5	15.5	6
XI	2	2	15	15
XII	1	5	31	6

Tabelle 2

Zeitspanne
zwischen zwei
Maxima in Tagen



Grafik 2a Wertekurven zu Tabelle 2 aus Spalte 4 und 5

mittleren Zeitspannen zwischen zwei auftretenden Maxima im Bereich einer Woche, während die langen Perioden zwischen zehn Tagen und mehr als einem Monat schwanken.

2. Ganz offenbar besteht auch hier ein Zusammenhang der mittleren Frequenz der pro Monat erscheinenden Höchstwerte mit der Lage der Übergangszone zwischen subtropischen und polaren Luftmassen, die im 200 mb-Niveau im weitaus überwiegenden Teil durch den Gegensatz von Troposphäre und Stratosphäre im Bereich der Subtropenfront bestimmt ist. Dabei scheint ebenfalls wie im 850 mb-Niveau eine mittlere Zeitspanne zwischen zwei Maxima von ca. einer Woche charakteristisch für die in diesem Bereich auftretenden Perioden.

Im Gegensatz zur 850 mb-Fläche zeigt sich jedoch der Jahresgang jener Perioden im 200 mb-Niveau auffallend schwächer ausgeprägt und durch wesentlich stärkere Schwankungen von Monat zu Monat gestört.

In der ersten Hälfte des Jahres vom Januar bis zum Juni wechseln die für den Frontbereich charakteristischen kurzen Perioden von Monat zu Monat ständig zwischen 40°N und 50°N , wobei die kürzeren Zeitabschnitte überwiegend auf dem 40° . Breitenkreis zu erkennen sind. Vom Monat Juni ab kehrt sich das Bild um. Während vor allem im Hochsommer, jedoch auch deutlich sichtbar im Herbst und Dezember der 40° . Breitenkreis eindeutig südlich des Bereiches der Subtropenfront liegt, wie die durchweg langen mittleren Zeiträume zwischen zwei Maxima beweisen, befindet sich der 50° . Breitenkreis, von einer Unterbrechung im November abgesehen, durchweg im Bereich der Front.

Hier scheint sich ein zeitlich gegenüber den niedrigen Luftschichten verzögerter Jahresgang der mittleren Häufigkeit der pro Monat auftretenden Maxima über 40°N und 50°N anzudeuten. Er könnte für die zweite Jahreshälfte eine logische Erklärung darin finden, daß sich natürlich die polare Kaltluft im Herbst und Dezember zuerst am Boden nach Süden ausbreitet und erst später eine Verlagerung der Subtropenfront in Richtung auf den Äquator nach sich zieht.

Der Verlauf der beiden Kurven in der Grafik 2a zwischen dem Monat Januar und dem Monat Juni ist durch eine solche Überlegung im um-

gekehrten Sinne jedoch nicht zu deuten. Hier muß vielmehr die für das 200 mb-Niveau besondere Tatsache berücksichtigt werden, daß im Gegensatz zur 850 mb-Fläche neben positiven durch wandernde Wellen erzeugten Flüssen in der zeitlichen und zonalen Veränderlichkeit der Transporte immer auch beträchtliche negative Flüsse auftreten, die oft die positiven kompensieren. So ist für beide Breitenkreise die Länge der mittleren Periode zusätzlich dadurch bestimmt, wieviele der in der zeitlichen und zonalen Veränderlichkeit auftretenden Transportspitzen wieder durch südwärts gerichtete Flüsse über andere Längengrade kompensiert werden und damit im zonalen Mittelwert nicht in Erscheinung treten. Dies zieht natürlich eine starke Unruhe im Verlauf der Kurven in der Grafik 2a nach sich, wenn auch die mittlere Lage der Subtropenfront einen eindeutigen Jahresgang aufweist.

Ein Vergleich der Grafik 2a mit den monatlichen und zonalen Mittelwerten des durch wandernde Wellen erzeugten meridionalen Flusses sensibler Energie in Abb. 34b läßt - wie auf der 850 mb-Fläche - ebenfalls einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der im zonalen Mittel auftretenden Maxima und den größten nordwärts gerichteten Transporten in Abb. 34b erkennen.

Eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse dieses Kapitels erfolgt gemeinsam mit der für das folgende Kapitel 4.3.2..

4.3.2. Die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des totalen meridionalen Transportes sensibler Energie im 200 mb-Niveau

Wie in der 850 mb-Fläche gilt für die tägliche Veränderlichkeit des totalen Transportes, daß hier zusätzlich zu den durch stehende und wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Wärmeflüssen Mischglieder (Gleichung (4e) und (4g)) hinzutreten, die vor allem den Beitrag der Transporte durch wandernde Wellen verstärken oder abschwächen, bei zeitlicher Mittelung jedoch verschwinden. So sind im Prinzip die Abb. 48 - 51 repräsentativ für die Summe des Transportes durch stehende und wandernde Wellen, wobei der totale Transport jedoch zusätzlich eine Information über die Stärke der

mittleren zonalen Abweichung der Temperatur und der meridionalen Windkomponente bietet. Vergleicht man die tägliche Variation der Breitenmittelwerte des meridionalen Wärmeflusses im 200 mb-Niveau mit dem in der 850 mb-Fläche, so fällt vor allem auf, daß in 200 mb wesentlich häufiger negative Werte auftreten. Die Tatsache, daß im Winter und Sommer in nördlichen Breiten Südwardtransporte stattfinden, ist in den vorhergegangenen Kapiteln erklärt worden. Sie kommen durch die Wechselwirkung der Stratosphäre mit der Troposphäre zustande und betreffen sowohl den durch stehende wie auch den durch wandernde Wellen hervorgerufenen Wärmefluß. Ebenso sind die negativen Beträge, die im Sommer über 40°N auftauchen, durch den Einfluß der warmen Temperaturen über Asien erklärt.

Die Südwardtransporte über 20°N werden im Januar vor allem durch die stehenden Wellen hervorgerufen, was in der Darstellung der täglichen Variation zur Folge hat, daß der zeitliche Transportverlauf dort nur um geringe Beträge schwankt. Gegen Ende Januar und Anfang Februar tritt über den niederen Breiten bereits eine starke Veränderung der Zirkulation und des Temperaturfeldes auf, die zu relativ großen Südwardtransporten sensibler Energie durch wandernde Wellen Veranlassung gibt. Der Transport ist über 20°N im Februar wesentlich stärkeren zeitlichen Schwankungen unterworfen als im Januar, was offenbar eine Folge der Veränderungen der Zirkulation und des Temperaturfeldes aufgrund der zunehmenden Sonneneinstrahlung ist. Während im Winter und Frühjahr bis einschließlich April starke zeitliche Schwankungen über 40°N und 50°N auftreten, wird im Mai und Juni die tägliche Veränderlichkeit geringer. Im Juli, August und September verlagert sich die Zone größter zeitlicher Variation weit nach Norden (50°N und 60°N). Für diese Erscheinungen spielen zwei verschiedene Mechanismen eine Rolle. Im Winter und Frühjahr wird sensible Energie im 200 mb-Niveau, hauptsächlich sowohl in der Zone der Polar- und Subtropenfront, transportiert als auch durch Austauschprozesse zwischen der Stratosphäre und der Troposphäre. Es finden also maximale Flüsse von der Zone südlich der Fronten bis in die polaren Gebiete statt. Im Mai und im Sommer sind diese Austauschprozesse nur noch für den 60. Breitenkreis maßgebend, führen dort aber

aufgrund der sommerlichen Temperaturverteilung nur noch zu relativ geringen Transporten. Die maximalen Wärmeflüsse und deren größte zeitliche Veränderlichkeit konzentrieren sich jetzt wesentlich auf die Zone knapp südlich der Subtropenfront, da dort vor allem die größte zeitliche Variation der meridionalen Windkomponente auftritt. So verlagert sich im Sommer das Gebiet der stärksten zeitlichen Veränderlichkeit des Flusses mit maximalen Werten als relativ schmale Zone von Süden nach Norden entsprechend der mittleren Lage der Subtropenfront. Im Herbst ist gut zu erkennen, wie diese Verlagerung wieder nach Süden rückläufig wird, und im Dezember auch wieder die Austauschprozesse über 50°N und 60°N an Bedeutung gewinnen.

Es zeigen sich für das 200 mb-Niveau also viel kompliziertere Zusammenhänge als für die bodennahe Schicht (850 mb).

Zusammenfassung für die Kapitel 4.3.1. und 4.3.2.:

1. Wie sich bereits aus den vorhergehenden Kapiteln, die den Transport im 200 mb-Niveau behandeln, ergibt, zeigt auch die tägliche Variation der zonalen Mittelwerte zwei wesentliche Mechanismen auf, die den weitaus größten Teil des meridionalen Wärmeflusses auf der 200 mb-Fläche bestimmen. Zum einen transportieren stark ausgeprägte Süd- oder Nordströmungen in einer Zone knapp südlich der zonal gemittelten Lage der Subtropenfront auch bei einem relativ gering ausgeprägten zonalen Temperaturgradienten beträchtliche Wärmemengen über die entsprechenden Breitenkreise hinweg. Zum anderen verursachen starke Temperaturgradienten zwischen Regionen durch troposphärische oder stratosphärische Luftmassen im Bereich der Fronten und bei großräumigen Austauschprozessen nördlich und südlich davon maximale Wärmeflüsse. Beide Mechanismen ergänzen sich im Ablauf des Jahres derart, daß über den mittleren und hohen Breiten sowohl bei großer als auch bei geringer zeitlicher Variation der Isothermen und Isohypsen in den zonalen und monatlichen Mittelwerten immer relativ hohe positive meridionale Transporte sensibler Energie stattfinden und daher auch der Jahrgang des Wärmeflusses wesentlich geringer ausgeprägt ist, als in der 850 mb-Fläche.

2. Ein Vergleich der täglichen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen hervorgerufenen mit der des totalen Transportes zeigt die Wechselwirkung der unter Punkt 1.) genannten zwei Mechanismen auf den Jahresgang des totalen Flusses in den monatlichen Mittelwerten über den Breitenkreisen 40°N und 50°N .

Im Winter, wo der durch stehende Wellen erzeugte Wärmefluß recht groß ist, wird der durch wandernde Wellen hervorgerufene Transport im monatlichen Mittel trotz starker täglicher Veränderlichkeit niedrig gehalten, weil durch die Wechselwirkung von Stratosphäre und Troposphäre neben hohen positiven Flüssen häufig bedeutende südwärts gerichtete Transporte auftreten.

Im späten Frühjahr und Sommer dagegen nehmen die Transporte durch stehende Wellen aufgrund geringerer zonalen Gradienten von Geopotential und Temperatur ab. Hier fehlt der Einfluß der Gegensätze von Stratosphäre und Troposphäre.

Gerade aufgrund dieses fehlenden oder sehr verminderten Einflusses tauchen aber in der täglichen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen verursachten Flusses nur noch sehr selten negative Werte auf, während die positiven Flüsse aufgrund der großen zeitlichen Variation der meridionalen Windkomponente und der Temperatur in der Nähe der Starkwindbänder oder der Fronten noch recht hohe Beträge aufweisen. Das führt besonders in den Monaten April und August zu maximalen Transporten und hat eine ausgleichende Wirkung auf den Jahresgang des totalen Flusses.

4.4. DIE TÄGLICHE UND ZONALE VERÄNDERLICHKEIT DES DURCH WANDERENDE WELLEN HERVORGERUFENEN UND DES TOTALEN MERIDIONALEN TRANSPORTES SENSIBLER ENERGIE IM 200 MB-NIVEAU

Die tägliche und zonale Variation der im vorliegenden Kapitel zu behandelnden Transporte wird in den Abb. 52 - 65 präsentiert.

Ebenso wie im Kapitel 3.4. für das 850 mb-Niveau sind diese Abbildungen nur als Beispiele für die Untersuchungen des folgenden Kapitels gedacht und umfassen nur eine geringe Auswahl aus 86 Darstellungen der täglichen und zonalen Variation der Transporte, welche alle in dem dieser Arbeit beigefügten, besonderen Bildband enthalten sind. Der Aufbau und Sinn dieser Abbildungen wurde bereits im Kapitel 3.4. für das 850 mb-Niveau beschrieben.

Für die Untersuchungen der täglichen und zonalen Variation des durch wandernde Wellen erzeugten Transportes wurden - wie für die 850 mb-Fläche - nur die Breitenkreise 40°N und 50°N herangezogen, da dort die maximalen Transporte vor sich gehen. Lediglich für die Monate Februar und November, wo die Breitenmittelwerte über 60°N höher liegen als über 50°N , wurde zusätzlich die tägliche und zonale Veränderlichkeit des Flusses über 60°N dargestellt. Diese Abbildungen wurden jedoch nicht in diese Arbeit aufgenommen, sondern sind in dem oben erwähnten Bildband einsehbar.

In allen die durch wandernde Wellen erzeugten Flüsse betreffenden Abbildungen fallen besonders die häufig auftretenden, großen Südwärts-transporte sensibler Energie im 200 mb-Niveau auf.

Es bestehen hier viel kompliziertere ursächliche Mechanismen für den Transport als im 850 mb-Niveau.

Eine Deutung der Zusammenhänge zwischen den wandernden Wellen der Temperatur, der meridionalen Windkomponente und dem durch sie erzeugten Transport ähnlich wie für die 850 mb-Fläche ist hier nicht möglich. Sie würde ja bei einem, gegenüber dem 850 mb-Niveau meist umgekehrten meridionalen Temperaturgradienten, vor allem negative Flüsse erklären. Das ist in der Realität jedoch nicht der Fall, vielmehr überwiegen auch im 200 mb-Niveau im zeitlichen und zonalen Mittel die positiven Werte des Wärmeflusses deutlich.

Aus der täglichen und zonalen Veränderlichkeit läßt sich erkennen, daß negative Beträge meistens etwas schwächer ausfallen als die positiven. Hier scheinen vielmehr die wandernden Wellen des Geopotentials überwiegend zwischen Null und $1/4$ der Wellenlänge nach Osten gegen jene der Temperatur verschoben zu sein. Dies ist eine Erscheinung, welche sich auch schon in der Untersuchung der durch stehende Wellen hervorgerufenen Transporte im 200 mb-Niveau für die Wechselwirkung zwischen Stratosphäre und Troposphäre herausstellte.

Das heißt also, daß im überwiegenden Maße ein Vorstoß der Troposphäre nach Norden bzw. ein Vorstoß der Stratosphäre nach Süden so geschieht, daß an den Ostflanken der Rücken über die Trennungszone zwischen Troposphäre und Stratosphäre hinaus eine Abkühlung stattfindet und an den Westflanken eine Erwärmung. Daher befindet

sich im Bereich der positiven Korrelation der wandernden Wellen der Temperatur und der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente oft auch das Starkwindband des Subtropenjets, so daß es dort überwiegend zu größeren Transportbeträgen kommt als in den Bereichen negativer Korrelation.

Im folgenden wird nun der Jahresgang der täglichen und zonalen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Transportes sensibler Energie mit Hilfe des entsprechenden totalen Transportes für 40°N und 50°N untersucht.

Ebenfalls wie für das 850 mb-Niveau wurde auch für die 200 mb-Druckfläche der Monat Januar als charakteristisches Beispiel für das winterliche Bild des meridionalen Wärmeflusses ausgewählt (s. Abb. 52, 53 für 40°N und 54, 55 für 50°N).

Für beide Breitenkreise ergeben sich im monatlichen und zonalen Mittel sehr große Transportwerte, wobei das Maximum über 40°N liegt (s. Abb. 34b).

Das Strömungsbild, welches sich aus den Darstellungen des totalen Transportes ermitteln läßt (s. Abb. 53 und 55), erweist sich für beide Breitenkreise als klar in drei große, recht stationäre Wellen des Geopotentials gegliedert. Sie besitzen

1. einen zonal sehr ausgedehnten Rücken über dem Ostpazifik und dem Westen Nordamerikas
2. einen schmalen Rücken über dem westlichen Atlantik hin bis zur Westküste Europas und
3. einen noch schmalen Rücken über Ostasien sowie entsprechend dazu drei Tröge über
 1. der Ostküste Asiens und dem westlichen Pazifik,
 2. der Ostküste Nordamerikas und
 3. Europas, welcher allerdings nur über 40°N gut erkennbar ist.

An den Flanken dieser Tröge und Rücken treten die maximalen, durch wandernde Wellen hervorgerufenen Wärmeflüsse auf.

Untersucht man diese Extrema des Transportes genauer (s. Abb. 52 und 54), so erkennt man für beide Breitenkreise, daß natürlich wieder sowohl große Temperaturschwankungen, als auch große Schwankungen der meridionalen Windkomponente als Ursache für extreme süd- oder nordwärts gerichtete, durch wandernde Wellen erzeugte Wärmeflüsse in Frage kommen.

Daß sich in dem Starkwindband nahe der Subtropenfront im 200 mb-Niveau eine solch ausgeprägte Veränderlichkeit der meridionalen Windkomponente zeigt, ist selbstverständlich. Die große Amplitude der wandernden Wellen der Temperatur, welche auch bei relativ geringer Variation der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente noch zu extrem großen Transporten Veranlassung gibt, ist in diesem Maße jedoch nur durch den ständigen Wechsel von Troposphäre und Stratosphäre über den entsprechenden Regionen erklärbar. Dieser Wechsel hat sich auch bei einer Analyse der betreffenden Wetterkarten des DWD eindeutig bestätigt.

Vor allem finden sich im Bereich des sehr schmalen Troges im Geopotentialfeld über Nordamerika häufig positiv korrelierte wandernde Wellen der Temperatur und der meridionalen Windkomponente, d.h. es stehen sich also maximale nordwärts gerichtete Transporte an beiden Flanken des Troges einander gegenüber. Das ist ein Zeichen für die eingangs erwähnte Phasenverschiebung der Geopotentialwellen gegen jene der Temperatur von ca. $1/4$ der Wellenlänge nach Osten, was aufgrund der kurzen Wellenlänge im Bereich des schmalen Troges offenbar gut möglich ist.

Der Rücken im Geopotentialfeld über dem Pazifik dagegen ist zonal wesentlich weiter ausgedehnt als der Trog über Nordamerika, so daß dort eine Phasenverschiebung der oben erwähnten Art nicht mehr $1/4$ der Wellenlänge erreicht. Sie begünstigt zwar noch den nordwärts gerichteten Transport, aber es treten nur selten an beiden Flanken positive Korrelationen in Erscheinung. Vielmehr zeichnet sich dort das Phasenverhalten der Temperatur- und Geopotentialwellen dadurch aus, daß die positiven Transportbeträge im allgemeinen nur etwas größer sind als die in zonaler Richtung gegenüberliegenden negativen Flüsse.

Zusammenfassend kann das typisch winterliche Bild des durch wandernde Wellen hervorgerufenen Wärmeflusses folgendermaßen charakterisiert werden:

Durch die Ausbildung eines Geopotentialfeldes mit ausgeprägten stationären Trögen und Rücken treten über den Breitenkreisen

40°N und 50°N maximale Wärme Flüsse auf, die vor allem durch die zeitlich und zonal stark variierenden Beträge der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente im Starkwindband des Jetstreams und den ausgeprägten meridionalen und zonalen Temperaturgradienten zwischen nebeneinander in der 200 mb-Fläche anwesenden Teilbereichen der Troposphäre und der Stratosphäre hervorgerufen werden. Die allgemein vorherrschende Phasenverschiebung der wandernden Wellen des Geopotentials zwischen Null und 1/4 der Wellenlänge nach Osten gegen jene der Temperatur ruft im zonalen und zeitlichen Mittel ein positives Transportmaximum hervor.

Bereits im Februar erkennbar setzt im Frühling dann eine Auflösung der stationären Strömungsverhältnisse ein. Es beginnt offenbar bereits die Umstellung auf die sommerliche Zirkulation. Dabei fällt besonders auf, daß bei diesem verstärkt auftretenden zeitlichen und zonalen Wechsel der Windrichtung, der oft auch mit einem Übergang eines Bereichs der Stratosphäre in einen troposphärischen und umgekehrt verbunden ist, weit häufiger positive Transporte durch negative kompensiert oder sogar überkompensiert werden. Positive Korrelationen der wandernden Wellen an den gegenüberliegenden Flanken von Wirbeln oder Trögen treten nur noch sehr selten auf. Eine regelmäßige Phasenverschiebung der Geopotentialwellen gegen jene der Temperatur wie im Winter scheint nicht mehr gegeben zu sein, und die Transporte gehen im zonalen und zeitlichen Mittel sehr zurück (s. Abb. 34b).

Wie ausgesprochen kompliziert die Zusammenhänge zwischen der zeitlichen und zonalen Variation der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente und dem Einfluß des Temperaturgegensatzes Stratosphäre - Troposphäre in dieser Übergangsphase zur sommerlichen Zirkulation sind, beweist der durch wandernde Wellen hervorgerufene Transport im Monat April (s. Abb. 56-59), der hier deshalb als Beispiel in die Arbeit aufgenommen wurde, weil an seinem Transportbild sehr deutlich wird, warum sich im zonalen und monatlichen Mittel ein erkennbares Abnehmen des Transportbetrages zum Sommer hin nur über 40°N, nicht aber über 50°N einstellen kann.

Während über 40°N der Transport im zonalen und zeitlichen Mittel-

wert gegenüber dem Winter bereits etwas zurückgeht, bildet sich über 50°N wiederum ein Maximum an nordwärts gerichtetem Fluß aus (s. Abb. 34b).

In der Darstellung der täglichen und zonalen Veränderlichkeit des durch wandernde Wellen erzeugten Wärmeflusses für 40°N (s. Abb. 56) läßt sich ein deutlicher Rückgang der Transporte über Europa und Asien erkennen. Die Subtropenfront hat sich hier bereits so weit nach Norden verlagert, daß der 40. Breitenkreis jetzt durch die Zone mit einem - wie bekannt - außerordentlich schwachen meridionalen Temperaturgradienten südlich der Subtropenfront hindurch verläuft und daher trotz immer noch recht großer Schwankungen des Betrages der meridionalen Windkomponente (s. Abb. 57) bedeutendere Transporte durch die geringe Amplitude der wandernden Wellen der Temperatur verhindert werden.

Nur 10 Breitengrade weiter nördlich, über 50°N , treten jedoch weiterhin extrem hohe Flüsse über Europa und Asien auf, weil dort zeitweilig der Einfluß der Stratosphäre gegenüber jenem der Troposphäre noch vorhanden ist. Zudem werden diese Transporte viel weniger als im Februar und März durch negative Transporte kompensiert.

Zu einer weiteren Verringerung des Flusses im zonalen und zeitlichen Mittel über 40°N trägt ein Bereich negativer Transporte an der Ostflanke des über 40°N noch gut erkennbaren Rückens über dem Pazifik bei, wo ständig mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten relativ warme troposphärische Luft (nicht der Stratosphäre!) nach Süden geführt wird. Die Transportmaxima, welche dort auftreten, sind im Absolutbetrag zwar recht wenig intensiv, gewinnen aber zusammen mit den dort zeitlich konstant wirksamen südwärts gerichteten Flüssen im monatlichen Mittel bedeutend an Gewicht (s. auch Abb. 38, unten). So sorgen über 40°N nur noch Vorstöße der Stratosphäre über Nordamerika und dem westlichen Atlantik nach Süden hin für maximale, nordwärts gerichtete, durch wandernde Wellen erzeugte Flüsse sensibler Energie.

Über 50°N sind natürlich die Gegebenheiten diesen Transport betreffend über Nordamerika und dem westlichen Atlantik ähnlich wie über 40°N , jedoch erscheinen zusätzlich extrem große nord-

wärts gerichtete Wärmeflüsse über dem Pazifik und dem westlichen Teil Nordamerikas, welche unter dem Einfluß des Temperaturgegensatzes zwischen Stratosphäre und Troposphäre entstehen (s. Abb. 58). Auch hier werden im April im Gegensatz zum Februar und März trotz der zeitlich stark variierenden Richtung der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente (s. Abb. 59) die positiven Maxima weniger durch südwärts gerichtete Flüsse kompensiert.

Das Bild des durch wandernde Wellen erzeugten meridionalen Wärmetransportes in der 200 mb-Fläche im April vermittelt also zwei wesentliche Charakteristika des meridionalen Flusses für die Übergangszeit zwischen Winter und Sommer:

1. Durch die beginnende Nordwärtsverlagerung der Subtropenfront gehen die Transporte in weiten Bereichen des 40. Breitenkreises, welche südlich der Front innerhalb der Zone des geringen meridionalen Temperaturgradienten ablaufen, wesentlich zurück.
2. Über jenen Regionen eines Breitenkreises, welche weiterhin im Einflußgebiet von Troposphäre und Stratosphäre verbleiben, finden zwar durch wandernde Wellen Transporte mit sehr hohen Absolutbeträgen statt, jedoch ist eine geregelte Phasenverschiebung zwischen den wandernden Wellen der Temperatur und des Geopotentials wie im Winter nicht mehr gegeben. Daher ist der Transportbetrag im monatlichen und zonalen Mittel von Monat zu Monat sehr unterschiedlich groß und ein regelmäßiger Jahresgang nicht mehr gut erkennbar.

In den von einer sommerlichen Zirkulation geprägten Monaten Mai, Juni, Juli, August und September läßt die Intensität der Transporte über 40°N sehr stark nach, da dieser Breitenkreis dann fast auf seiner ganzen Länge südlich der Subtropenfront im Bereich eines sehr schwachen meridionalen Temperaturgradienten verbleibt. Über 50°N schwankt jedoch der Transport in diesen Monaten im zeitlichen und zonalen Mittel so stark, daß selbst im Hochsommer kein eindeutiges Abnehmen der Transporte gegenüber dem Winter feststellbar ist, im Gegenteil steigt der Wert im August wiederum zu einem relativen Maximum an. Die Ursache dafür bildet - wie in der Zusammenfassung für den April unter Punkt 2. genannt - der weiterhin vorhandene Einfluß der Stratosphäre. Die von Monat

zu Monat auftretenden Schwankungen des Transportbetrages werden wiederum dadurch hervorgerufen, daß die positiven Transportmaxima je nach Phasenverschiebung der wandernden Wellen im Geopotentialfeld gegen jene der Temperatur mehr oder weniger durch negative Flüsse kompensiert werden. Die Unregelmäßigkeit dieser Schwankungen wird außerdem durch den das ganze Jahr hindurch über 50°N vorhandenen großen zeitlichen und zonalen Mittelwert im 10-jährigen Mittel bewiesen (s. OORT und RASMUSSEN, 1970).

Wie bedeutend sich der Einfluß der Temperaturoegensätze innerhalb der Luftmassen der Troposphäre gegenüber jenen der Stratosphäre für den Transport darstellt, zeigt das Bild des durch wandernde Wellen hervorgerufenen meridionalen Flusses sensibler Energie im August (s. Abb. 60 - 63).

Der 40. Breitenkreis liegt - wie oben erwähnt - eindeutig südlich der Subtropenfront. Obwohl die Schwankungen der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente durchaus mit denen über 50°N vergleichbar sind - über Europa erweisen sie sich sogar noch als größer (vergl. Abb. 61 und 63) - stellen sich auf dem gesamten Breitenkreis über 40°N keine bedeutenden Transportmaxima ein (s. Abb. 60). Selbst die im 200 mb-Niveau innerhalb der Troposphäre über dem sommerlichen asiatischen Hitzetief vorhandenen warmen Temperaturen und dadurch erzeugten zonalen Temperaturunterschiede scheinen zeitlich so stationär zu sein, daß sie auf den durch wandernde Wellen hervorgerufenen Transport keinen Einfluß haben, während sie für den durch stehende Wellen erzeugten von großer Bedeutung sind (vergl. Abb. 36, oben mit Abb. 60, s. dazu auch die stationären Strömungsverhältnisse über Indien in Abb. 61).

Wie in diesem Abschnitt bereits eingangs ausgeführt wurde, bleibt über dem gesamten 50. Breitenkreis das Allgemeinbild des durch wandernde Wellen erzeugten Transportes, in welchem überall Extremwerte auftauchen, auch im Hochsommer erhalten (s. Abb. 62). Eine Analyse des dazugehörigen totalen meridionalen Flusses sensibler Energie (s. Abb. 63) ergibt im ersten Drittel des Monats relativ stationäre Strömungsverhältnisse, während das Bild im restlichen Teil über dem gesamten Breitenkreis auf schnell von Westen nach Osten ziehende Wellen hinweist. Es sind also über verschiedenen

Sektoren zwei ganz unterschiedliche Strömungsregime der allgemeinen Zirkulation wirksam. Dennoch läßt ein Vergleich der täglichen Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte des durch wandernde Wellen erzeugten Transportes (s. Abb. 46, ganz rechts) mit der zonalen und täglichen Veränderlichkeit dieses Flusses (s. Abb. 62) erkennen, daß trotzdem die Schwankungen der Beträge in beiden Zirkulationstypen nahezu gleich bleiben, und die zonalen Mittelwerte von Tag zu Tag vor allem dadurch bestimmt werden, wie stark positive Maxima in der zonalen Variation durch negative Flüsse kompensiert werden.

Im August läßt sich über 50°N nur eine Ausnahme von diesem Prinzip finden: nämlich der den Nordwärtstransport deutlich unterbrechende Abschnitt mit südwärts gerichtetem Fluß zwischen dem 12. und 15. August (s. Abb. 46, rechts). Er tritt genau in der Übergangsphase des stationären Zirkulationstypus zu jenem durch schnell wandernde Störungen gekennzeichneten auf (s. Abb. 63). Dadurch, daß sich die Amplitude der stationär vorhandenen Tröge und Rücken im Geopotentialfeld verringert (Zonalisierung der Isohypsen), gerät der 50° . Breitenkreis kurzzeitig ganz außerhalb des Einflußbereiches der Stratosphäre, so daß in diesen vier Tagen über 50°N ein minimaler meridionaler Temperaturgradient jeden nennenswerten, durch wandernde Wellen erzeugten Transport verhindert. Das anschließende erneute Vorrücken der Stratosphäre nach Süden in der zweiten Hälfte des August führt dann wieder zu maximalen Flüssen.

Auch im Herbst findet ein erkennbarer, zum Frühjahr inverser Übergang des Transportes vom sommerlichen Typus auf den winterlichen nur über dem 40° . Breitenkreis statt. Über 50°N dagegen unterliegt der monatliche und zonale Mittelwert des durch wandernde Wellen erzeugten Flusses sensibler Energie weiterhin starken Schwankungen von Monat zu Monat. Wie außerordentlich wichtig für diesen Wärmefluß über 50°N hinweg das ganze Jahr hindurch neben dem Einfluß der Stratosphäre auch die Auswirkungen der sehr unterschiedlichen Phasenverschiebung der Wellen des Geopotentials gegenüber jenen der Temperatur sind, soll hier noch einmal anhand eines Vergleiches der Darstellung des Transportes im August mit der des Oktober (s. Abb. 64, 65) verdeutlicht werden.

Sowohl in der zweiten Hälfte des August als auch im gesamten Monat Oktober ist der globale Strömungstyp der Allgemeinen Zirkulation durch schnell wandernde Wellenstörungen oder Wirbel gekennzeichnet (vergl. Abb. 63 und 65). In den entsprechenden beiden Darstellungen des durch wandernde Wellen erzeugten Transportes zeigen sich über dem gesamten Breitenkreis sehr viele Extrema (s. Abb. 62 und 64).

Trotz der vergleichbaren Strömungsverhältnisse in der zweiten Hälfte des August und im Oktober stellt sich die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittelwerte (vergl. Abb. 46, rechts und 47, Mitte) in den entsprechenden Zeitabschnitten ganz unterschiedlich dar. Während zwischen dem 16. und 29. August die zonalen Mittelwerte ständig $6^{\circ}\text{C m sec}^{-1}$ und mehr betragen, schwanken diese Beträge im Oktober wesentlich stärker zwischen positiven Transportmaxima und -minima, ja zeitweise sind sogar negative Beträge feststellbar.

Betrachtet man nun an jenen Tagen, an welchen diese geringen positiven oder südwärts gerichteten Transporte in der täglichen Veränderlichkeit der zonalen Mittel des Oktober auftreten (3., 7., 15., 23., 31. Oktober in Abb. 47), die zonale Veränderlichkeit des Flusses (s. Abb. 64), so wird deutlich, daß es sich hier nicht etwa um Tage handelt, an denen allgemein nur schwache Transporte wirksam sind, sondern es sind vielmehr die maximalen positiven Flüsse jeweils besonders stark durch negative Extrema kompensiert oder gar überkompensiert. Es zeichnet sich also deutlich eine um Null schwankende Phasenverschiebung der Geopotentialwellen gegen die Temperaturwellen ab und trägt zu einer starken Verminderung des Flusses im Breitenmittelwert bei.

Im vergleichbaren Zeitraum des August dagegen werden positive Extremwerte nur höchst selten durch negative Flüsse kompensiert, so daß die zonalen Mittelwerte ständig sehr hoch bleiben.

Dieser Vergleich zeigt noch einmal für das allgemeine Bild des durch wandernde Wellen erzeugten Transportes über 50°N im 200 mb-Niveau, daß vor allem die Phasenverschiebung von Temperatur- und Geopotentialwellen im Zusammenhang mit dem Einfluß des Temperaturgegensatzes Stratosphäre - Troposphäre für die zeitlichen Schwankungen des Transportes verantwortlich sind und weitaus weniger

die Tatsache, daß der 50. Breitenkreis hin und wieder außerhalb des Einflußbereiches der Stratosphäre gerät.

Nach der Phase mit außerordentlich geringen Transportbeträgen im Sommer stellen sich über 40°N im Herbst langsam wieder größere durch wandernde Wellen erzeugte Transporte ein. Der zeitliche und zonale Mittelwert (s. Abb. 34b), wie auch die tägliche Veränderlichkeit der zonalen Mittel des Transportes über 40°N (s. Abb. 47) lassen erkennen, daß sich die Subtropenfront im Herbst wieder so weit nach Süden zurückzieht, daß auch dieser Breitenkreis wieder in den Einflußbereich der Stratosphäre gelangt und sich dort immer häufiger Extremwerte des Flusses einstellen. Diese Extrema treten zuerst in einer Folge von Vorstößen der Stratosphäre über Nordamerika nach Süden auf, dann über Asien und Europa, bis sich im November und Dezember langsam das für die Winterzeit anhand des Monats Januar als charakteristisch herausgestellte Bild mit drei großen stationären Wellen im Geopotentialfeld und den damit verbundenen, durch wandernde Wellen hervorgerufenen Transporten wieder einstellt.

Selbstverständlich unterliegt in dieser Phase auch der Transport über dem 40. Breitenkreis der starken Abhängigkeit der zonalen Mittelwerte des Flusses von der jeweiligen Phasenverschiebung der Geopotential- gegen die Temperaturwellen, so daß sich ebenfalls starke Schwankungen in der zeitlichen Variation der Breitenmittelwerte ergeben (s. Abb. 47).

Zusammenfassung:

1. Bemerkenswerte, durch wandernde Wellen erzeugte Wärmetransporte finden im 200 mb-Niveau nur im Bereich der Übergangszone zwischen Stratosphäre und Troposphäre statt.
Südlich der Subtropenfront werden größere Flüsse durch die außerordentlich geringe Amplitude der wandernden Temperaturwellen verhindert, obwohl auch dort eine große zeitliche und zonale Schwankung der meridionalen Windgeschwindigkeitskomponente vorhanden sein kann.
2. Der durch wandernde Wellen hervorgerufene Transport über 40°N ist im monatlichen und zonalen Mittel einem erkennbaren Jahresgang unterworfen, da die-

ser Breitenkreis im Hochsommer meist in einen Bereich südlich der Subtropenfront gelegen ist, wo ein sehr geringer meridionalen Temperaturgradient bewirkt, daß die Transporte im Juli und August sehr stark zurückgehen.

Der 50. Breitenkreis verbleibt dagegen das ganze Jahr hindurch wechselweise im Einflußbereich der Stratosphäre oder der Troposphäre, so daß die Schwankungen des Transportes im monatlichen und zonalen Mittel dort vor allem auf die jeweilige Phasenverschiebung zwischen den wandernden Wellen der Temperatur und des Geopotentials zurückzuführen sind, und kaum ein Jahresgang erkennbar ist.

3. Trotz einer deutlich erkennbaren Abhängigkeit des durch wandernde Wellen hervorgerufenen Transportes von der Phasenverschiebung der Geopotential- gegen die Temperaturwellen, wobei im zonalen Mittel durchaus negative Flüsse resultieren können, ist die überwiegende Zahl der positiven Transportmaxima vom Betrag her größer als die negativen. Damit transportieren die wandernden Wellen das ganze Jahr hindurch im zeitlichen und zonalen Mittel sensible Energie über die mittleren und höheren Breiten nach Norden.

5. SCHLUSSBETRACHTUNG

In den einleitenden Kapiteln wurde eine Reihe bedeutender Arbeiten zitiert, die sich mit dem meridionalen Transport sensibler Energie befassen. In diesen Arbeiten wurden im wesentlichen jedoch nur zonale und zeitliche Mittelwerte des Wärmeflusses bestimmt, während man die zonale Veränderlichkeit nur teilweise näher untersucht und auch die tägliche Variation nur in speziellen Fällen bearbeitet hat. Aufgrund eines umfangreichen Datenmaterials war es möglich, in der vorliegenden Diplomarbeit für das spezielle Jahr 1975 eine detaillierte Untersuchung der täglichen und zonalen Veränderlichkeit der meridionalen Transporte sensibler Energie im Zusammenhang mit den dazugehörigen zeitlichen und zonalen Mittelwerten vorzunehmen. Dabei wurden neben einer ausführlichen Beschreibung des Jahresganges der meridionalen Flüsse fühlbarer Wärme auch einige zusätzliche Erkenntnisse von prinzipieller Bedeutung für die Zusammenhänge zwischen dem Wärmetransport und dem Temperatur- und Geopotentialfeld und in den beiden Druckniveaus 850 und 200 mb gewonnen, dort wo der meridionale Wärmetransport nach bisheriger Erfahrung maximal ist.

Für die durch stehende Wellen hervorgerufenen meridionalen Flüsse sensibler Energie zeigt sich im 850 mb-Niveau ein ganz bedeutender Einfluß der zonalen Temperaturgegensätze zwischen Land und Meer, wobei im Winter die Kaltluftzentren über Asien und Nordamerika und im Sommer die Wüstengebiete über Afrika, Arabien und Kalifornien von ausschlaggebendem Einfluß sind. So entstehen die maximalen Absolutwerte des Transportes im Winter über den mittleren und höheren Breiten, während sie über den niederen Breiten im Sommer in Erscheinung treten.

Im 200 mb-Niveau werden dagegen die größten, durch stehende Wellen hervorgerufenen Transporte vor allem in den mittleren und höheren Breiten durch das wechselhafte Ineingreifen von Stratosphäre und Troposphäre erzeugt. Nur im Sommer stellen sich stärkere Wärmeflüsse im Bereich der relativ warmen Troposphäre über dem südasiatischen Hitzetief ein.

Der Jahresgang zeichnet sich im zeitlichen und zonalen Mittel-

wert auf der 850 mb-Fläche durch starke Nordwärtstransporte im Winter und negative Flüsse im Sommer aus, während im 200 mb-Niveau die durch stehende Wellen erzeugten Transporte allgemein nach Norden gerichtet sind und die Transportbeträge nur zum Sommer hin schwächer werden. Aufgrund der starken meridionalen Windkomponenten in der Nähe von Polar- und Subtropenfront konzentrieren sich hier die maximalen Transporte im Winter, Frühjahr und Herbst vor allem auf die Breitenkreise 40°N und 50°N .

Der durch wandernde Wellen erzeugte meridionale Fluß sensibler Energie ist dem durch stehende Wellen hervorgerufenen im zonalen und zeitlichen Mittelwert ebenbürtig. Dabei finden sich die wesentlichen Transporte im allgemeinen in der Zone mit stärkster zeitlicher Veränderlichkeit von Temperatur und Geopotential. Jedoch treten auch in Gebieten mit stehenden Temperatur- und Geopotentialwellen vereinzelt derart hohe Transporte durch wandernde Wellen auf, daß sie den zeitlichen und zonalen Mittelwert stark beeinflussen können.

Aufgrund eines gut ausgeprägten und durch die Temperatur des Untergrundes noch verstärkten meridionalen Temperaturgefälles von Süd nach Nord fallen im 850 mb-Niveau die Transporte durch wandernde Wellen fast nur positiv aus und werden kaum durch südwärts gerichtete Flüsse kompensiert. So finden auf dieser bodennahen Druckfläche die größten Nordwärtsflüsse an den Flanken von Tiefdruckgebieten, also vor allem in der Zone der Westwinddrift statt. Dementsprechend stellt sich auch der Jahresgang ein. Die Beträge sind im zonalen und zeitlichen Mittelwert in allen Monaten positiv und die höchsten Beträge treten über den Breitenkreisen auf, über denen der Verlauf der Polar- und Subtropenfront hin- und herschwankt und weisen Maxima im Frühjahr und Herbst auf. Im 200 mb-Niveau treten bemerkenswerte, durch wandernde Wellen erzeugte Transporte ausschließlich im Übergangsbereich zwischen Troposphäre und Stratosphäre auf. Trotz großer zeitlicher Schwankungen der meridionalen Windkomponente sind die Transporte außerhalb dieses Bereiches vollkommen unbedeutend, da die dort außerordentlich geringe Amplitude der wandernden Temperaturwellen keine größeren Flüsse zuläßt.

Im Übergangsbereich zwischen Troposphäre und Stratosphäre liegt

die Phasenverschiebung der wandernden Wellen und Geopotential und Temperatur in der überwiegenden Zahl aller Fälle so, daß die Transporte im zonalen und zeitlichen Mittelwert trotz des umgekehrten meridionalen Temperaturgradienten nordwärts gerichtet sind. Die durch wandernde Wellen erzeugten Flüsse orientieren sich daher nicht mehr allein nach der mittleren Lage der Fronten, sondern sie werden zusätzlich durch Austauschprozesse von Stratosphäre und Troposphäre nördlich des Frontenverlaufs hervorgerufen. Zudem sind die zonalen Mittelwerte des Transportes in diesen Bereichen stark durch die Phasenverschiebung der Geopotentialwellen gegen die der Temperatur beeinflusst, so daß nur noch über niederen Breiten bis einschließlich 40°N ein ausgeprägter Jahresgang zu erkennen ist, während über 50°N und 60°N die Beträge von Monat zu Monat stark schwanken.

Die Untersuchung der täglichen und zonalen Veränderlichkeit des totalen meridionalen Flusses sensibler Energie hat ergeben, daß sich aus ihm allein nur sehr schwer Aussagen über den Wärmeaustausch Äquator - Pol machen lassen. Jedoch stellen die Abbildungen des totalen Transportes wesentliche Hilfsmittel zur Interpretation der entsprechenden Darstellungen des durch stehende und wandernde Wellen hervorgerufenen Transportes sensibler Energie dar.

Es war dem Umfang dieser Arbeit entsprechend nicht möglich, genaue Aussagen über das Phasenverhalten der wandernden Temperatur- und Geopotentialwellen zu machen. Es deuten sich aber gerade hier Gesetzmäßigkeiten an, die für den Wärmetransport sehr interessant sein dürften, da die durch wandernde Wellen hervorgerufenen Flüsse sensibler Energie mindestens die gleiche Bedeutung haben wie die durch stehende Wellen erzeugten. Gleichfalls wäre mit Hilfe der zonalen Veränderlichkeit der Transporte eine eingehende Untersuchung über Wechselwirkungen zwischen stehenden und wandernden Wellen im Bezug auf die durch sie hervorgerufenen Wärmeflüsse möglich, welche in dieser Abhandlung nur andeutungsweise untersucht werden konnten, da sie sich von Fall zu Fall sehr unterscheiden und ebenso eine genauere Analyse der Temperatur- und Geopotentialwellen erfordern würden.

DANKSAGUNG

Die zur Erstellung dieser Diplomarbeit erforderlichen Daten wurden dem Institut für Meereskunde Kiel, Abt. Maritime Meteorologie, vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt. Sie haben die Berechnung der in dieser Arbeit analysierten Transporte erst möglich gemacht. Dem Deutschen Wetterdienst und den Mitglieder der Abteilung Maritime Meteorologie des Instituts für Meereskunde in Kiel sei hier für die Bereitstellung und Aufbereitung der Daten besonders gedankt; ebenso wie der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die freundlicherweise im Rahmen des Forschungsprogramms "Längerzeitliche Veränderlichkeit der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation der Nordhalbkugel auf der Grundlage empirisch gegebener Daten" für diese Diplomarbeit finanzielle Mittel zur Verfügung stellte.

Der Verfasser dankt weiterhin vor allem Herrn Prof. Dr. Fr. Defant und Frau A. Osthaus für die wissenschaftliche Betreuung dieser Diplomarbeit sowie Herrn Dr. Fechner für die große Unterstützung bezüglich der programmiertechnischen Probleme.

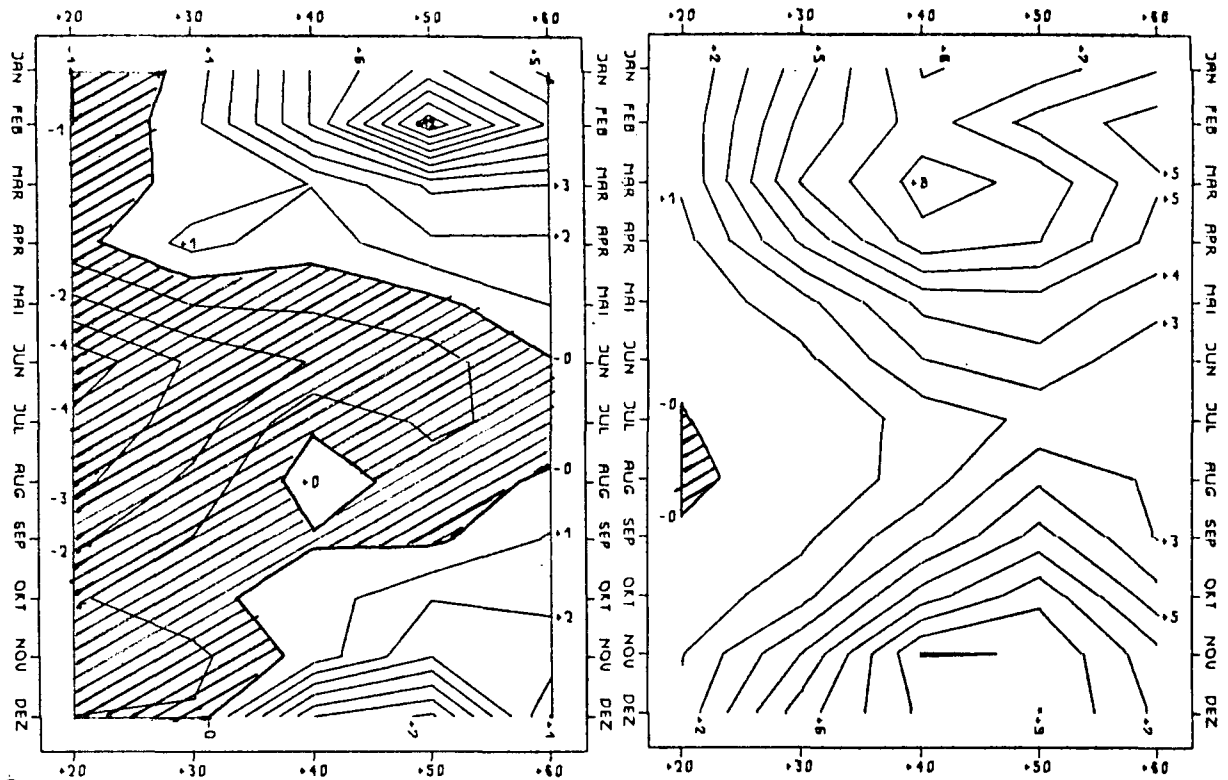


LITERATURVERZEICHNIS

- BJERKNES, J., 1951: The maintenance of the zonal circulation of the atmosphere, P.V. Meteor. Un. geod. geophys. int. Brüssel, I-XXIII (Presid. Adress)
- CORBY, G.A., 1969: The global circulation of the atmosphere, Roy. Meteor. Soc. Konferenz
- DEFANT, A. u. Fr., 1958: Physikalische Dynamik der Atmosphäre, Akademische Verlagsgesellschaft mbH, Frankfurt/M.
- DEFANT, F., A. OSTHAUS and P. SPETH, 1979: The global energy budget of the atmosphere, Part II: The ten - years mean structure of the stationary large - scale wave disturbances of temperature and geopotential height for January and July (northern hemisphere), Contributions to atmosphere physics, Vol. 52, No. 3, August 1979, pp. 229-245
- ELIASSEN, E., 1958: A study of the long atmospheric waves on the basis of zonal harmonic analysis, Tellus 10, pp. 206-215
- HAINES, D.A. and G.S. WINSTON, 1963: Monthly mean values and spatial distribution of meridional transport of sensible heat, Monthly Weather Rev., 91(7), pp. 319-328
- HASTENRATH, S.L., 1968: On the role of eddy mechanism in the meridional energy transports, Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A, 17, pp. 114-124
- HSIAO, C., 1979: Interannual variance of atmospheric meridional eddy transports, Environmental Research Papers, Colorado State University No. 17
- 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
- MINTZ, I., 1955: Final computations of the mean geostrophic poleward flux of angular momentum and of sensible heat in the winter and summer 1949, Final Rept. Gen. Circ. Proj. Contr. AF 19(122)-48 Dept. Meteorol. University California, Los Angeles

- MUENCH, H.S., 1965: On the dynamics of the wintertime stratosphere circulation, *J. of Atm. Sci.* 22, pp. 349-360
- OORT, A.H. and E.M. RASMUSSEN, (1970: Atmospheric circulation statistics, U.S. Dep. Commerce, Nat. Oceanic Atmosph. Adm., Prof. Pap. 5
- OORT, A.H. and E.M. RASMUSSEN, 1971: The observed annual cycle of the meridional transport of atmosphere energy, *J. of Atm. Sci.* 28, pp. 325-339
- 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 L.A. VUORELA, 1963: On the mean meridional circulation in the northern hemisphere during the winter season, *Quart. J. of the Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 89, No. 379, pp. 131-138
- PALMÉN, E. and C.W. NEWTON, 1969: Atmospheric circulation systems, Academic Press, New York
- REITER, E.R., 1969a: Mean and eddy motions in the atmospheric, *Monthly Weather Rev.* 97, pp. 200-204
- REITER, E.R., 1969b: Atmospheric transport processes, Part I, Energy transfers and transformations, U.S. Atomic Energy Commiss., Crit.Rev.Ser. 1-253
- SPETH, P., 1974: Horizontale Flüsse von sensibler und latenter Energie und Impuls für die Atmosphäre der Nordhalbkugel, *Met. Rundschau* 27, pp. 65-91
- SPETH, P., 1976: Extreme values of large-scale horizontal fluxes of sensible and latent energy and momentum caused by transient eddies during the period 1967-1972, *Met. Rundschau* 29, pp. 1-14
- SPETH, P. und A. OSTHAUS, 1978: Großskalige und 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*
- STARR, v.P., 1948: An essay on the general circulation of the earth's atmosphere, *J. of Met.* 5, pp. 39-43

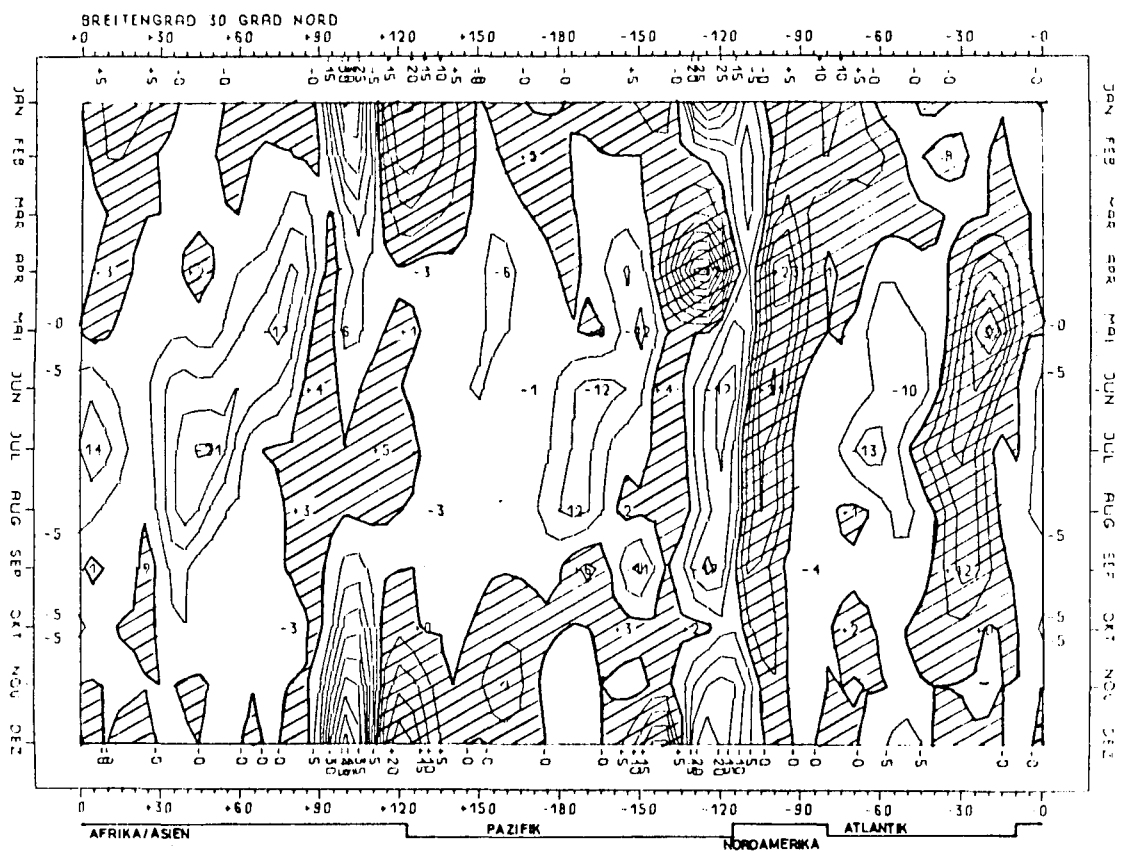
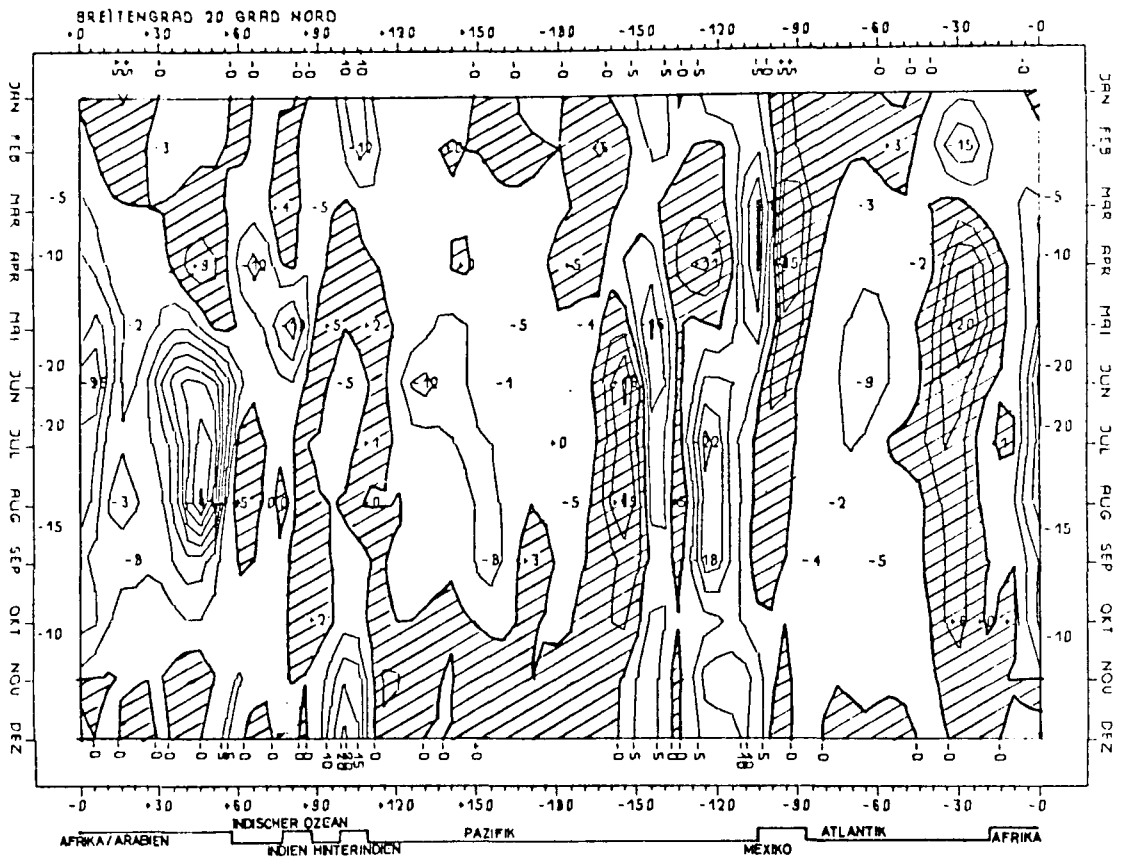
- STRÜFING, R., 1978: Die Struktur der atmosphärischen Temperatur- und Geopotentialwellen und die durch sie hervorgerufenen Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls während eines vierteljährigen Winterzeitraumes November 1967 - Januar 1968, Berichte IfM, Kiel Nr. 52
- VOGL, C., 1979: Die Struktur der stehenden Temperatur- und Geopotentialwellen im April und Oktober und die durch sie hervorgerufenen Transporte von sensibler Energie und Drehimpuls, Berichte IfM, Kiel Nr. 74
- 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



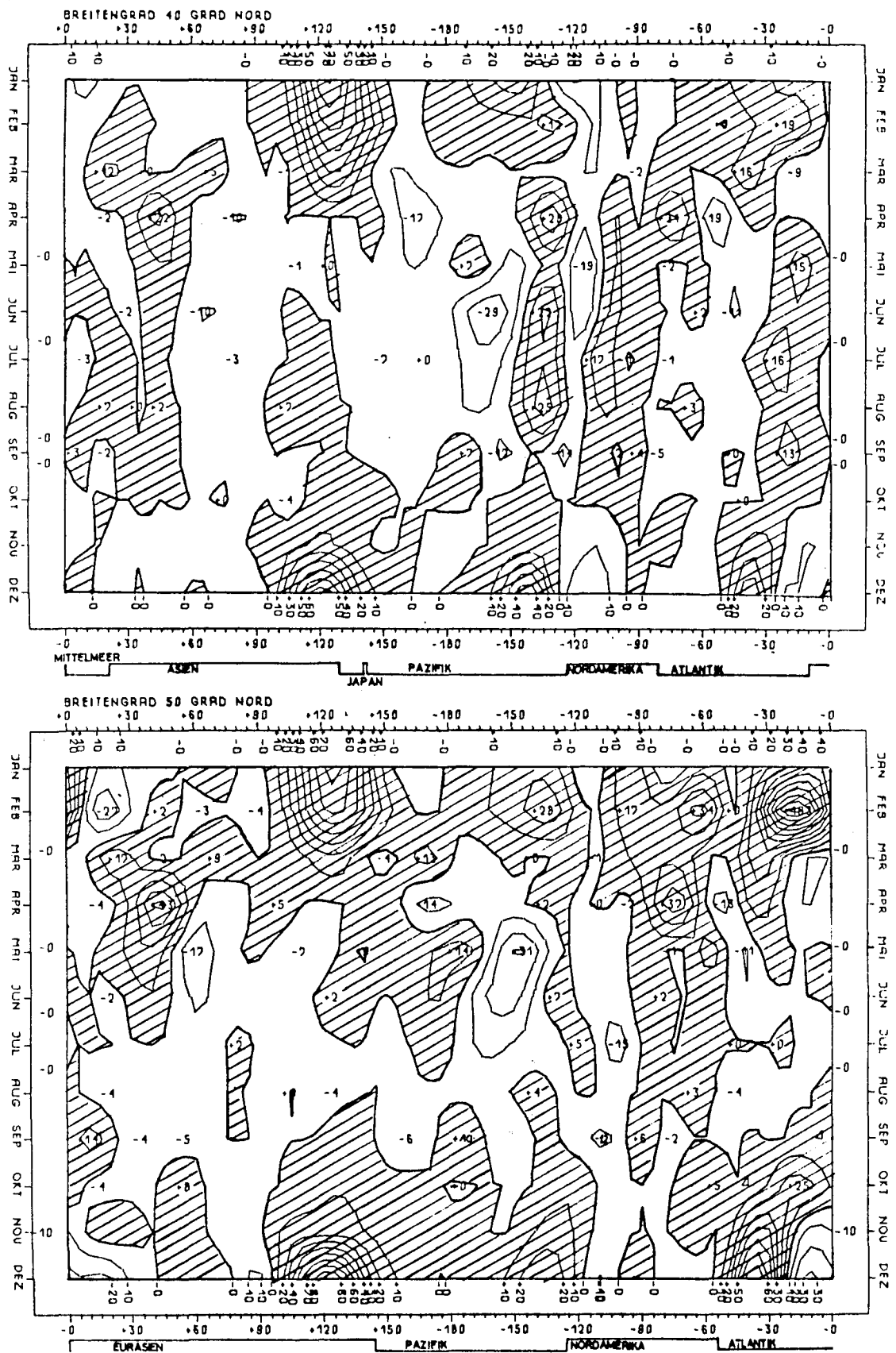
a)

b)

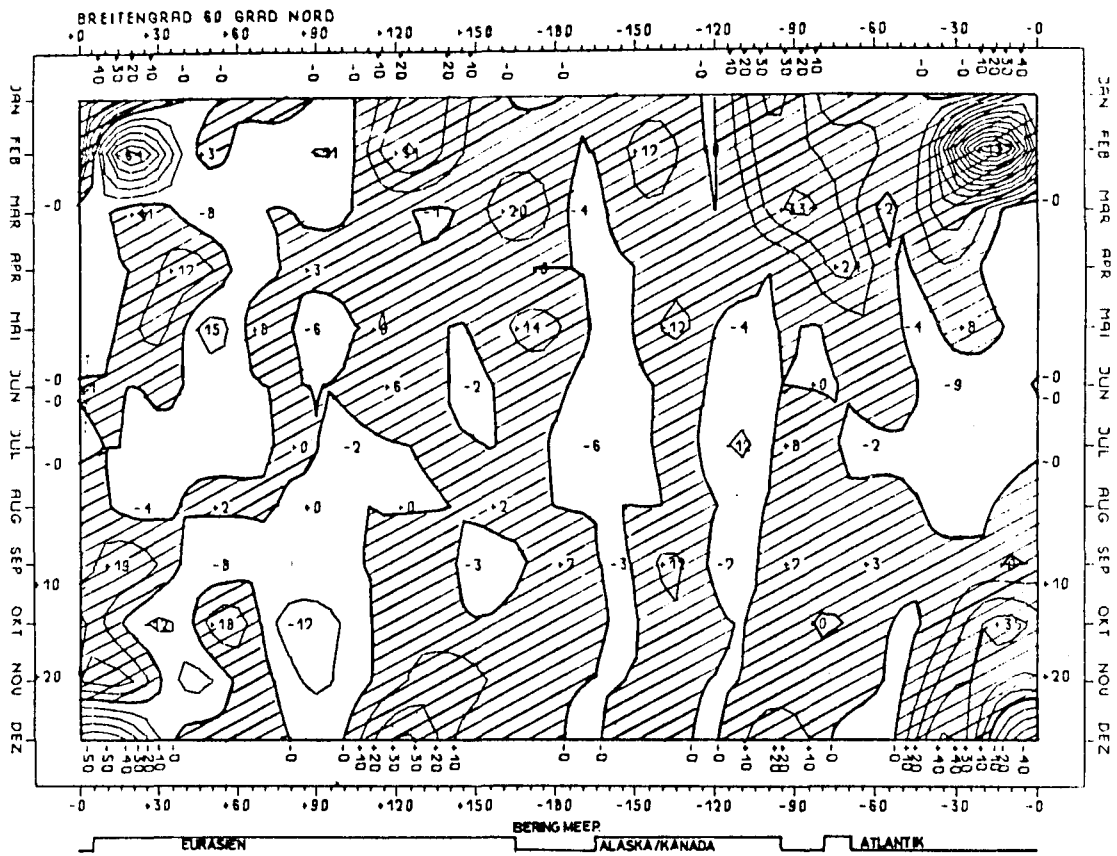
Die mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte von
 a) dem meridionalen Transport sensibler Energie durch
 stehende Wellen,
 b) den monatlichen Mittelwerten des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen
 im 850 mb - Niveau.
 Isolinienabstand: $1 \text{ grad m sec}^{-1}$



Räumliche Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im Druckniveau 850mb. Isolinienabstand: 5 grad m sec⁻¹

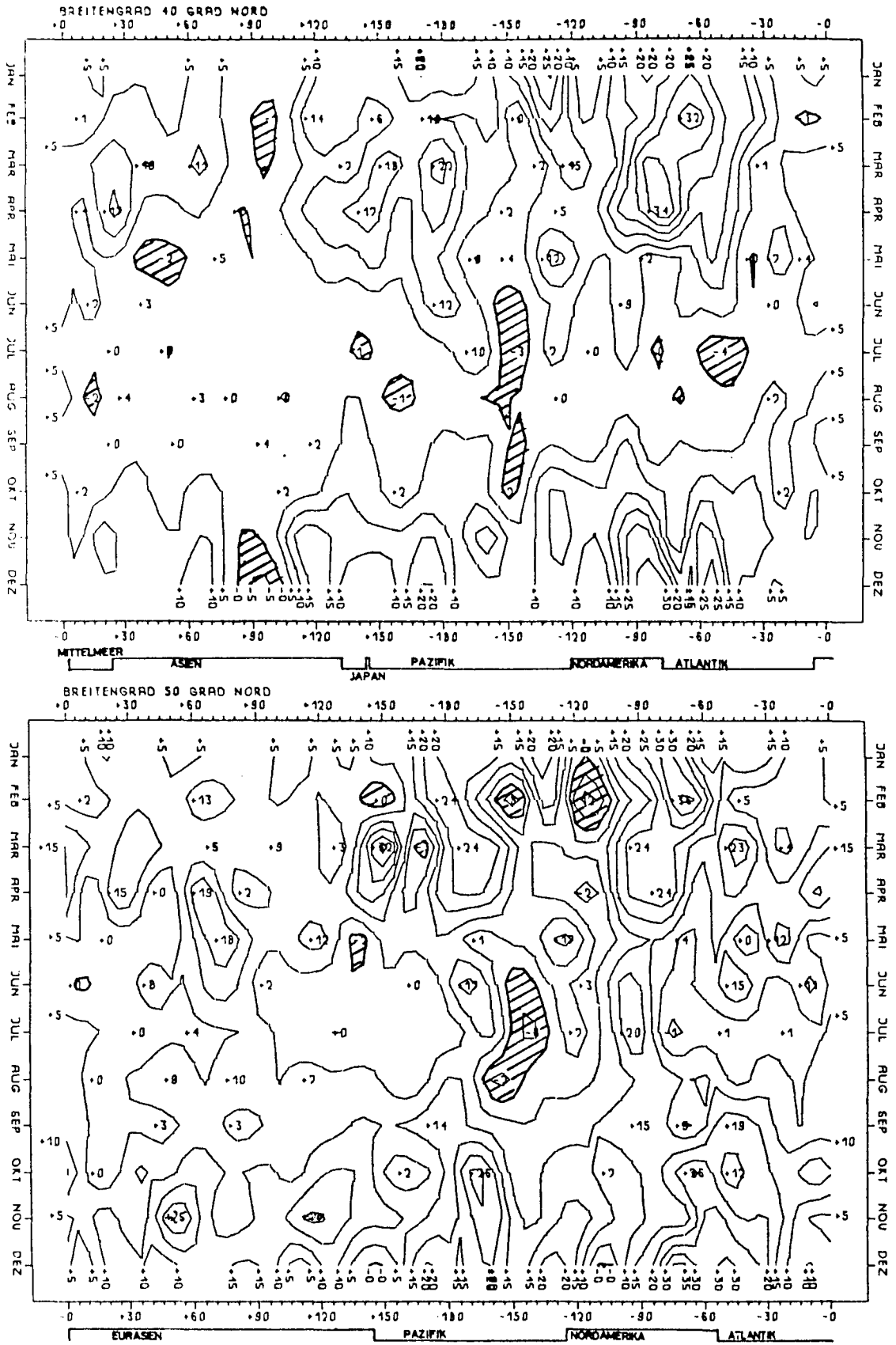


Räumliche Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im Druckniveau 850mb. Isolinienabstand: 10 grad m sec⁻¹

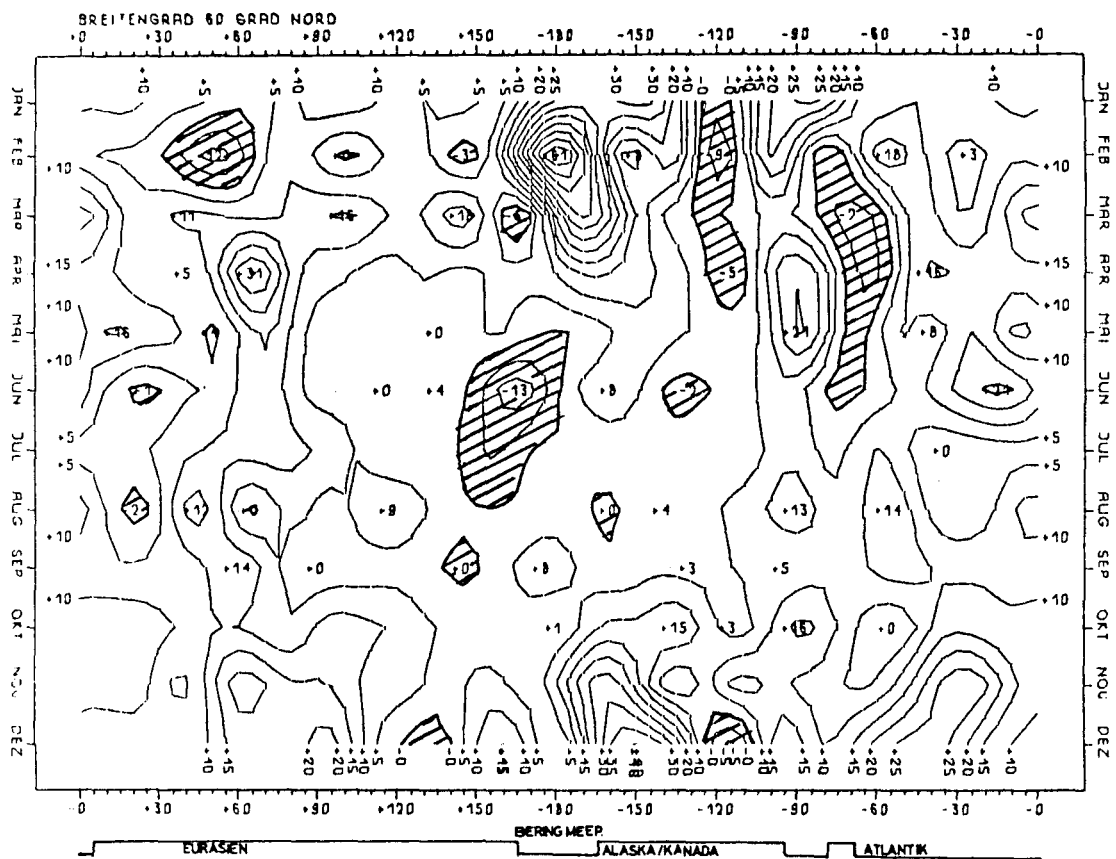


Räumliche Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im Druckniveau 850mb. Isolinienabstand: 10 grad m sec⁻¹

Abb.6

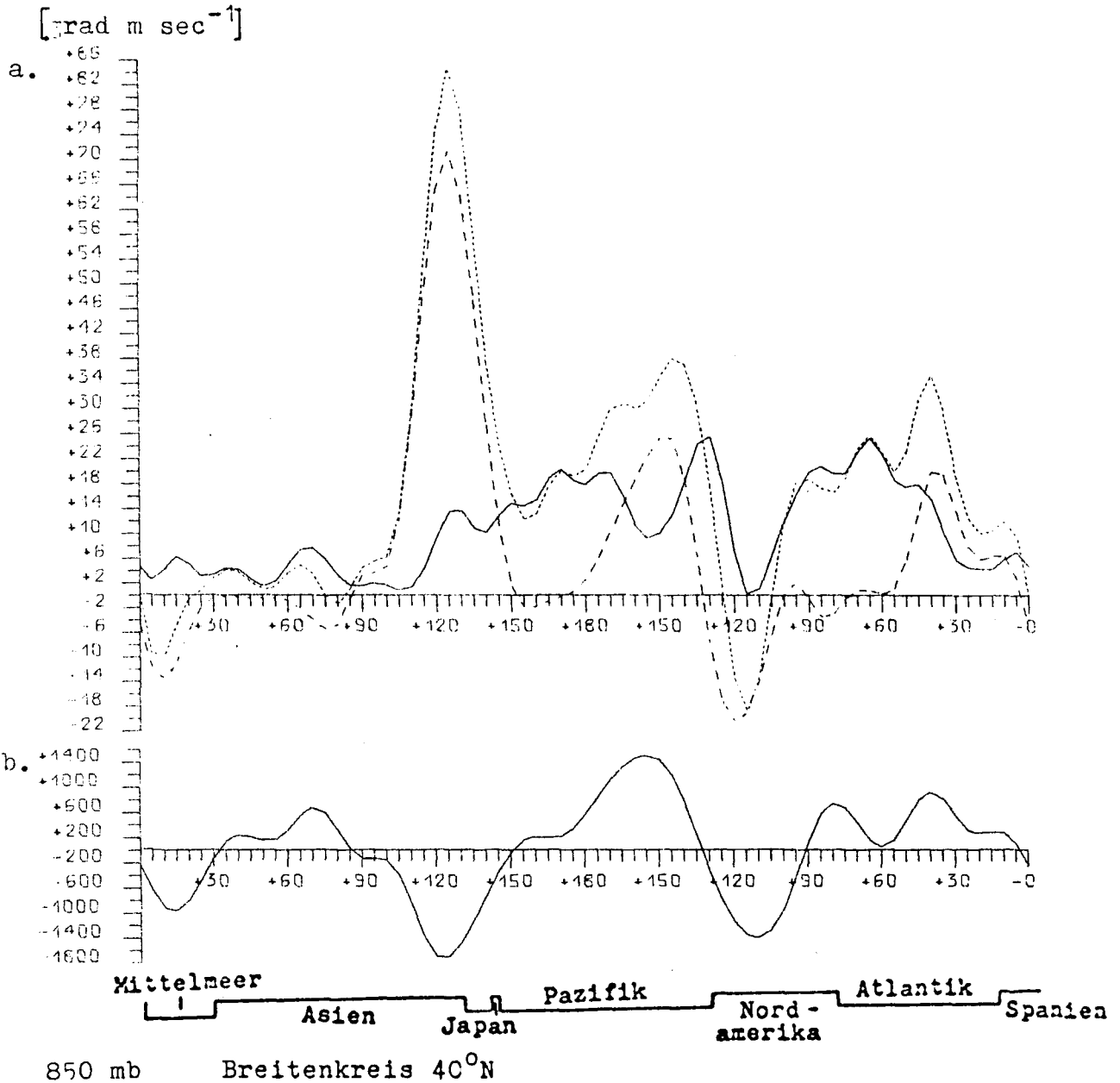


Räumliche Veränderlichkeit der monatlichen Mittelwerte des meridionalen Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen im 850 mb - Niveau.
 Isolinienabstand: 5 grad m sec⁻¹



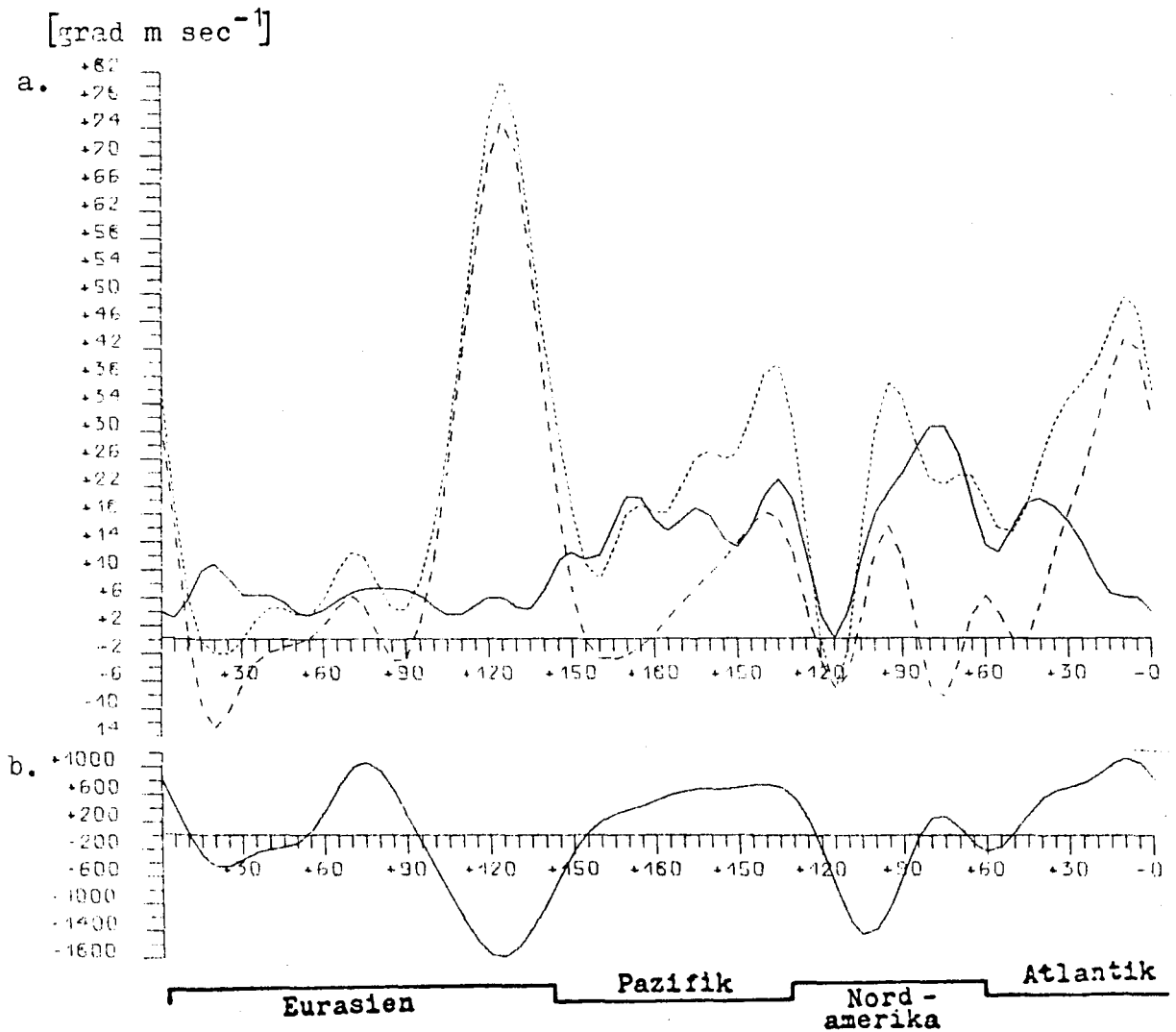
Räumliche Veränderlichkeit der monatlichen Mittelwerte des meridionalen Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen im 850 mb - Niveau.
 Isolinienabstand: 5 grad m sec⁻¹

Januar 1975



Räumliche Veränderlichkeit des zeitlich gemittelten meridionalen Transportes sensibler Energie, aufgeteilt in Transport durch:
 Teil a.: wandernde Wellen (TE:—), stehende Wellen (SE:---), die Summe beider Anteile (TE+SE:.....),
 Teil b.: den Anteil von zusätzlichen Gliedern, die bei gemischt räumlicher und zeitlicher Mittelung entstehen und im Breitenmittel keinen Beitrag geben (—). Abb.9

Januar 1975

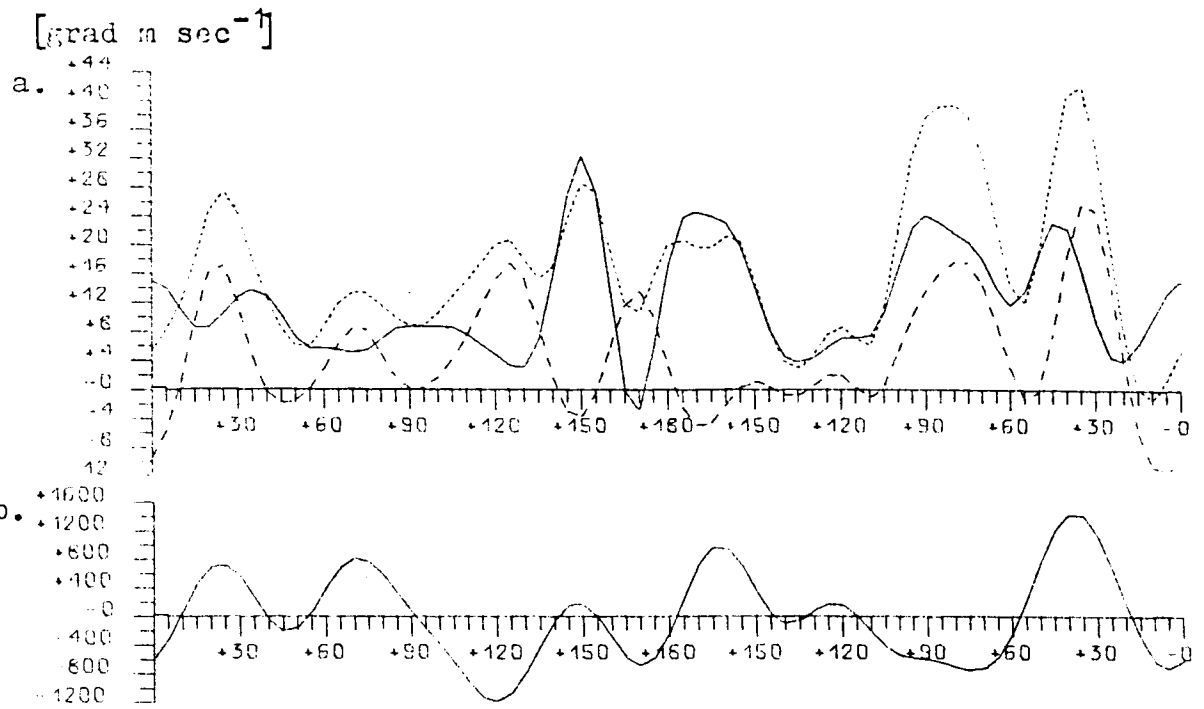


850 mb

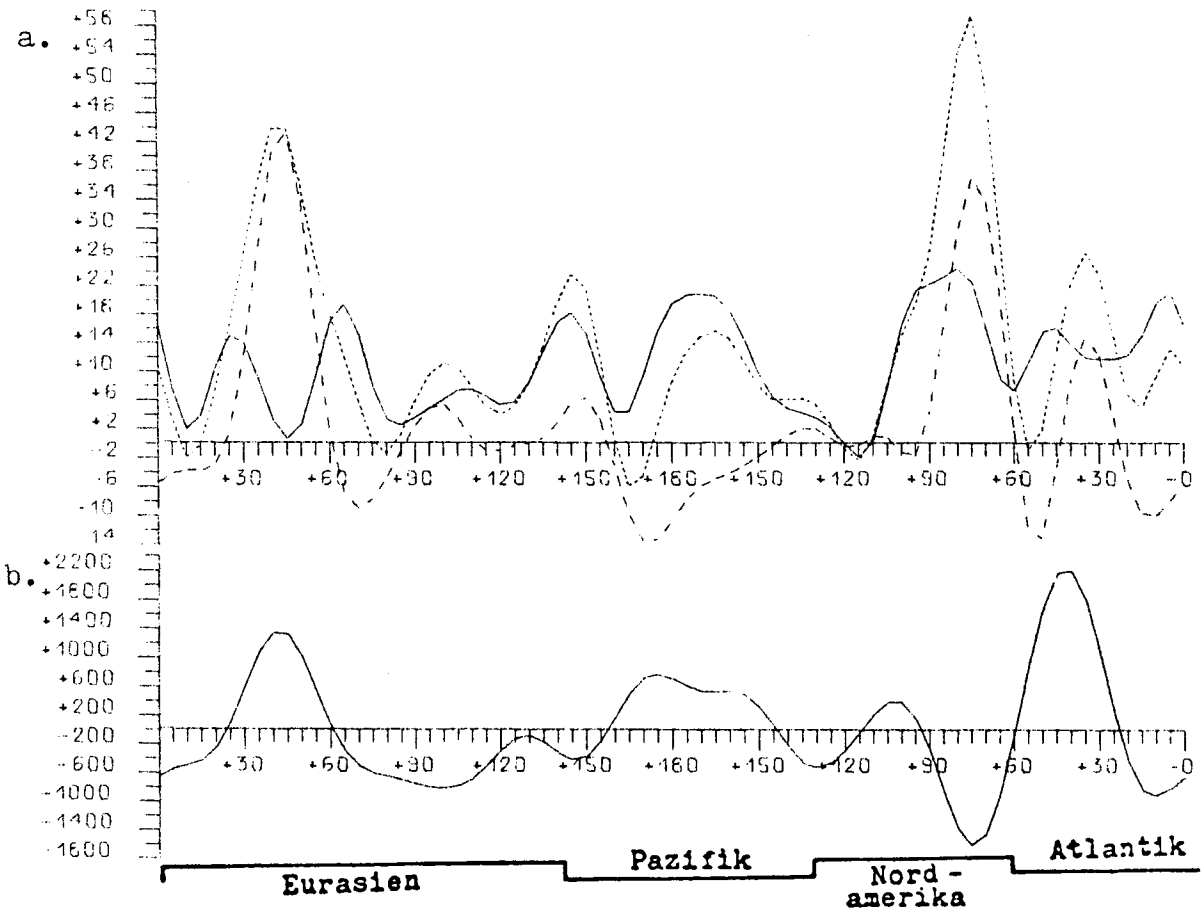
Breitenkreis 50°N

Räumliche Veränderlichkeit des zeitlich gemittelten meridionalen Transportes sensibler Energie, aufgeteilt in Transport durch:
 Teil a.: wandernde Wellen (TE:—), stehende Wellen (SE:---), die Summe beider Anteile (TE+SE:.....),
 Teil b.: den Anteil von zusätzlichen Gliedern, die bei gemischt räumlicher und zeitlicher Mittelung entstehen und im Breitenmittel keinen Beitrag geben (——). Abb.10

März 1975

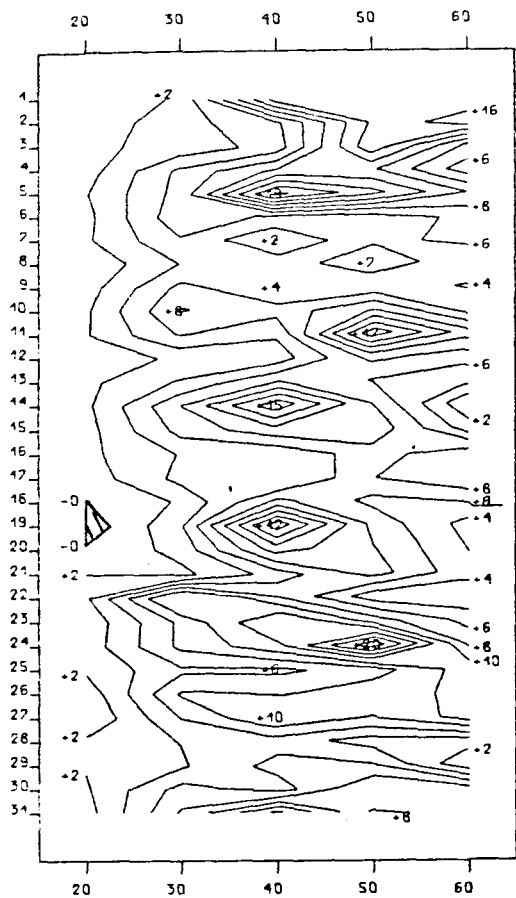


April 1975

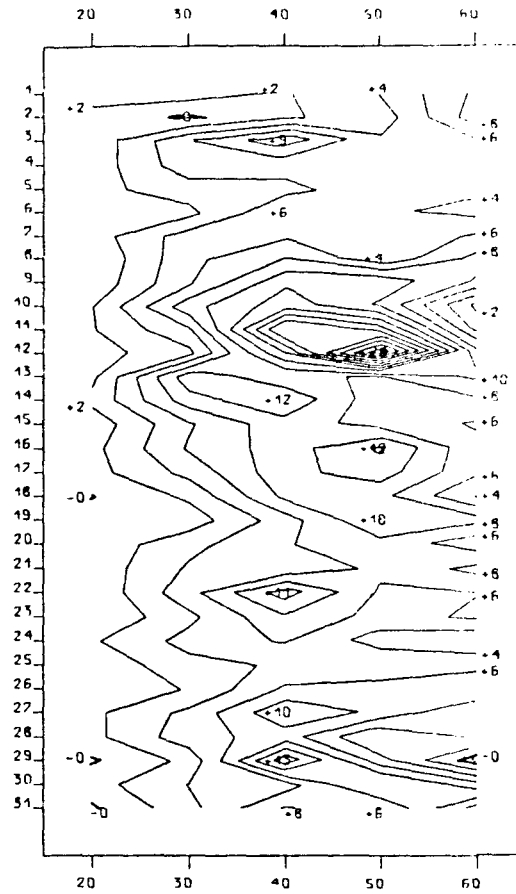


850 mb Breitenkreis 50°N

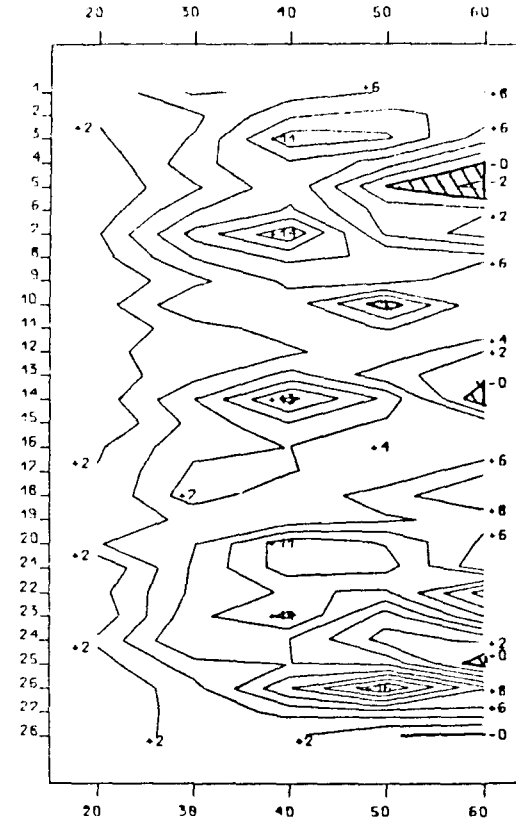
Räumliche Veränderlichkeit des zeitlich gemittelten meridionalen Transportes sensibler Energie, aufgeteilt in Transport durch:
 Teil a.: wandernde Wellen (TE:—), stehende Wellen (SE:---), die Summe beider Anteile (TE+SE:.....),
 Teil b.: den Anteil von zusätzlichen Gliedern, die bei gemischt räumlicher und zeitlicher Mittelung entstehen und im Breitenmittel keinen Beitrag geben (—). Abb.11



Dezember 1975



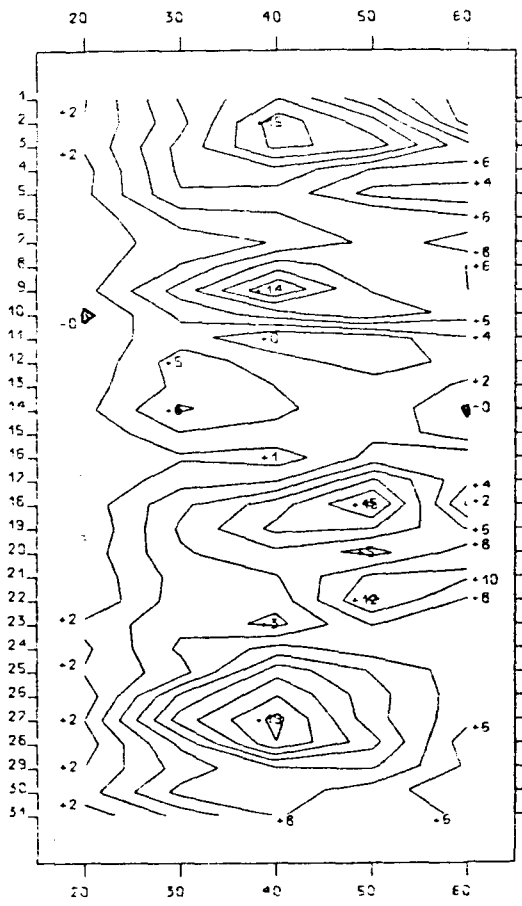
Januar 1975



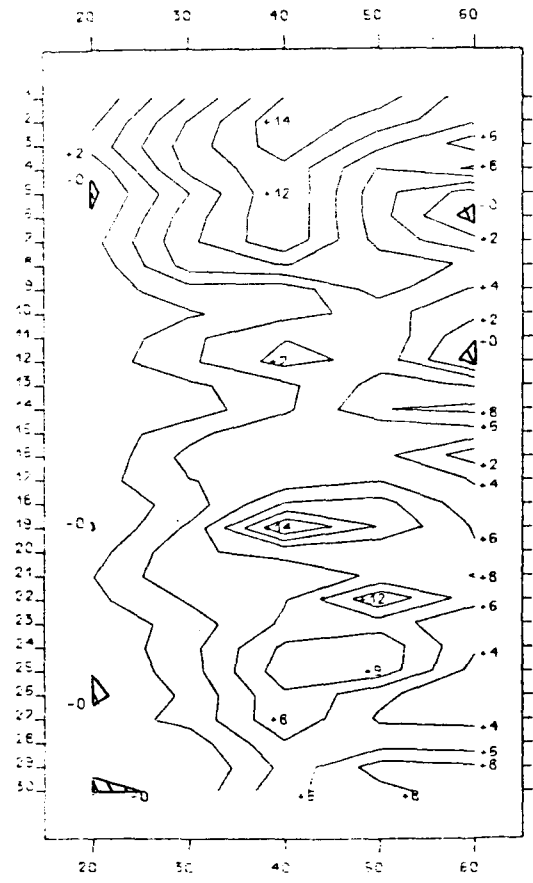
Februar 1975

850 mb

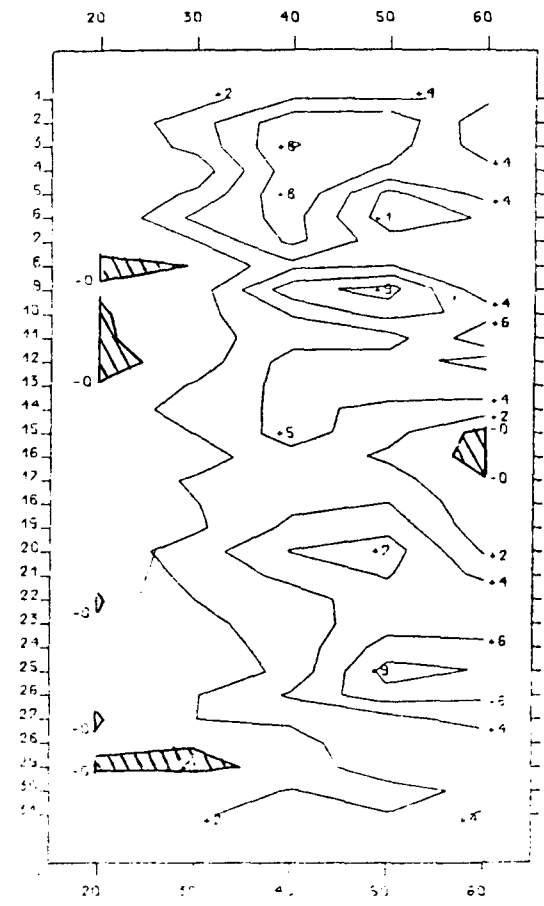
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch wandernde Wellen zwischen 20°N und 60°N .
 Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



März 1975



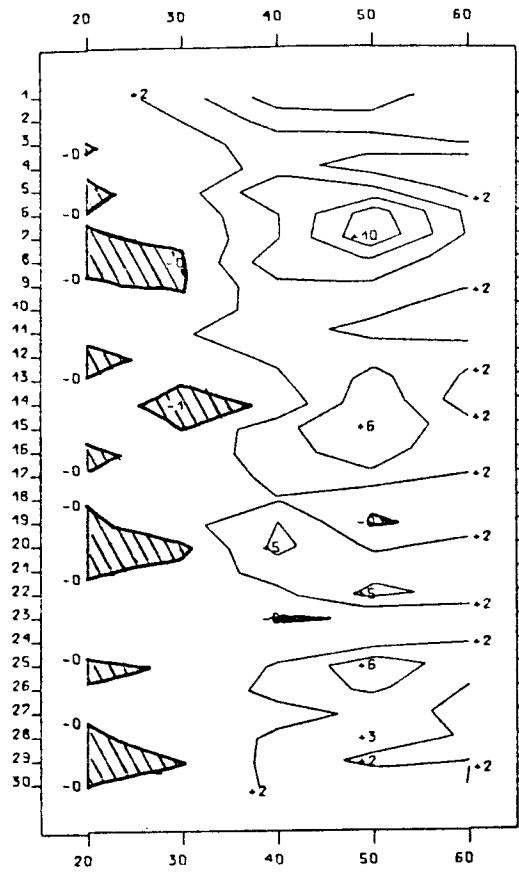
April 1975



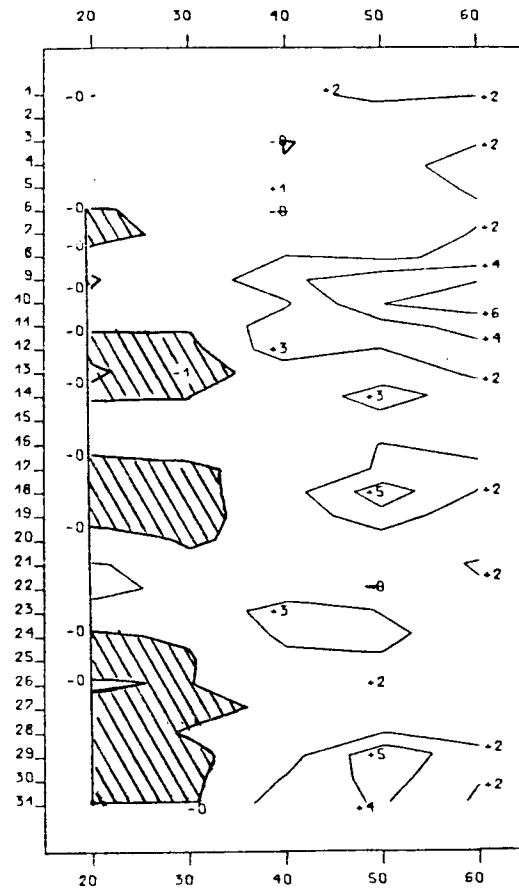
Mai 1975

850 mb

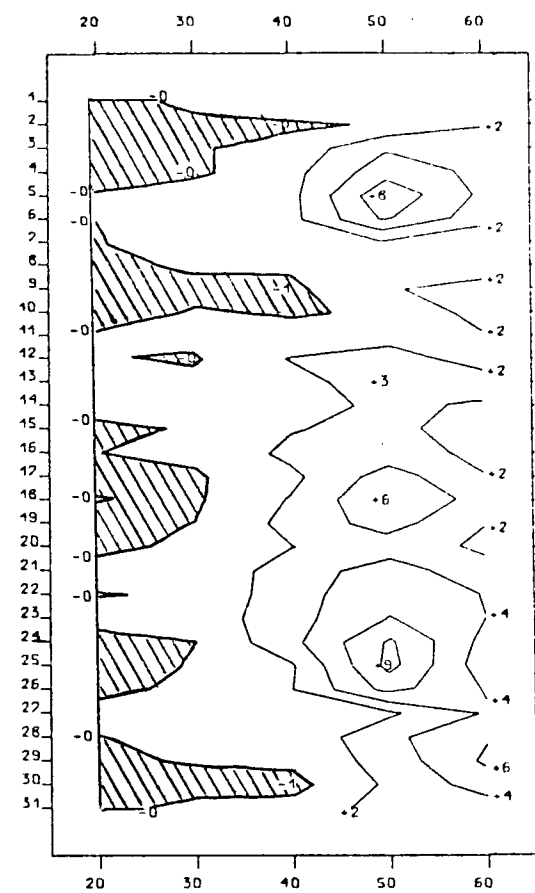
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch wandernde Wellen zwischen 20°N und 60°N . Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



Juni 1975



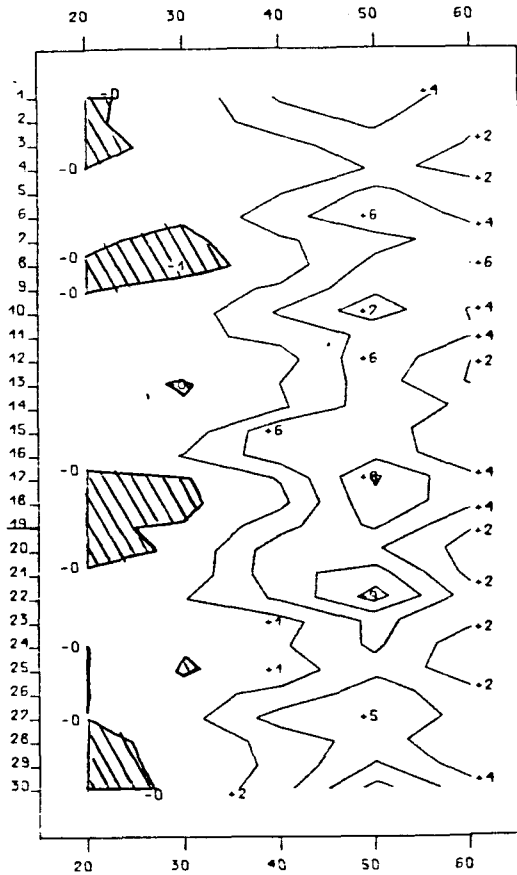
Juli 1975



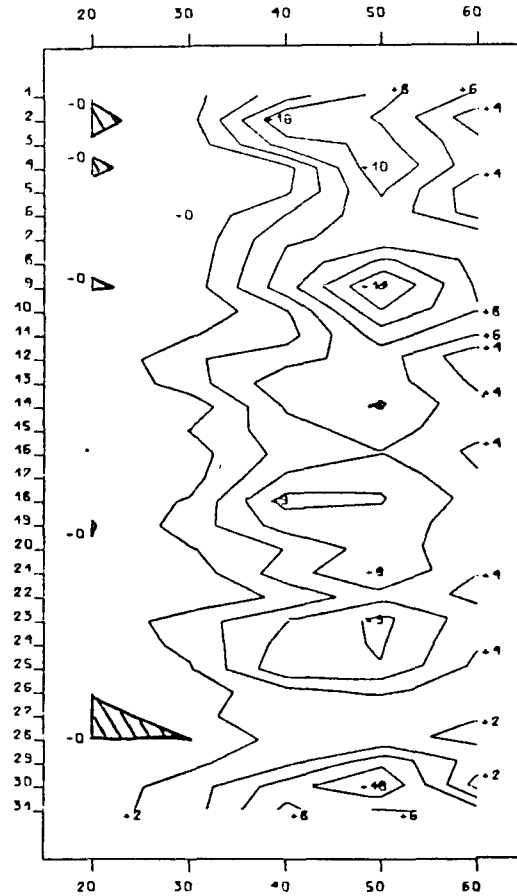
August 1975

850 mb

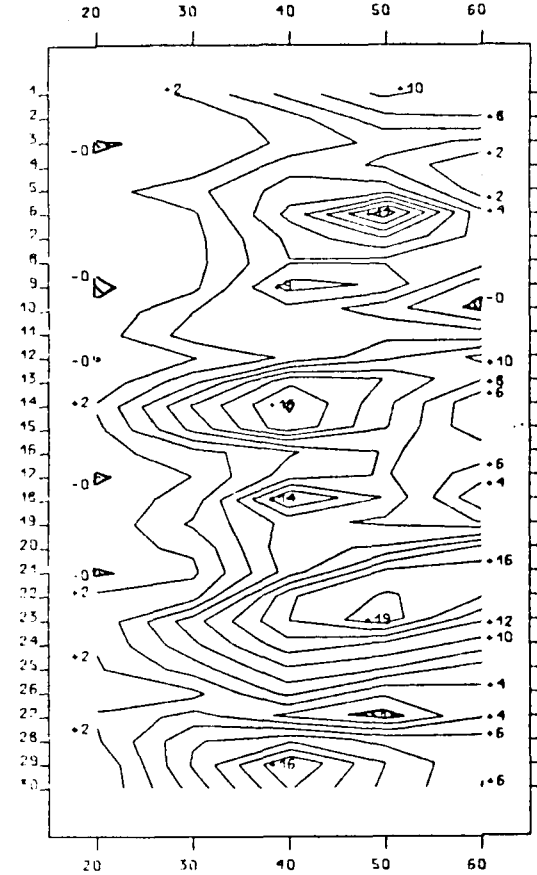
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten
Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler
Energie durch wandernde Wellen zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



September 1975



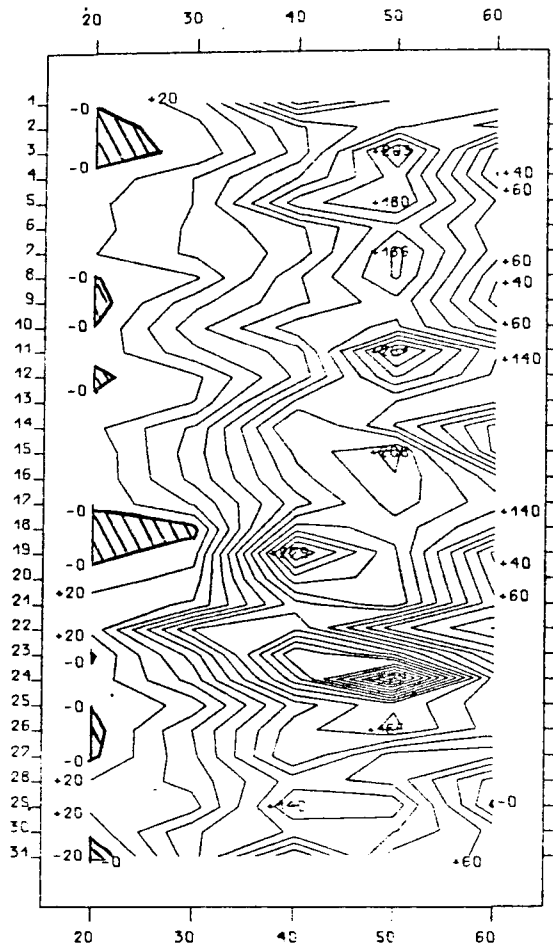
Oktober 1975



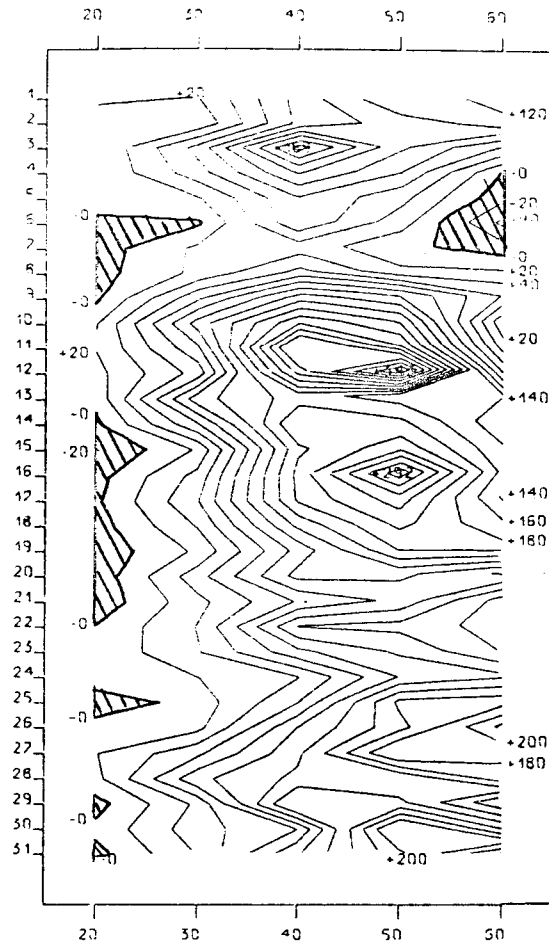
November 1975

850 mb

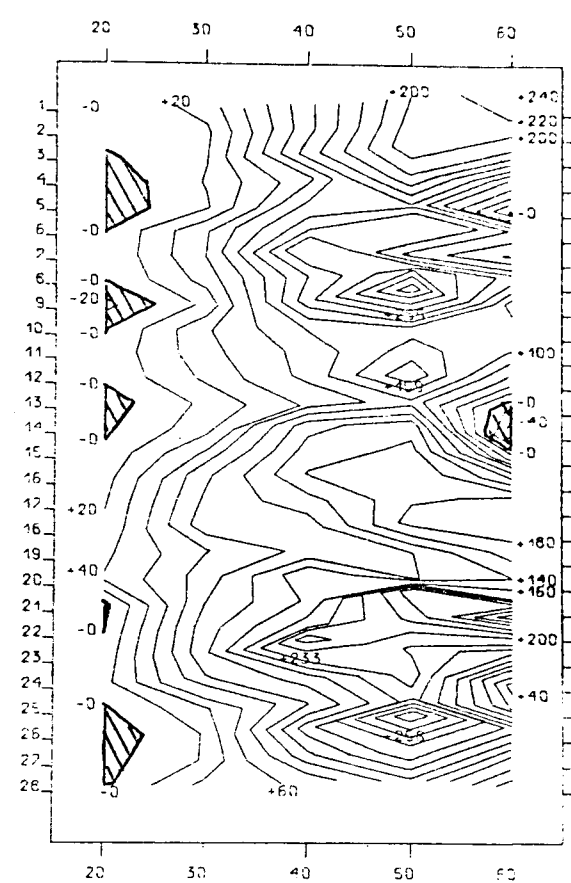
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten
Breitnittelwerte des meridionalen Transportes sensibler
Energie durch wandernde Wellen zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



Dezember 1975



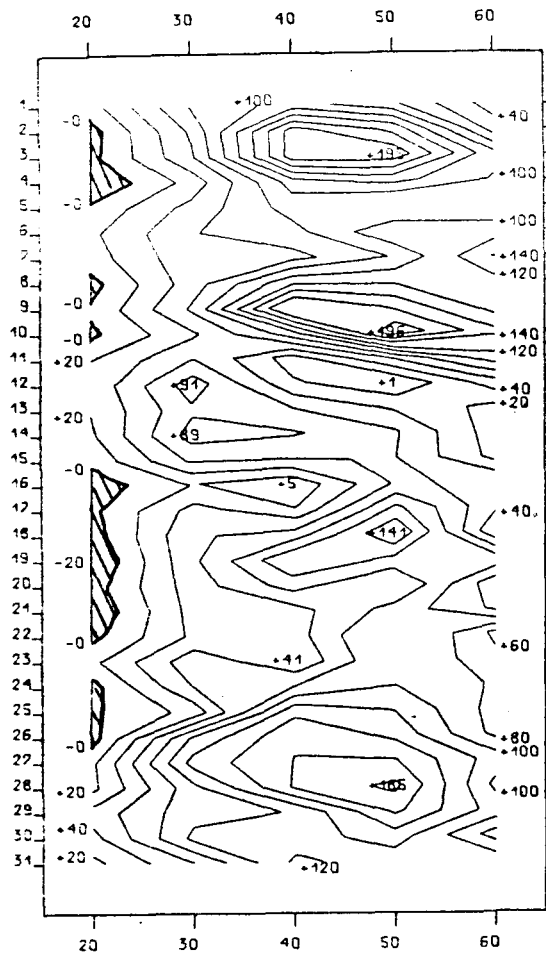
Januar 1975



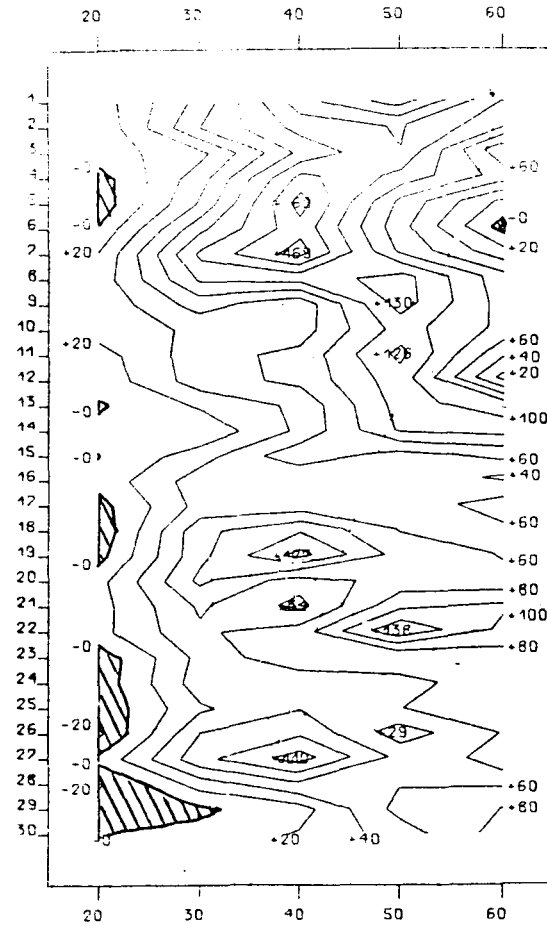
Februar 1975

850 mb

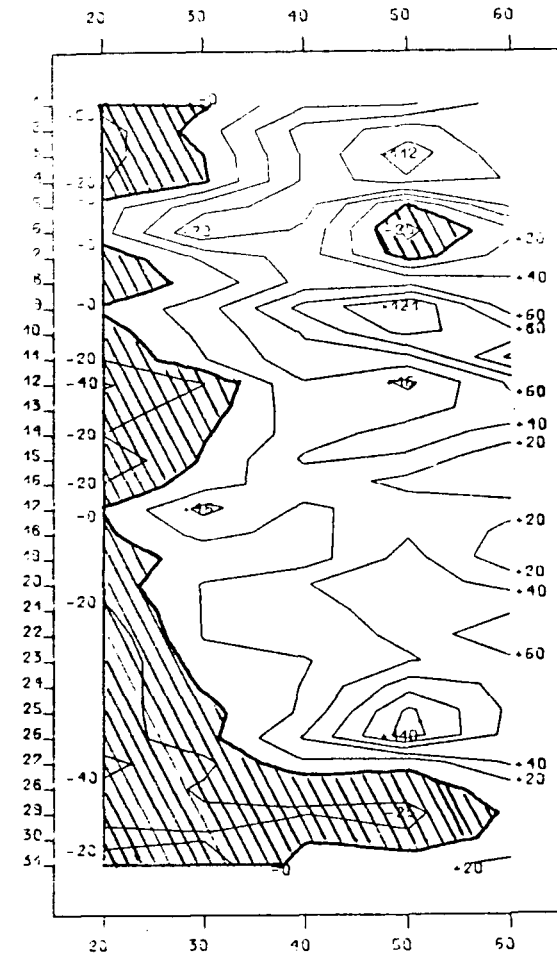
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten
Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes
sensibler Energie zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



März 1975



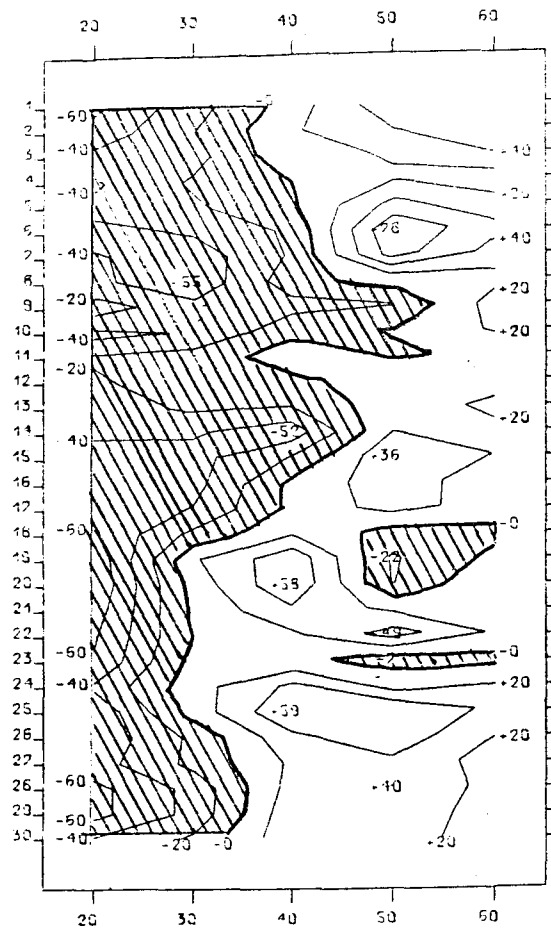
April 1975



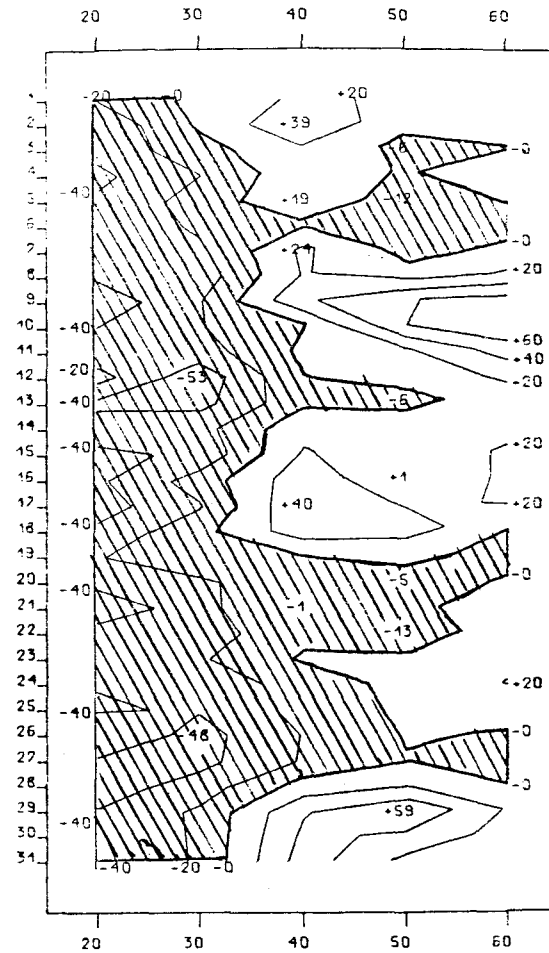
Mai 1975

850 mb

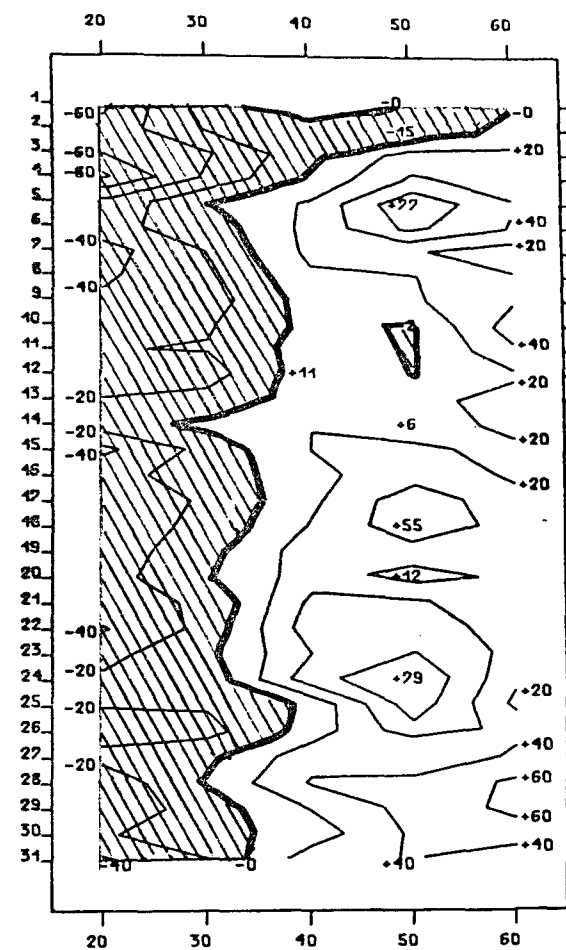
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\psi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: 2 grad m sec^{-1}



Juni 1975



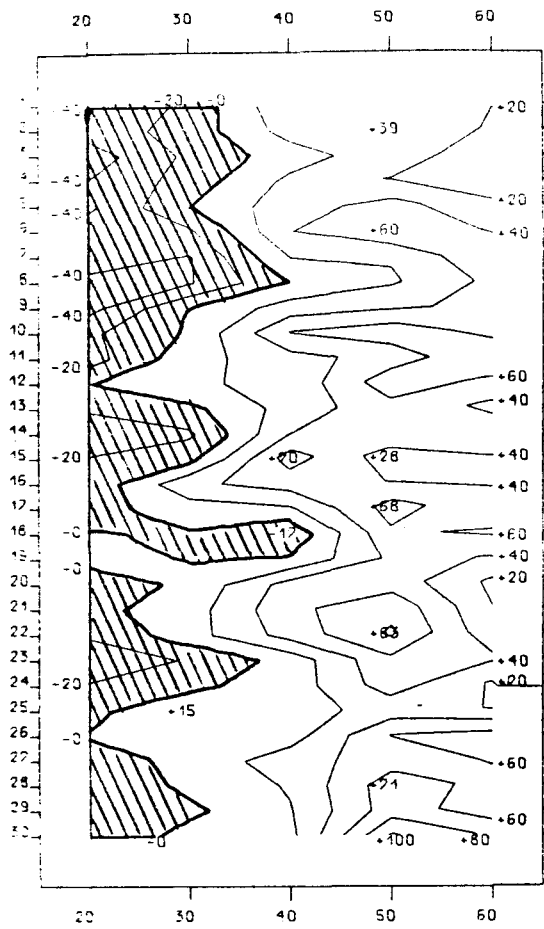
Juli 1975



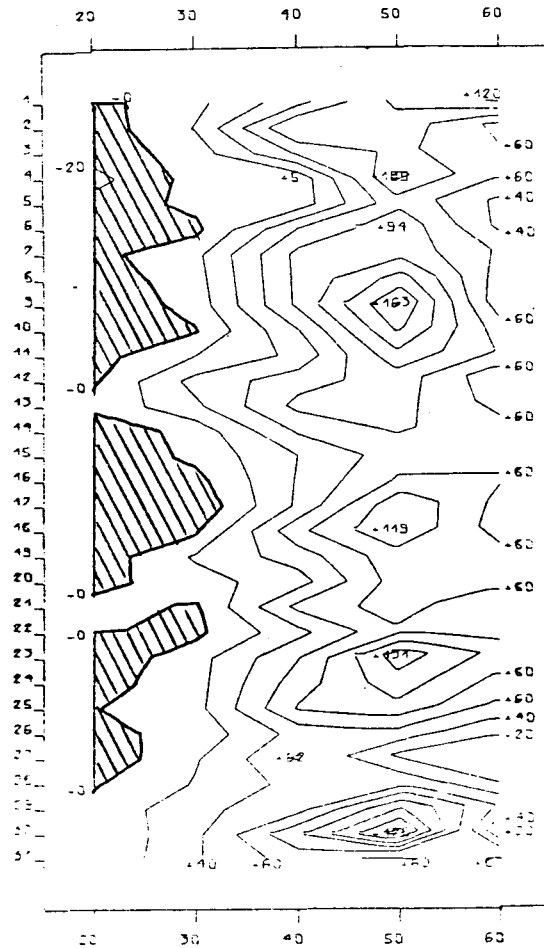
August 1975

850 mb

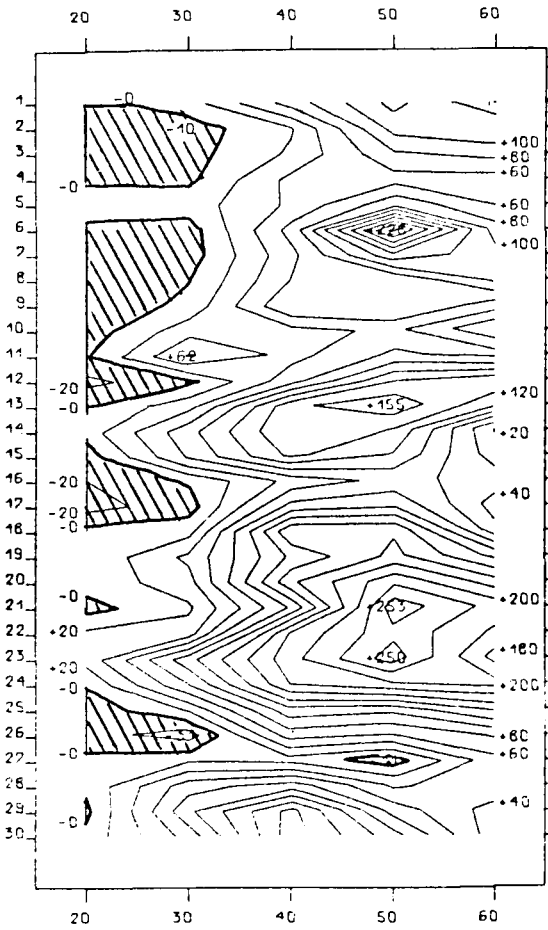
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\phi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$.



September 1975



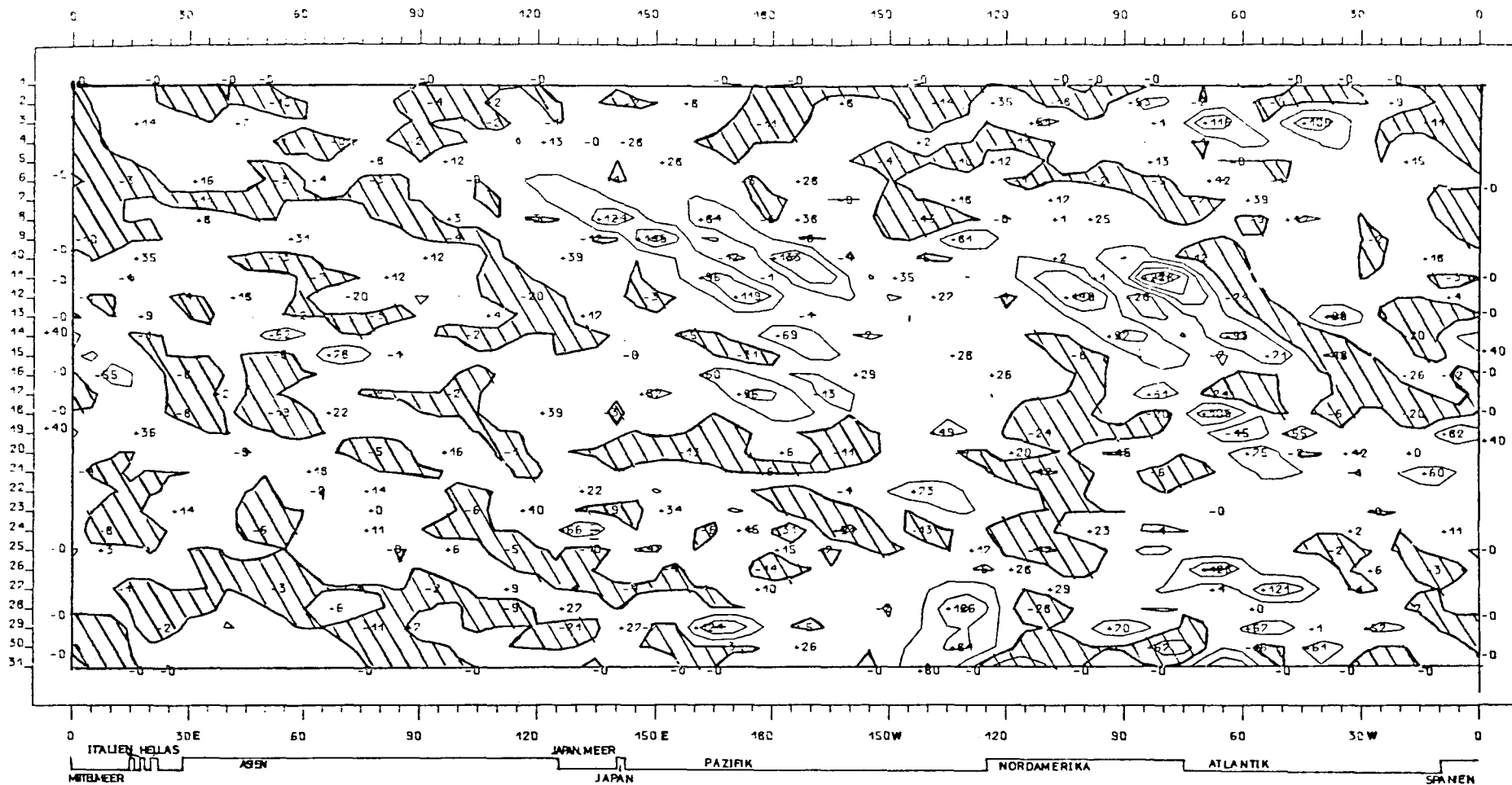
Oktober 1975



November 1975

850 mb

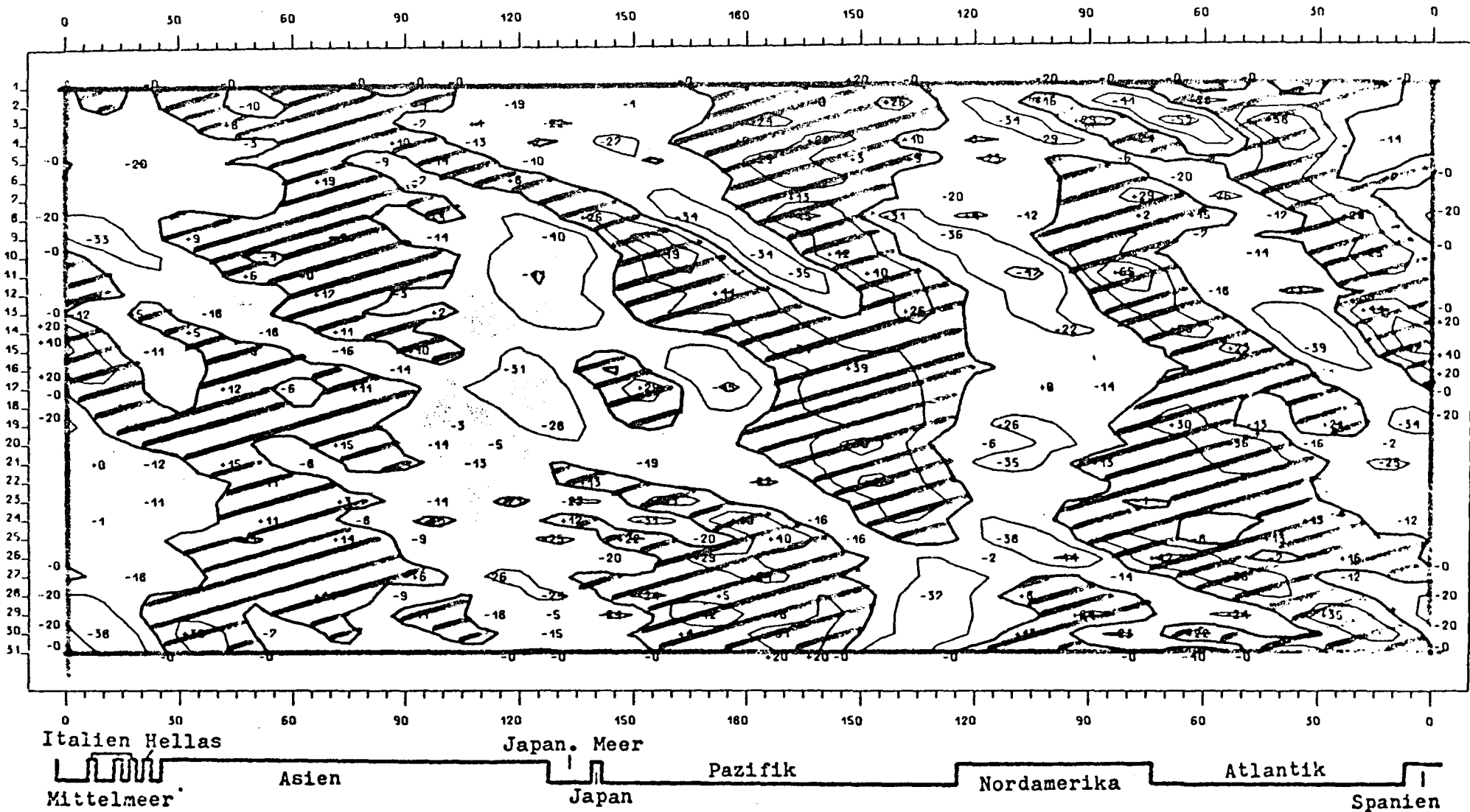
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



850mb
 Breitenkreis 40°N
 Januar 1975

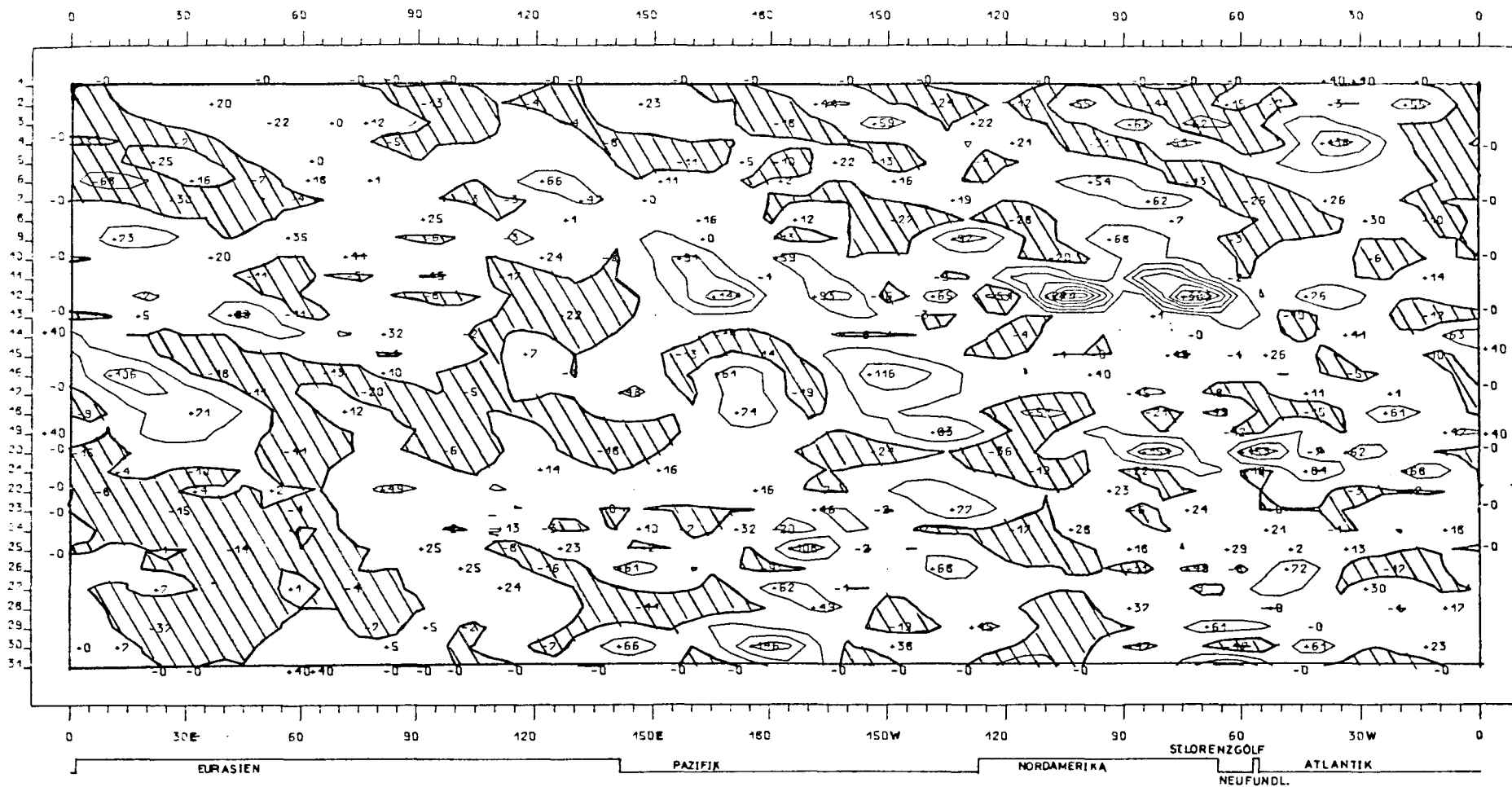
Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

Abb.20



850 mb
Breitenkreis 40°N
Januar 1975

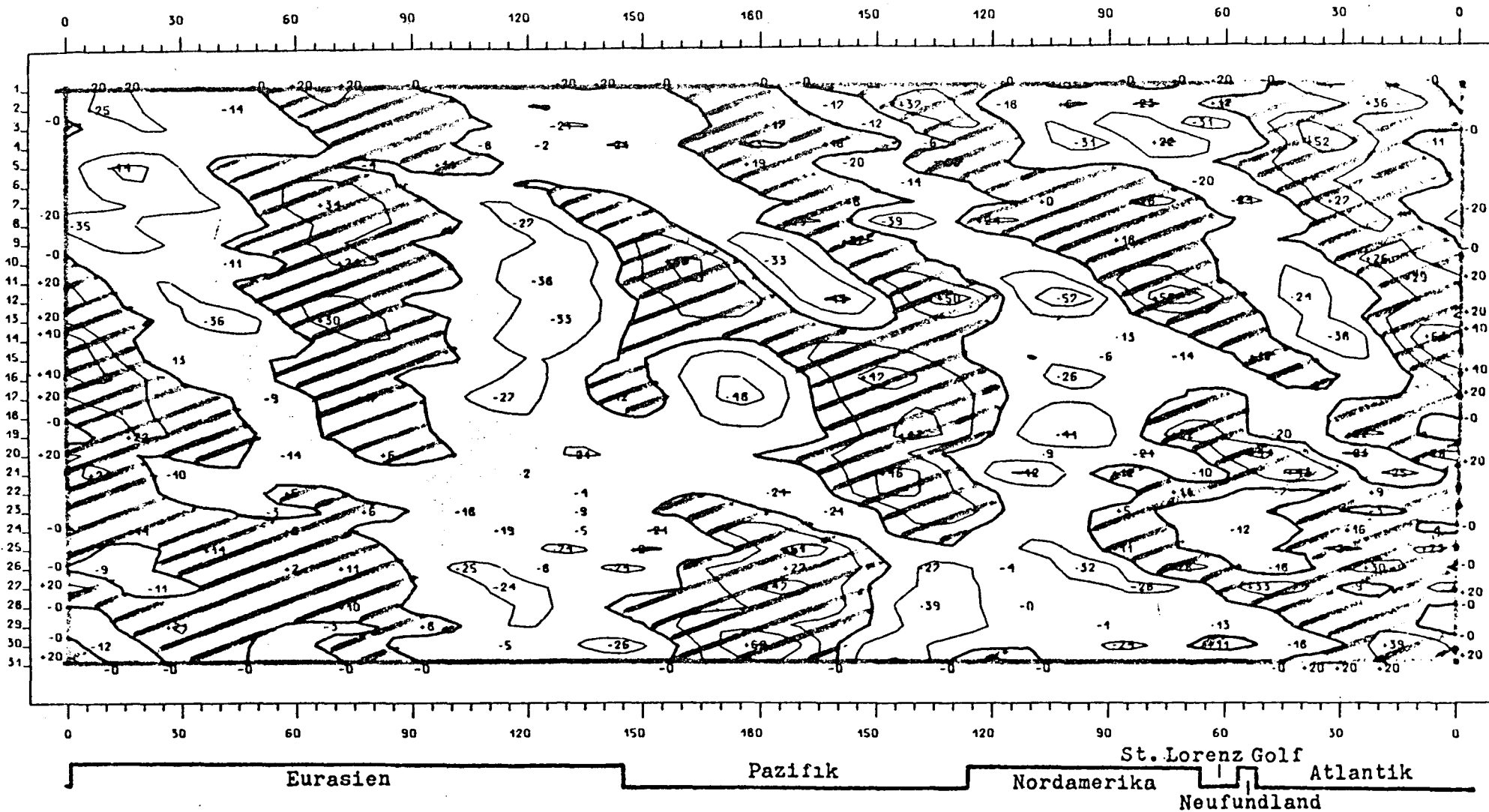
Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
Transports sensibler Energie.
Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹



850 mb
 Breitenkreis 50°N
 Januar 1975

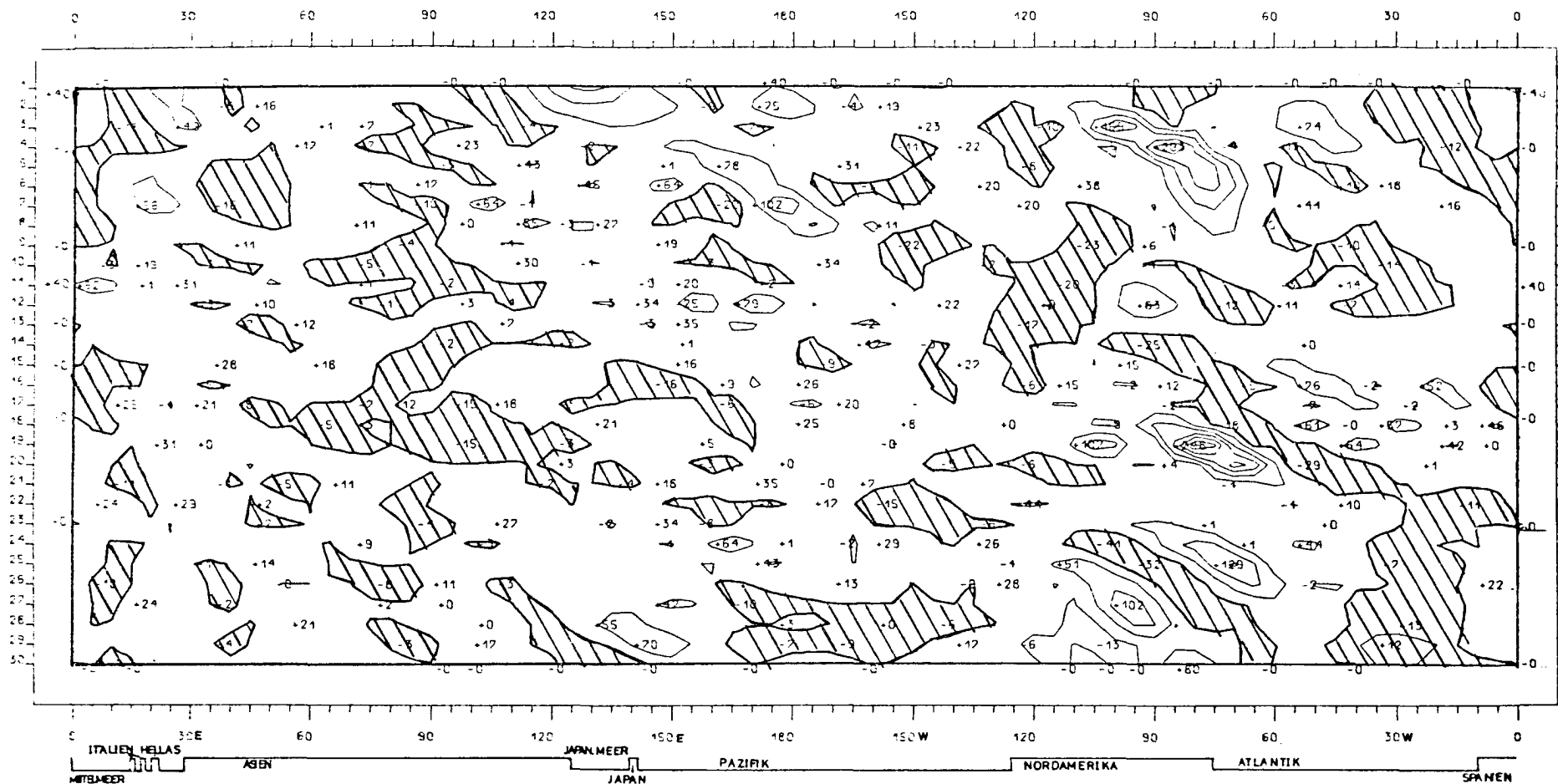
Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

Abb.22



850 mb
 Breitenkreis 50°N
 Januar 1975

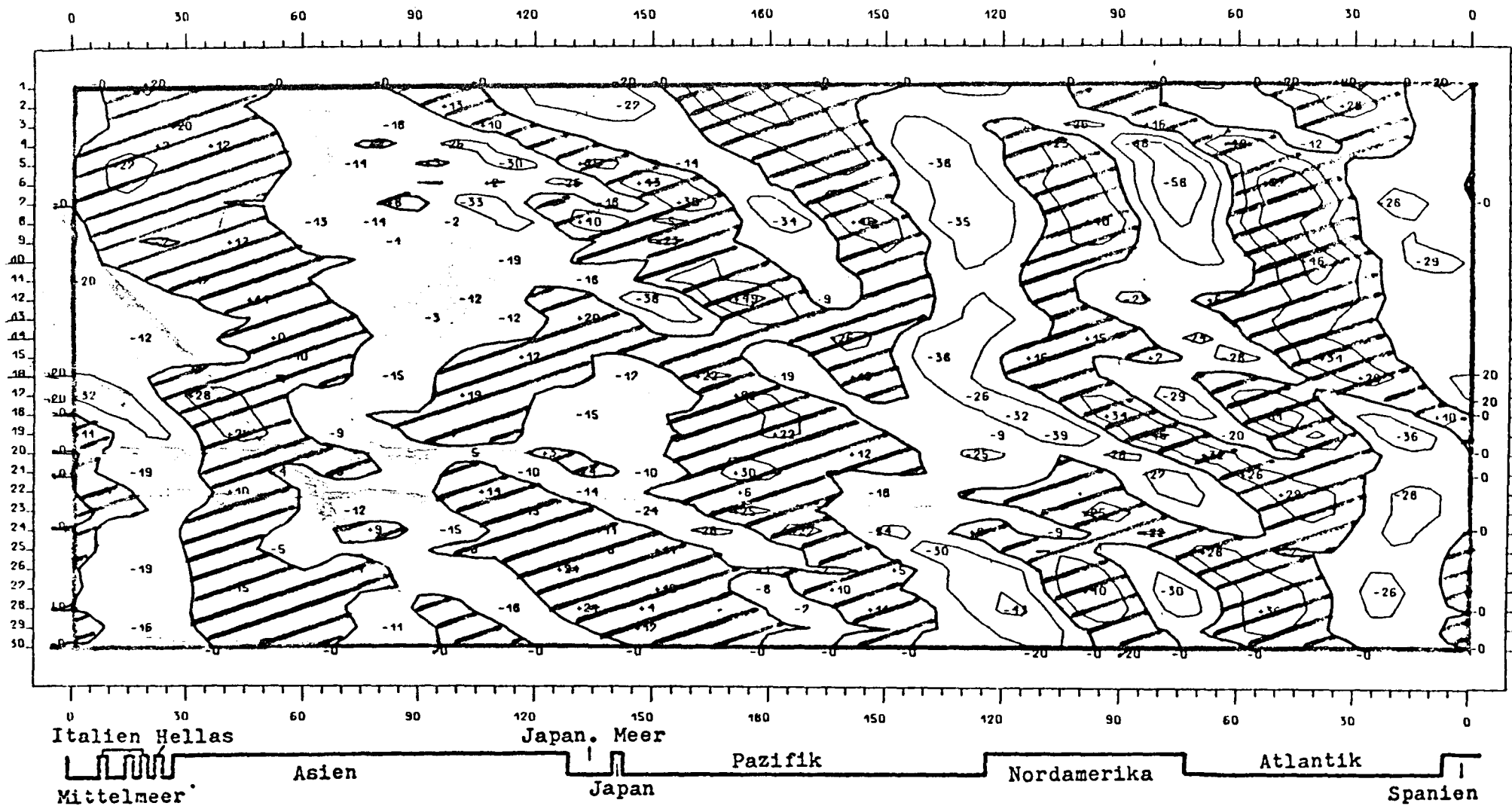
Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹



850 mb
 Breitenkreis 40°N
 April 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

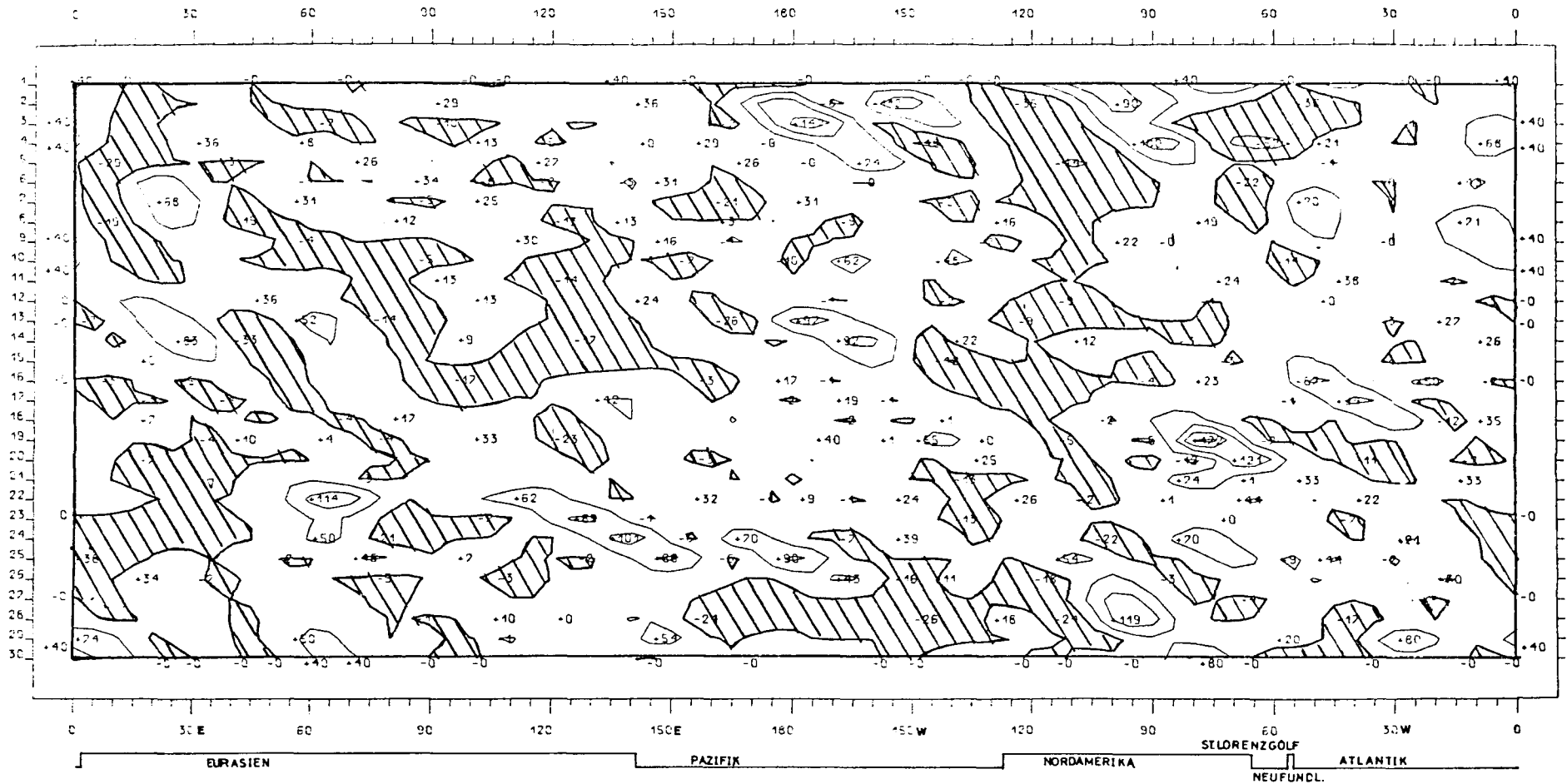
Abb.24



850 mb
 Breitenkreis 40°N
 April 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

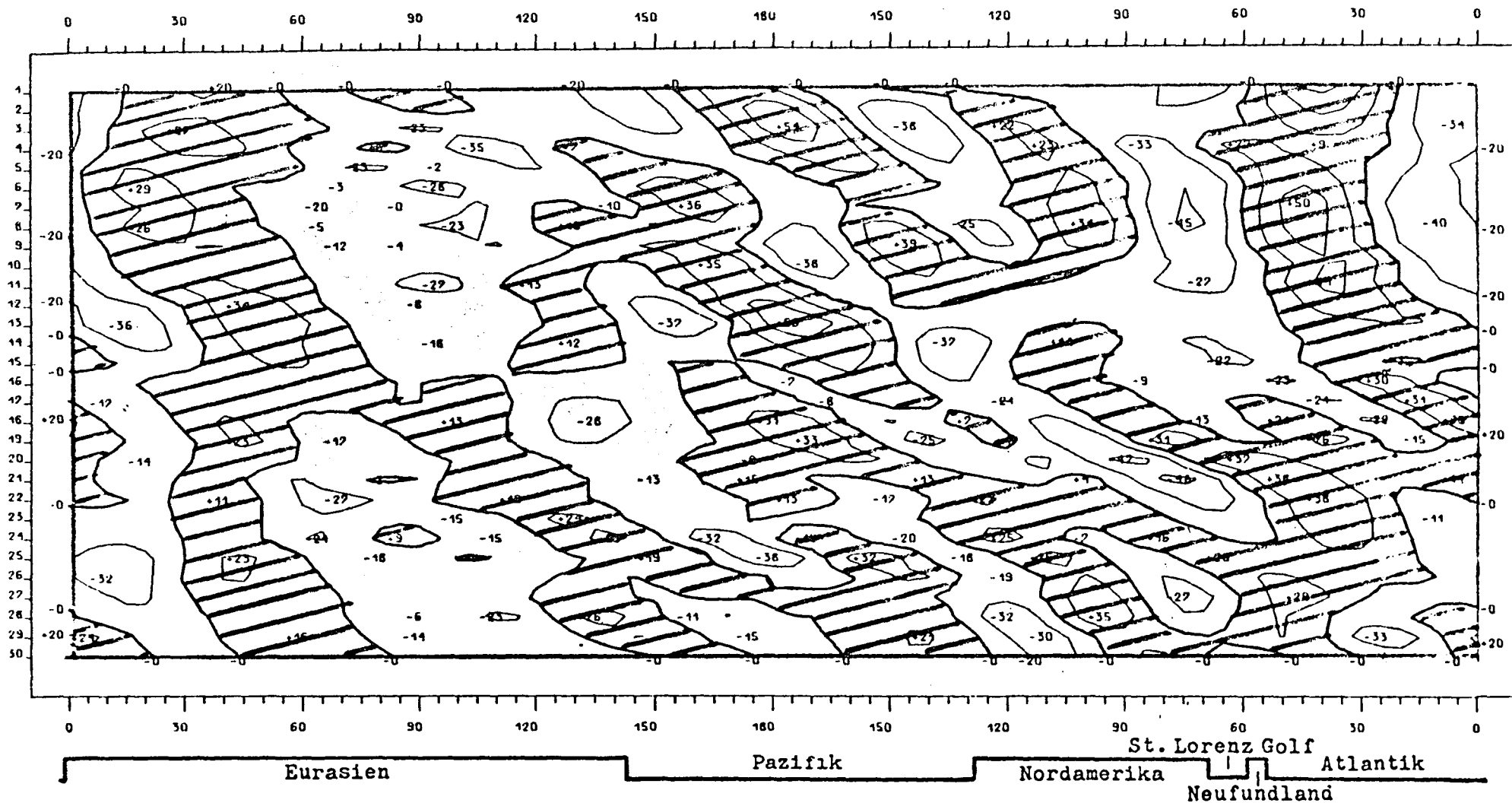
Abb.25



850 mb
 Breitenkreis 50°N
 April 1975

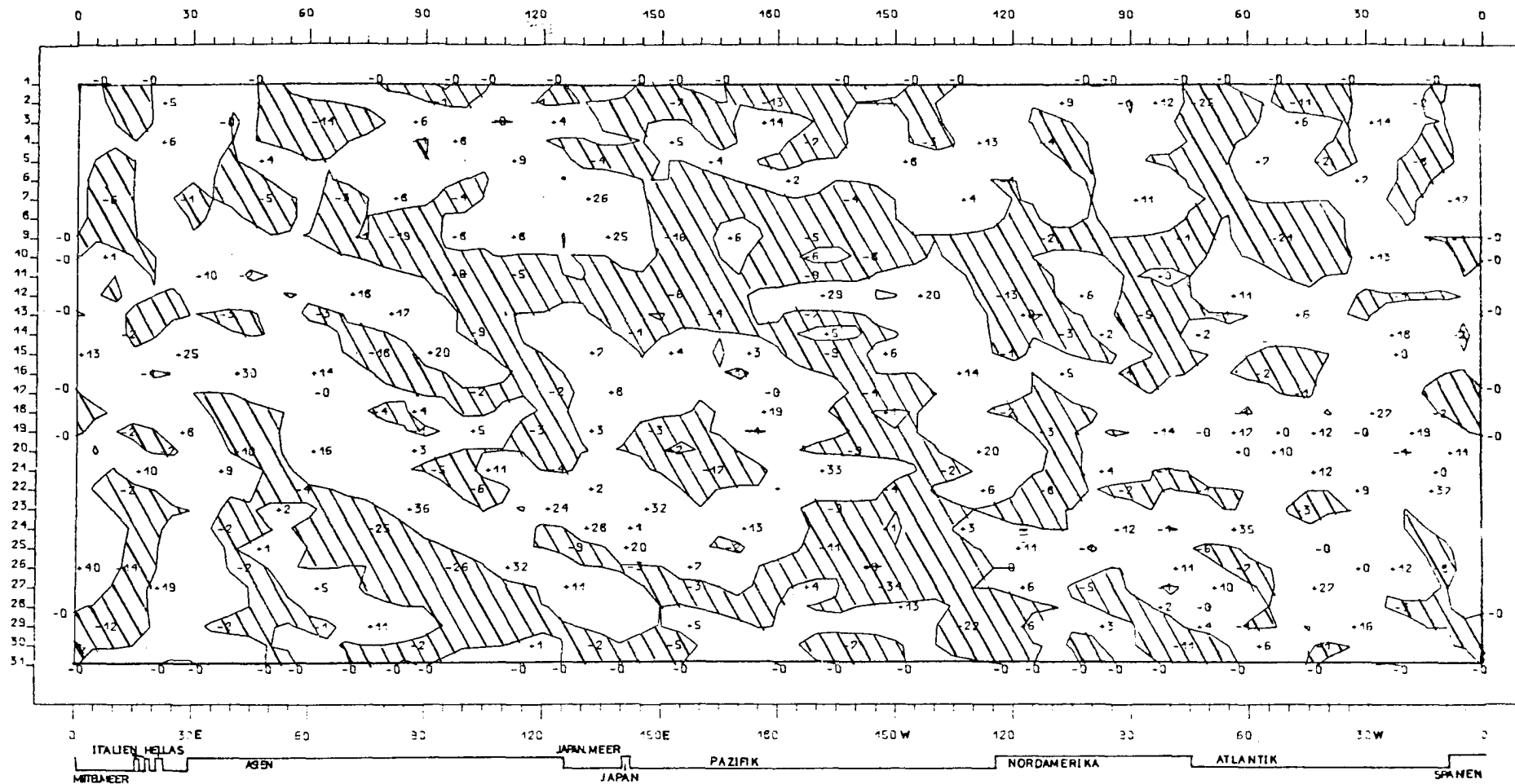
Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

Abb.26



850 mb
Breitenkreis 50°N
April 1975

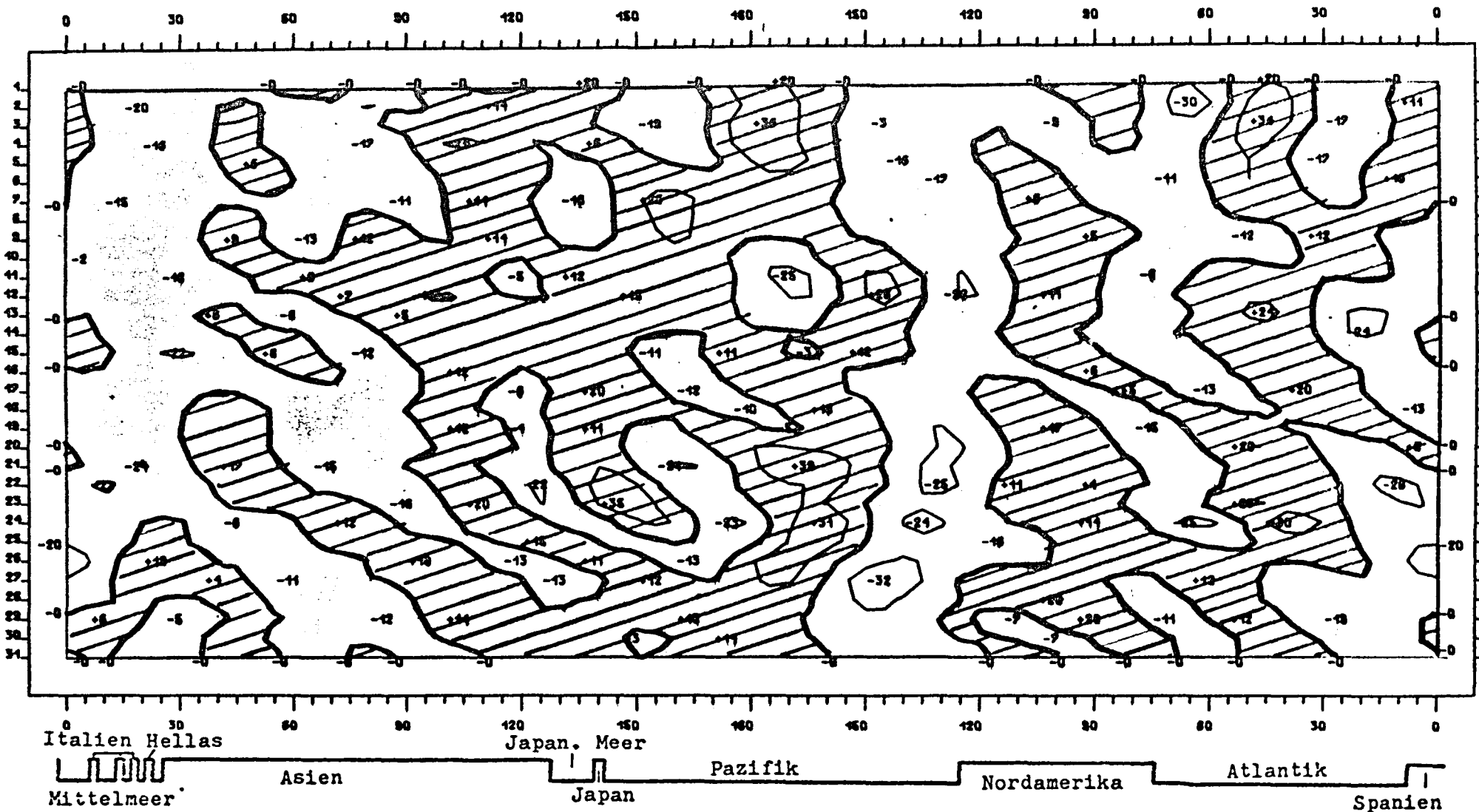
Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
Transports sensibler Energie.
Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹



850 mb
 Breitenkreis 40°N
 August 1975

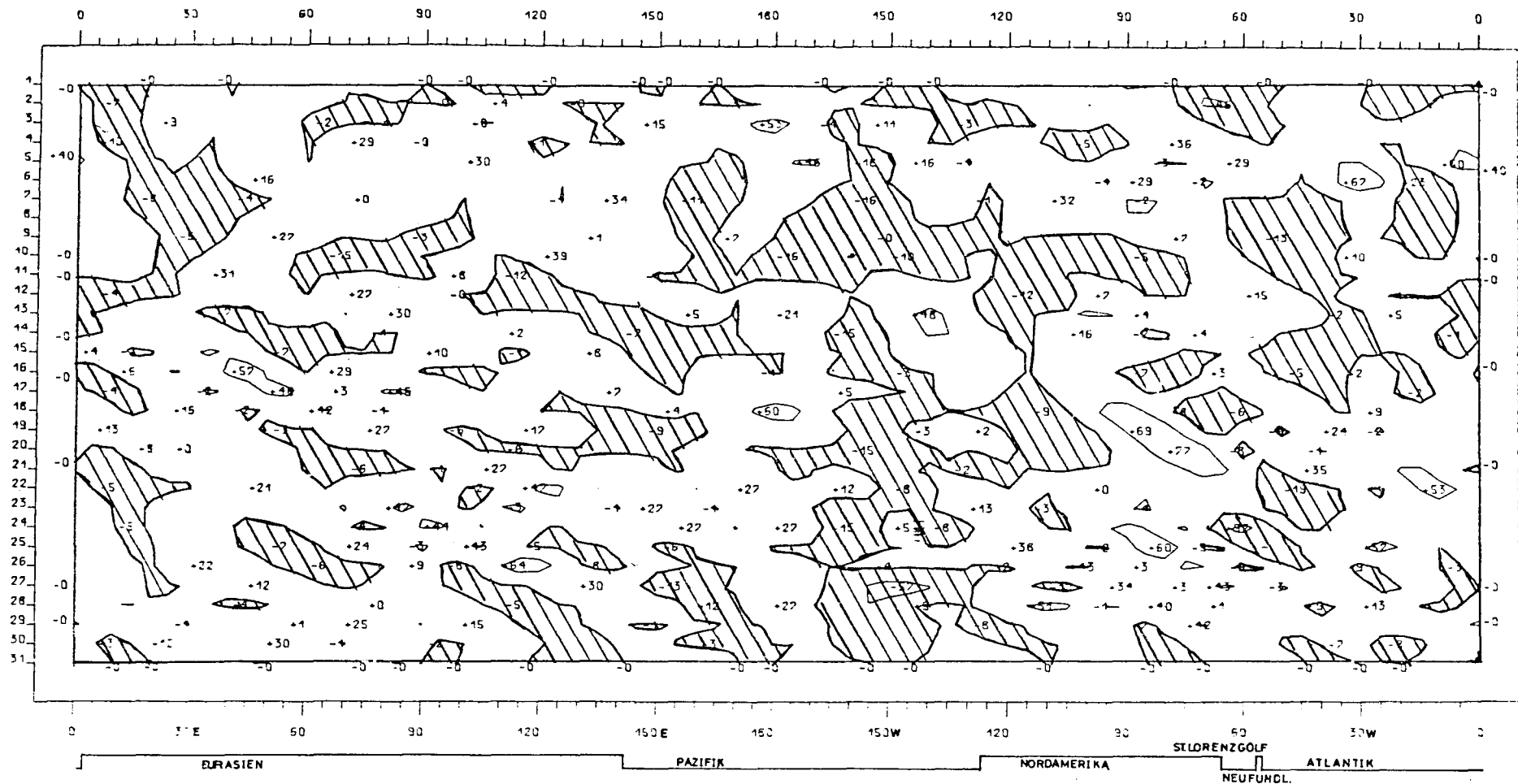
Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

Abb.28



850 mb
 Breitenkreis 40°N
 August 1975

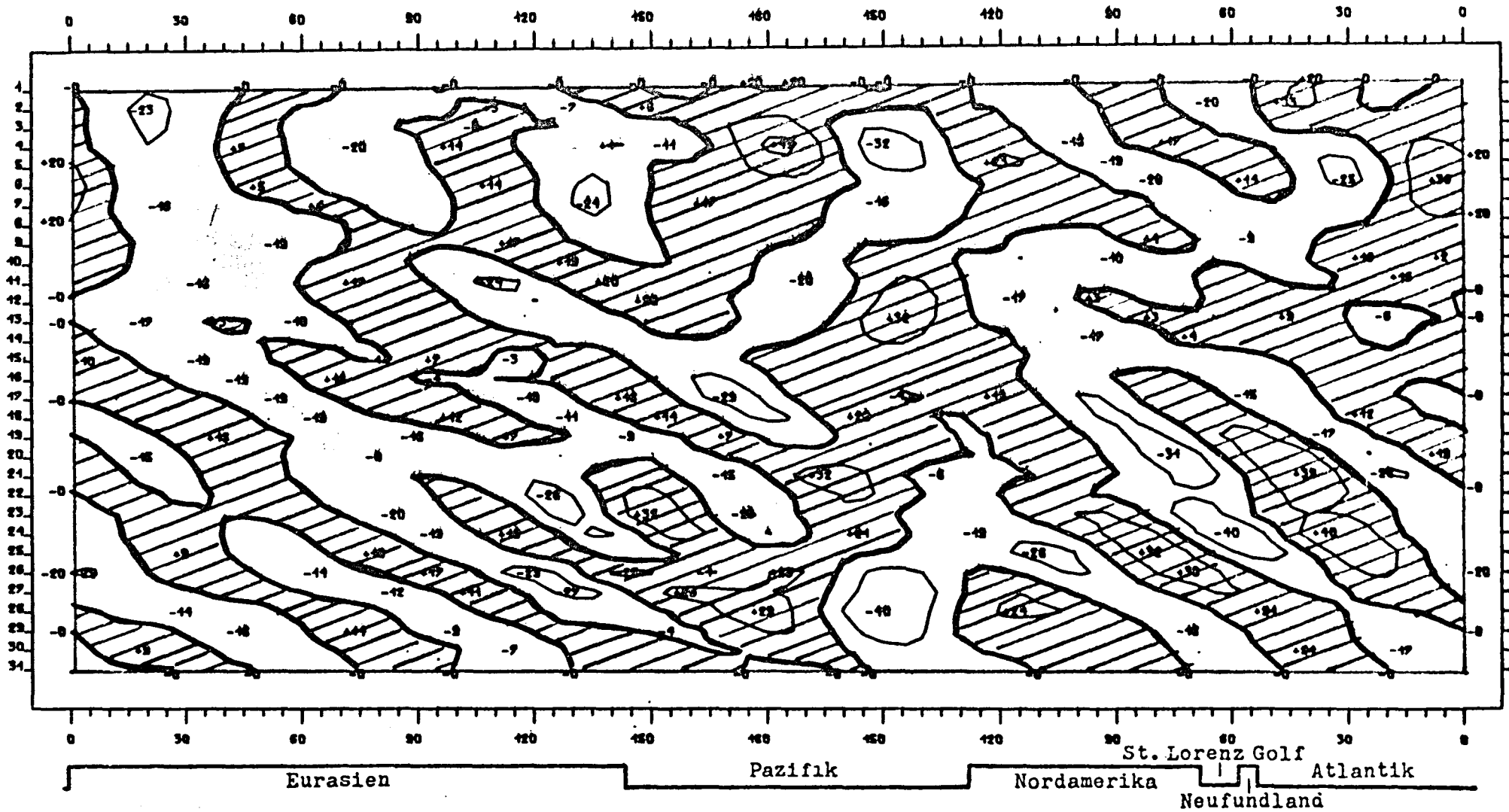
Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: $2000 \text{ grad m sec}^{-1}$



850 mb
 Breitenkreis 50°N
 August 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

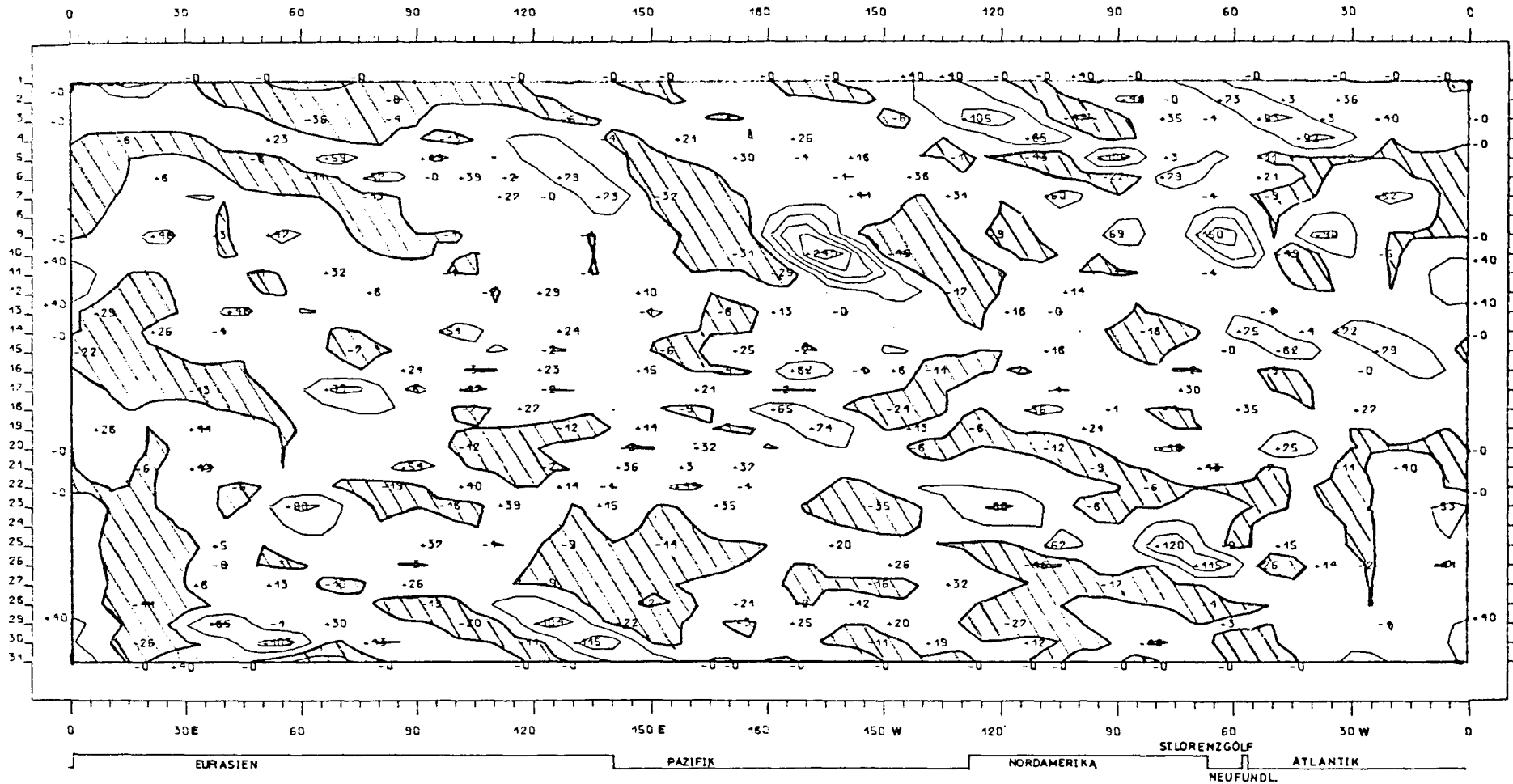
Abb.30



850 mb
 Breitenkreis 50°N
 August 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transportes sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

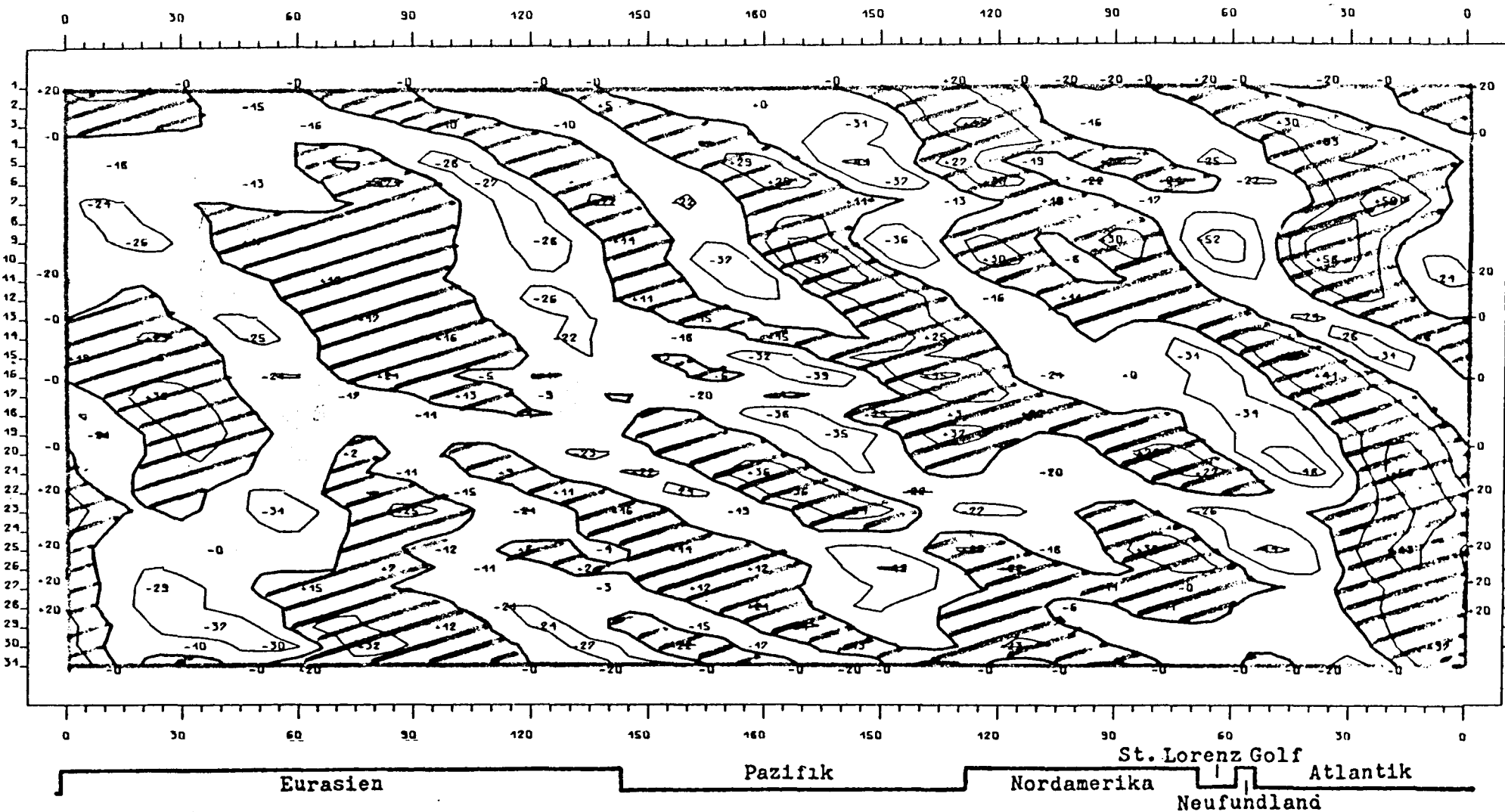
Abb.31



850 mb
 Breitenkreis 50°N
 Oktober 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

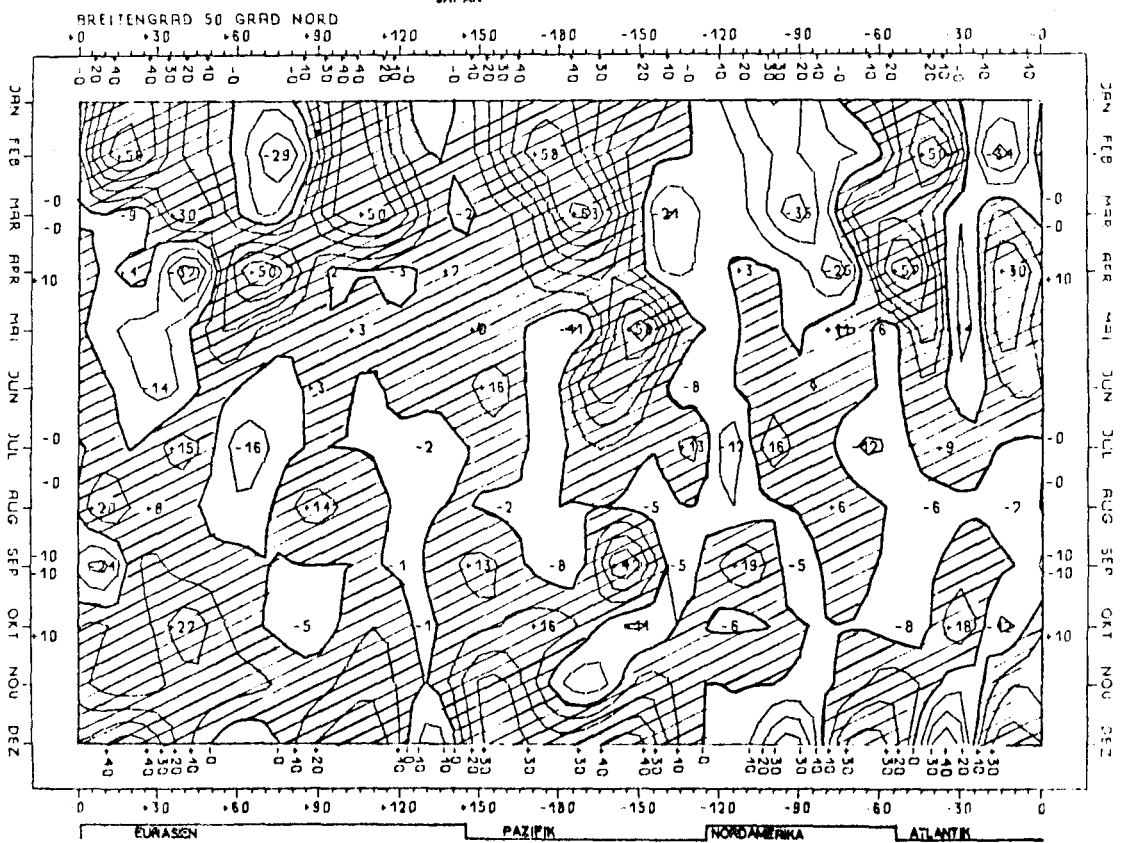
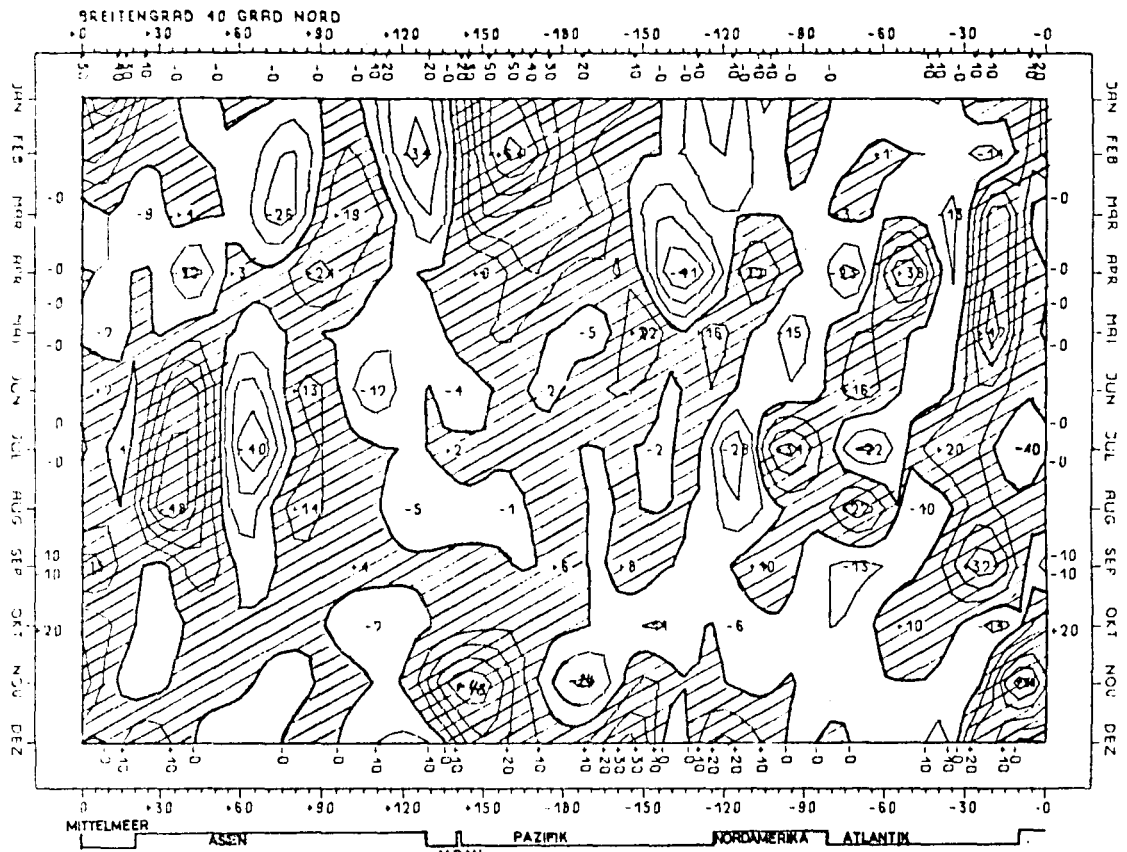
Abb.32



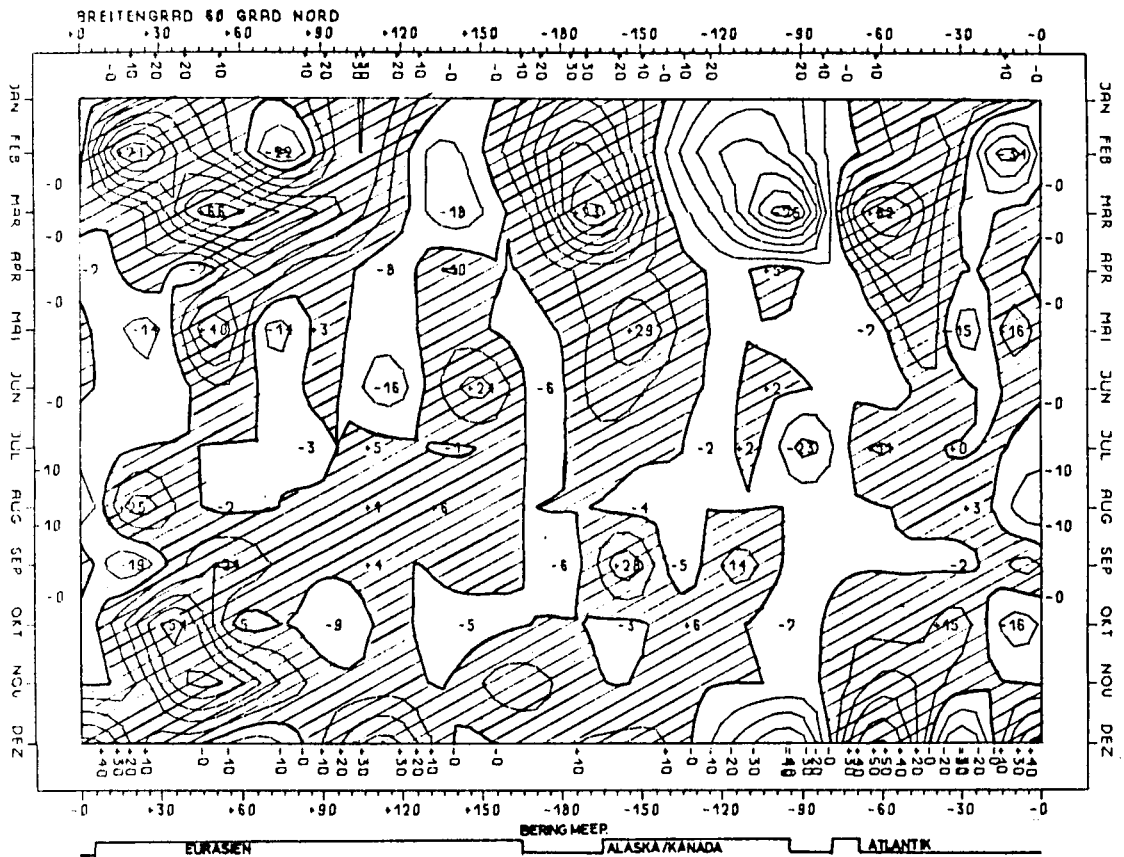
850 mb
 Breitenkreis 50°N
 Oktober 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

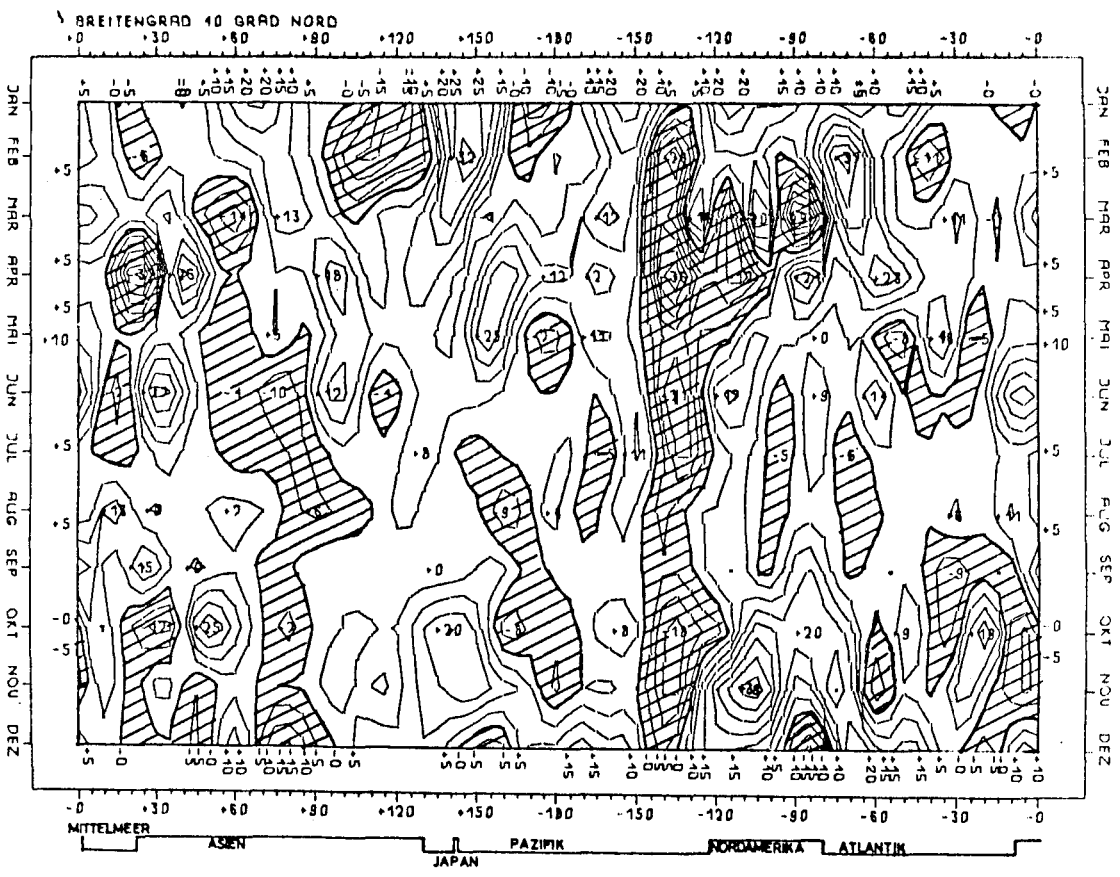
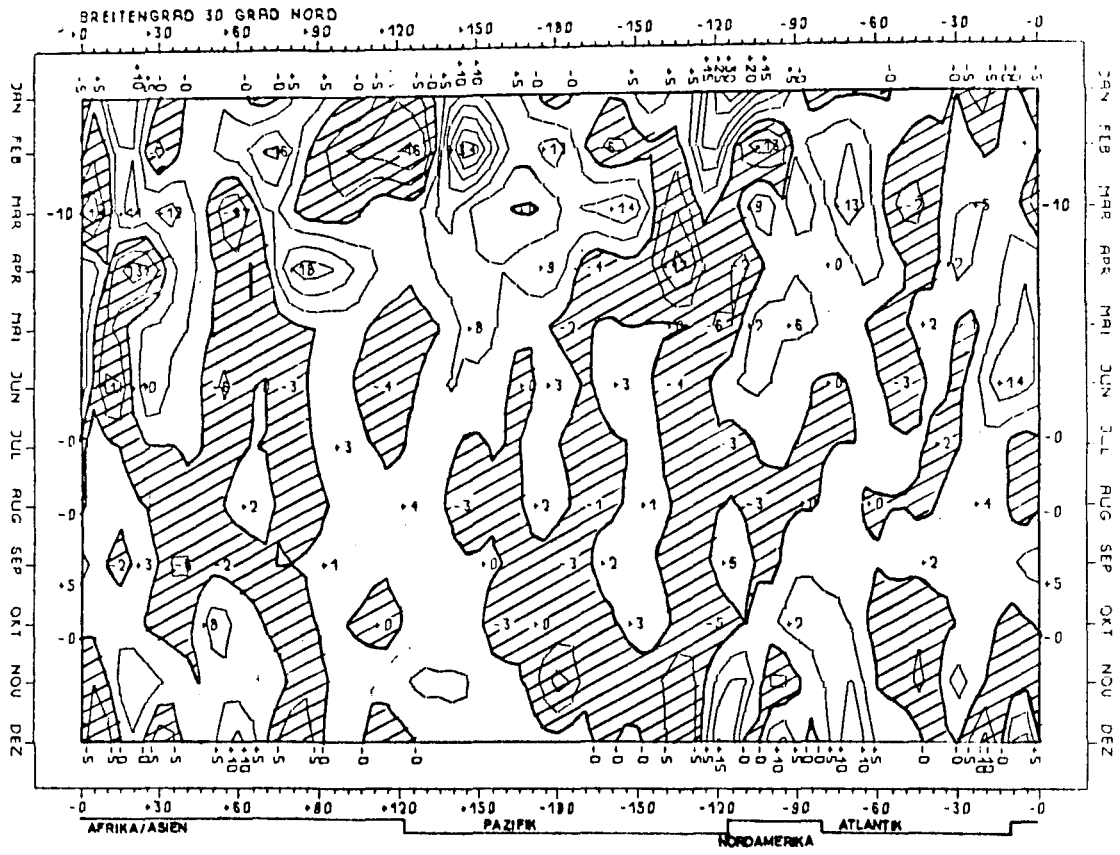
Abb.33



Räumliche Veränderlichkeit des meridionalen Transportes sensibler Energie durch stehende Wellen im Druckniveau 200mb. Isolinenabstand: 10 grad m sec⁻¹

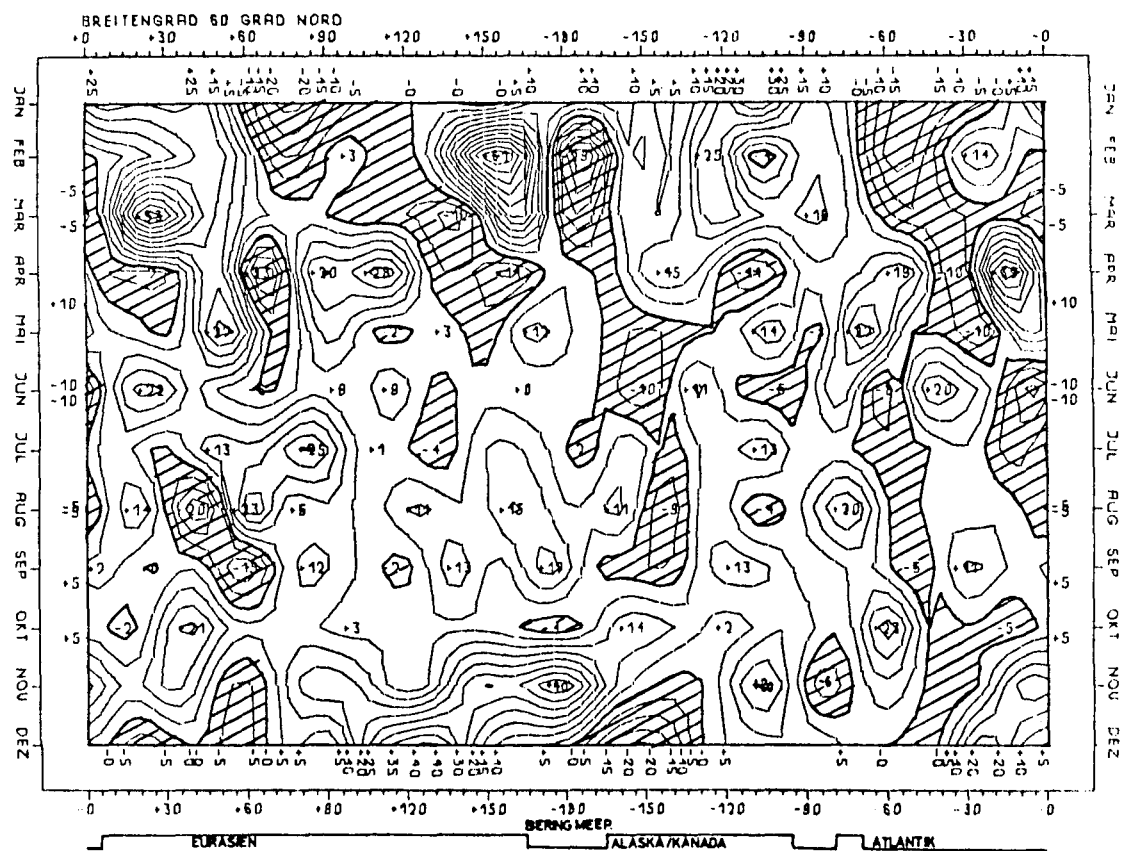
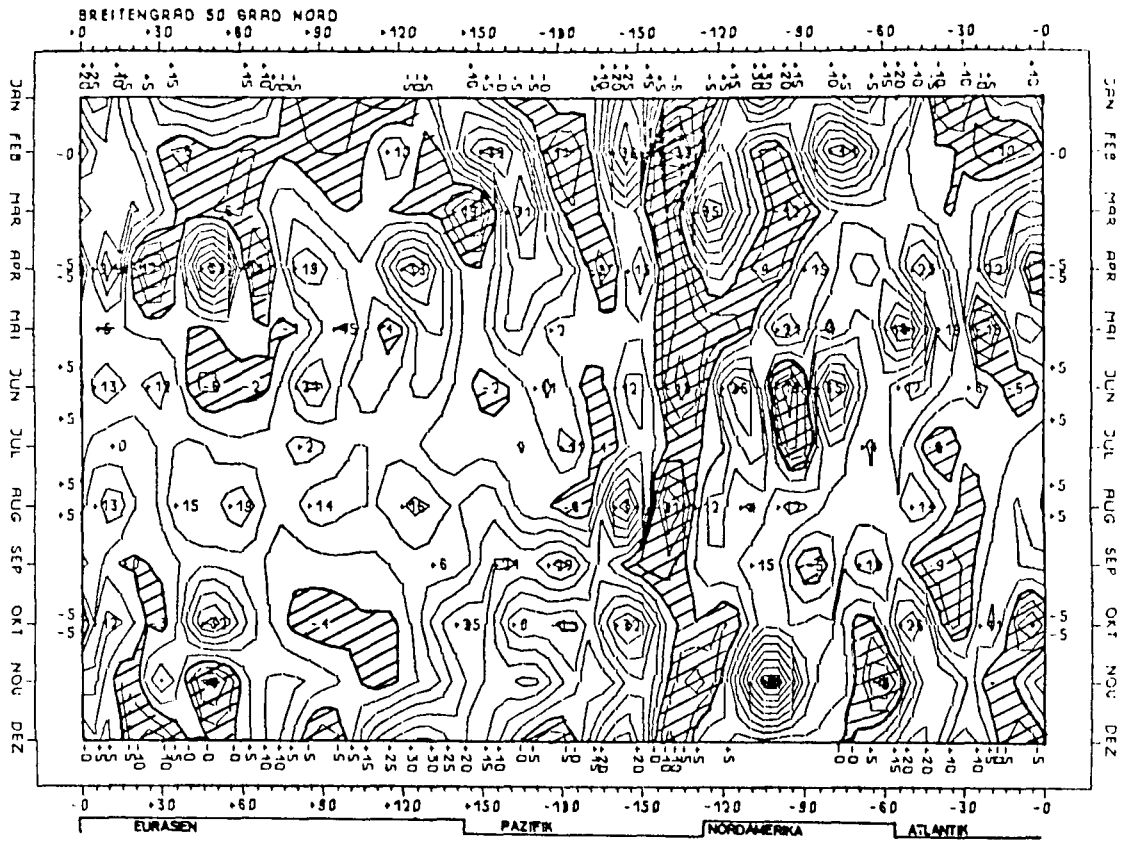


Räumliche Veränderlichkeit des meridionalen Transportes
sensibler Energie durch stehende Wellen im Druckniveau 200mb.
Isolinienabstand: 10 grad m sec⁻¹



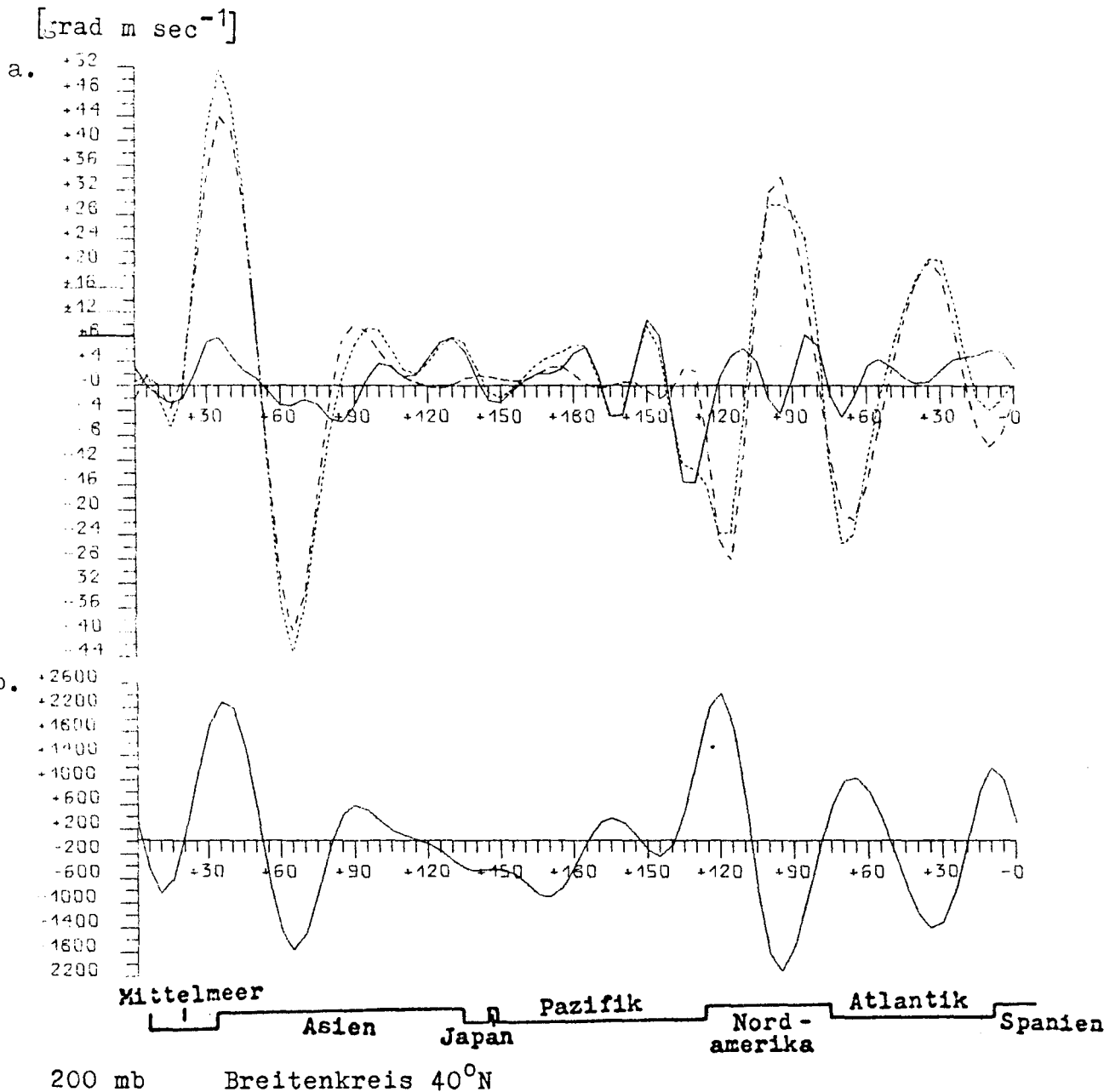
Räumliche Veränderlichkeit der monatlichen Mittelwerte des meridonalen Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen im 200 mb - Niveau.

Isolinienabstand: 5 grad m sec⁻¹



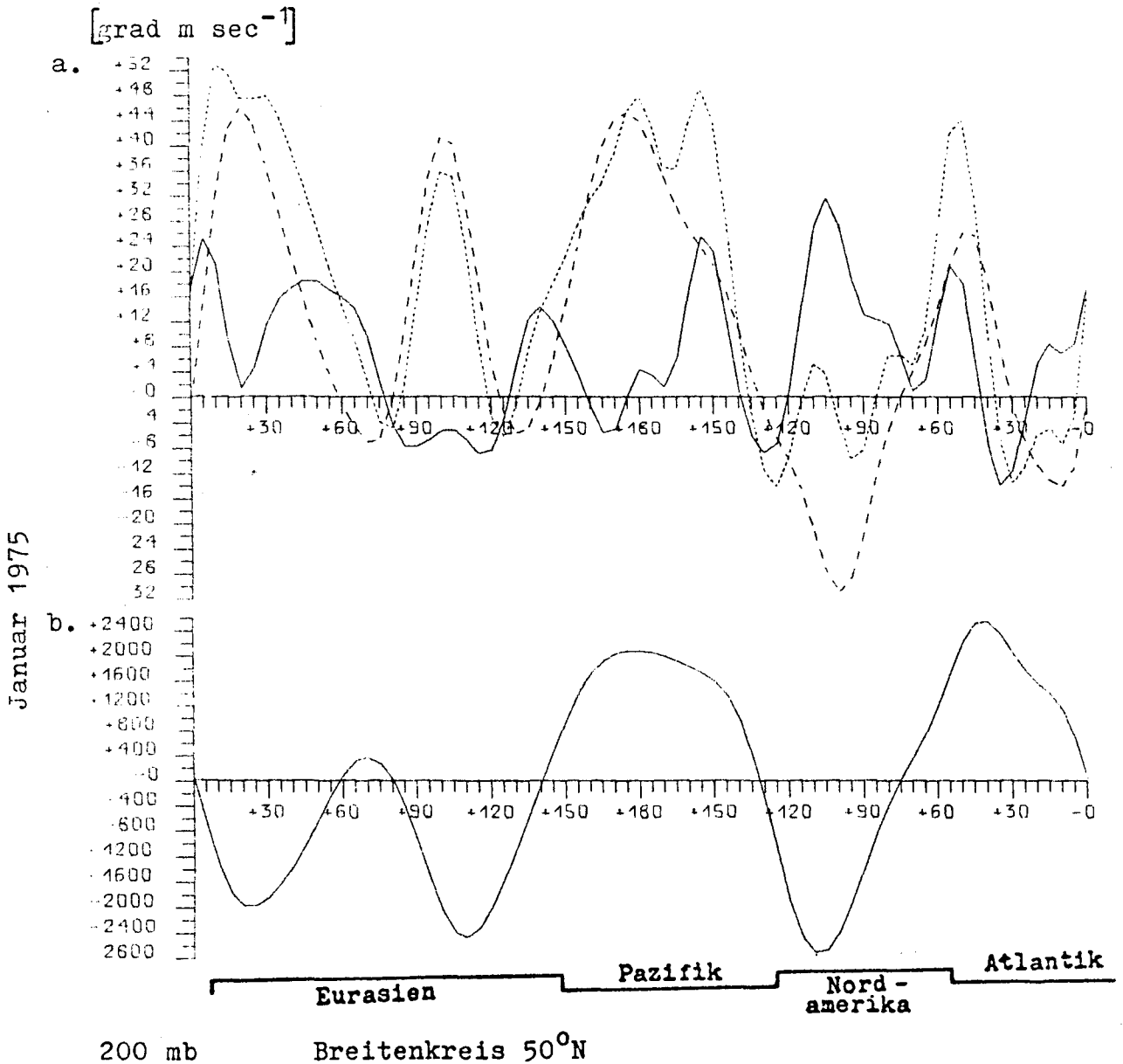
Räumliche Veränderlichkeit der monatlichen Mittelwerte
 des meridionalen Transports sensibler Energie durch
 wandernde Wellen im 200 mb - Niveau.
 Isolinienabstand: 5 grad m sec⁻¹

Jul 1975



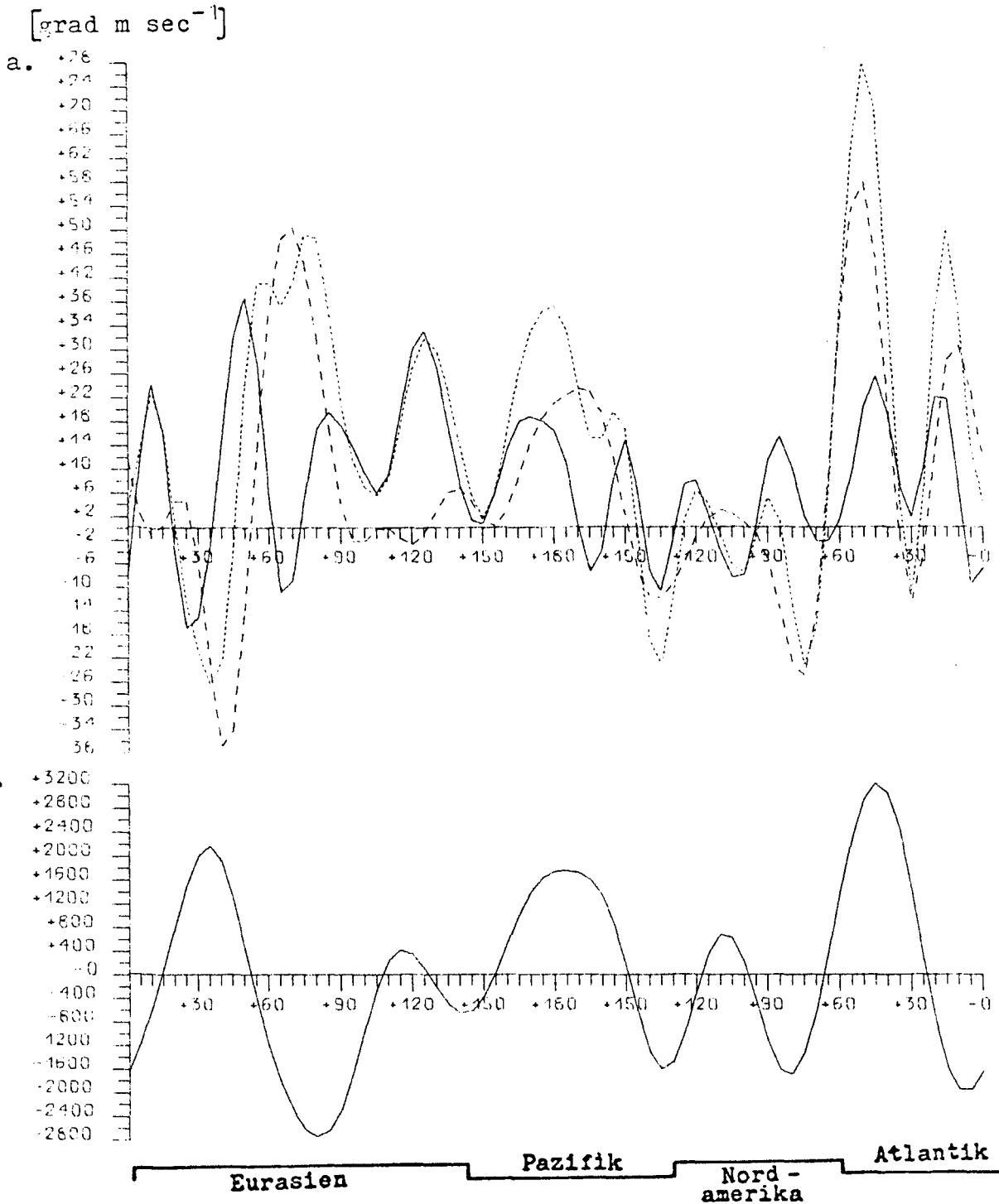
200 mb Breitenkreis 40°N

Räumliche Veränderlichkeit des zeitlich gemittelten meridionalen Transportes sensibler Energie, aufgeteilt in Transport durch:
Teil a.: wandernde Wellen (TE:—), stehende Wellen (SE:----), die Summe beider Anteile (TE+SE:.....),
Teil b.: den Anteil von zusätzlichen Gliedern, die bei gemischt räumlicher und zeitlicher Mittelung entstehen und im Breitenmittel keinen Beitrag geben (—).



Räumliche Veränderlichkeit des zeitlich gemittelten meridionalen Transportes sensibler Energie, aufgeteilt in Transport durch:
 Teil a.: wandernde Wellen (TE:—), stehende Wellen (SE:----),
 die Summe beider Anteile (TE+SE:.....),
 Teil b.: den Anteil von zusätzlichen Gliedern, die bei gemischt
 räumlicher und zeitlicher Mittelung entstehen und im
 Breitenmittel keinen Beitrag geben (—).

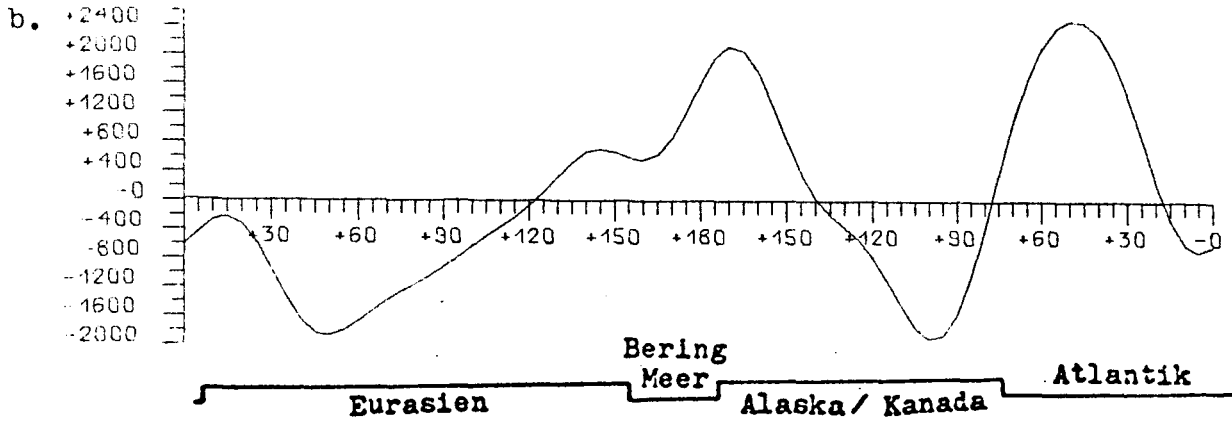
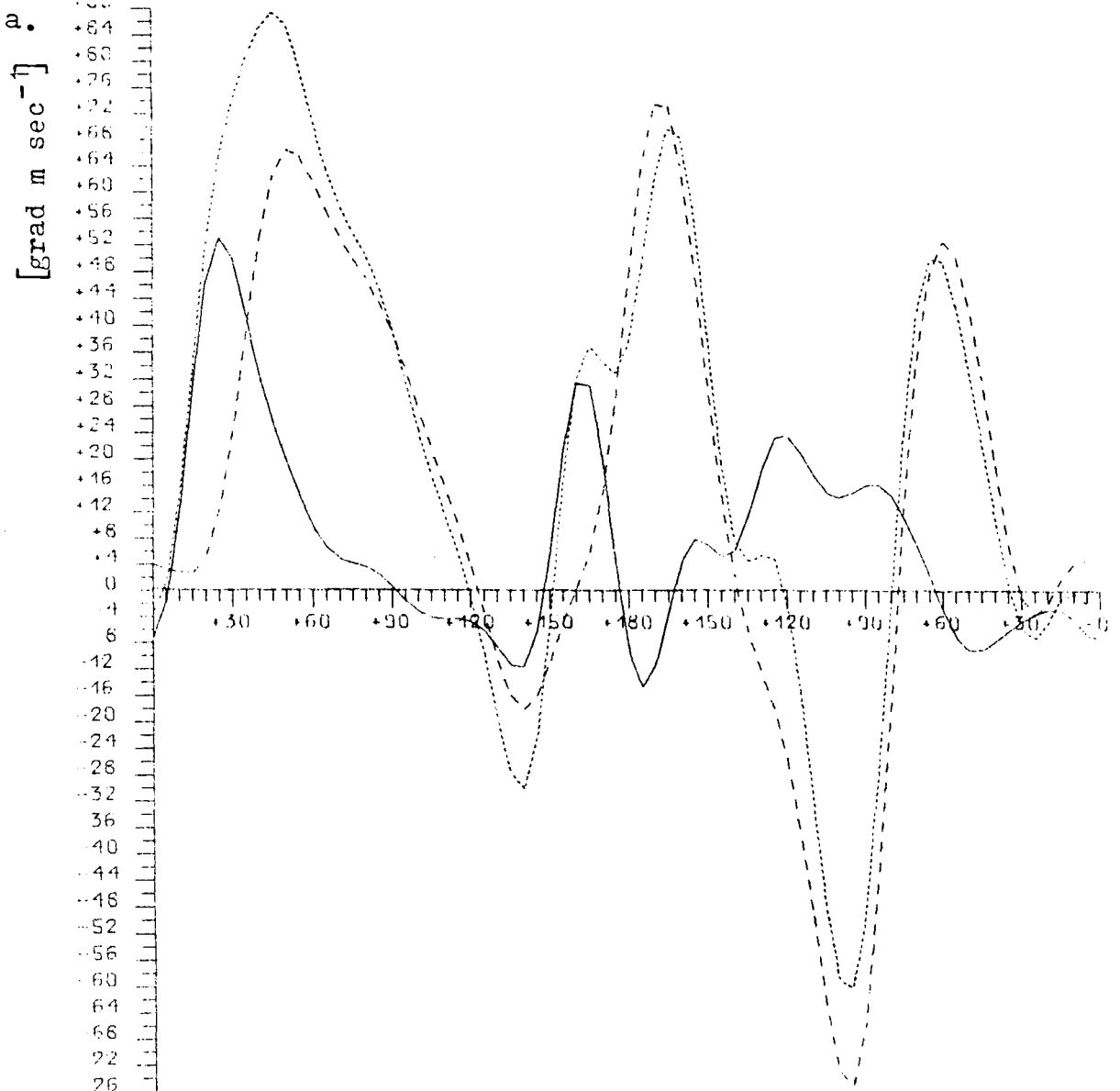
April 1975



200 mb Breitenkreis 50°N

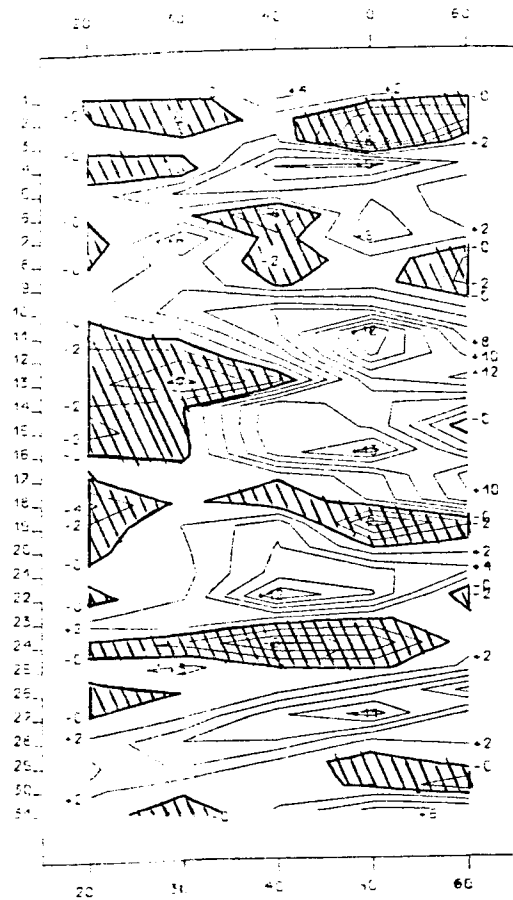
Räumliche Veränderlichkeit des zeitlich gemittelten meridionalen Transportes sensibler Energie, aufgeteilt in Transport durch:
 Teil a.: wandernde Wellen (TE:—), stehende Wellen (SE:----),
 die Summe beider Anteile (TE+SE:.....),
 Teil b.: den Anteil von zusätzlichen Gliedern, die bei gemischt
 räumlicher und zeitlicher Mittelung entstehen und im
 Breitenmittel keinen Beitrag geben (——). Abb.42

März 1975

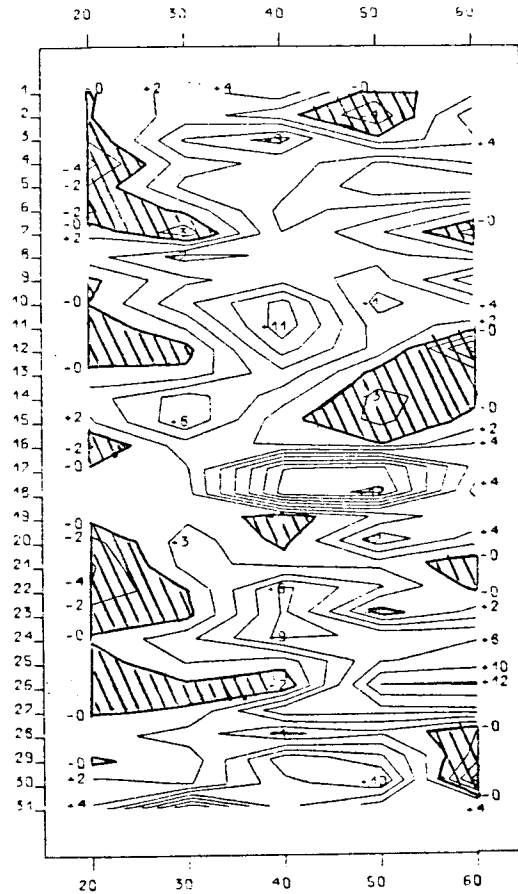


200 mb Breitenkreis 60°N

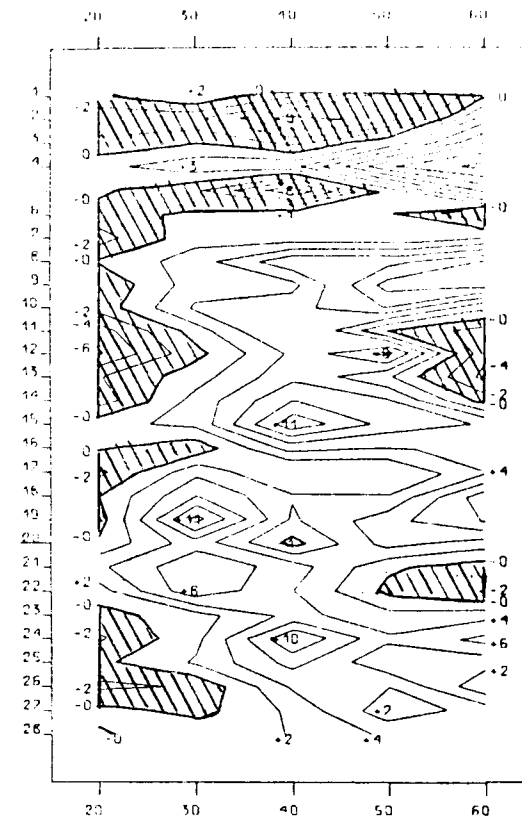
Räumliche Veränderlichkeit des zeitlich gemittelten meridionalen Transportes sensibler Energie, aufgeteilt in Transport durch:
 Teil a.: wandernde Wellen (TE:—), stehende Wellen (SE:----),
 die Summe beider Anteile (TE+SE:.....),
 Teil b.: den Anteil von zusätzlichen Gliedern, die bei gemischt
 räumlicher und zeitlicher Mittelung entstehen und im
 Breitenmittel keinen Beitrag geben (—). Abb.43



Dezember 1975



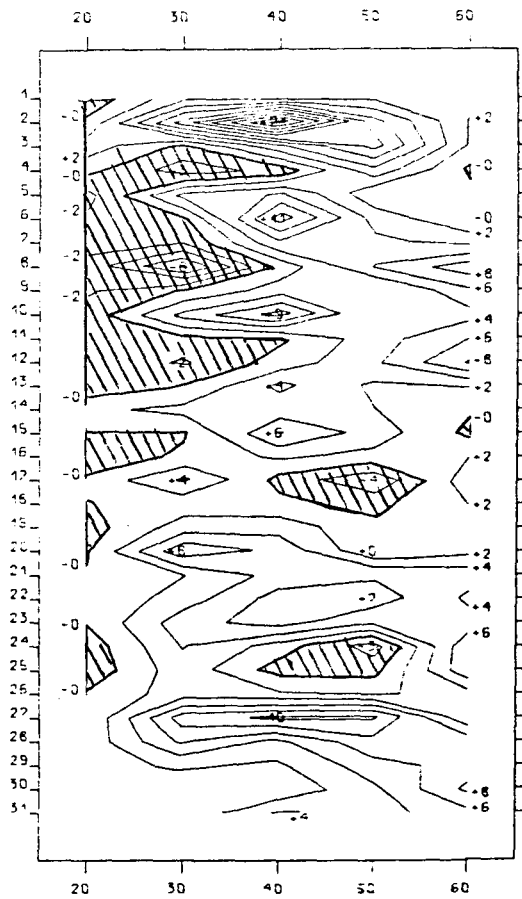
Januar 1975



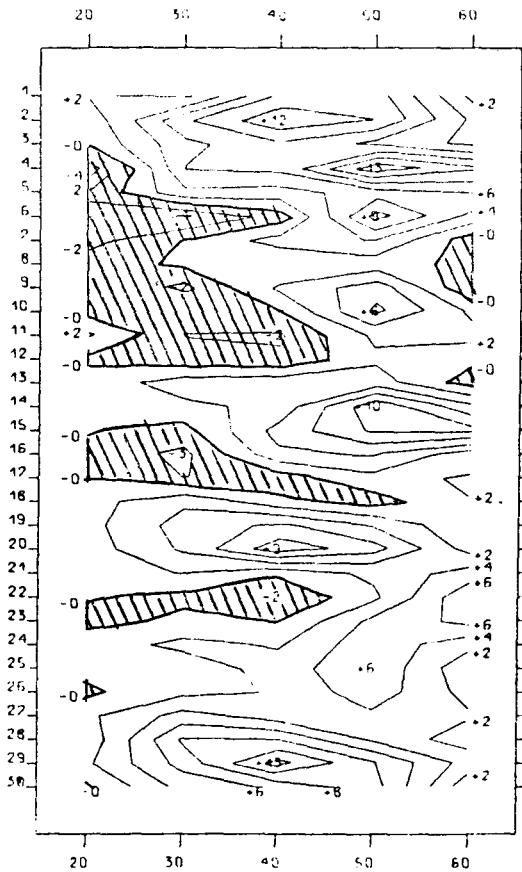
Februar 1975

200 mb

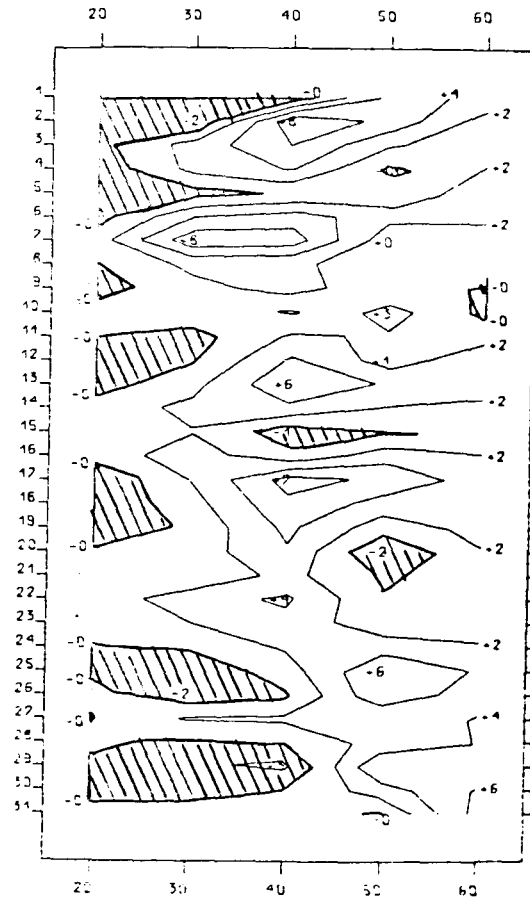
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten
Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler
Energie durch wandernde Wellen zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



März 1975



April 1975

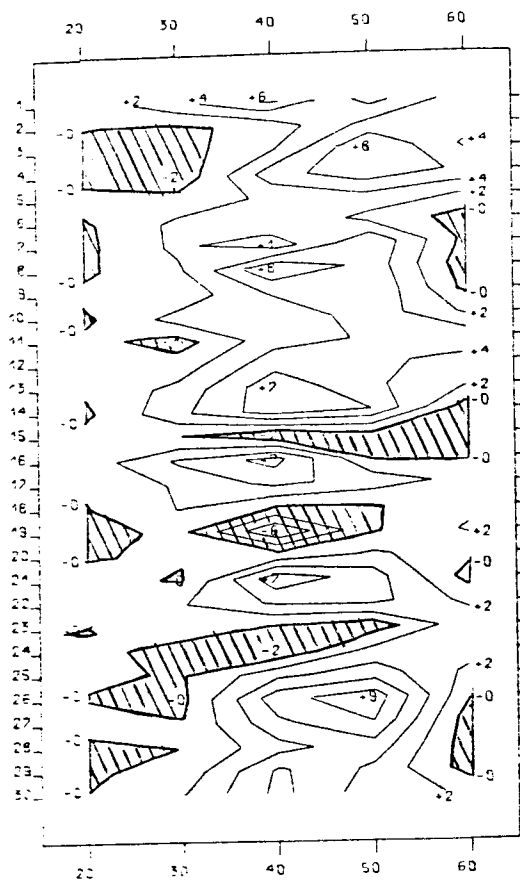


Mai 1975

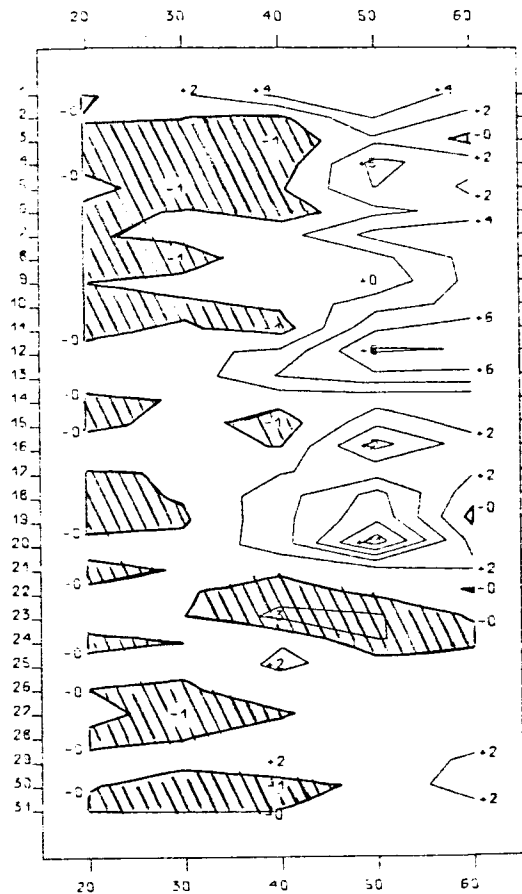
200 mb

Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie durch wandernde Wellen zwischen 20°N und 60°N .
 Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$

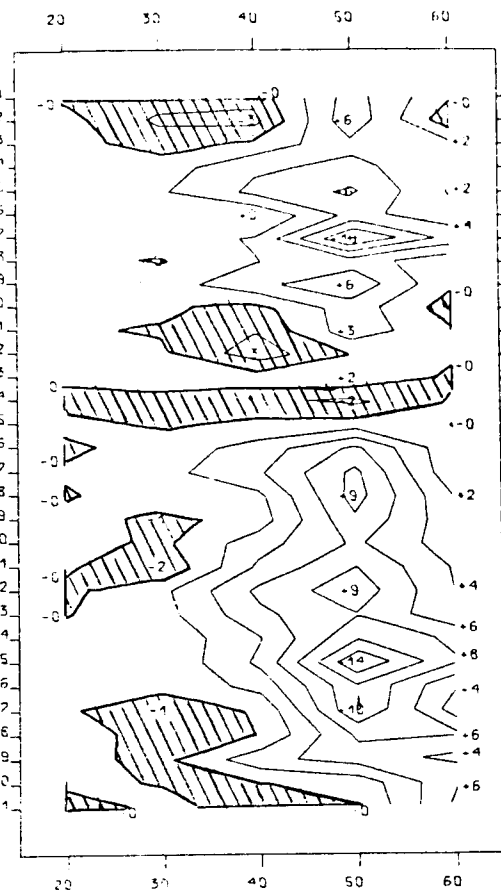
Abb.45



Juni 1975



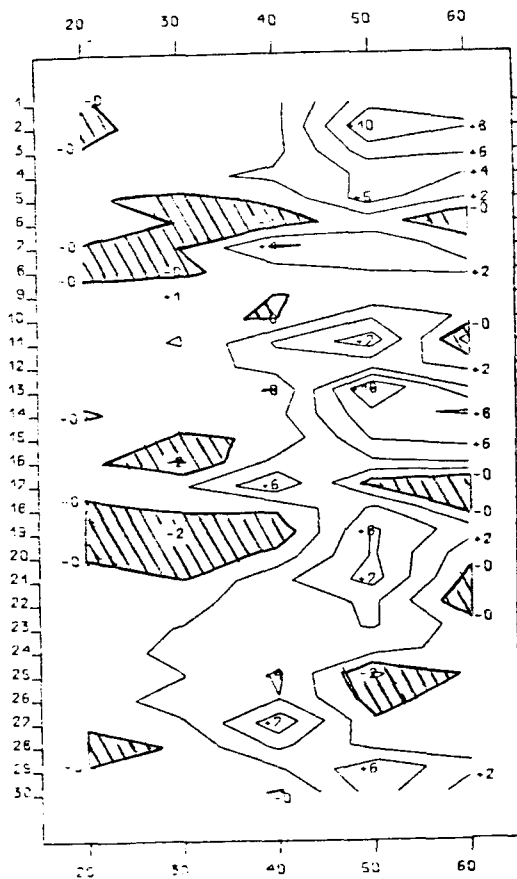
Juli 1975



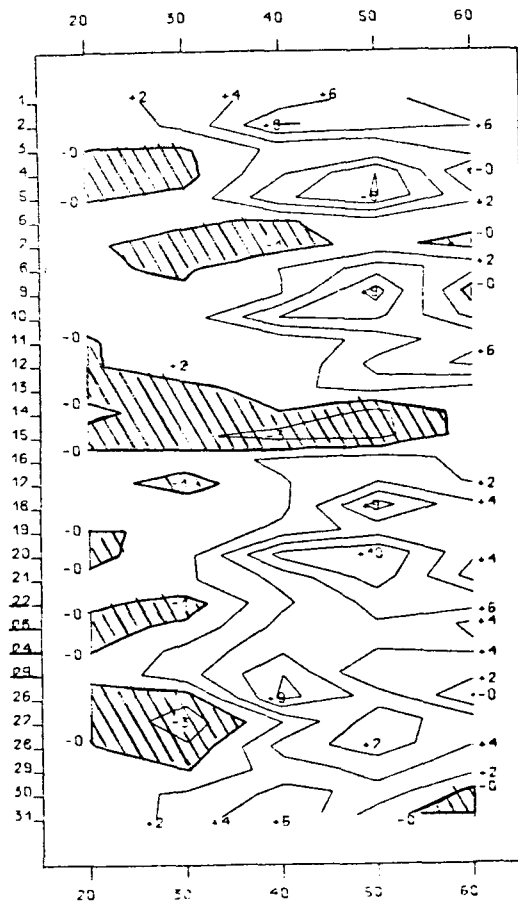
August 1975

200 mb

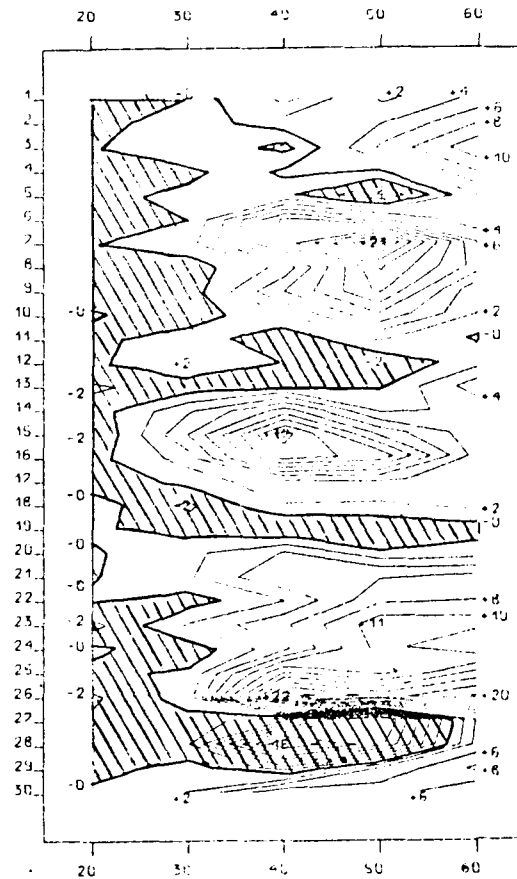
Zeitliche Veränderlichkeit der mit \cos gewichteten
Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler
Energie durch wandernde Wellen zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



September 1975



Oktober 1975

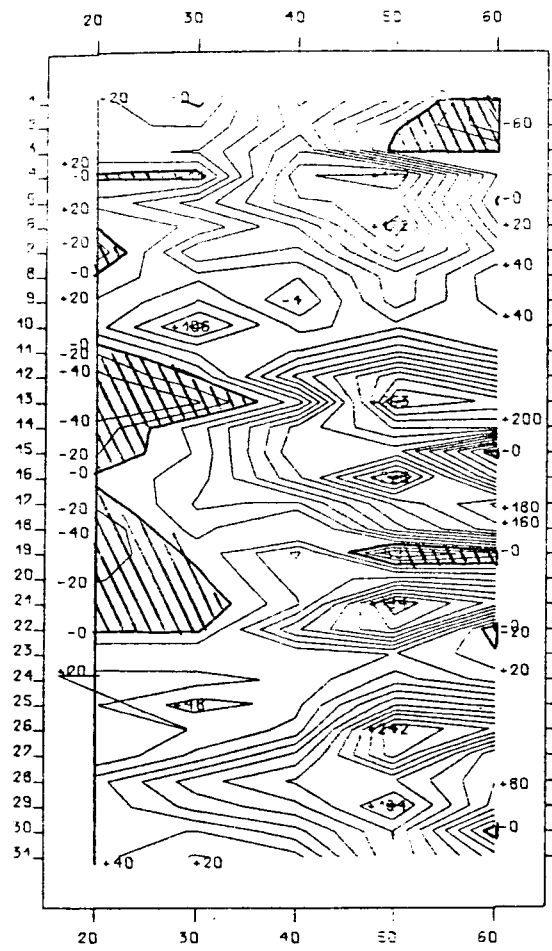


November 1975

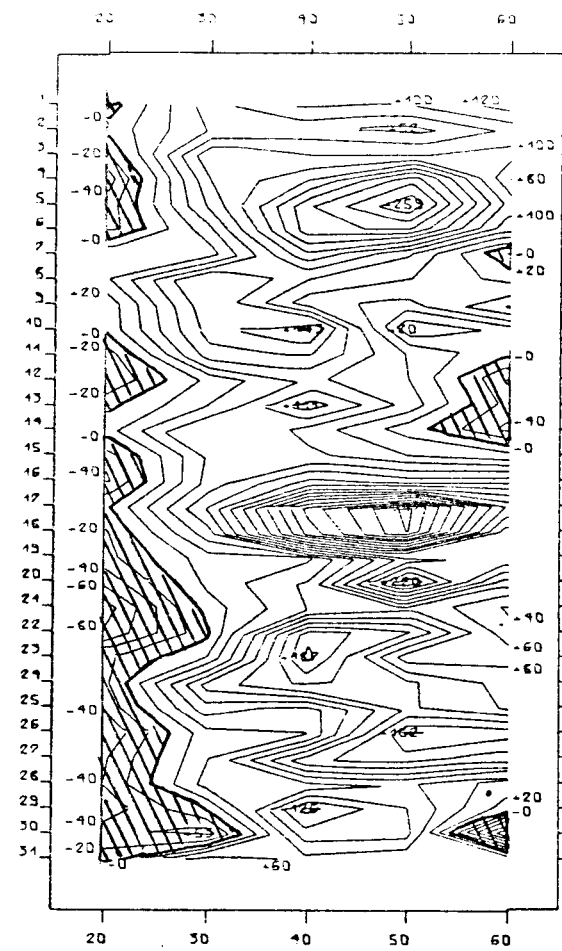
200 mb

Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten
Breitnittelwerte des meridionalen Transportes sensibler
Energie durch wandernde Wellen zwischen 20°N und 60°N .

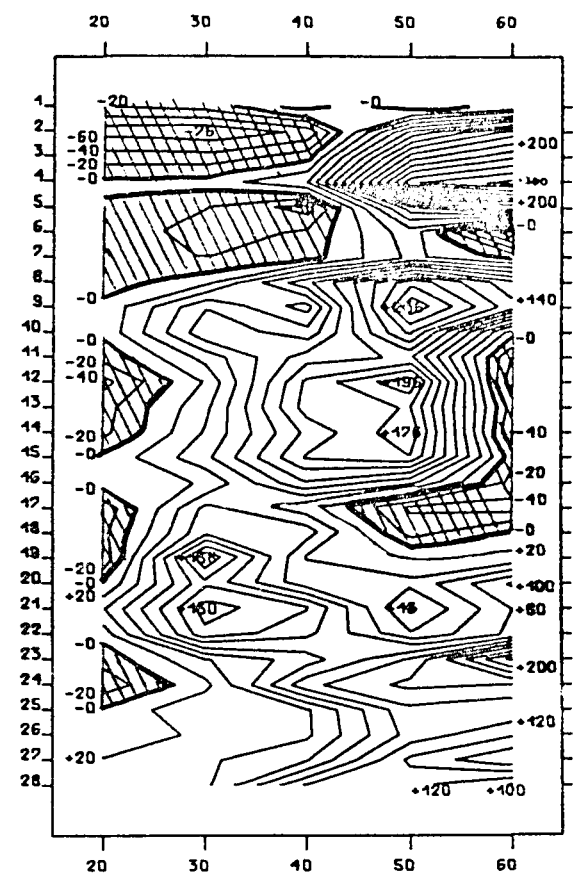
Isolinienabstand: 2grad m sec^{-1}



Dezember 1975



Januar 1975

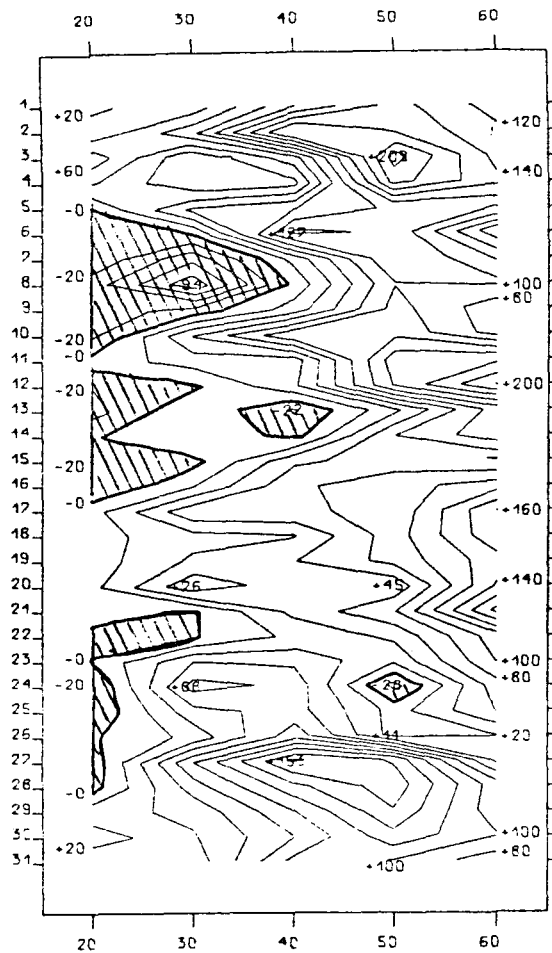


Februar 1975

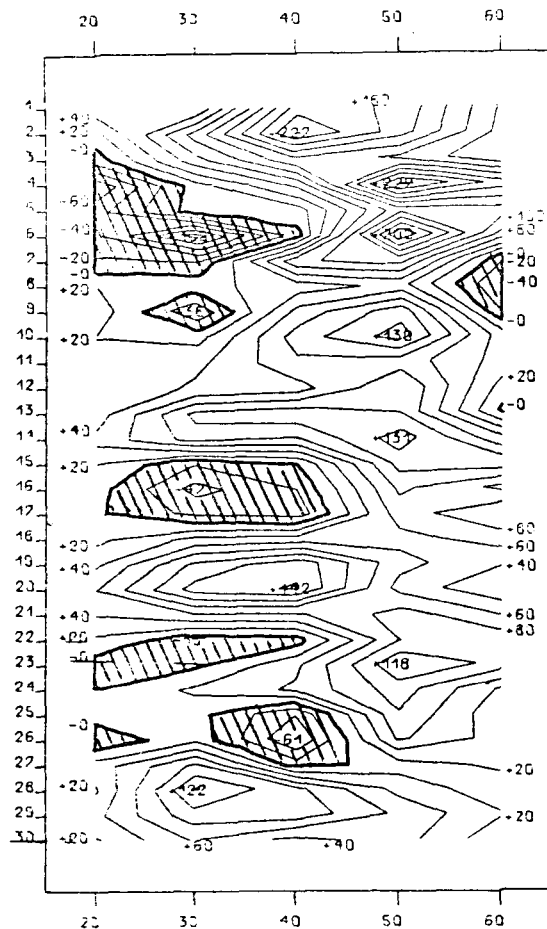
200 mb

Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie zwischen 20°N und 60°N .
 Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$

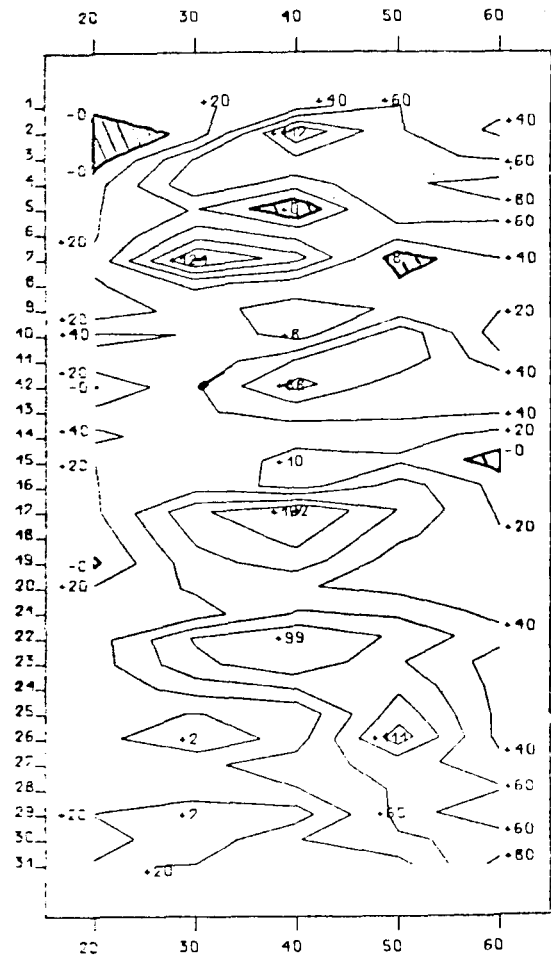
Abb.48



März 1975

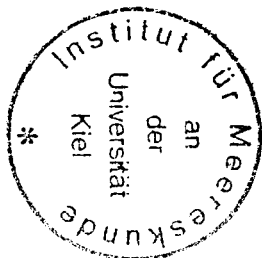


April 1975

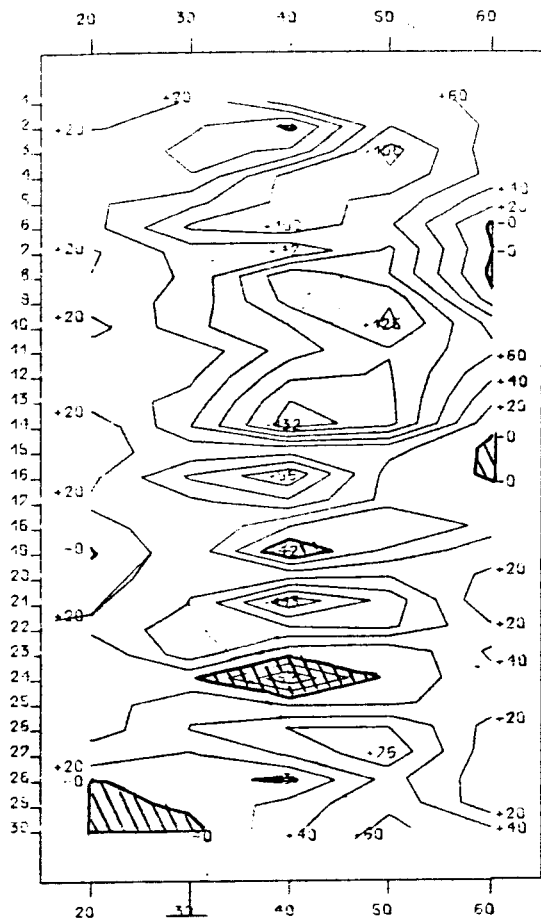


Mai 1975

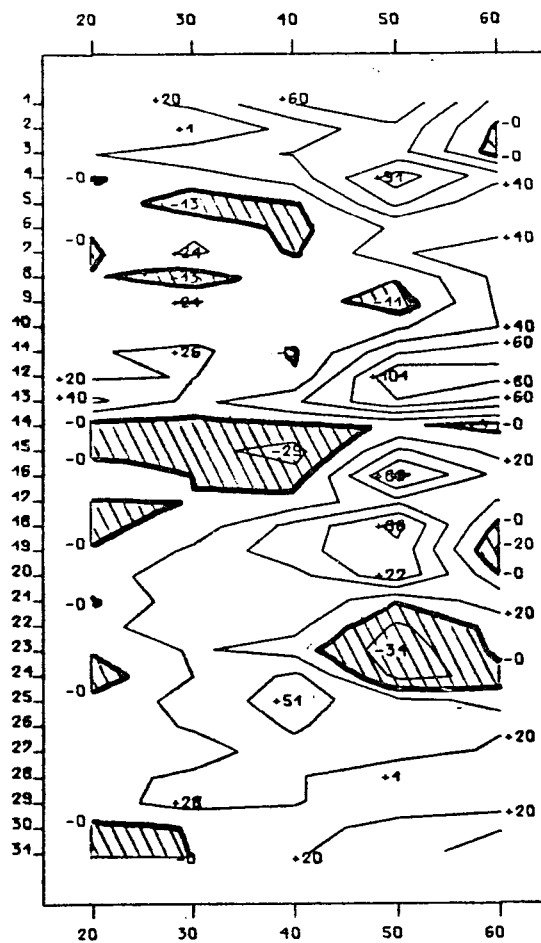
200 mb



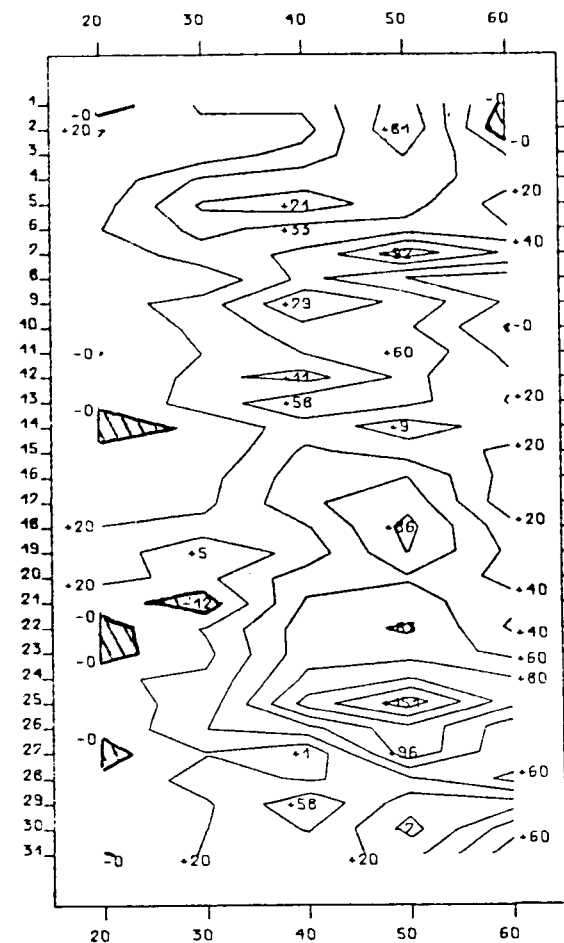
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



Juni 1975



Juli 1975

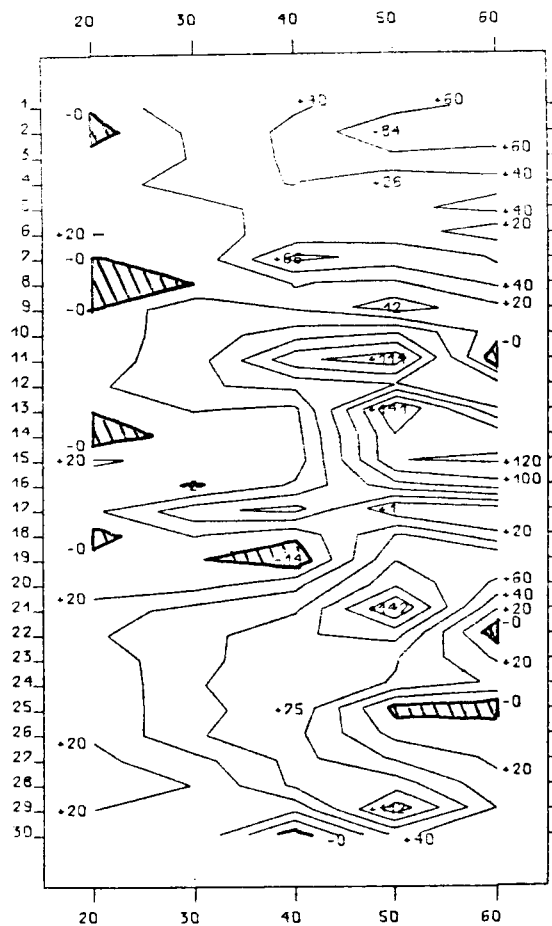


August 1975

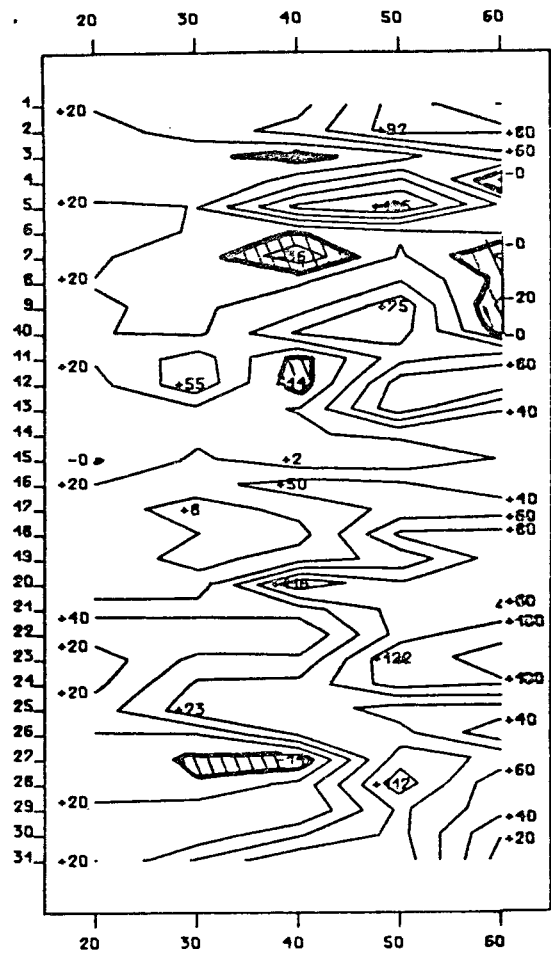
200 mb

Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie zwischen 20°N und 60°N .
 Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$

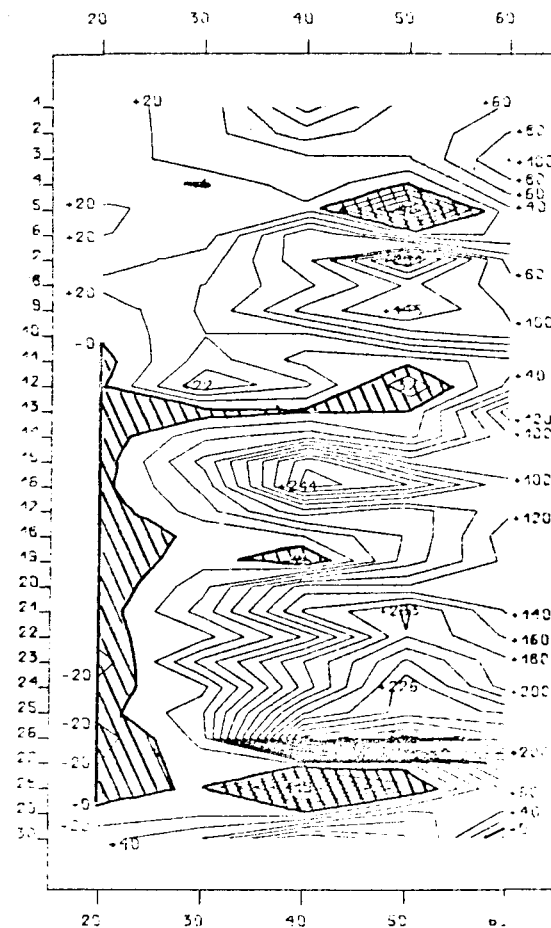
Abb.50



September 1975



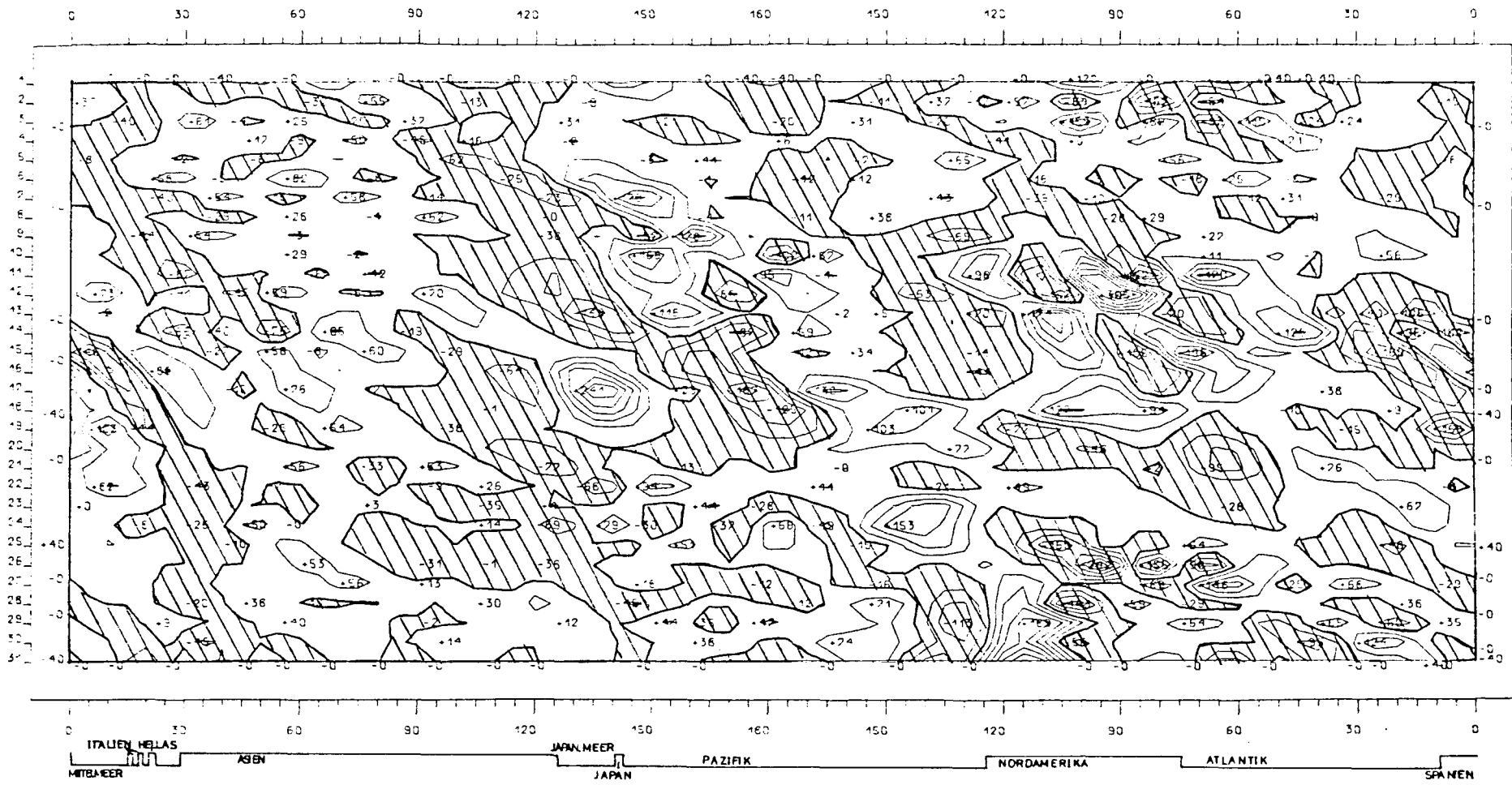
Oktober 1975



November 1975

200 mb

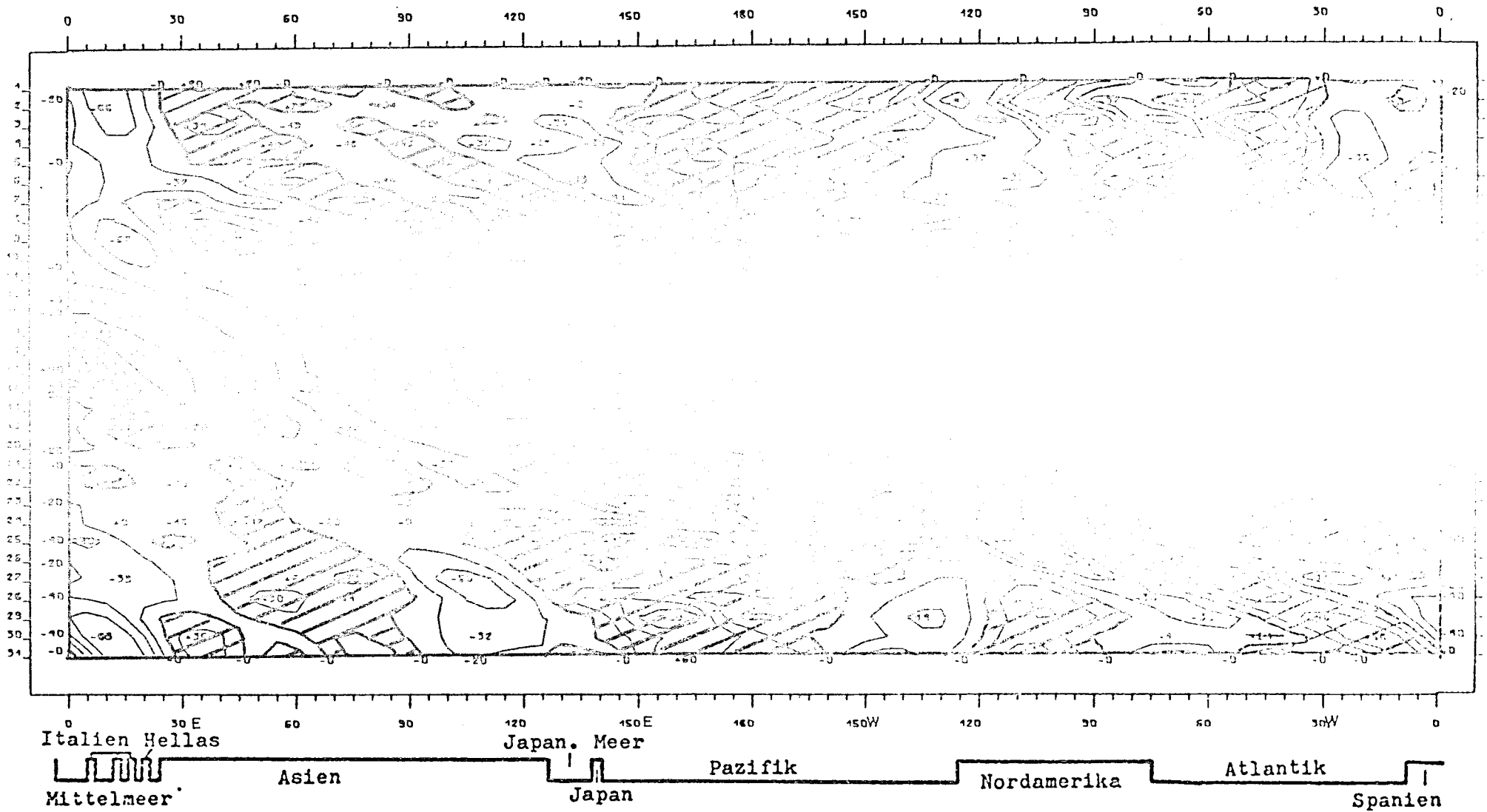
Zeitliche Veränderlichkeit der mit $\cos\varphi$ gewichteten Breitenmittelwerte des meridionalen Transportes sensibler Energie zwischen 20°N und 60°N .
Isolinienabstand: $2 \text{ grad m sec}^{-1}$



200 mb
 Breitenkreis 40°N
 Januar 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

Abb.52

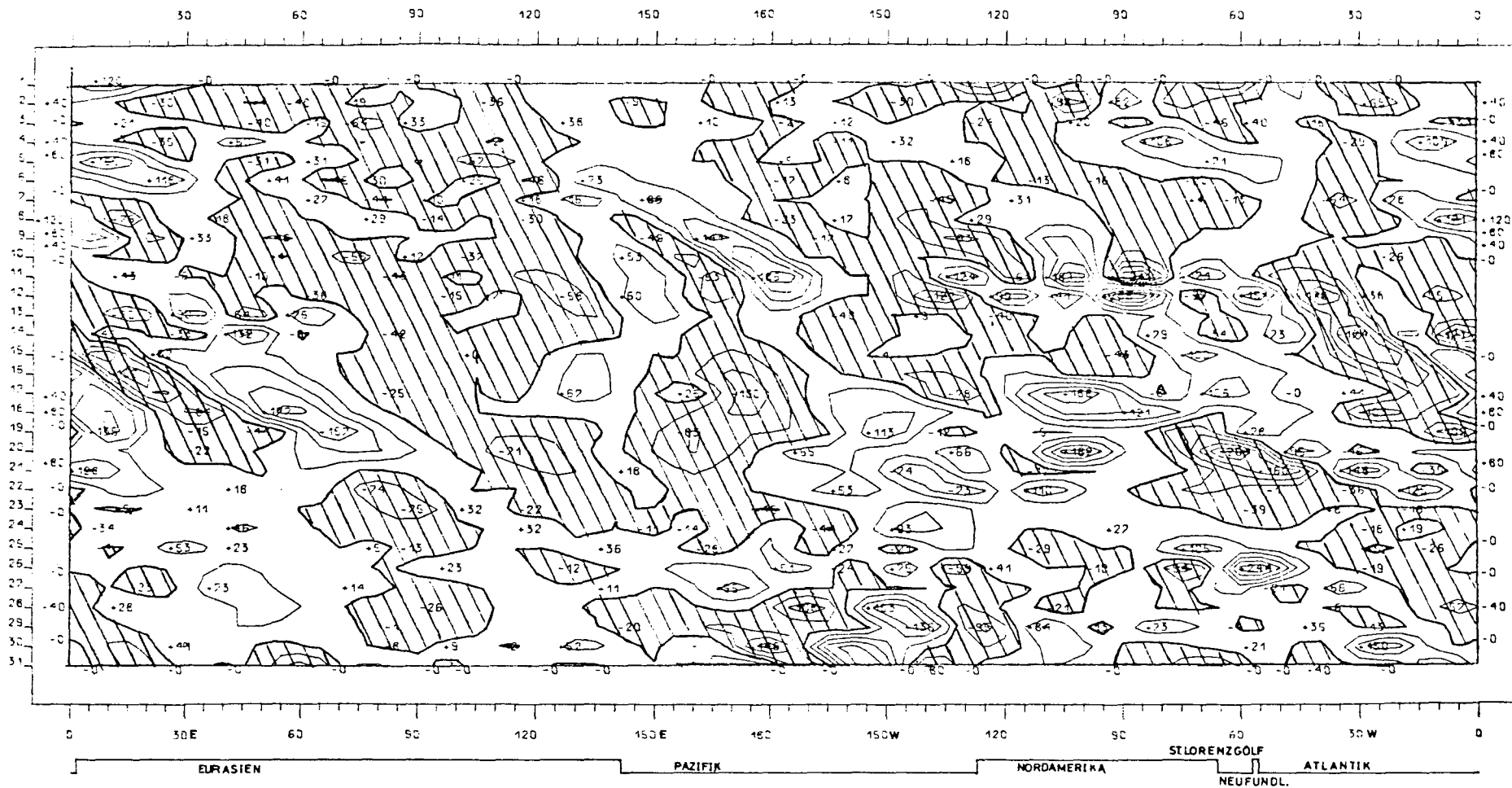


200 mb
 Breitenkreis 40°N
 Januar 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.

Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

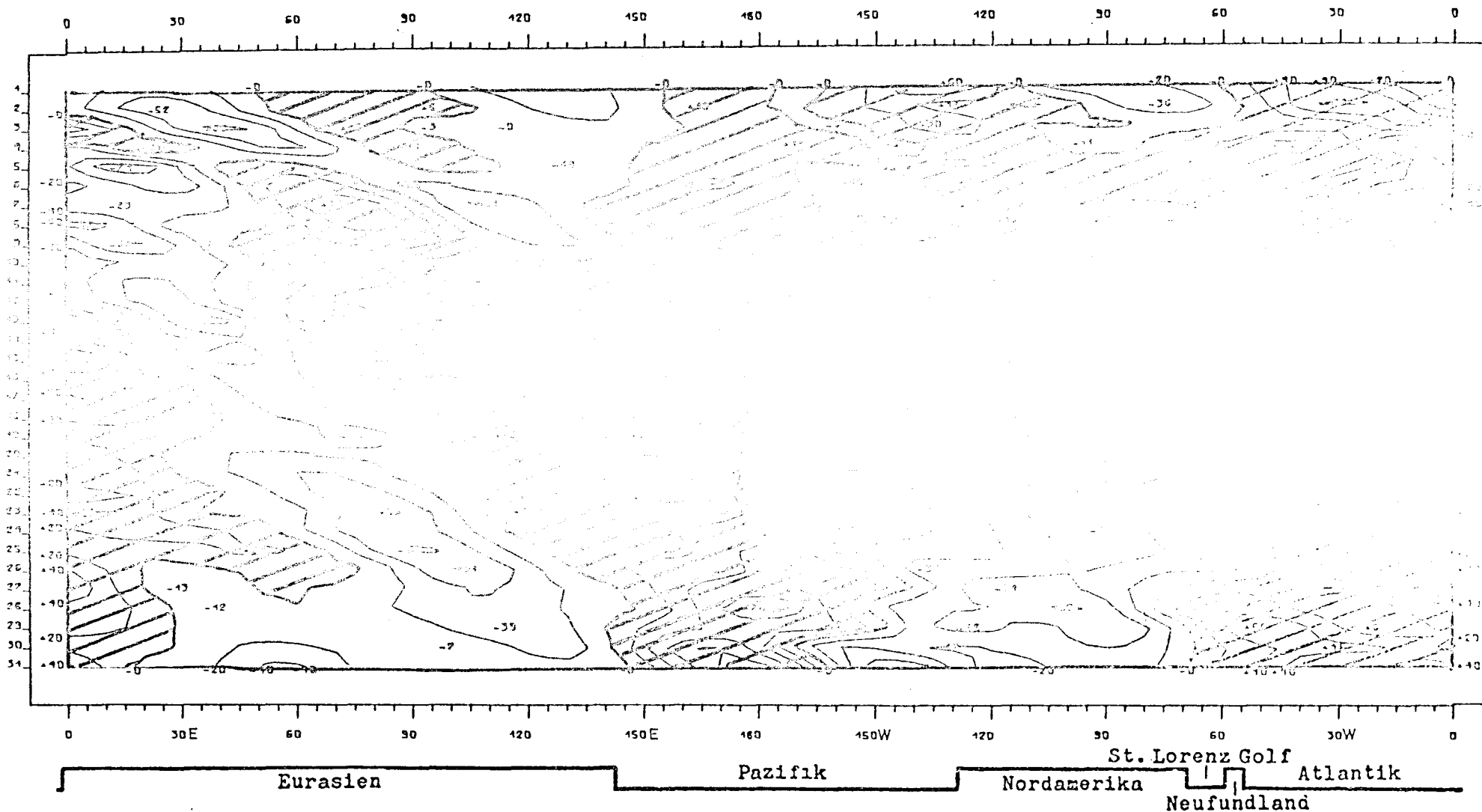
Abb.53



200 mb
Breitenkreis 50°N
Januar 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

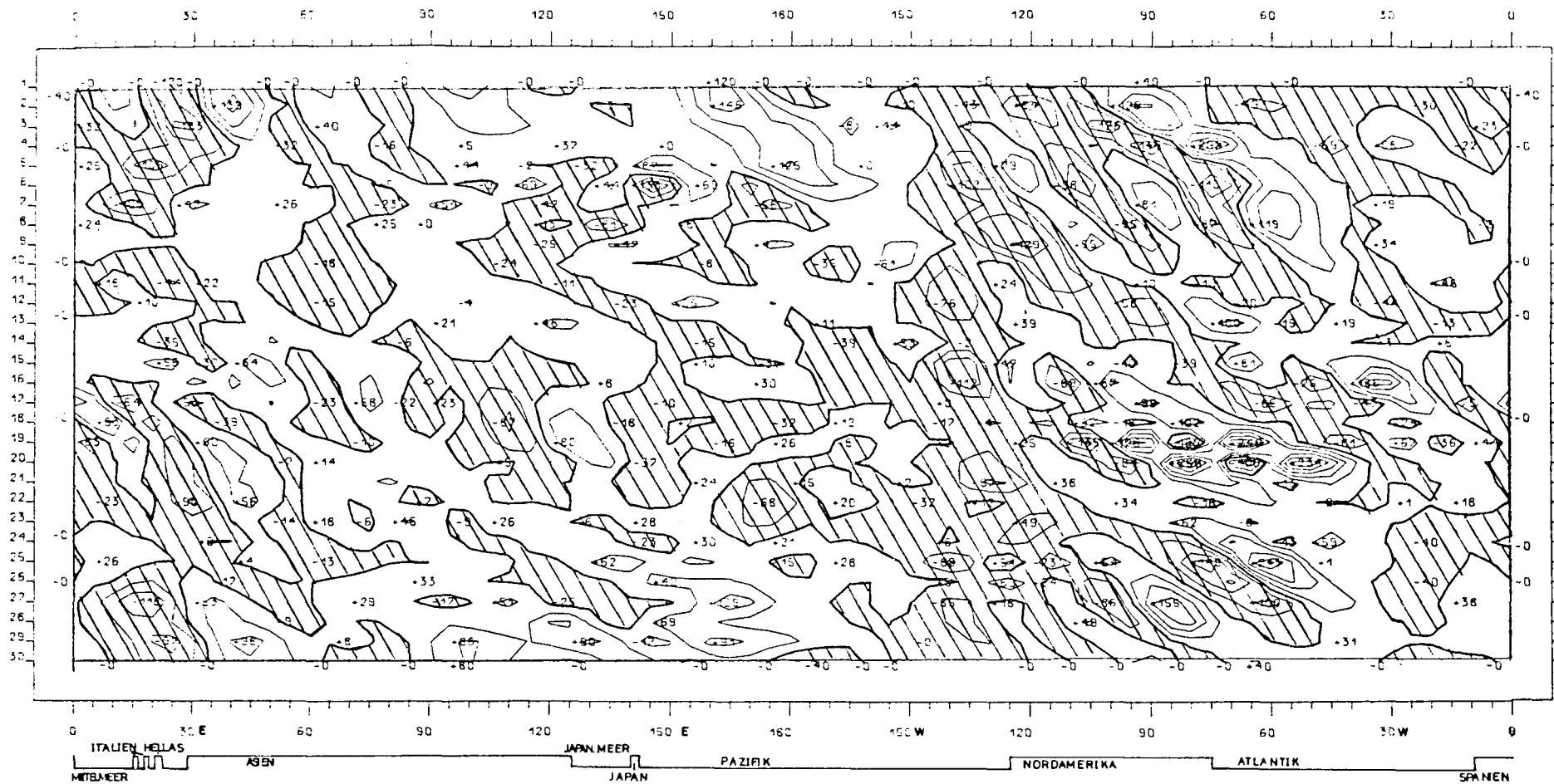
Abb.54



200 mb
 Breitenkreis 50°N
 Januar 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

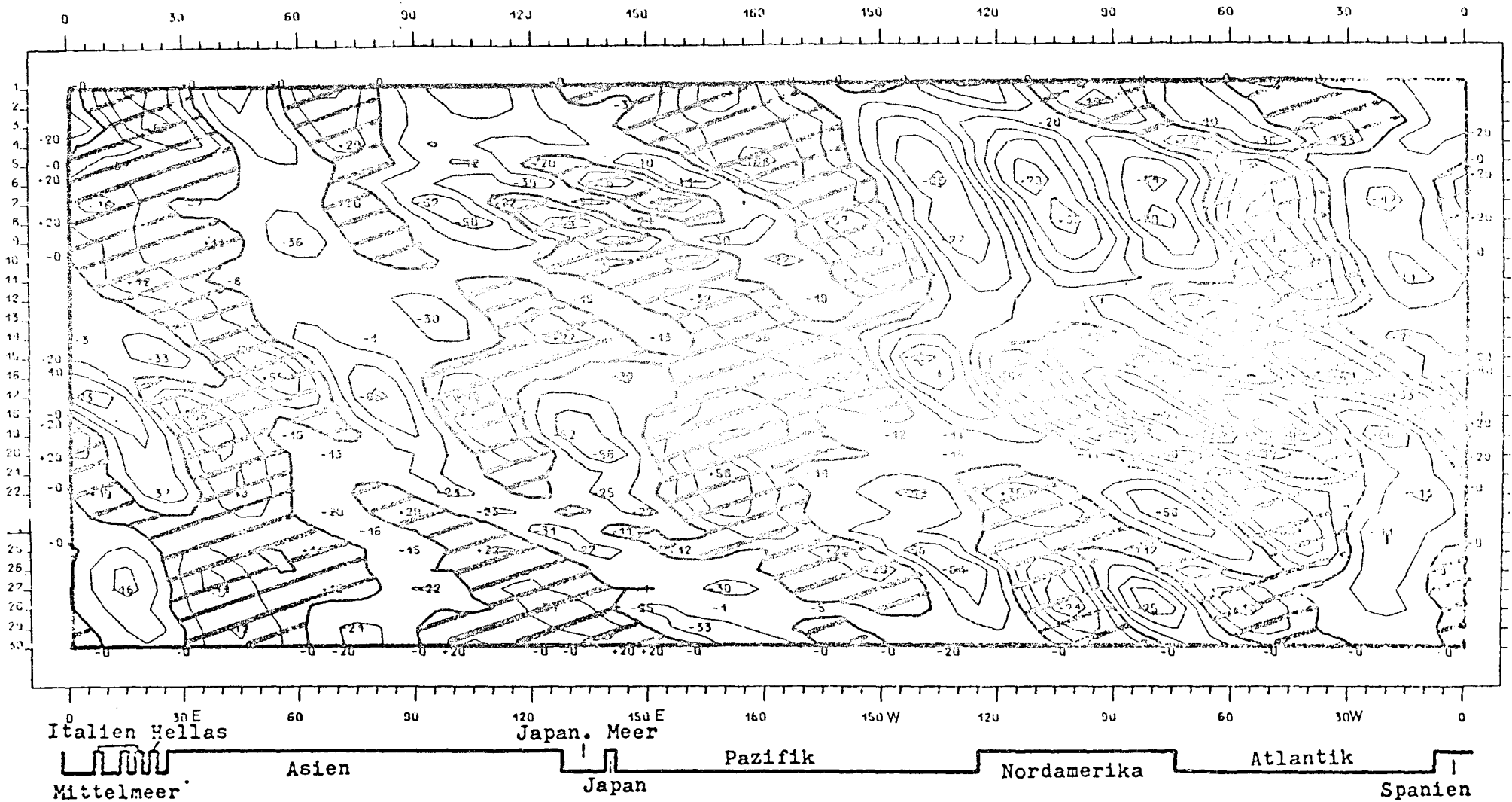
Abb.55



200 mb
 Breitenkreis 40°N
 April 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

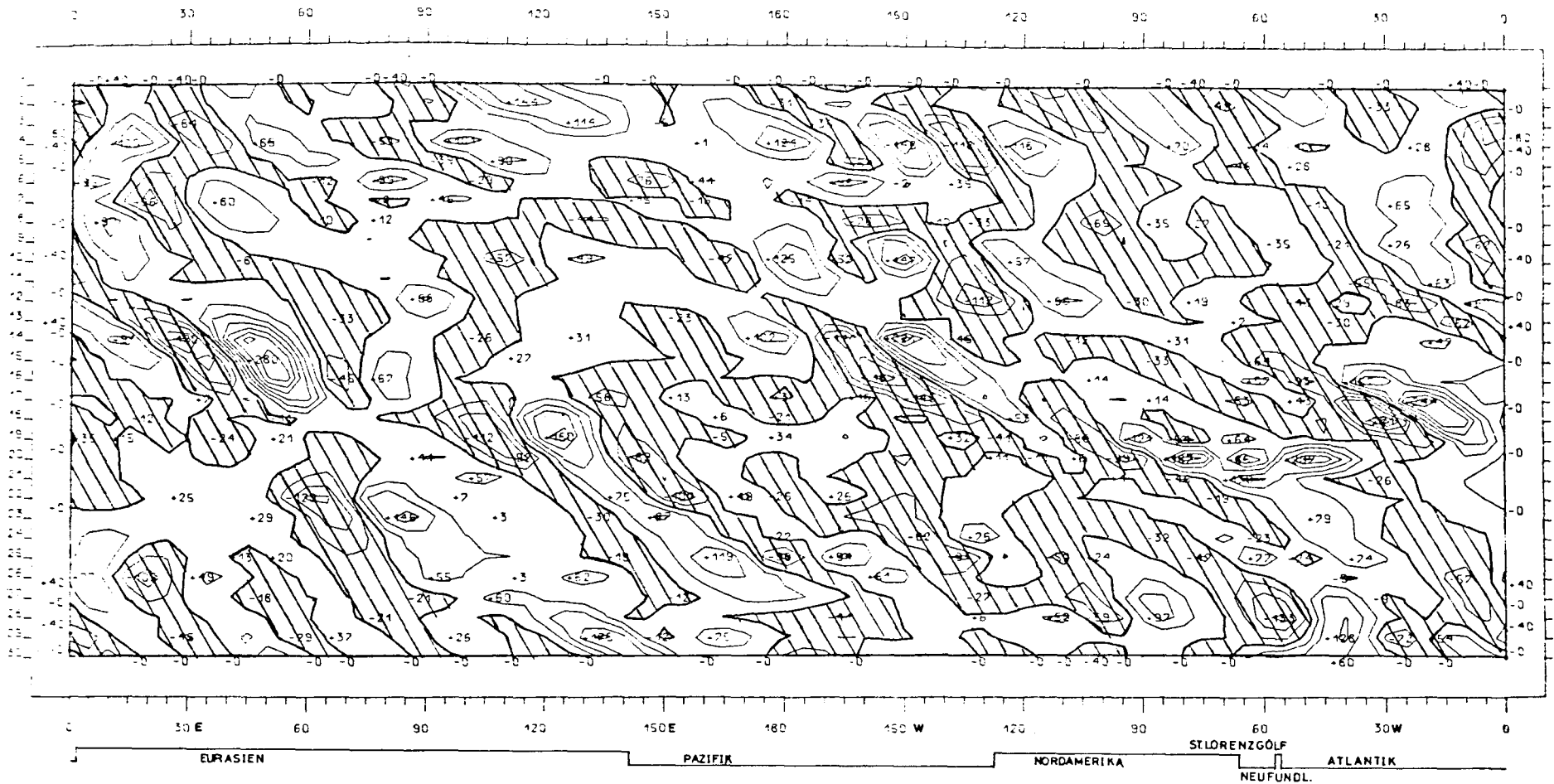
Abb.56



200 mb
 Breitenkreis 40°N
 April 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

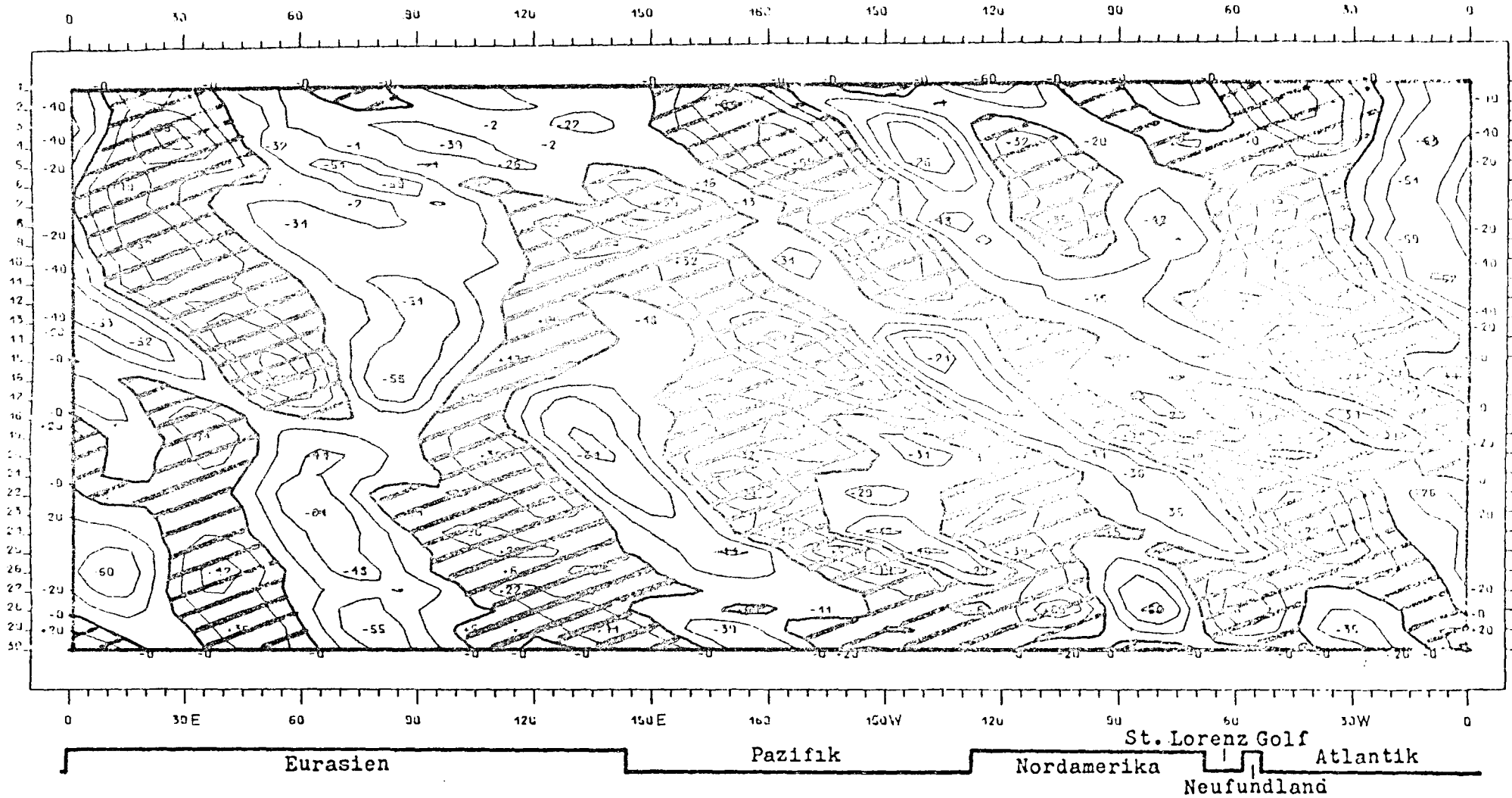
Abb.57



200 mb
 Breitenkreis 50°N
 April 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

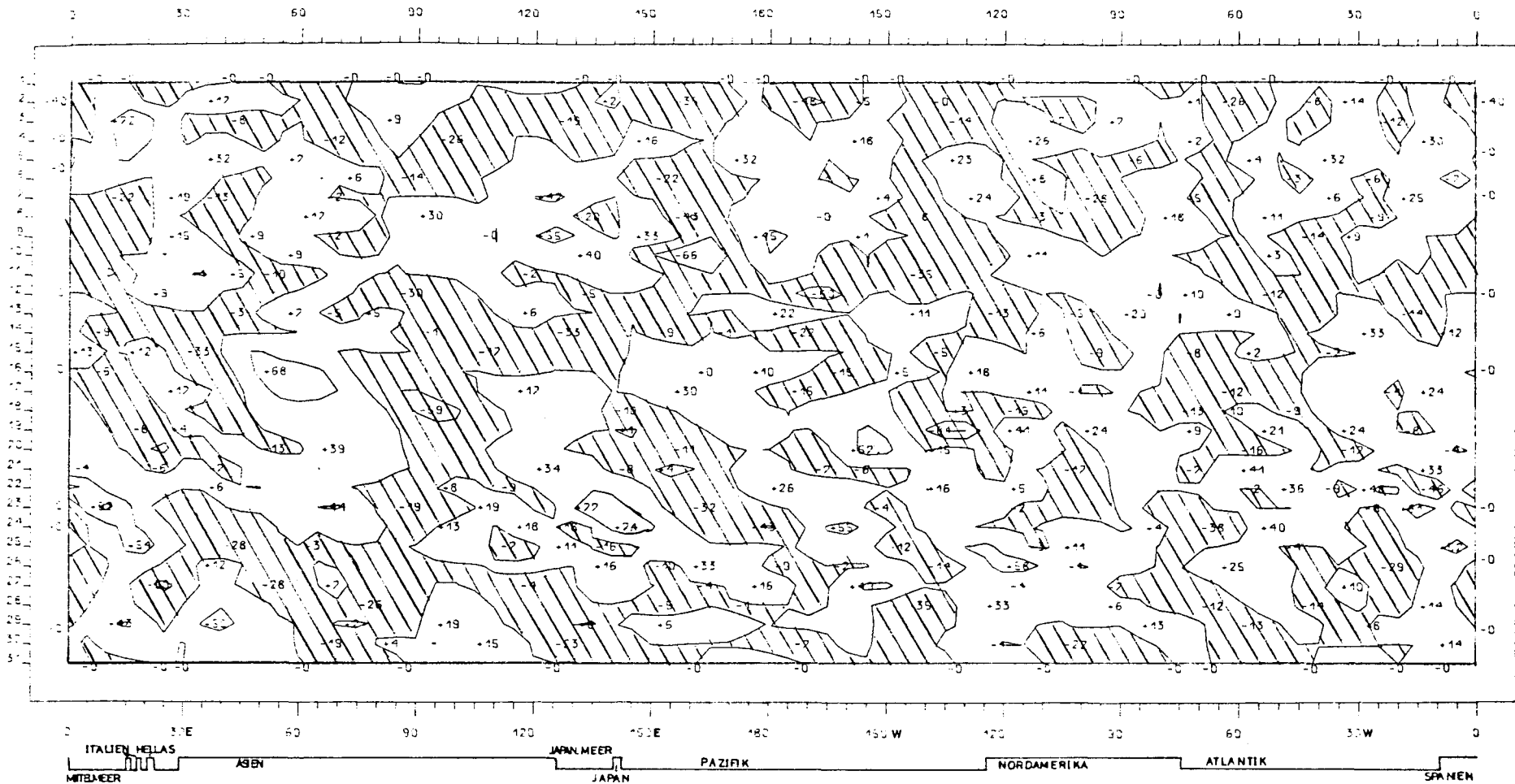
Abb.58



200 mb
 Breitenkreis 50°N
 April 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

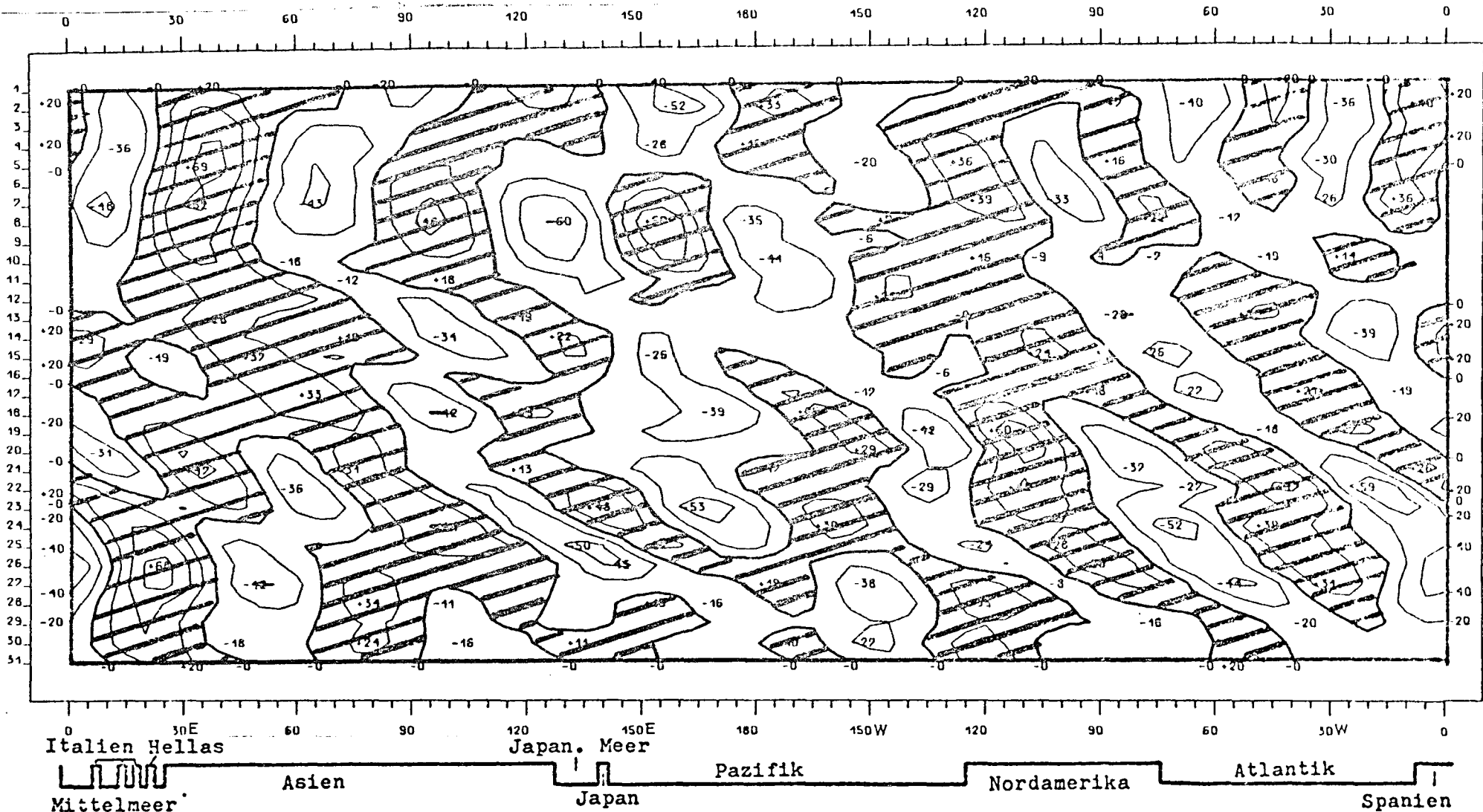
Abb.59



200 mb
 Breitenkreis 40°N
 August 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

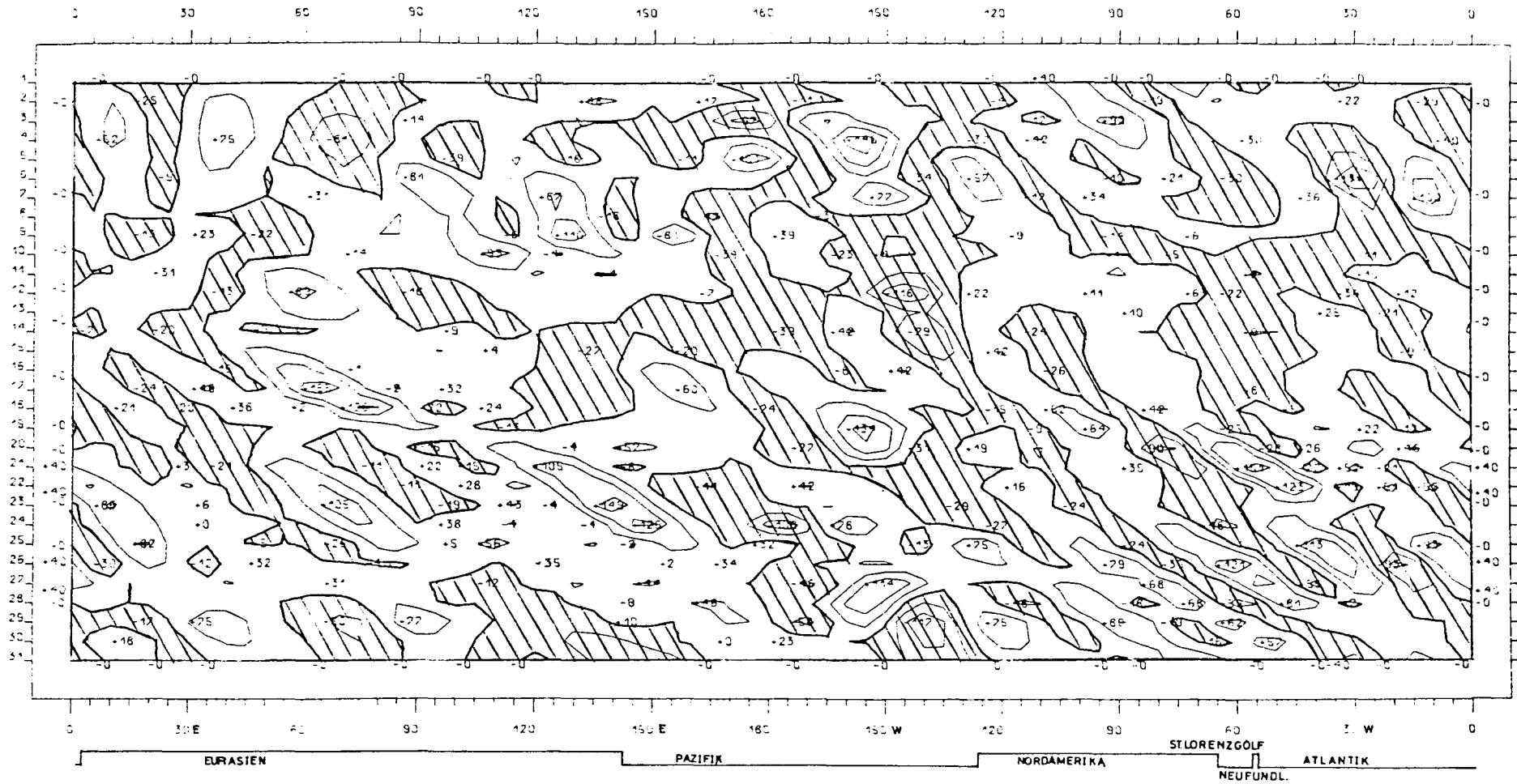
Abb.60



200 mb
 Breitenkreis 40°N
 August 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transportes sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

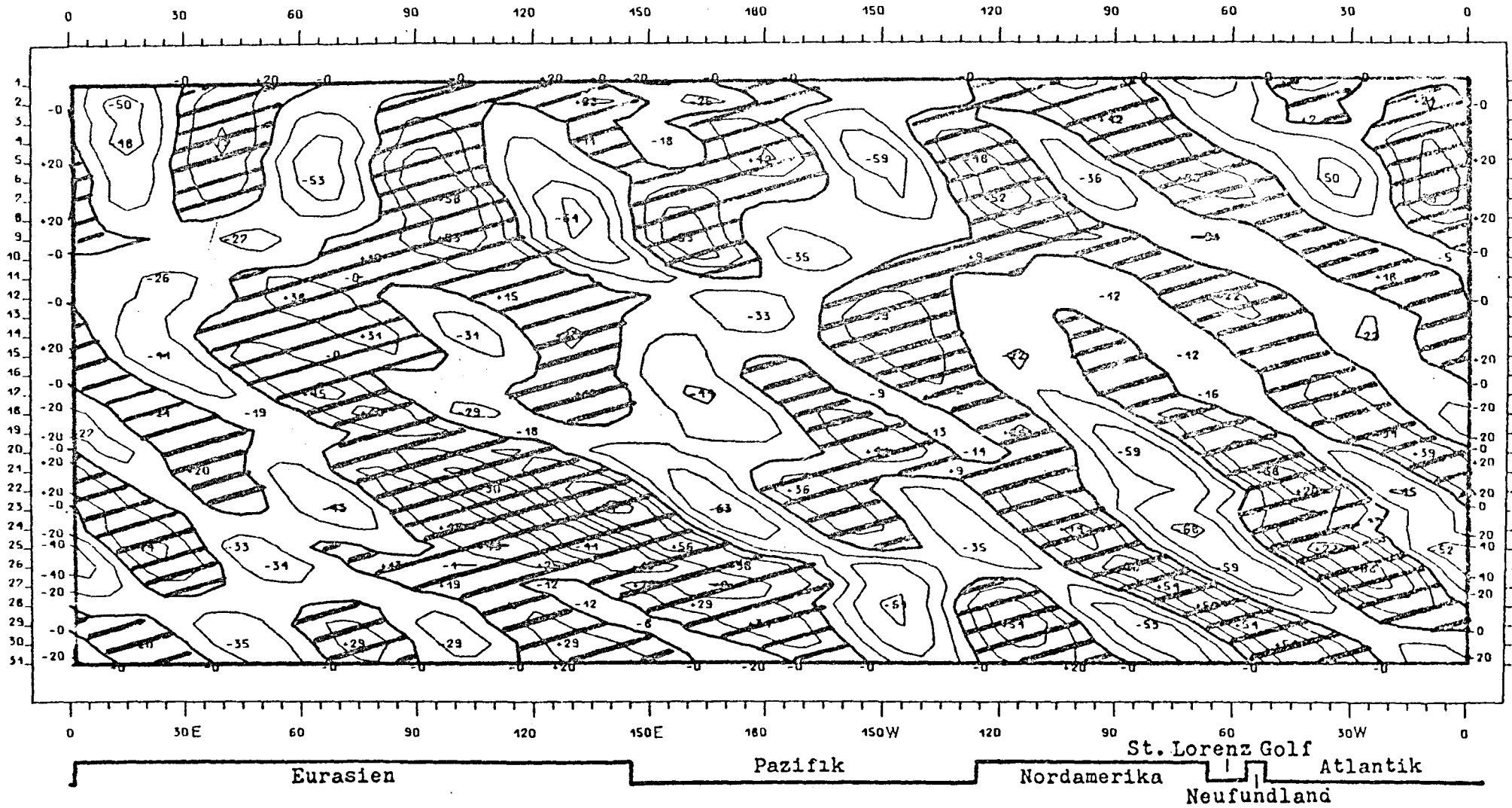
Abb.61



200 mb
 Breitenkreis 50°N
 August 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

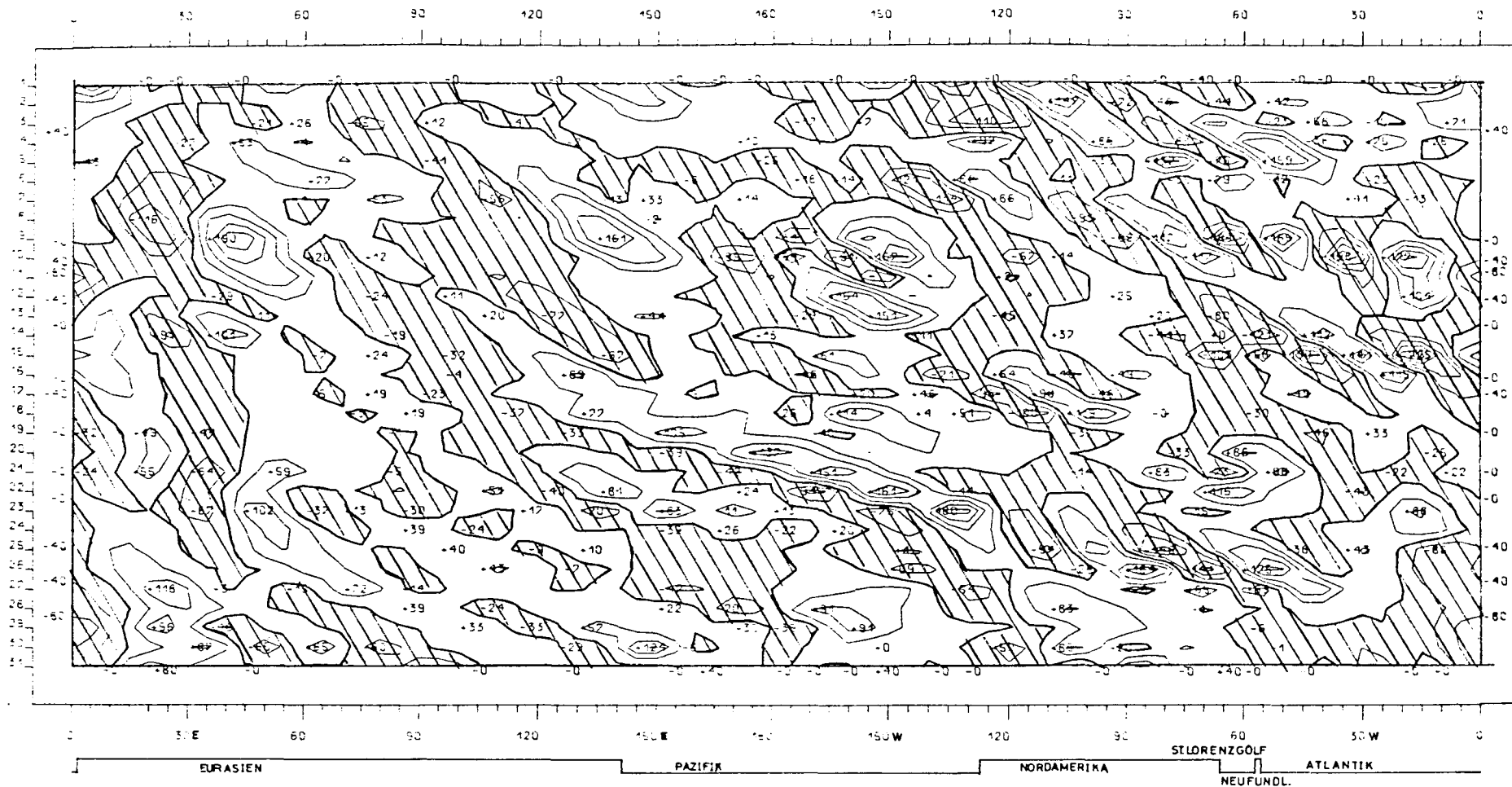
Abb.62



200 mb
 Breitenkreis 50°N
 August 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

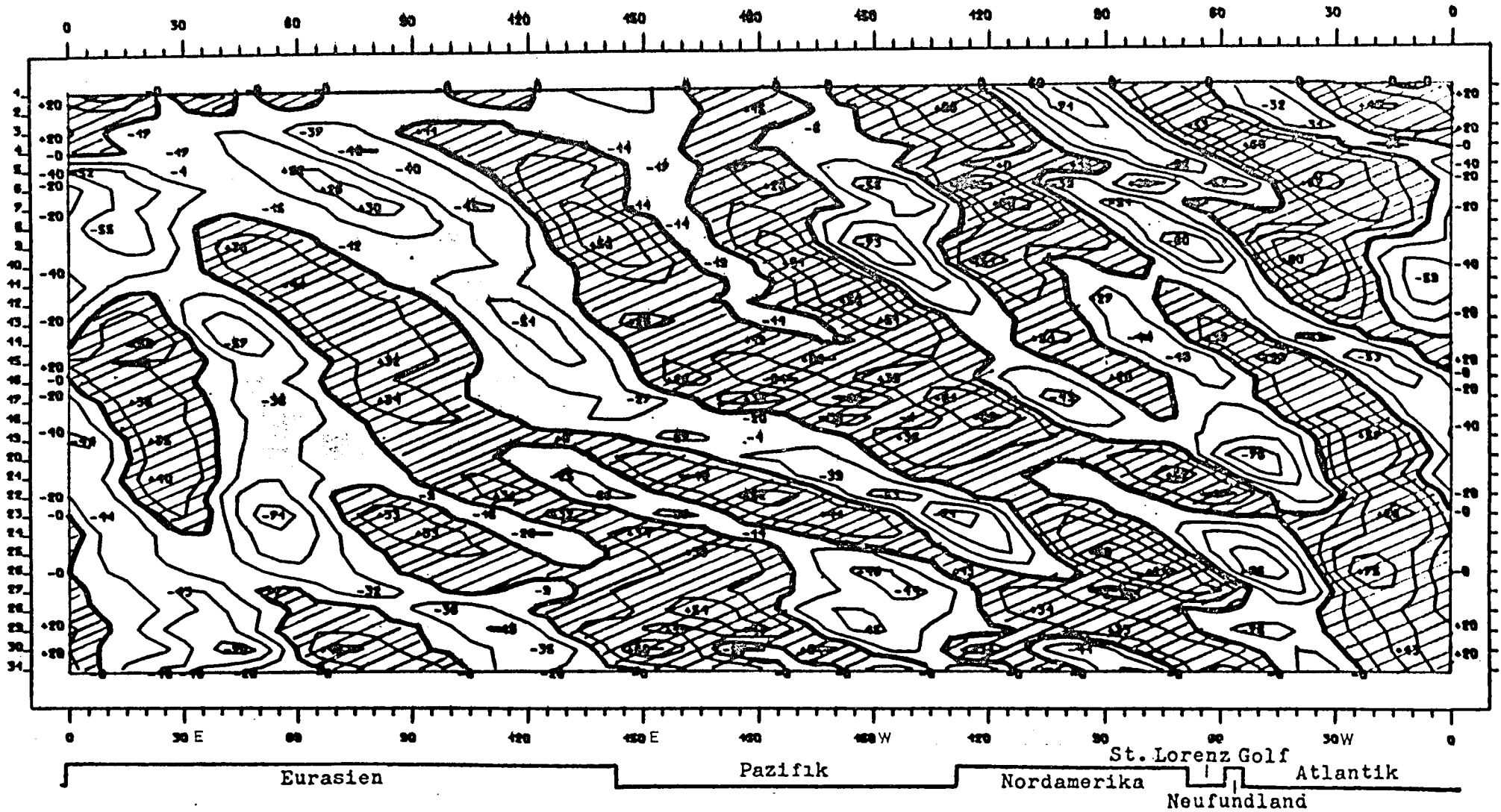
Abb.63



200 mb
 Breitenkreis 50°N
 Oktober 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie durch wandernde Wellen.
 Isolinienabstand: 40 grad m sec⁻¹

Abb.64



200 mb
 Breitenkreis 50°N
 Oktober 1975

Räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen
 Transports sensibler Energie.
 Isolinienabstand: 2000 grad m sec⁻¹

Abb.65