

# DEUTSCHER WETTERDIENST

---

## WETTERKUNDLICHE LEHRMITTEL

Nr. 12

551.507.362.2 : 557.509.3 ✓ 80/3597

### Überwachung des Wettergeschehens durch Satelliten

DWD Offenbach / Bibliothek



B23029425

---

Der Deutsche Wetterdienst bearbeitet in seinem Sonderreferat Unterricht und Lehrmittel solche wetterkundlichen Stoffe, die als Anregung oder Hilfe für den praktischen Unterricht in der Wetterkunde gedacht sind.

Die Herausgabe derartiger Lehrstoffe läßt im übrigen dem Lehrer die volle Freiheit über den Umfang und die Art der Behandlung im Unterricht. Eine stoffliche oder lehrplanmäßige Bindung wird mit der Herausgabe dieser Lehrstoffe nicht angestrebt.

IRM (LR (101))



80.2507

# INHALT

1.	Einführung .....	1
2.	Satellitenbahnen .....	2
2.1	Bahnmechanik .....	2
2.2	Geostationäre Bahnen .....	4
2.3	Polare Bahnen .....	4
3.	Instrumentierung .....	6
3.1	Gewinnung von Bilddaten .....	6
3.2	Sondierung der Atmosphäre .....	8
3.3	Einsammeln der Daten von automatischen Plattformen .....	8
3.4	Wiederverbreitung von Daten .....	8
4.	Empfang von Satellitendaten .....	9
5.	Nutzung von Satellitendaten .....	10
5.1	Qualitative Nutzung .....	10
5.2	Quantitative Nutzung .....	11
6.	Beispiele .....	11
6.1	Entwicklung einer Zyklone, 20.9. - 22.9.1969 .....	12
6.2	Sturmtief über dem Ärmelkanal, 12.2.1970 .....	15
6.3	Okkludierte Zyklone über Ostengland, 20.8.1970 .....	17
6.4	Nebel und Hochnebel über Mitteleuropa, 28.10.1975 .....	18
6.5	Ende einer mehrwöchigen Schönwetterperiode in Deutschland, 14./15.8.1975 .....	19
6.6	Orkantief über Südkandinavien/westl. Ostsee, 3.1.1976 ..	21
6.7	Sturmwirbel über dem Ostatlantik, 25.4.1971 .....	23
6.8	Hurrikan "Fifi", September 1974 .....	25

## 1. Einführung

Als im Oktober 1957 die Sowjetunion einer überrascht aufhorchenden Welt die Nachricht vom erfolgreichen Start des ersten künstlichen Satelliten bekanntgab und als die Vereinigten Staaten wenige Monate später mit der Meldung über den Start ihres ersten "Explorer"-Satelliten folgten, waren die ersten Schritte in die neue Ära der Raumfahrt getan. Mit Hilfe des Raketenantriebs war es Forschern und Ingenieuren gelungen, einen Flugkörper auf eine Geschwindigkeit von 8 km/sec zu bringen, bei der er in der Lage ist, die Erde als künstlicher Satellit zu umkreisen.

Seither sind große personelle und finanzielle Aufwendungen für die Entwicklung der Raketentechnik und Raumfahrt gemacht worden. Dem großen Aufwand entsprechend hat die Satellitentechnik seit dem Ende der fünfziger Jahre eine stürmische Entwicklung zu verzeichnen, und den ersten, nur der Forschung dienenden Satelliten, sind längst zahlreiche sogenannte Anwendungssatelliten für die verschiedensten Gebiete gefolgt. Relativ früh sind die neuen technischen Möglichkeiten auch in den Dienst der Meteorologie gestellt worden. Am 1. April 1960 starteten die USA den ersten, für meteorologische Messungen bestimmten Satelliten: TIROS I. Die Sowjetunion folgte erst 1966 mit dem Start von KOSMOS-122 dem Beispiel der USA.

Seit 1960 sind etwa 50 meteorologische Satelliten von den USA und der UdSSR gestartet worden. Im Sommer und Herbst 1977 sind Japan und die Europäische Weltraumorganisation ESA (Bundesrepublik Deutschland Mitglied) mit den Starts von GMS (Geostationary Meteorological Satellite) und METEOSAT (Meteorologischer Satellit) zu den USA und der UdSSR als satellitenbetreibende Staaten oder Organisationen hinzugekommen.

Die meteorologischen Satelliten werden von der Aufgabenstellung her in Forschungs- und Betriebssatelliten unterteilt. Den Forschungssatelliten unterliegt es, die Daten für eine spezielle Forschungsaufgabe zu liefern oder neue Instrumente auszuprobieren. Die Betriebssatelliten hingegen werden innerhalb des weltweiten meteorologischen Beobachtungssystems, das die Daten für die Lösung der verschiedenen Aufgaben der Wetterdienste, z.B. Herausgabe von Wettervorhersagen, liefert, eingesetzt. Die Wettersatelliten schließen die Lücken im weltweiten Beobachtungsnetz über den Ozeanen, Wüsten und Polkappen.

TIROS : Television and Infra-Red Observation Satellite

## 2. Satellitenbahnen

Im Laufe der Jahre haben sich zwei unterschiedliche Satellitentypen - sowohl bei den Forschungs- als auch bei den Betriebssatelliten - herauskristallisiert, die sich im wesentlichen durch ihre Umlaufbahnen unterscheiden:

- geostationäre Satelliten,
- polarumlaufende Satelliten.

### 2.1 Bahnmechanik

Ein Geschöß, das an der Erdoberfläche unter einem flachen Winkel abgefeuert wird, fällt nach einer gewissen Entfernung auf diese zurück, weil - die Flugbahn unter dem Einfluß der Anziehungskraft der Erde gekrümmt ist,

- ein Teil der beim Abschuß mitgegebenen kinetischen Energie durch die Reibung in der Luft aufgezehrt wird.

Die Entfernung, bis zu der ein Geschöß zu fliegen vermag, wird um so größer, je höher seine Anfangsgeschwindigkeit und je geringer der Luftwiderstand wird. Die Rechnung zeigt, daß bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 7,9 km/s (= 28000 km/h) ein horizontal abgefeuertes Geschöß - falls es keine Luftreibung gäbe - nicht mehr zur Erde zurückfallen, sondern diese als künstlicher Satellit umkreisen würde. Bei dieser Geschwindigkeit, die auch als die "erste kosmische Geschwindigkeit" bezeichnet wird, halten sich die Anziehungskraft der Erde und die Zentrifugalkraft das Gleichgewicht. Es ist dasselbe Gleichgewicht, das die Bahn des Mondes um die Erde bestimmt. Diese Analogie verleiht der Bezeichnungsweise "künstliche Satelliten" ihre volle Berechtigung.

Je größer man den Abstand der Bahn eines künstlichen Satelliten von der Erde wählt, desto geringer werden sowohl die Anziehungskraft wie auch die Zentrifugalkraft. Dafür werden die Umlaufzeiten länger.

Der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen dem Abstand eines Satelliten von der Erdoberfläche und seiner Umlaufbahn wird durch die Beziehung

$$U = U_0 \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{\frac{3}{2}}$$

geliefert. In dieser Formel, die sich aus dem 3. Keplerschen Gesetz

der Planetenbewegungen herleitet, bedeutet:

U die Umlaufzeit in der Höhe h über der Erdoberfläche

R den Erdradius und  $U_0$  die (infolge der Luftreibung nicht realisierbare) Umlaufzeit in der Höhe  $h = 0$ , d.h. unmittelbar an der Erdoberfläche.

Diese Umlaufzeit  $U_0$ , die sich aus der Forderung nach Gleichgewicht zwischen Anziehungskraft und Zentrifugalkraft errechnen läßt, beträgt 84,4 Minuten. Aus obiger Formel ergeben sich dann die Umlaufzeiten für Kreisbahnen in verschiedenen Höhen über der Erdoberfläche (s. Tab. 1).

h = 200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	km
U = 88,4	92,5	96,6	100,9	105,0	109,3	113,7	118,1	122,6	126,8	min

Tab. 1 : Umlaufbahnen auf Kreisbahnen in Abhängigkeit von der Höhe über der Erdoberfläche

Wenn man den Abstand des Satelliten von der Erdoberfläche in Vielfachen des Erdradius angibt, so erhält man die in Tab. 2 angegebenen Werte.

Die Mindestumlaufzeit bei  $h = 0$  beträgt annähernd  $1\frac{1}{2}$  Stunden. Zwei Stunden Umlaufzeit erfordert eine Kreisbahn in 1688 km Höhe. Etwa 4 Stunden werden im Abstand von 1 Erdradius, 12 Stunden in ca. 20000 km und 24 Stunden in 36000 km Abstand von der Erdoberfläche benötigt. In dem der Mondentfernung entsprechenden Abstand von 60 Erdradien würde auch ein künstlicher Satellit nahezu 28 Tage für einen Umlauf gebrauchen.

h [ R ] = 1/2R	R	2 R	3 R	5,65 R	6 R	60 R
h [km] = 3185	6370	12740	19110	36000	38200	382000 km
U = 2h35m	3h59m	7h19m	11h15m	24h	26h03m	28 Tage

Tab. 2 : Umlaufzeiten auf Kreisbahnen in Abhängigkeit von der Höhe über der Erdoberfläche (Abstände in Erdradien bzw. in km)

## 2.2 Geostationäre Bahnen

Nach Tab. 2 beträgt in einer Höhe von 36000 km über der Erdoberfläche die Umlaufzeit eines Satelliten gerade 24 Stunden. Das ist die gleiche Zeit, die die Erde zu einer Drehung um ihre Achse benötigt. Ein solcher Satellit scheint, wenn seine Bahnebene die Äquatorebene ist, von der Erde aus betrachtet, am Himmel still zu stehen, daher auch die Bezeichnung "geostationärer Satellit".

Von einer solchen Plattform aus kann ein beträchtlicher und stets der gleiche Teil der Erdoberfläche eingesehen werden. Wenn man daher von dort aus mit einer Kamera in relativ kurzen Zeitabständen die Wolkenfelder photographiert, kann man deren Veränderungen und Bewegungen nahezu kontinuierlich verfolgen. Hiervon profitiert insbesondere der Warndienst für Wirbelstürme und Gewitterfronten.

## 2.3 Polare Bahnen

Die andere Gruppe von Bahnen, die für meteorologische Messungen besondere Vorteile bieten, sind solche, die über die Pole führen. Da die Ebene einer Satellitenbahn im Raum unverändert bleibt, dreht sich die Erde einmal im Laufe des Tages unter dem Satelliten hinweg. Ein mitfliegender Beobachter würde, wenn die Kreisbahn beispielsweise in 1688 km Höhe gewählt wird, die Pole alle 2 Stunden überfliegen. Ferner würde er, vorausgesetzt, daß der Öffnungswinkel seines Blickfeldes mindestens  $30^{\circ}$  beträgt, alle Punkte des Äquators 2mal innerhalb von 24 Stunden sehen, nämlich einmal zu deren Tages- und einmal zu deren Nachtzeit (Abb. 1). Man kann also bei polarum-



Abb. 1 : Umläufe eines Satelliten auf polarer Kreisbahn und Gesichtsfeld einer Fernsehkamera

laufenden Satelliten erreichen, wenn man mit Hilfe der Bahnhöhe und des Öffnungswinkels des Instruments die Breite des überschaubaren Streifens entsprechend wählt, daß jeder Punkt der Erdoberfläche mindestens 2mal pro Tag eingesehen wird.

Die Tatsache, daß ein in eine polare Umlaufbahn gebrachter Satellit seine Bahnebene im Raum beibehält, würde allerdings auf die Dauer gesehen eine für die meteorologischen Beobachtungen recht unerwünschte Konsequenz haben. Würde nämlich ein Satellit so gestartet werden, daß er die einzelnen Gebiete jeweils am Mittag überfliegt, so würde er nach 3 Monaten, wenn sich die Verbindungslinie Sonne - Erde um  $90^\circ$  im Raum verschoben hat (s. Abb.2), überall bereits um 06h Ortszeit er-

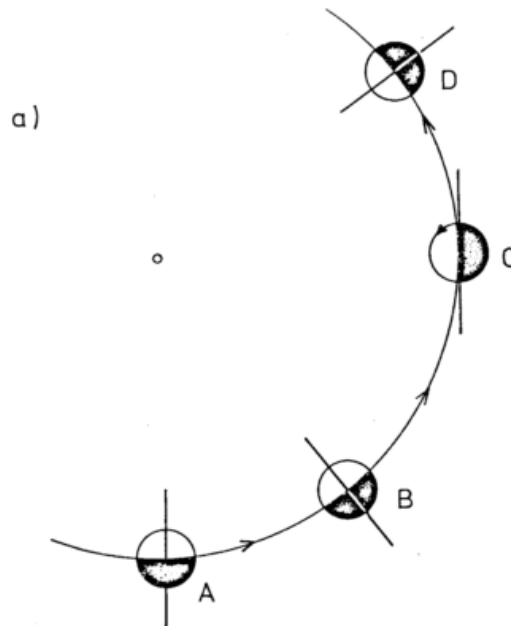


Abb. 2a,b: Sonnensynchrone Umlaufbahn

- a) Punkte A und C: Bahnebene bei unveränderter Orientierung im Raum (nicht sonnensynchron)
- Punkte B und D: Bahnebene bei Umläufen mit unveränderter Ortszeit (sonnensynchron)
- b) Drehung der Satelliten-Umlaufbahn

scheinen und nach insgesamt 4 Monaten würden seine Kameras über un- beleuchteten Teilen der Erde operieren. Glücklicherweise läßt sich eine solche Entwicklung vermeiden, und zwar durch die Wahl einer sog. "sonnensynchronen" Umlaufbahn, bei der der Satellit also alle Tage zur gleichen Ortszeit erscheint. Zu diesem Zweck muß sich die Bahnebene täglich um ca.  $1^\circ$  drehen, und zwar im gleichen Sinn, wie sich

die Erde um die Sonne bewegt.

Diese Drehung kann man dadurch erreichen, daß man einen Störeffekt ausnutzt, den die Erde auf ihre Satelliten ausübt, und der daher rührt, daß die Erde keine Kugel mit zentralsymmetrischer Massenverteilung, sondern - in erster Annäherung - ein Rotationsellipsoid ist, d.h., daß sie eine Art "Wulst" am Äquator besitzt. Infolgedessen treten Störkräfte hinsichtlich der Satellitenbahn auf, deren Größe -kreisförmige Bahnen vorausgesetzt - von der Höhe der Bahn und ihrer Neigung gegen die Äquatorebene abhängt. Wie die Rechnungen gezeigt haben, gehören zu dem Höhenintervall von 500 - 1500 km, in dem die amerikanischen Satelliten operieren, Neigungswinkel (Inklination) zwischen Bahn- und Äquatorebene zwischen  $98^{\circ}$  und  $102^{\circ}$ . Wenn man dies berücksichtigt, können die Störkräfte dahingehend ausgenutzt werden, daß die Umläufe des Satelliten über Monate hinaus sonnensynchron erfolgen.

Die amerikanischen NOAA-Satelliten der Serien ITOS und TIROS-N umkreisen die Erde täglich 12-13mal auf Bahnen, die Höhen von 1450 km (ITOS) und 900 km (TIROS-N) haben mit Inklinationen von  $101^{\circ}$  (ITOS) und  $99^{\circ}$  (TIROS-N). Die Umlaufzeiten betragen 115 (ITOS) und 103 min (TIROS-N). Die russischen METEOR-Satelliten haben ebenfalls Bahnhöhen von 900 km mit Umlaufzeiten von 103 min. Sie verlaufen allerdings nicht auf sonnensynchronen Bahnen, da der Inklinationenwinkel nur  $81^{\circ}$  beträgt.

### 3. Instrumentierung

Die Wettersatelliten sind generell so ausgerüstet, daß sie die folgenden Aufgaben (Missionen) durchführen können:

- Gewinnung von Bilddaten
- Sondierung der Atmosphäre (z.Zt. nur polarumlaufende Satelliten)
- Einsammlung der Daten von automatischen Plattformen
- Wiederverbreitung von Daten.

#### 3.1 Gewinnung von Bilddaten

Die ersten Satellitenbilder wurden mit Fernsehkameras gewonnen, die im sichtbaren Bereich ( $0.3 - 0.8 \mu\text{m}$ ) des elektromagnetischen Spektrums

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

ITOS : Improved Tiros Operational Satellite

arbeitet. Die Daten wurden anfangs an Bord des Satelliten zwischengespeichert und konnten z.B. nur von den Amerikanern und Russen abgefragt werden. 1964 wurde in einem Forschungssatelliten der USA erstmals das sogenannte APT-Verfahren (Automatic Picture Transmission) angewandt, das die direkte Übertragung der Satellitenbilder an Empfangsstationen erlaubte, die sich im Blickfeld des Satelliten befinden. 1966 wurde das Verfahren für die amerikanischen Betriebssatellitenserie ESSA (Environmental Science Satellite) übernommen.

Die Fernsehkameras wurden 1972 in den NOAA-Satelliten durch Radiometer abgelöst, die zeilenweise, senkrecht zur Umlaufbahn, die Erdoberfläche abtasten. Diese Radiometer arbeiten im sichtbaren und im infraroten Frequenzbereich. Im sichtbaren Bereich zwischen  $0.3 - 0.8 \mu\text{m}$  wird die reflektierte Sonnenstrahlung gemessen und in dem infraroten Frequenzband ( $1 - 1000 \mu\text{m}$ ) die von Oberflächen oder von Gasen emittierte Strahlung. Die im "Fensterbereich" des Infraroten bei  $11 - 12 \mu\text{m}$  - hier ist die Atmosphäre für die von den Oberflächen (Land, Wasser, Wolken) emittierte Strahlung durchlässig - aufgenommene Information erlaubt auch eine Verfolgung des Wettergeschehens während der Nacht. Weiterhin geben die Messungen in den Absorptionsbanden von Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon Aufschluß über die horizontale und vertikale Verteilung dieser für den Energiehaushalt der Atmosphäre wichtigen dreiatomigen Gase.

Die Bilddaten werden mit Radiometern mittlerer und hoher Auflösung gewonnen. Die Daten mit mittlerer Auflösung (3-4 km) werden bei 136 MHz (VHF-Bereich) als APT-Information, die mit hoher Auflösung (1 km) bei 1.69 GHz (S-Band) als sogenannte HRPT (High Resolution Picture Transmission)-Information direkt von dem Satelliten abgestrahlt.

In den letzten Jahren wurden abbildende Mikrowellenradiometer (Mikrowellenbereich 0.1 - 100 cm) entwickelt, deren Daten Aussagen über Niederschlagsgebiete, Alter und Zustand von Eisflächen sowie Angabe über Seegang und Zustand der Erdoberfläche erlauben. Sie fanden bislang nur in Forschungssatelliten Verwendung.

### 3.2 Sondierung der Atmosphäre

Durch Messungen in sehr schmalen Frequenzbereichen (Kanälen) der Absorptionsbanden von Kohlendioxid und Wasserdampf im Infraroten ist es nach Anwendung komplizierter Verfahren möglich, vertikale Temperatur- und Feuchteprofile abzuleiten. Ähnliche Meßverfahren im Mikrowellenbereich bei 0.5 - 1 cm erlauben ebenfalls die Ableitung von Temperatur- und Feuchteprofilen.

Ein Infrarot-Vertikalsondierungsgerät wurde erstmals 1969 in einem amerikanischen Forschungssatelliten geflogen und 1972 in die operationelle NOAA-Serie übernommen.

Die Daten finden in den mathematisch/physikalischen Modellen Verwendung, die 3-5-tägige Vorhersagen der wichtigsten meteorologischen Parameter - Druck, Temperatur, Feuchte, Wind - liefern und auf die dann die Wettervorhersagen aufbauen, die an die Öffentlichkeit gegeben werden.

### 3.3 Einsammeln der Daten von automatischen Plattformen

Polarumlaufende sowie geostationäre Satelliten eignen sich zur Abfrage der Daten von automatischen Meßeinrichtungen (Plattformen), seien sie an Land, auf Bojen und Schiffen oder Ballonen und Flugzeugen installiert. Die Daten können auf diesem Wege schnell an zentrale Bodenstationen weitergegeben werden, die sie wiederum in die weltweiten Fernmeldenetze einspeisen.

Die meisten Satelliten sind zur Zeit mit den entsprechenden Einrichtungen zum Einsammeln der Daten ausgerüstet, die Anzahl der automatischen Plattformen ist jedoch noch klein. Für die Zukunft wird eine rasche Zunahme erwartet.

### 3.4 Wiederverbreitung von Daten

Die APT- und HRPT-Verfahren zur direkten Übermittlung von Satellitenbildern wurden schon unter 3.1 erwähnt. Neben dieser Direktübertragung durch die polarumlaufenden Satelliten bieten die geostationären Satelliten die Möglichkeit der Wiederverbreitung von Daten, seien es Satellitenbilder, Wetterkarten oder Beobachtungsdaten. Die großen Vorteile dieser Mission sind:

- es können enorme Datenmengen schnell übertragen werden (zwischen 100 und 500 Kbit/s, entspr. 25.000 - 125.000 Buchstaben/s).
- eine Vielzahl von Empfangsstationen kann gleichzeitig die Information aufnehmen (keine Zeitverzögerung).

#### 4. Empfang von Satellitendaten

Für den Empfang der unterschiedlichsten Satellitendaten sind jeweils entsprechende Empfangseinrichtungen nötig. Die Aufnahme der Bilddaten der polarumlaufenden Satelliten erfordert:

- eine Station, die im VHF-Bereich arbeitet, um die Daten mit mittlerer Auflösung empfangen zu können;
- eine Station für den Empfang der hochauflösenden Bilddaten; diese arbeitet im S-Band-Bereich.

Der Empfang der geostationären Satelliten erfordert ebenfalls, je nachdem um welche Daten (analoge oder digitale) es sich handelt, unterschiedliche Aufnahmeeinrichtungen.

Die Wetterdienste haben je nach ihrer Aufgabenstellung, die im nationalen und internationalen Rahmen sehr unterschiedlich sein kann, Empfangsstationen aufgebaut. Der Deutsche Wetterdienst ist für die Aufnahme der APT- und HRPT-Information der polarumlaufenden Satelliten sowie der Daten der geostationären Satelliten ausgerüstet.

Die Empfangseinrichtungen des Deutschen Wetterdienstes können in Offenbach täglich Bilder von 8-10 Umläufen (4-5 tags, 4-5 nachts) eines polarumlaufenden Satelliten (s. Abb. 3) und die halbstündlich vorliegenden Bilder des geostationären Satelliten METEOSAT aufnehmen. Der Stand-

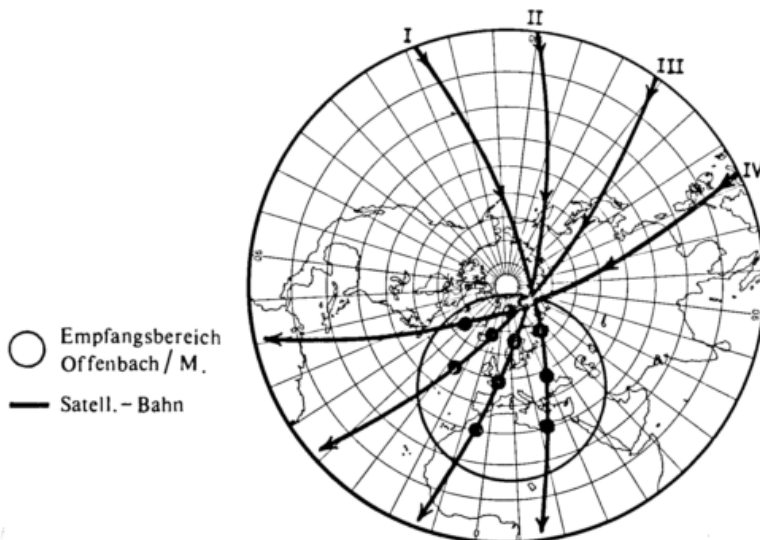


Abb. 3: Schematische Darstellung von aufeinanderfolgenden Umläufen eines polarumlaufenden Satelliten und Empfangsbereich der Empfangsstation in Offenbach.

ort von METEOSAT befindet sich über dem Äquator bei 0°-Länge(s.Abb.4).

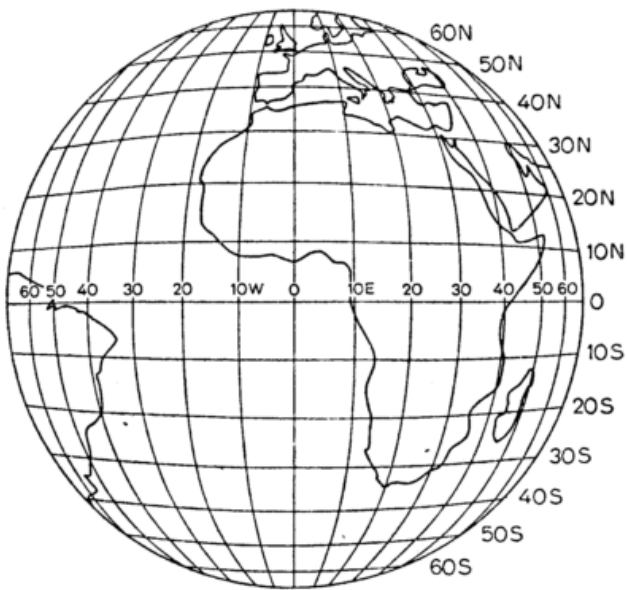


Abb. 4: Gesichtsfeld des geostationären Wettersatelliten METEOSAT von einem "Standort" über dem Äquator bei 0° Länge

## 5. Nutzung von Satellitendaten

Die Satellitendaten werden in der Meteorologie in qualitativer und quantitativer Hinsicht genutzt:

### 5.1 Qualitative Nutzung

Hier sind es vor allen Dingen die Satellitenbilder, die als qualitative Information bei der Analyse und Überwachung des Wettergeschehens herangezogen werden. Liegen die Bilder in kurzzeitigen Abständen vor - wie z.B. die der geostationären Satelliten -, dann stellen sie ein wertvolles Material für die Kurzfristvorhersage dar. Im einzelnen kann folgende Information aus den Bildern entnommen werden:

- Lage, Ausdehnung und Intensität von Tiefdruckgebieten der außertropischen Breiten und von tropischen Wirbelstürmen;
- Lage, Ausdehnung und Intensität von Fronten;
- Lage von Starkwindfeldern in der oberen Troposphäre (Strahlstrom (Jetstream));
- Art der Bewölkung;
- Stabilität von Luftmassen.

## 5.2 Quantitative Nutzung

Aus den Bilddaten und den Messungen der Vertikalsondierungsgeräte sowie der Mikrowelleninstrumente lassen sich die folgenden meteorologischen Parameter ableiten:




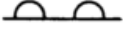

- Bedeckungsgrad der Bewölkung;
- Schnee- und Eisbedeckung;
- Meeresoberflächentemperaturen;
- Höhe der Wolkenobergrenzen;
- Vertikale Temperatur- und Feuchteverteilung;
- Windfeld in den Tropen und Subtropen in 3 Höhenschichten der Troposphäre;
- Flüssigwassergehalt von Wolken;
- Horizontale Ausdehnung von Niederschlagsgebieten;
- Zustand der Wasseroberfläche (Seegang);
- Zustand der Landoberflächen (feucht - trocken);
- Zustand und Alter der Eis- und Schneeoberflächen;
- Strahlungshaushalt.

## 6. Beispiele

Die Beispiele dienen zur Illustration der Verwendung der Satellitenbilder bei der Wetterkartenanalyse. Es werden Wetterkarten und Satellitenbilder nebeneinander gestellt. Zum besseren Verständnis der Eintragungen auf den Wetterkarten ist ein vereinfachtes Eintragungsschema beigelegt (Abb. 6).

### 6.1 Entwicklung einer Zyklone, 20.9. - 22.9.1969

Die primäre Voraussetzung für die Entstehung von Tiefdruckgebieten ist das Gegeneinanderführen von verschieden temperierten Luftmassen. Die sich dabei bildenden scharfen Grenzen bezeichnet man als Fronten. Fronten sind also an Tiefdruckgebiete gebunden. Man unterscheidet folgende Arten:

	am Boden	
	Kaltfront	: warme Luft wird durch kalte verdrängt
	in der Höhe	
	am Boden	
	Warmfront	: kalte Luft wird durch warme verdrängt
	in der Höhe	
	Okklusion	: durch den Okklusionsprozeß wird die gesamte, im Bereich eines Tiefdruckgebiets am Boden vorhandene Warmluft durch Kaltluft ersetzt, wobei die Warmluft nicht nur verdrängt, sondern vom Boden abgehoben wird, so daß die Okklusion die Grenze zwischen der Kaltluft auf der Rückseite eines Tiefs und der kühleren Luft auf der Vorderseite ist.

20. September 1969, 12 GMT

Auf dem Satellitenbild von diesem Tag sieht man ein sich von  $55^{\circ}\text{N}/10^{\circ}\text{W}$  bis  $45^{\circ}\text{N}/40^{\circ}\text{W}$  erstreckendes Wolkenband, das mit einer Kaltfront zusammenhängt.

Im Bereich  $50^{\circ}\text{N}/30^{\circ}\text{W}$  verdichtet sich die Bewölkung und greift nach Norden aus. Diese Veränderung in der Krümmung des frontalen Wolkenbandes und der Dichte der Bewölkung ist ein Anzeichen dafür, daß sich eine Wellenzyklone gebildet hat.

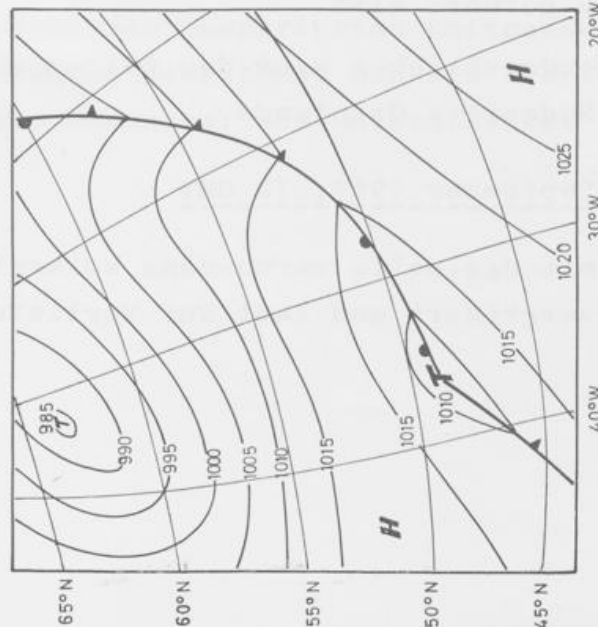
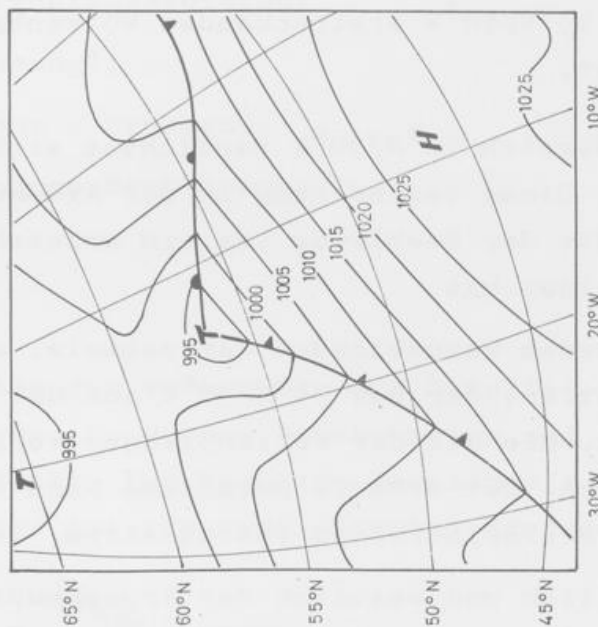
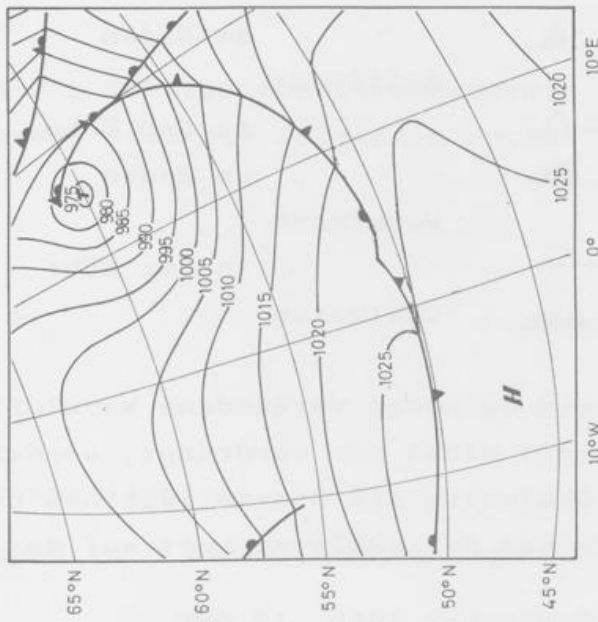
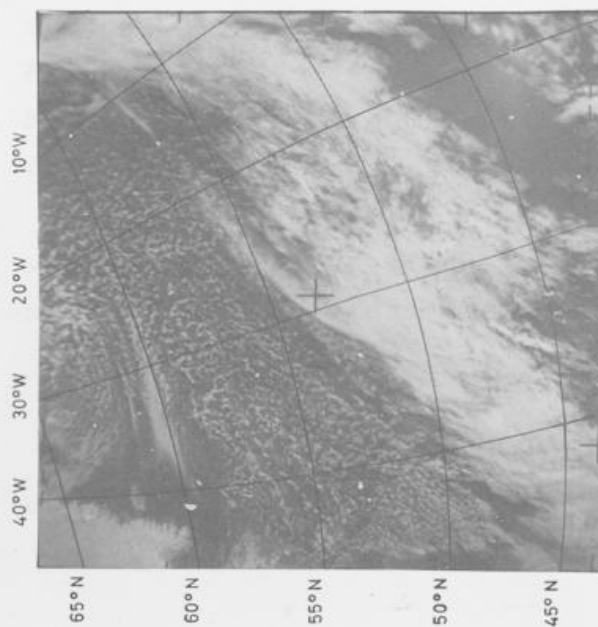
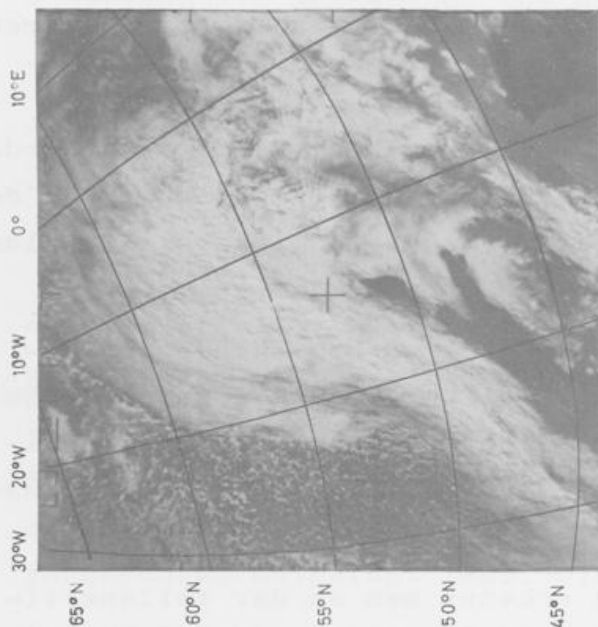
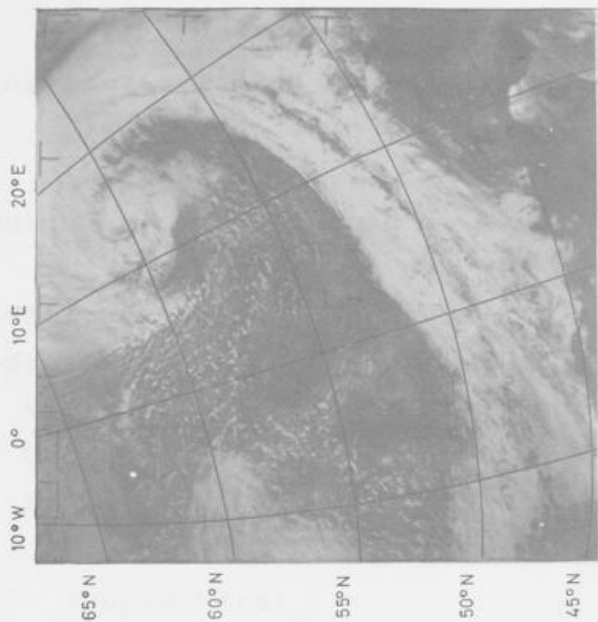
Außerdem kennzeichnet der schmale, aus hohen Zirren bestehende Wolkenstreifen, der bei  $54^{\circ}\text{N}/30^{\circ}\text{W}$  aus der Frontbewölkung nach Nordosten herausweht, die mit der Wellenbildung verstärkt einsetzenden Aufgleiterscheinungen. Der scharfe nördliche Rand dieses Streifens stimmt mit der Achse des Starkwindfeldes (Strahlstrom, Jetstream) in der Höhe überein.

Nördlich und westlich der Frontbewölkung erkennt man an der zellenartigen Struktur der Bewölkung, daß es sich um kumuliforme Wolken handelt. Dieses Wolkenbild ist typisch für Kaltluft, die über wärmere Meeresgebiete geführt wird.

Am nordwestlichen Rand des Bildes sieht man in dem wolkenfreien Gebiet die Südspitze Grönlands.

21. September 1969, 12 GMT

Das mit der Welle verbundene Wolkenfeld hat sich seit dem letzten Termin vergrößert und läßt auf Vertiefung der Welle schließen, was die Bo-



22. September 1969, 12 GMT

21. September 1969, 12 GMT

20. September 1969, 12 GMT

Abb. 5: Satellitenbilder (ESSA 8) vom 20. - 22. Sept. 1969 mit Wetterkarten

denanalyse bestätigt (15 mb Druckfall im Zentrum gegenüber dem Vortag). Die Achse des Strahlstroms markiert sich in dieser Aufnahme als ein nur wenig von dem Hauptwolkenfeld abgesetzter Schattenwurf ( $54^{\circ}\text{N}/18^{\circ}\text{W} - 61^{\circ}\text{N}/05^{\circ}\text{W}$ ).

22. September 1969, 12 GMT

Der Kerndruck der Zyklone hat sich noch um 20 mb gegenüber dem Vortag verringert. Der Okklusionsprozeß hat nun mit der Verwirbelung eingesetzt. An der Kaltfront hat sich bei  $52^{\circ}\text{N}/03^{\circ}\text{E}$  wieder eine Welle gebildet. Die kumuliforme Kaltluftbewölkung südlich und westlich des Tiefzentrums hat sich aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten in Windrichtung angeordnet (an der starken Drängung der Isobaren in diesem Gebiet zu erkennen).

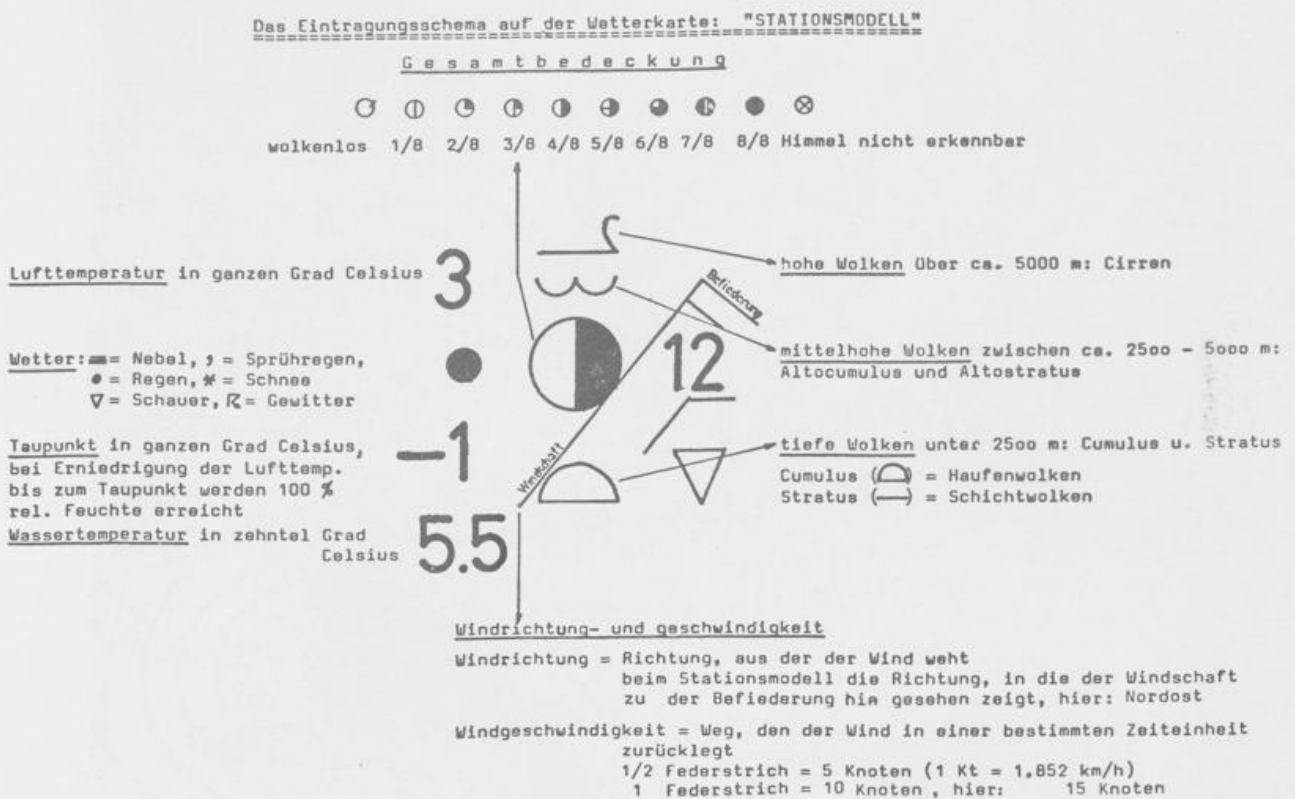


Abb. 6: Eintragungsschema auf den Wetterkarten

6.2 Sturmtief über dem Ärmelkanal, 12.2.1970

Die Aufnahmen des Satelliten ESSA 8 (Abb. 7) und die dazugehörige Boden-Wetterkarte 09 GMT (Abb. 8) zeigen eine Sturmzyklone im Bereich des Ärmelkanals mit den höchsten Windgeschwindigkeiten von 70-75 km/h über der Biskaya und der Irischen See. Deutlich erkennbar sind die wirbelartig um das Tiefdruckzentrum herumgeführten Wolkenbänder, die an die Fronten (Okklusion, Warmfront, Kaltfront) gebunden sind. Über Osteuropa und dem südlichen Teil Skandinaviens herrscht wolkenarmes Hochdruckwetter. Auf dem Satellitenbild sind das schneebedeckte Osteuropa und der vereiste Bottnische und Finnische Meerbusen deutlich zu erkennen. Die Bedeckung der Seegebiete

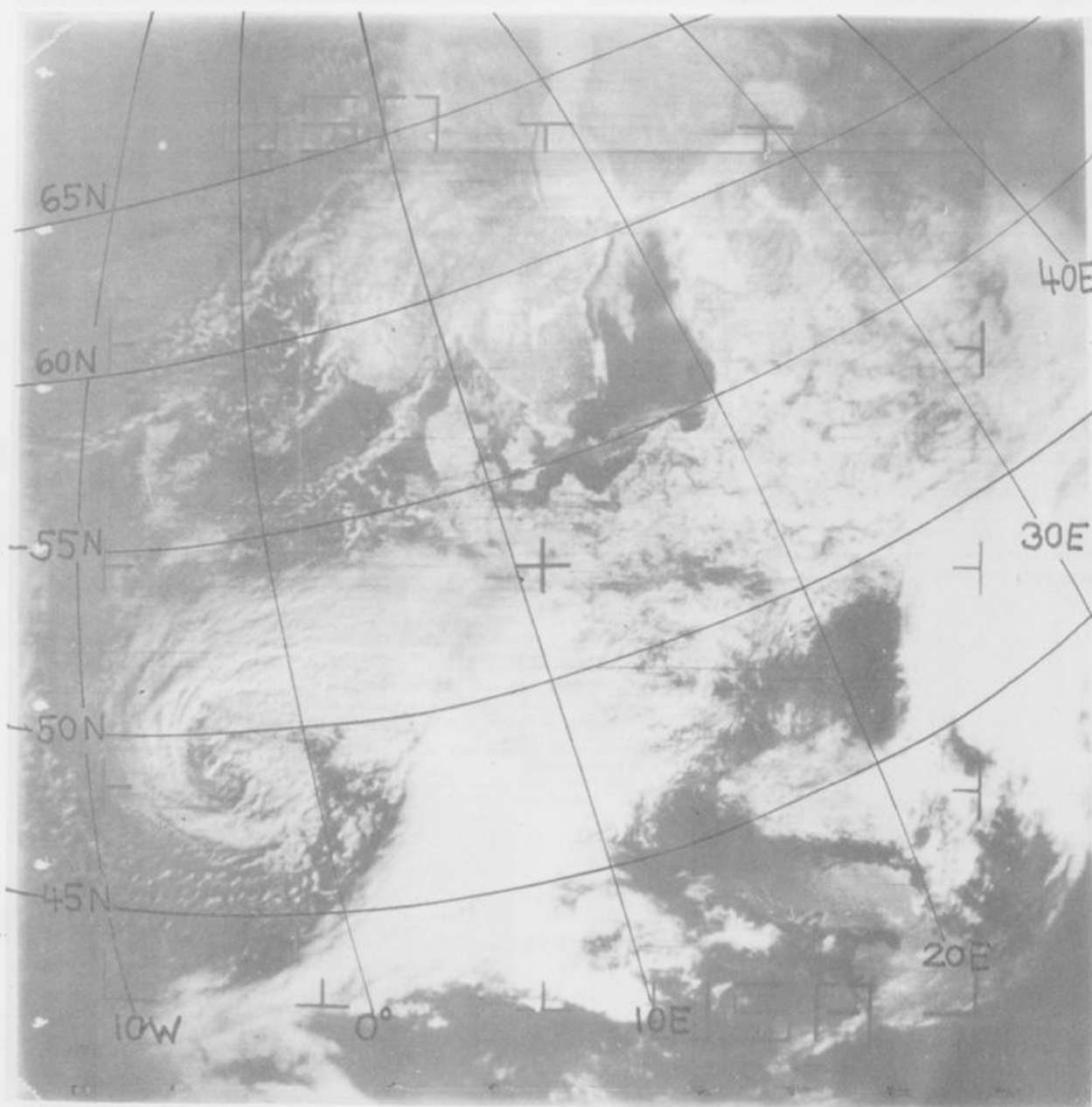


Abb. 7: ESSA 8, 12.2.1970, 09.40 GMT, sichtbarer Spektralbereich

mit Fest- oder Treibeis ist durch unterschiedliche Helligkeitswerte zwischen dem Bottnischen Meerbusen (Festeis) und der nördlichen Ostsee (Treibeis) auszumachen. Eine eisfreie Zone vor der Südostküste Schwedens ist durch die Abtrift des Treibeises durch westliche, ablandige Winde entstanden.

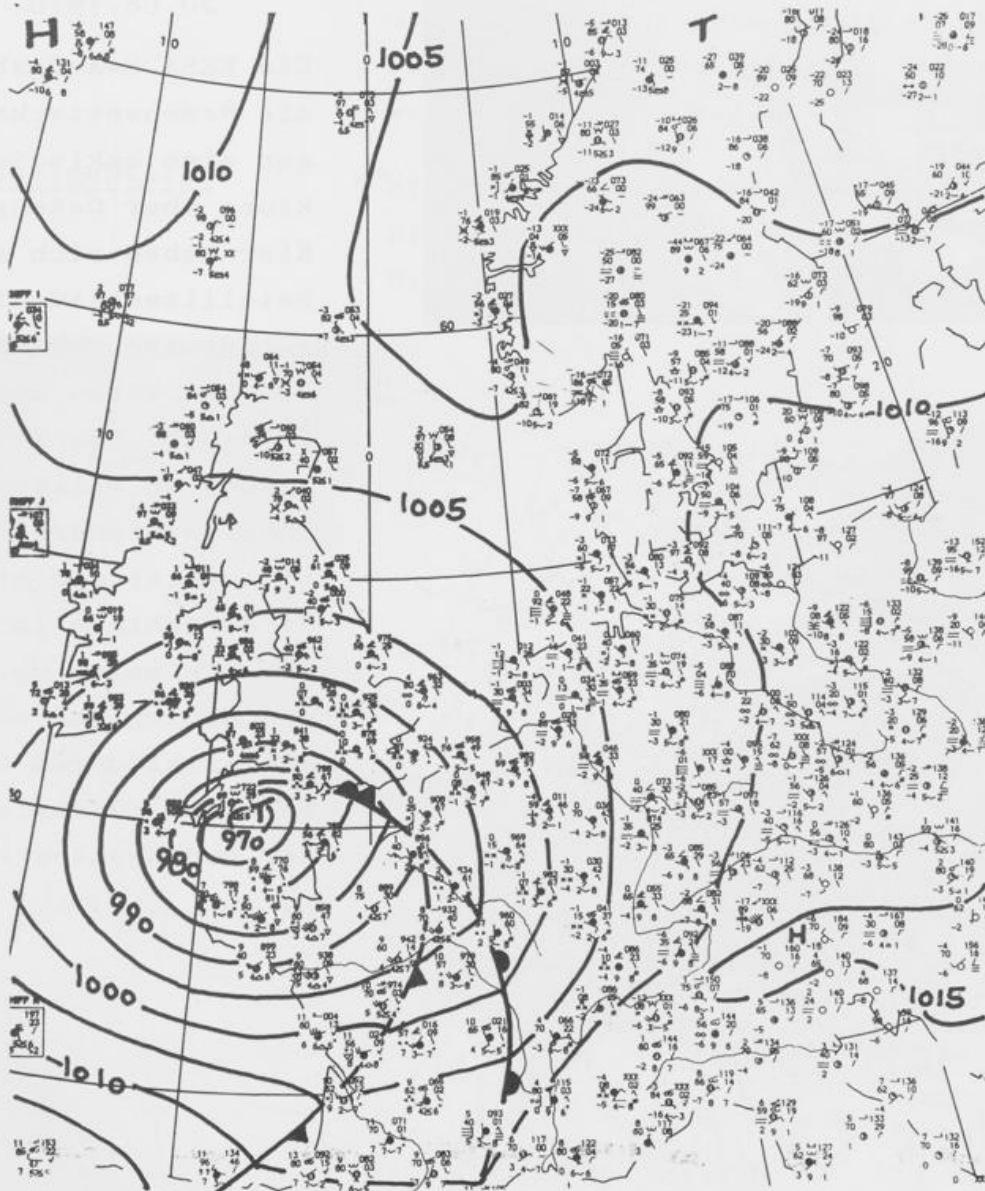
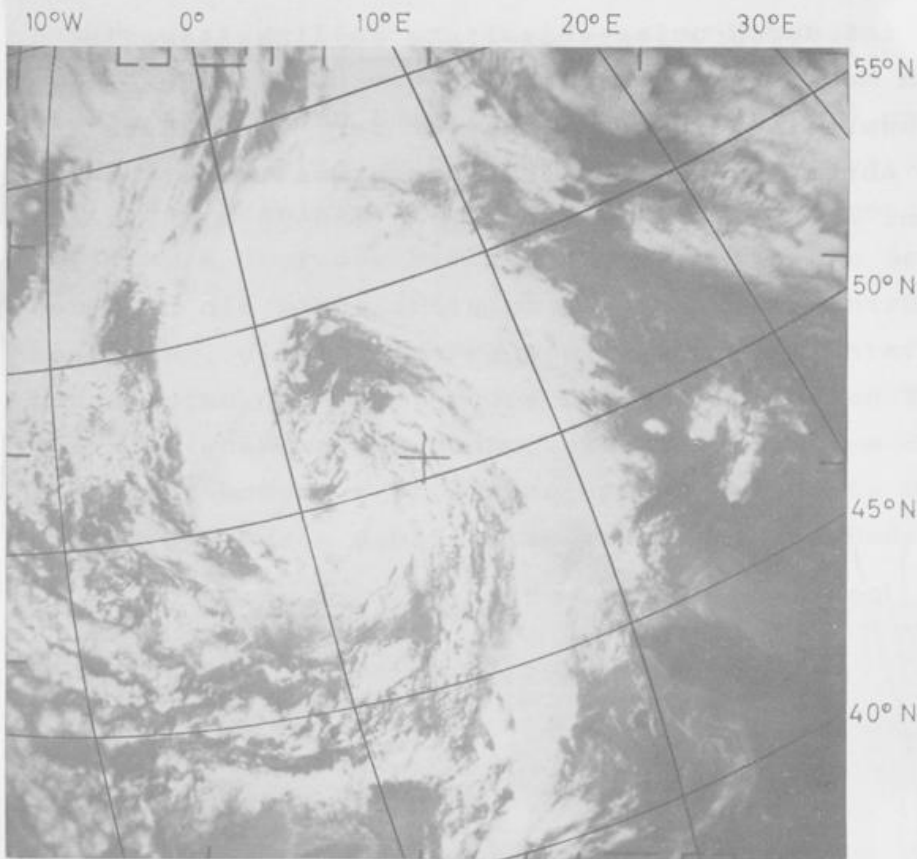


Abb. 8: Bodenwetterkarte vom 12.2.1970, 09 GMT



6.3 Okkludierte Zyklone über Ostengland, 20.08.1970

Die ESSA 8-Aufnahme und die Bodenwetterkarte zeigen eine okkludierte Zyklone über Ostengland. Klar heben sich auf dem Satellitenbild die spiralförmige Okklusion sowie die Warm- und Kaltfront ab. Das mit dem frontalen Wolkenband verknüpfte Niederschlagsgebiet weist die stärksten Niederschläge im Bereich der Okklusion über Mittel- und Südengland auf (siehe Wettermeldungen über Mittel- und Südengland auf der Bodenwetterkarte : , : , : , : ).

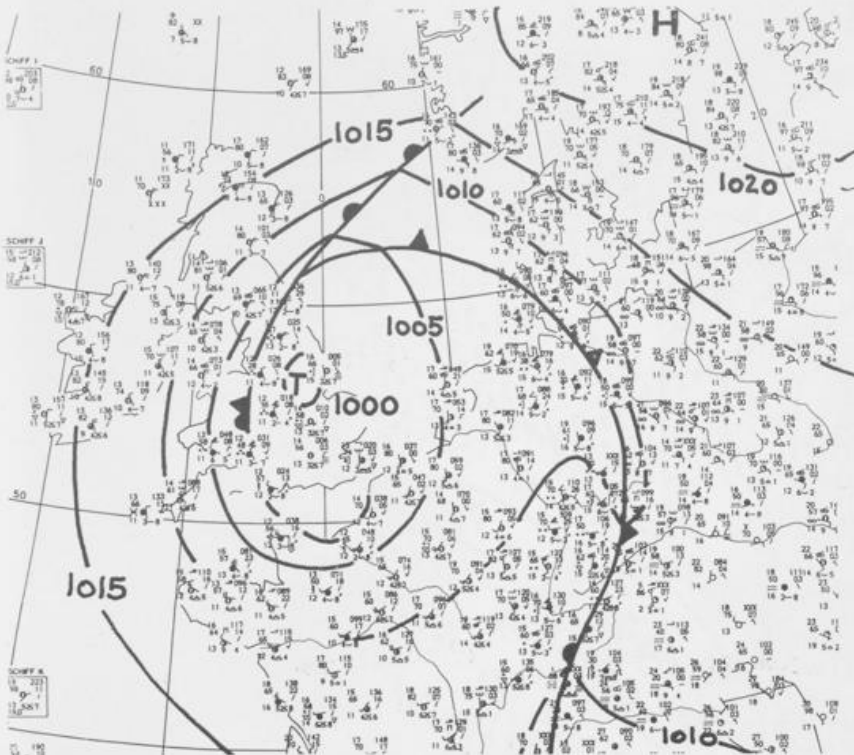


Abb. 9: Satellitenbild (ESSA 8), 10 GMT und Bodenwetterkarte, 09 GMT vom 20.08.1970

6.4 Nebel und Hochnebel über Mitteleuropa. 28.10.1975

Das Satellitenbild gibt eine stabile Nebel- und Hochnebellage über Mitteleuropa wieder. Es ist deutlich zu erkennen,

- daß die Gipfellagen der Mittelgebirge (A,B) aus dem Nebel herausragen und
- daß die Nebelgebiete bei C und D den Verlauf der entsprechenden Flußtäler und -niederungen nachzeichnen.

Wolkenfreie Gebiete: Südlich und östlich von A: Eifel, Rothaargebirge mit Westerwald, Harz. Weiter südlich: Hunsrück und Vogelsberg, Rhön. Südlich und östlich von B: Französische Mittelgebirge, Vogesen, Jura, Schwarzwald, Schwäbische Alb.

Nebelgebiete:  
B: Rhonetal, Neuenburger See, Aare, Donau  
C: Moldau- und Elbniederungen bei Prag  
D: Theißniederung in Ungarn

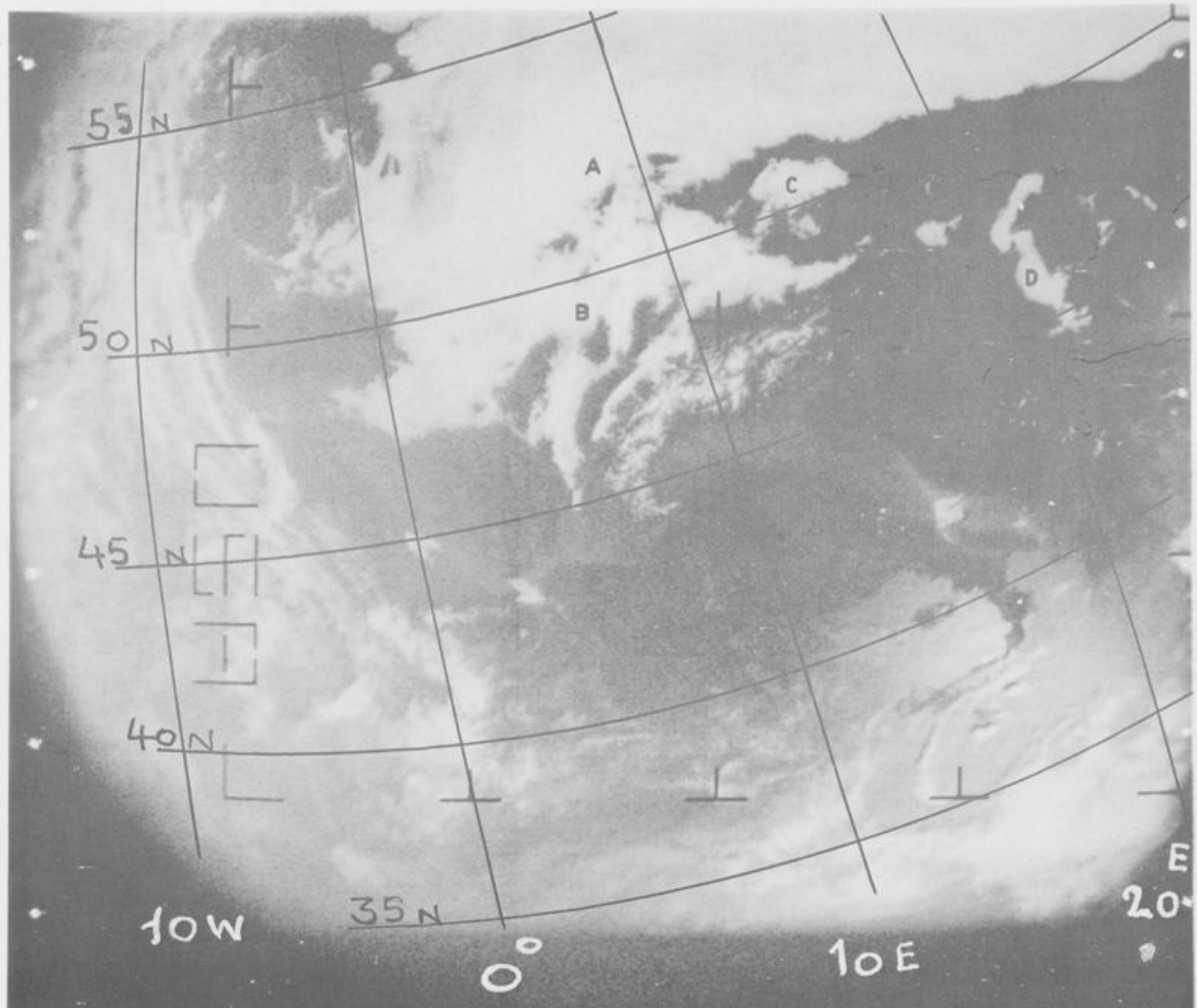


Abb. 10: ESSA 8, 28.10.1975, 09.52 GMT, sichtbarer Spektralbereich

6.5 Ende einer mehrwöchigen Schönwetterperiode in Deutschland, 14./15.8.1975

Die beiden Satellitenbilder zeigen den mitteleuropäischen Raum an zwei aufeinanderfolgenden Tagen, 14. und 15. August 1975, zur gleichen Uhrzeit: 11.45 GMT. Sie wurden von dem russischen Wettersatelliten METEOR 2.1 aus einer Höhe von ca. 900 km aufgenommen und von der Satellitenempfangsstation des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach aufgezeichnet. Bemerkenswert sind die Bewölkungsunterschiede über Deutschland an den beiden Tagen.

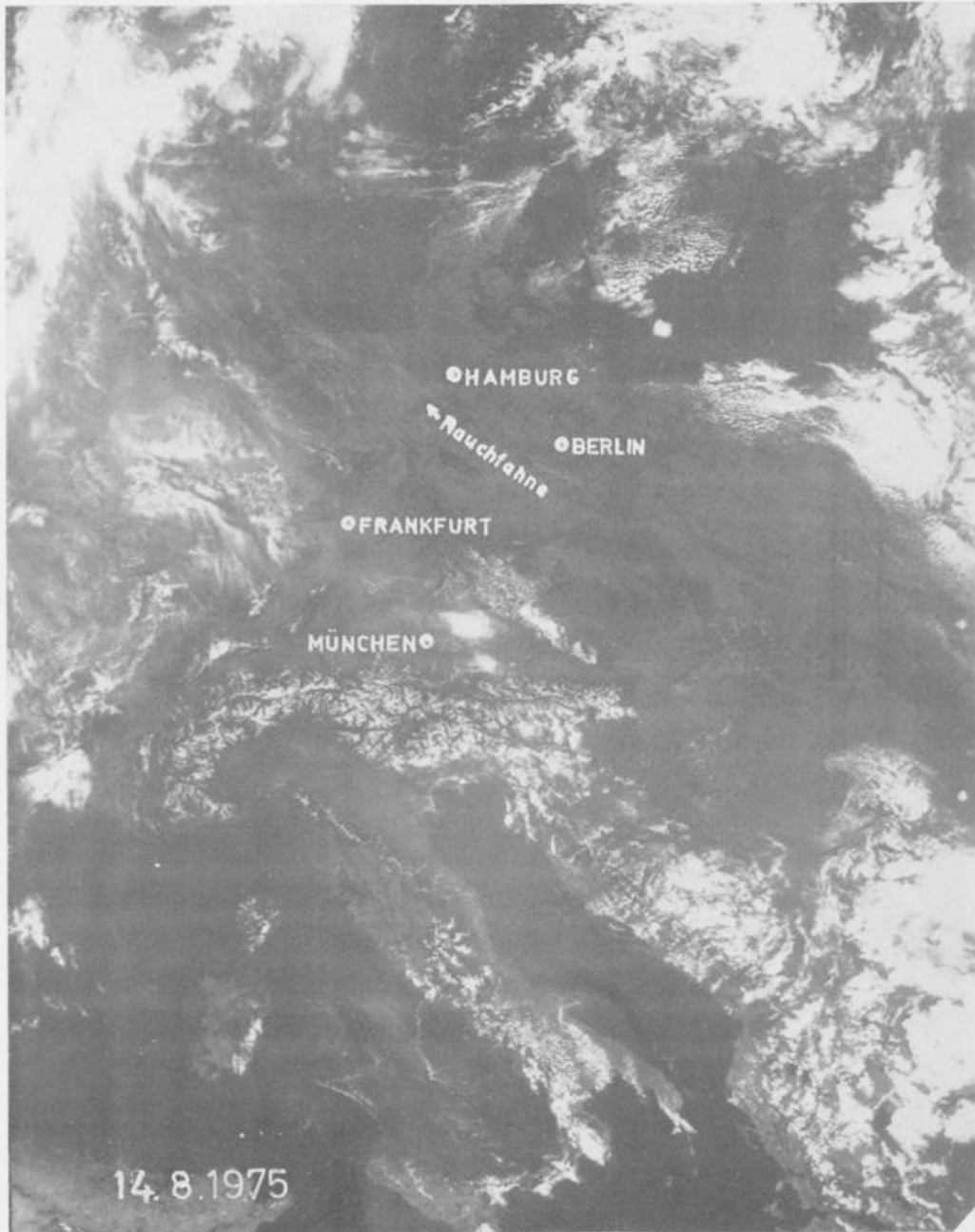


Abb. 11: METEOR 2.1, 14.08.1975, 11.45 GMT

Am 14. August 1975 liegt ganz Mitteleuropa im Einflußbereich eines Hochdruckgebietes über Pommern. Über dem größten Teil der Bundesrepublik herrscht wolkenloses Wetter mit Tageshöchsttemperaturen von 25-30 °C und südöstlichem Bodenwind vor. Gut hebt sich die etwa 150 km lange Rauchfahne der Waldbrände bei Eschede/Kreis Celle heraus, die sich bis südlich Bremen erstreckt. Am linken Bildrand deuten Wolkenfelder über Frankreich, die mit den Fronten eines Tiefdruckgebietes über dem Atlantik verknüpft sind und die sich nach Osten hin ausbreiten, daraufhin, daß die mehrwöchige Schönwetterperiode für Deutschland zu Ende geht. Dies zeigt sich auf dem Satellitenbild vom 15. August 1975. Die ausgedehnten Wolkenfelder haben mit ihrem Vorderrand Ostdeutschland erreicht und die damit verbundenen Niederschlagsgebiete bringen nach langanhaltender Trockenheit über weiten Teilen der Bundesrepublik den ersehnten Regen.

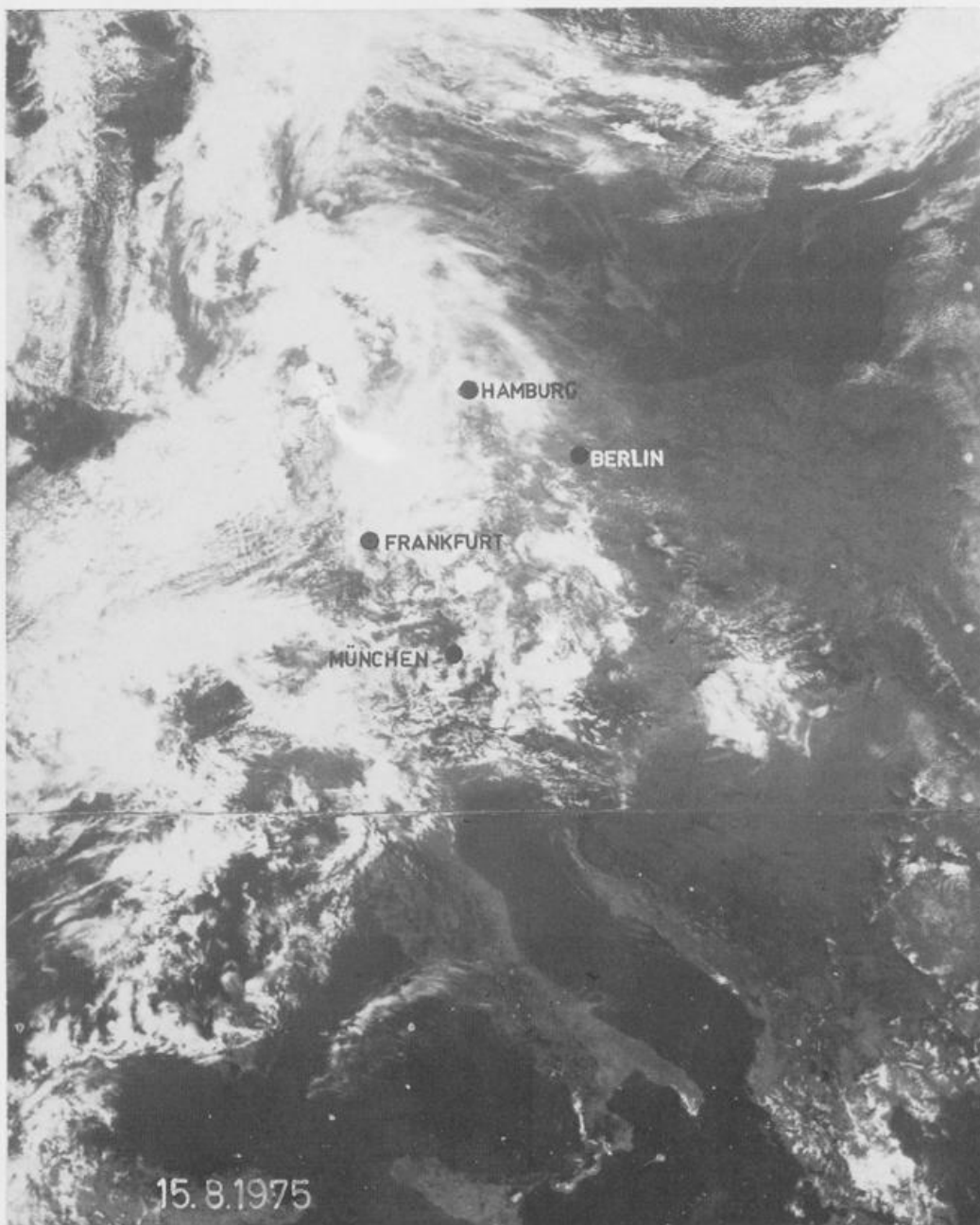


Abb. 12: METEOR 2.1, 15.08.1975, 11.45 GMT

6.6 Orkantief über Südkandina-  
vien/westliche Ostsee,  
03.01.1976

Im Zentrum des Orkantiefs über Südkandinavien, Dänemark und der Ostsee zeigt das Satellitenbild ein kompaktes, spiralförmig angeordnetes Wolkenfeld. Die Grenze des hochreichenden Wolkenschirms (Nordsee) markiert die Zone, in der am Boden die stärkste Isobarendrängung und somit die höchsten Windgeschwindigkeiten auftreten (s. Abb. 14).

Auf der West- und Südseite des Zentrums fließt von Norden her Kaltluft ein, die durch aufgelockerte hochreichende Quellbewölkung gekennzeichnet ist. Die Bewölkung formiert sich in Richtung der herrschenden Windströmung.

Windrichtung und -geschwindigkeit  
in List auf Sylt:

- ▲ Westnordwest mit 54 Knoten.  
Das entspricht 100 km/h oder  
Windstärke 10.

Abb. 13: NOAA 4, 3.1.1976,  
10.25 - 10.42 GMT,  
infraroter Spektral-  
bereich



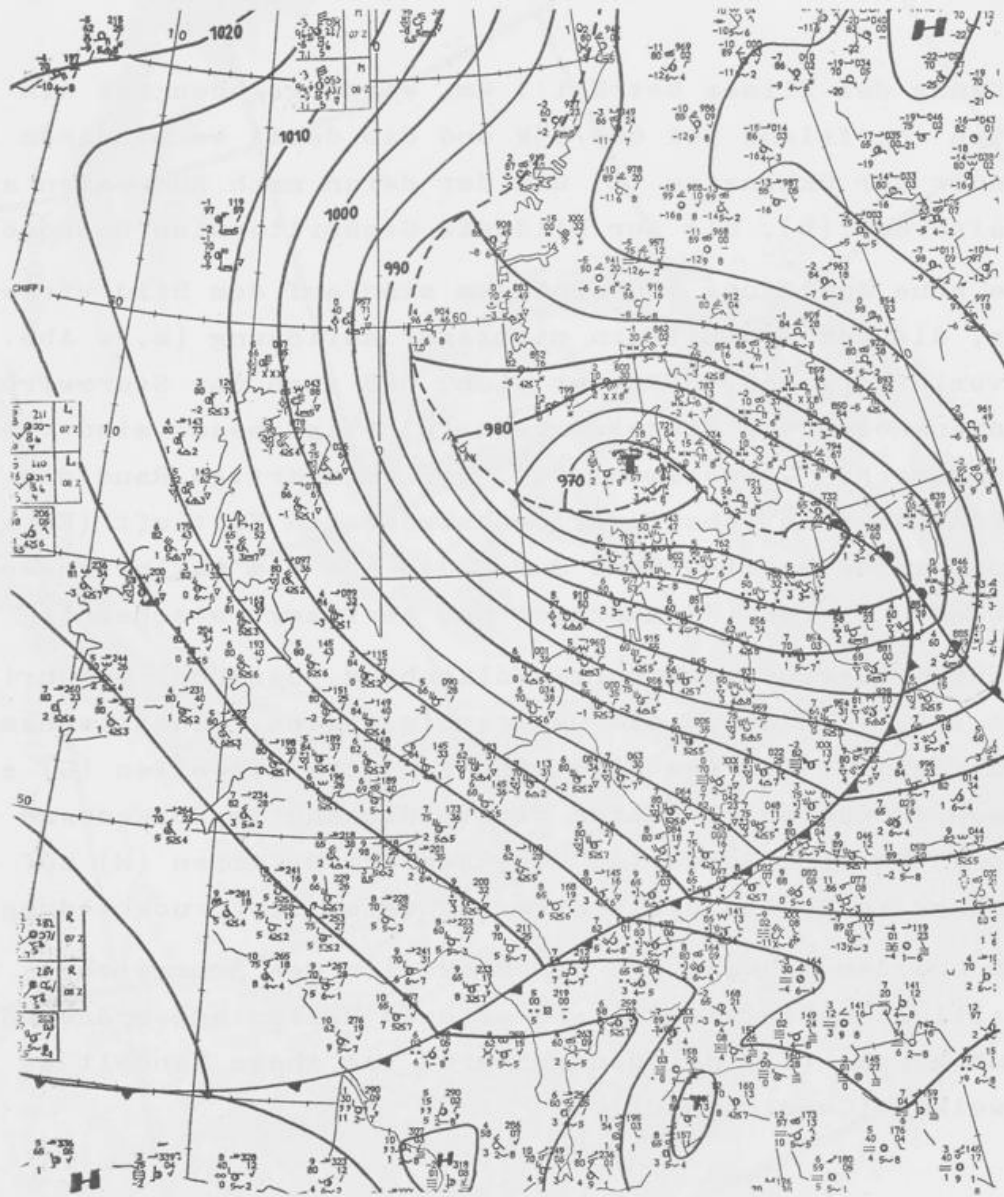


Abb. 14: Bodenwetterkarte vom 03.01.1976, 09 GMT

## 6.7 Sturmwirbel über dem Ostatlantik, 25.4.1977

Das nebenstehende Satellitenbild (Abb. 15) wurde vom amerikanischen Wettersatelliten NOAA 5 über dem Ostatlantik mit dem hochauflösenden Radiometer (Very High Resolution Radiometer, VHRR) am 25.4.1977 aufgenommen.

Die Auflösung des Bildes beträgt 1 km. Wiedergegeben ist ein Sturmwirbel südlich von Island bei 60N/15W und die damit verbundenen frontalen Wolkenbänder der Okklusion (A) und der daran nach Südwesten anschließenden Kaltfront (B), die zur Bildzeit Großbritannien überquert.

Durch die hohe Auflösung von einem km sind auf dem Bild viele Details erkennbar, die auf den Bildern mittlerer Auflösung (z.B. Abb. 13) natürlich verloren gehen. So zeigt sich, daß sich der Sturmwirbel aus einer ganzen Reihe von Einzelwirbeln (C) - insgesamt sind vier solcher Wirbel auszumachen - zusammensetzt. Der rückwärtige Rand der Okklusion (D) ist einigermaßen scharf zur nachströmenden Kaltluft (E) abgegrenzt, während der vorderseitige Rand durch die aus dem Okklusionswolkenband herauswehenden Zirren (F) unscharf und zerfasert erscheint.

Das mit der Kaltfront verknüpfte Wolkenband, das über Großbritannien angelangt ist, wird durch die Orographie (Wales, Schottisches Hochland) modifiziert. Auf dem Bild sind typische Leewellen (G) sichtbar. Weiter nach Südwesten zu deutet die Verdickung im Wolkenband und die langen, aus ihm nach Nordosten herauswehenden Zirren (H) auf die Entstehung einer Welle und damit einer erneuten Tiefdruckbildung hin.

In der im breiten Schwall auf der Rückseite des Sturmwirbels einströmenden Kaltluft heben sich die in offenen Zellen angeordneten Kumuluswolken gut heraus (I). Bei den größeren von ihnen handelt es sich um Gewitterwolken (Cumulonimbus).

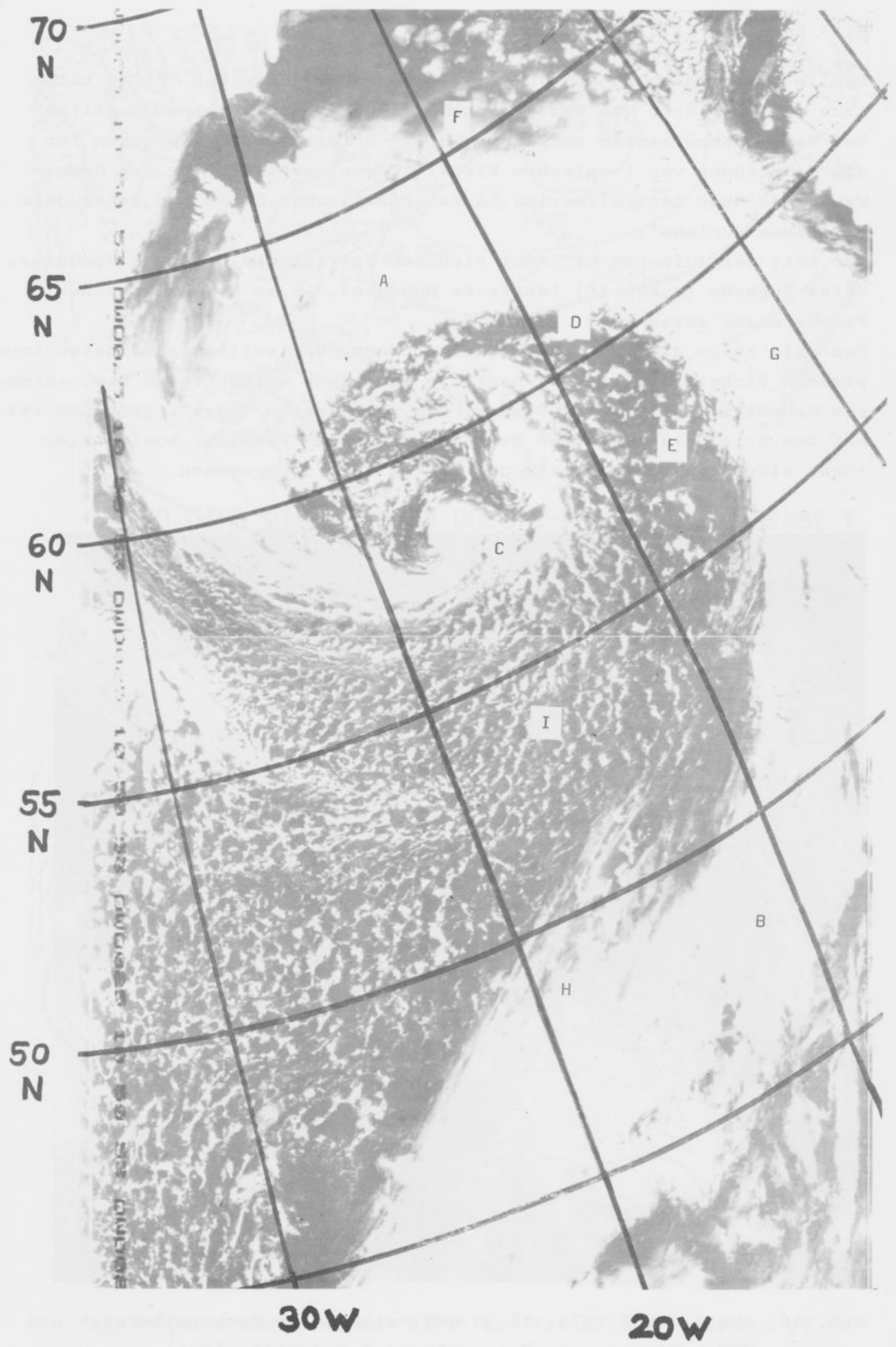


Abb. 15: NOAA 5, 25.4.1977, 11.00 GMT, sichtbarer Spektralbereich

6.8 Hurrikan "Fifi", September 1974

Der im Satellitenbild vom 18.9.1974 erkennbare Hurrikan "Fifi" hatte sich am 13.9. über dem Westatlantik im Gebiet der "Kleinen Antillen" bei Wassertemperaturen von mehr als 27 °C (eine der Bedingungen für die Entstehung von tropischen Wirbelstürmen) gebildet. Er zog dann westwärts über Zentralamerika in den Pazifischen Ozean und bekam dort den Namen "Orlene".

Zur Zeit der Aufnahme befindet sich der Hurrikan im Golf von Honduras. Seine Zugbahn (s. Abb. 18) tangierte Honduras, wo er besonders schwere Verwüstungen anrichtete.

Das Bild zeigt die typische Wolkenanordnung bei voll-ausgebildeten tropischen Wirbelstürmen: Wolkenspirale mit einem wolkenfreien bzw. -ärmeren Gebiet im Zentrum des Sturms, dem sogenannten "Auge". Außerdem ist auf dem Bild unter leichter Bewölkung Kuba und Florida, sowie unter etwas stärkeren Wolken Haiti und Puerto Rico zu erkennen.

↑ 18:30 261:74 01-A-1 0300 0900 B2 MIA 6A10 CH1

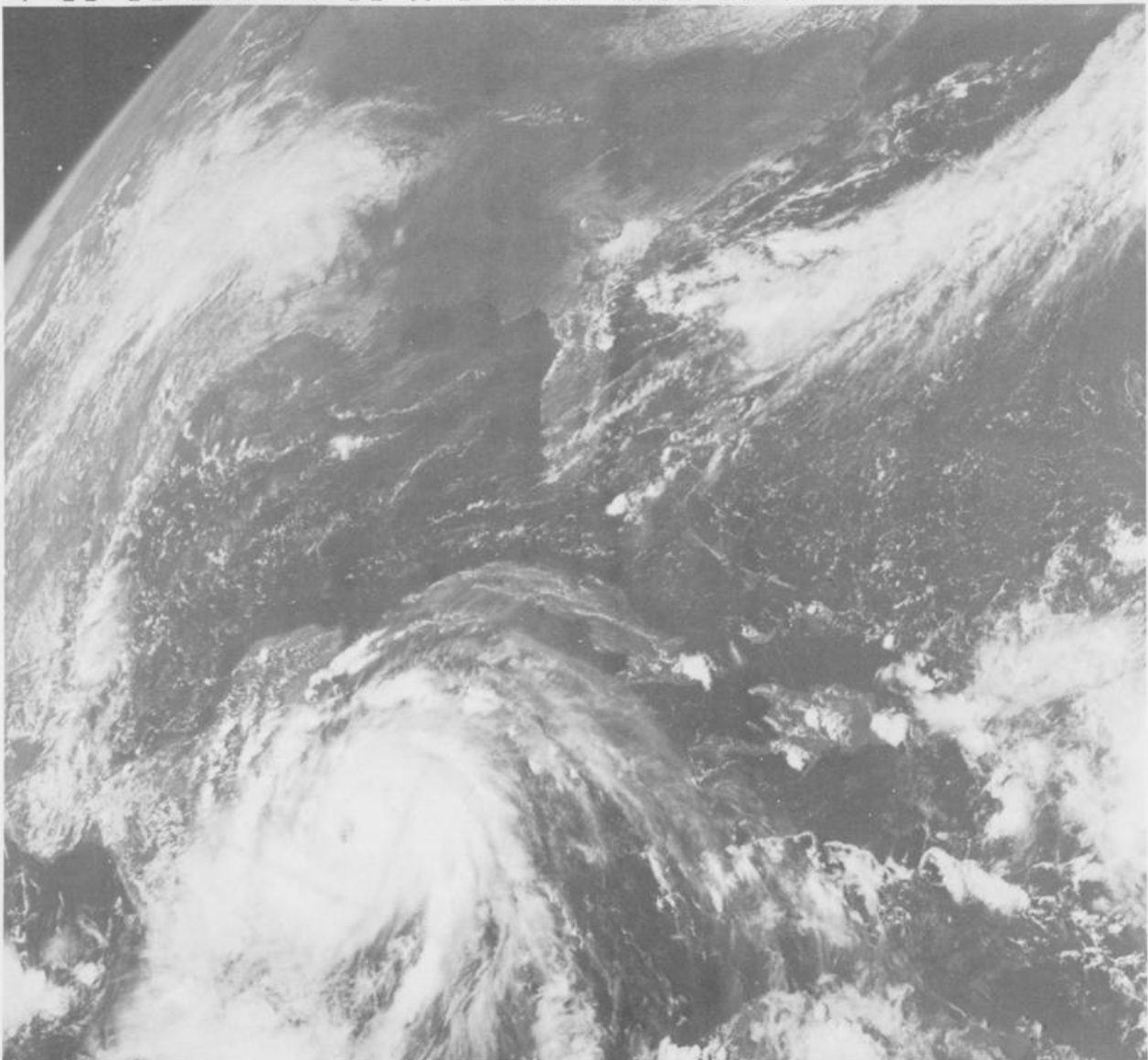


Abb. 16: SMS 1, 18.9.1974, 18.30 GMT, sichtbarer Spektralbereich  
SMS = Synchronous Meteorological Satellite (USA)

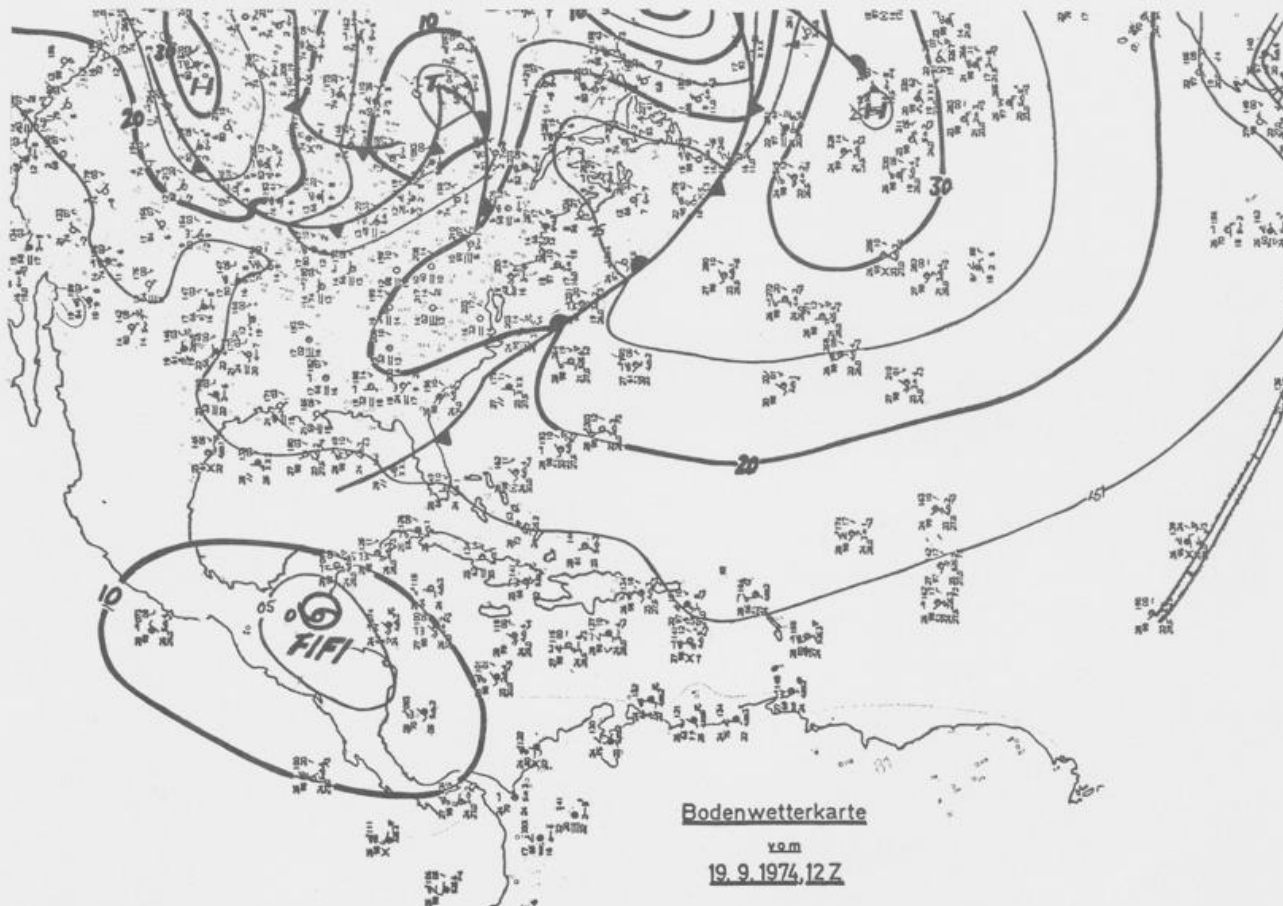


Abb. 17: Bodenwetterkarte vom 19.8.1974, 12 GMT

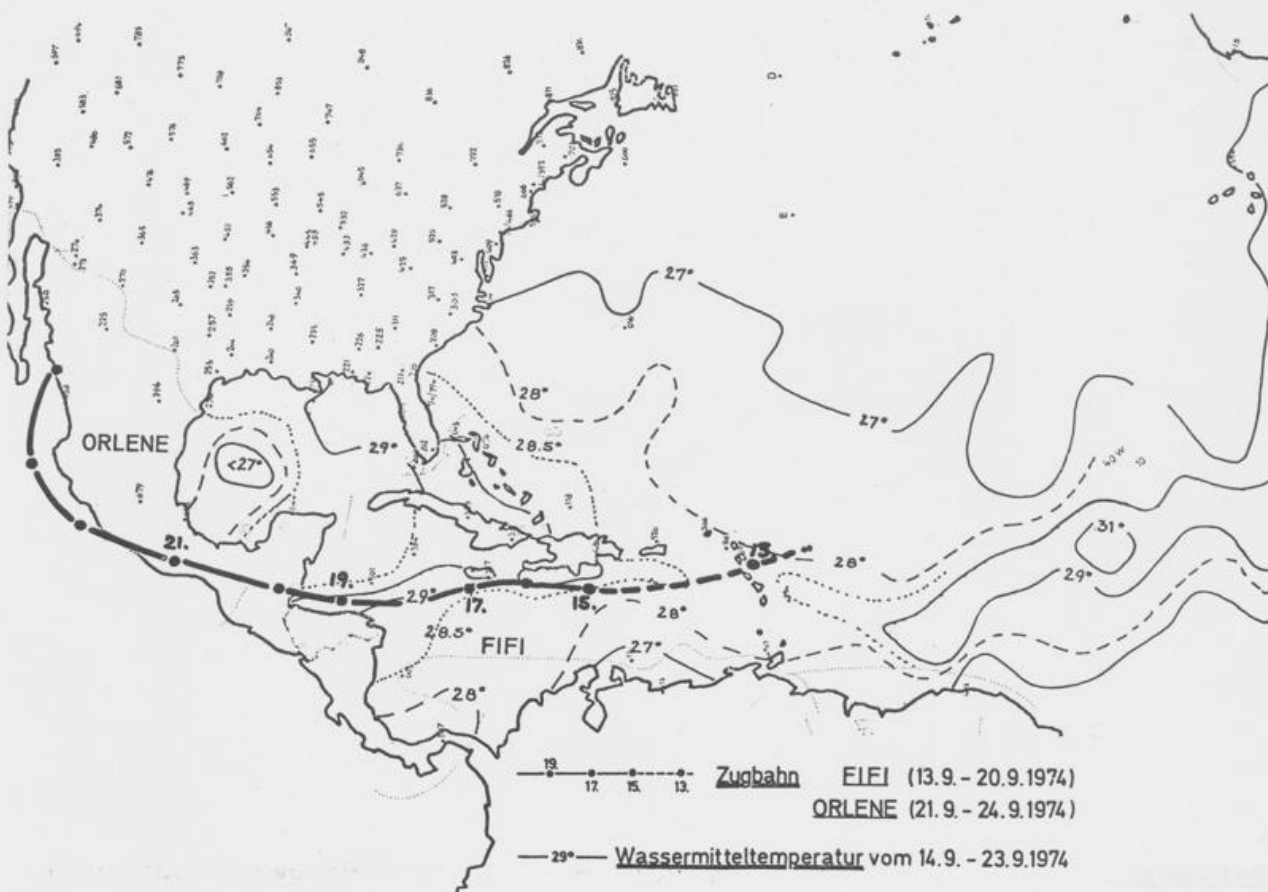


Abb. 18: Zugbahn von Hurrikan "Fifi" und Wassertemperaturen = 27 °C

Anmerkung:

Weiteres Bildmaterial kann beim Referat S 3, Zentralamt, Deutscher Wetterdienst, Postfach 185, 6050 Offenbach gegen Gebühr ausgeliehen oder gekauft werden.