

Kapitel 2

Satellitenbilder

2.1 Grundprinzip

[a] Satellitenbilder basieren auf der Messung der von Sonne, Erde und Atmosphäre emittierten elektromagnetischen Strahlung. Je wärmer die Strahlungsquelle desto höher ist die Intensität der emittierten Strahlung (Gesetz von Stefan-Boltzmann für die Strahlung von schwarzen Körpern). Dieser Zusammenhang zwischen Temperatur und Strahlungsintensität bildet die Basis für die Fernerkundung der Atmosphäre mit Hilfe von Satelliten.

Aufgabe: Die Strahlung eines schwarzen Körpers ist durch das Planck'sche Strahlungsgesetz gegeben:

$$P(\lambda)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1} d\lambda$$

Hier ist λ die Wellenlänge, h die Planck'sche Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit, k_B die Boltzmann'sche Konstante und T die Temperatur. Der Energiegehalt $E(\lambda_1, \lambda_2)$ im Wellenlängenintervall von λ_1 bis λ_2 lässt sich durch Integration von $P(\lambda)d\lambda$ bestimmen:

$$E(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda)d\lambda$$

Wie lautet das Planck'sche Strahlungsgesetz ausgedrückt mit der Wellenzahl $\omega = 2\pi/\lambda$? Versuche ausgehend vom Planck'schen Strahlungsgesetz die folgenden wichtigen Gesetze herzuleiten:

Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_m \cdot T = 2902 \mu m K$$

Dieses Gesetz gibt die Wellenlänge λ_m an, an der $P(\lambda)$ bei gegebener Temperatur T das Maximum annimmt.

Gesetz von Stefan Boltzmann:

$$E = \sigma \cdot T^4, \quad \text{mit} \quad \sigma = 5.669 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$$

Dieses Gesetz gibt die total abgestrahlte Energie in Abhängigkeit der Temperatur T wieder.

Als Beispiel ist in der folgenden Abbildung die beobachtete Infrarotstrahlung (IR) dargestellt, die in den Weltraum abgestrahlt wird.

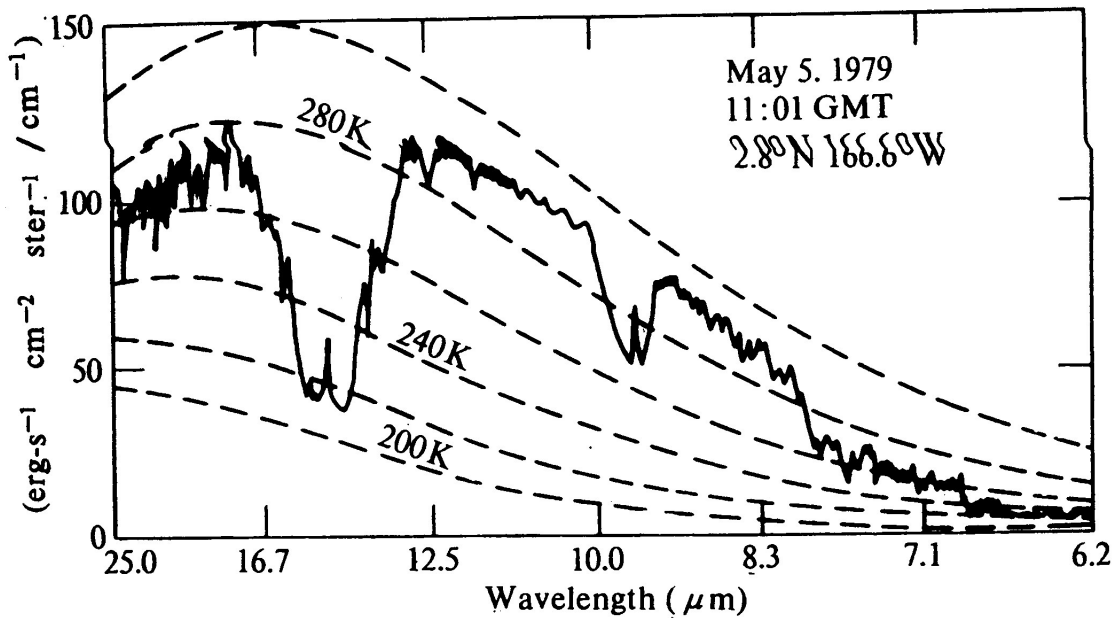


Fig.1 Beobachtete IR-Strahlung, die in den Weltraum abgestrahlt wird (Messung des Nimbus-4 Satelliten). Gestrichelt sind einige Spektren von Schwarzen Strahlern bei unterschiedlicher Temperatur eingezeichnet. Atmosphärische Absorber führen dazu, dass die ausgehende Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen von verschiedenen Höhen stammen. Damit wird auch die effektive Temperatur des Erdspektrums von der Wellenlänge abhängig. [entnommen aus „Chemistry of Atmospheres“, R. P. Wayne]

Aufgabe: Versuche abzuschätzen, aus welchen Höhen die einzelnen Bereiche des Spektrums abgestrahlt werden? Versuche die Lücken im IR-Spektrum einzelnen atmosphärischen Absorber zuzuweisen.

[b] Die folgende Abbildung zeigt den Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung vom Ultraviolett UV ($\lambda = 0.2 \mu\text{m}$) bis zu den Mikrowellen ($\lambda = 100 \mu\text{m}$) mit den Spektren der Sonnen- und der Erdstrahlung (engl. “solar” and “terrestrial radiation”). Gemäss dem Wien’schen Verschiebungsgesetz emittiert die Sonne mit einer Emissionstemperatur von $\sim 6000 \text{ K}$ bei deutlich kleineren Wellenlängen (Max. bei $0.5 \mu\text{m}$ im sichtbaren Bereich) als die Erde (Max. bei $11 \mu\text{m}$ im Infrarot).

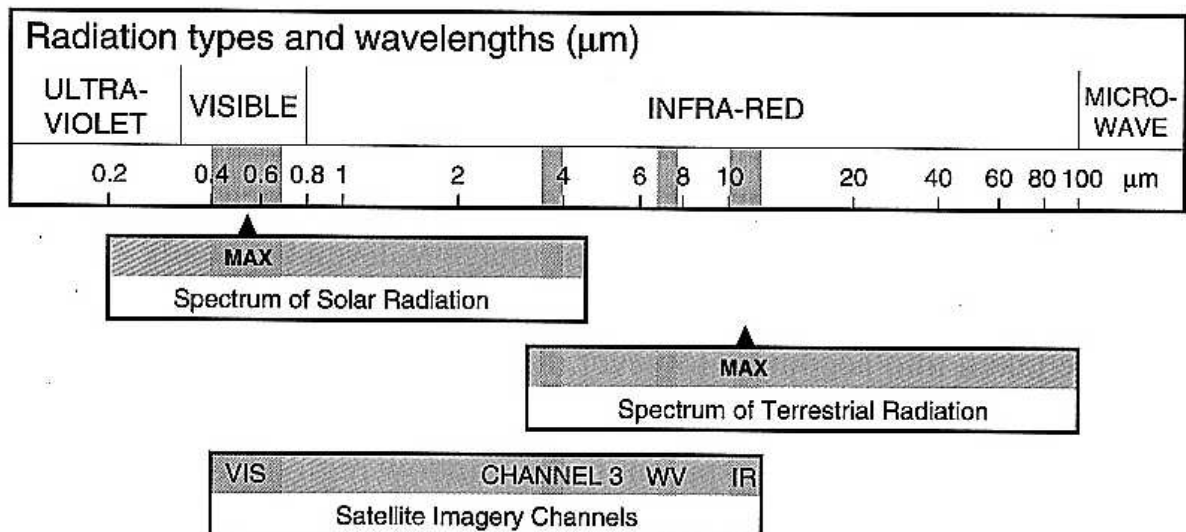


Fig.2: Wellenlängen der verschiedenen Strahlungstypen und die für die Satellitenbilder verwendeten Kanäle.

[c] Im Gegensatz zu Feststoffen und Flüssigkeiten können Gase nur bedingt als schwarze Körper betrachtet werden. Sie weichen von Schwarzkörperstrahlung bei charakteristische Wellenlängen ab, bei denen sie elektromagnetischen Strahlung absorbieren und emittieren. In den für die Meteorologie wichtigen Wellenlängenbereichen (sichtbarer Bereich VIS und Infrarot IR) sind Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon die hauptsächlichen absorbierenden Gase. Die wichtigsten Typen von Satellitenbildern entstehen durch Strahlungsmessungen entweder in einem sogenannten “Fenster” (d.h. in einem Wellenlängenbereich, in dem die Atmosphäre transparent ist, z.B. VIS und IR) oder aber gerade in einem der Absorptionsbänder, z.B. WV).

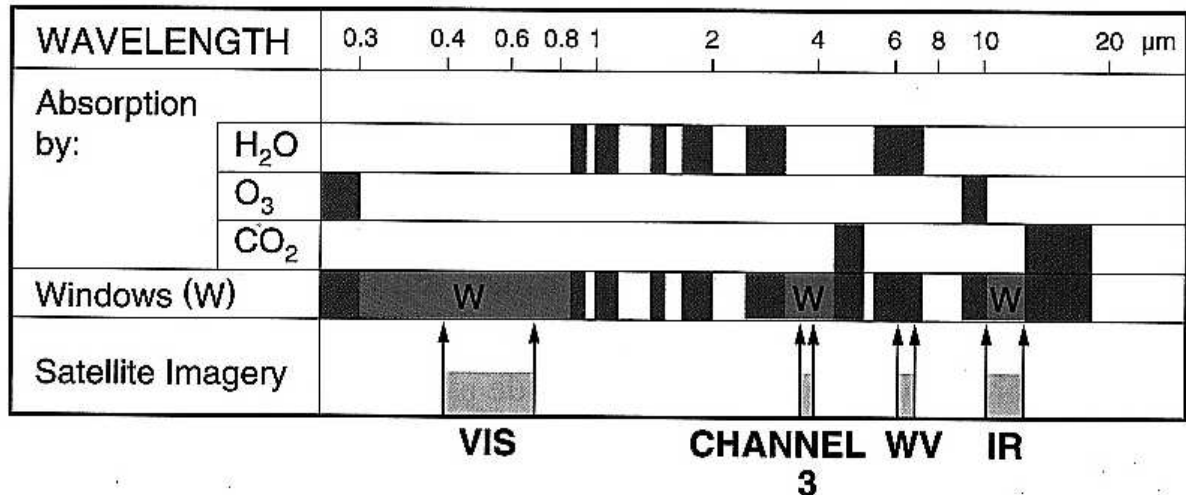


Fig.3: Absorption der Strahlung durch atmosphärische Gase bei verschiedenen Wellenlängen. VIS und IR Bilder entstehen in atmosphärischen “Fenstern” (W) und WV Bilder in einem der Absorptionsbänder von Wasserdampf.

2.2 Typen von meteorologischen Satelliten

[a] “Polar-orbiting” Satelliten kreisen etwa in einer Höhe von 850 km in einer fixen Bahn über die Pole, während sich die Erde unter ihnen dreht. Die jeweils sichtbaren Streifen der Erdoberfläche haben eine Breite von ~2600 km. Mit 14 Erdumläufen pro Tag kann die ganze Erdoberfläche in 24 Stunden zwei Mal aufgenommen werden.

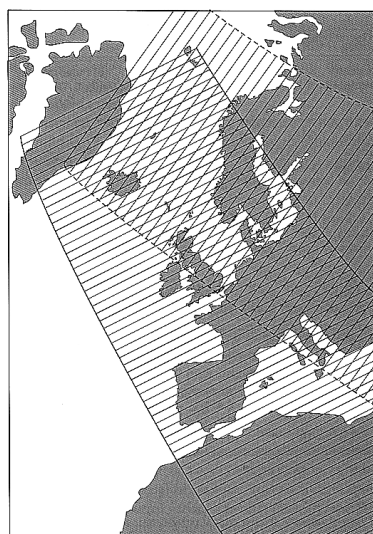


Fig.4: Benachbarte Bänder der Erdoberfläche wie sie von einem “polar-orbiting” Satelliten bei zwei aufeinanderfolgenden Umläufen gesehen werden.

Die folgende Tabelle (entnommen aus „An Introduction to Satellite Image Interpretation“ von Conway) gibt eine Liste der Instrumente auf dem TIROS N-Satelliten an:

**PRIMARY SENSORS ON THE TIROS N
POLAR ORBITING SATELLITE**

SENSOR	FUNCTION
1. Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR)	Provides VIS and IR imagery for weather, ocean, and land studies
2. TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS)	Measures temperature profile of atmosphere; water vapor, carbon dioxide, ozone, and oxygen content of atmosphere
3. ARGOS Data Collection System (DCS)	Monitors position of transmitters located on ships, ocean buoys, weather balloons, and animals for tracking purposes
4. Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) Radiometer	Measures vertical distribution and total content of atmospheric ozone
5. Search and Rescue (SAR)	Locates radio signals from Emergency Locator Transmitters (ELT) in emergency situations to aid in rescue operations
6. Earth Radiation Budget Experiment (ERBE)	Measures all incoming and outgoing solar radiation in order to determine Earth's heat budget
7. Space Environment Monitor (SEM)	Detects radiation at various energy levels in space

[b] **Geostationäre Satelliten** kreisen über dem Äquator um die Erde, in einer Höhe von ca. 35'800 km. Der grosse Vorteil dieser Satelliten liegt darin, dass mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 30 Minuten das selbe Gebiet erfasst werden kann. Wegen ihrer grossen Distanz zur Erde haben sie dafür eine deutlich schlechtere Auflösung als die "polar-orbiting" Satelliten. Zudem ist die brauchbare Information auf den Bereich zwischen 70°N und 70°S beschränkt.

Aufgabe: Mache Dir klar, wie man auf die Höhe von 35'800 km kommt? Warum befinden sich Startbasen für geostationäre Satelliten immer in Äquatornähe?

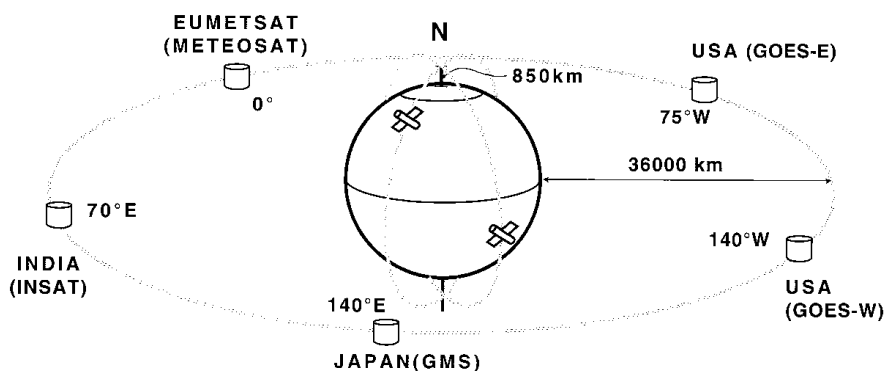


Fig.5: Die Position von geostationären Satelliten bezüglich der Erde.

Die folgende Tabelle (entnommen aus „An Introduction to Satellite Image Interpretation“ von Conway) gibt eine Liste der Instrumente auf den GOES-Satelliten an:

**SUMMARY OF CHANNELS ON THE GOES I-M SERIES
OF U.S. GEOSTATIONARY METEOROLOGICAL SATELLITES**

CHANNEL	SPECTRAL BANDWIDTH	SPATIAL RESOLUTION	MAJOR FUNCTIONS AND IMPROVEMENTS
1	0.55–0.75 μm (visible)	0.5 x 1 km	Improved cloud edge detection; cloud top feature detection; severe storm identification; pollution and haze detection; cloud height measurements
2	3.80–4.00 μm (near infrared)	2 x 4 km	Improved fog detection at night; detection of water clouds vs. snow and ice clouds; detection of hot spots (fire, volcano); nighttime sea surface temperatures (SST); location of hurricane eye through thin cirrus
3	6.50–7.00 μm (water vapor)	2 x 8 km	Improved study of large-scale weather patterns; better wind speed determinations in middle troposphere
4	10.20–11.20 μm (thermal infrared)	2 x 4 km	Improved cloud edge and cloud top detection; heavy precipitation estimates; severe storm identification; wave cloud detection
5	11.50–12.50 μm (thermal infrared)	2 x 4 km	When used in combination with channel 4, will help determine low-level moisture; improved SST; volcanic ash detection

[c] Im Moment sind 5 geostationäre Satelliten operationell im Einsatz (darunter der METEOSAT über Europa und zwei GOES Satelliten über dem westlichen und östlichen Teil der USA. Die Bilder vom METEOSAT haben bei 50°N eine horizontale Auflösung von 4 km (VIS) bzw. 8 km (IR und WV). Im Gegensatz dazu ist die horizontale Auflösung beim “polar-orbiting” Satelliten der NOAA mit 1 km deutlich höher.

2.3 Die 3 gebräuchlichsten Typen von Satellitenbildern

VIS	Visible	$0.4 < \lambda < 1.1 \mu\text{m}$	von der Erde/Atmosphäre reflektiertes Sonnenlicht
IR	Infrarot	$10 < \lambda < 12 \mu\text{m}$	von Erde und Atmosphäre emittierte Strahlung
WV	Wasserdampf	$6 < \lambda < 7 \mu\text{m}$	Emissionsstrahlung des Wasserdampfs

[a] **Visible:** Die Intensität ist abhängig von der Albedo (Reflektivität) der darunterliegenden Erdoberfläche bzw. Wolke. Hohe Intensitäten (d.h. stark reflektierende Flächen) werden weiss dargestellt, tiefe Intensitäten schwarz. Typische Albedo-Werte sind:

Meer, Seen	8%
Ackerland	14%
Vegetation	18%
Wüste	27%
Meereseis	35%
Schnee	60-80%
dünne Wolken mit tiefem Wolkenwassergehalt	30-40%
dicke Wolken mit hohem Wolkenwassergehalt	65-90%

Daraus wird ersichtlich, dass sich die hellen Wolken im Allgemeinen vom dunklen Erdboden unterscheiden, sie aber im VIS Bild nicht immer eindeutig von Eis bzw. Schnee getrennt werden können. In wolkenfreien Gegenden können auch deutlich Wasser- und Landflächen unterschieden werden. In der Nacht können keine VIS Bilder aufgenommen werden und in den Morgen- und Abendstunden werfen die einzelnen Wolkenschichten oft einen deutliche sichtbaren Schatten, was den VIS Bildern eine gewisse Plastizität verleiht.

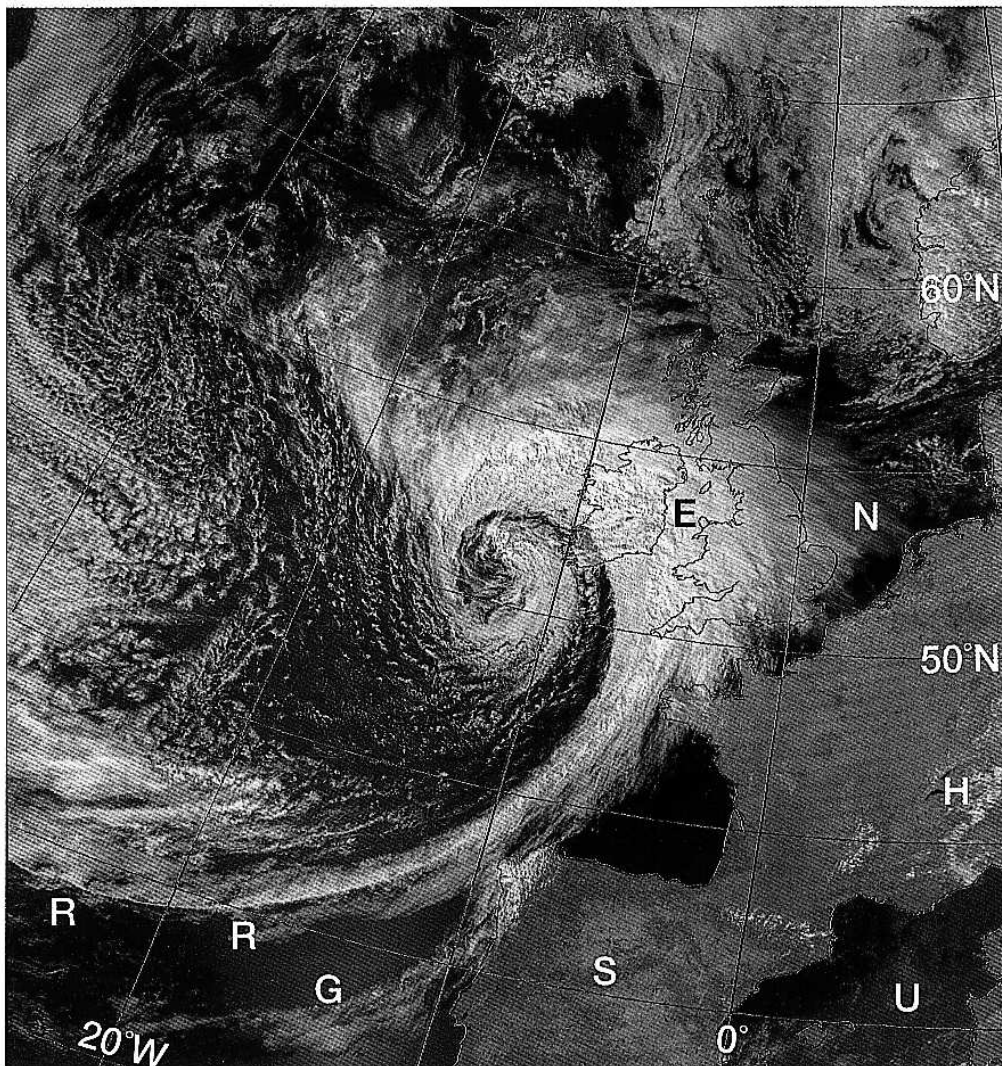


Fig.6: VIS Bild eines Tiefdruckgebietes, 1455 UTC 1 August 1986.

Die Abbildung zeigt dunkel die Europa umgebenden Meere sowie einige Seen in der Schweiz (H), deutliche Helligkeitsunterschiede über Spanien (S) durch unterschiedlich starke Vegetation, dicke Wolkenschichten verbunden mit den Frontstrukturen über den Britischen Inseln (E) sowie dünne aufgelockerte Bewölkung über dem Mittelmeer (U). Das letzte Beispiel zeigt, dass kleine und dünne Wolken im VIS Bild oft nur schwer erkennbar sind.

[b] Infrarot: IR Bilder zeigen die Temperatur der abstrahlenden Oberflächen. Warme Regionen (d.h. hohen Intensitäten) werden schwarz dargestellt, kältere Regionen (d.h. tiefe Intensitäten)

weiss. Wolken (speziell hochreichende Wolken) erscheinen hell gemäss den tiefen Temperaturen an ihrer Oberseite. Deshalb zeigen IR Bilder im Gegensatz zu VIS Bildern einen guten Kontrast zwischen hohen und tiefen Wolken. Die verschiedenen hohen Wolkenschichten der Zyklone (L) sind in der Abbildung gut sichtbar. Die dünnen Wolken im Mittelmeergebiet sind im IR Bild deutlich sichtbar. Offensichtlich handelt es sich um hohe Zirrusbewölkung. Im Gegensatz dazu sind tiefe Wolken und Nebel im IR Bild kaum sichtbar, da sich ihre Temperatur vom umgebenden Land/Wasser oft nur unwesentlich unterscheidet. Der Kontrast zwischen Land und Wasser im IR Bild unterliegt täglichen und saisonalen Schwankungen. In der Nacht kann das warme Meereswasser dunkler erscheinen als die stark abkühlende Landoberfläche. Am Tag, speziell im Sommer, sind die Verhältnisse meist umgekehrt.

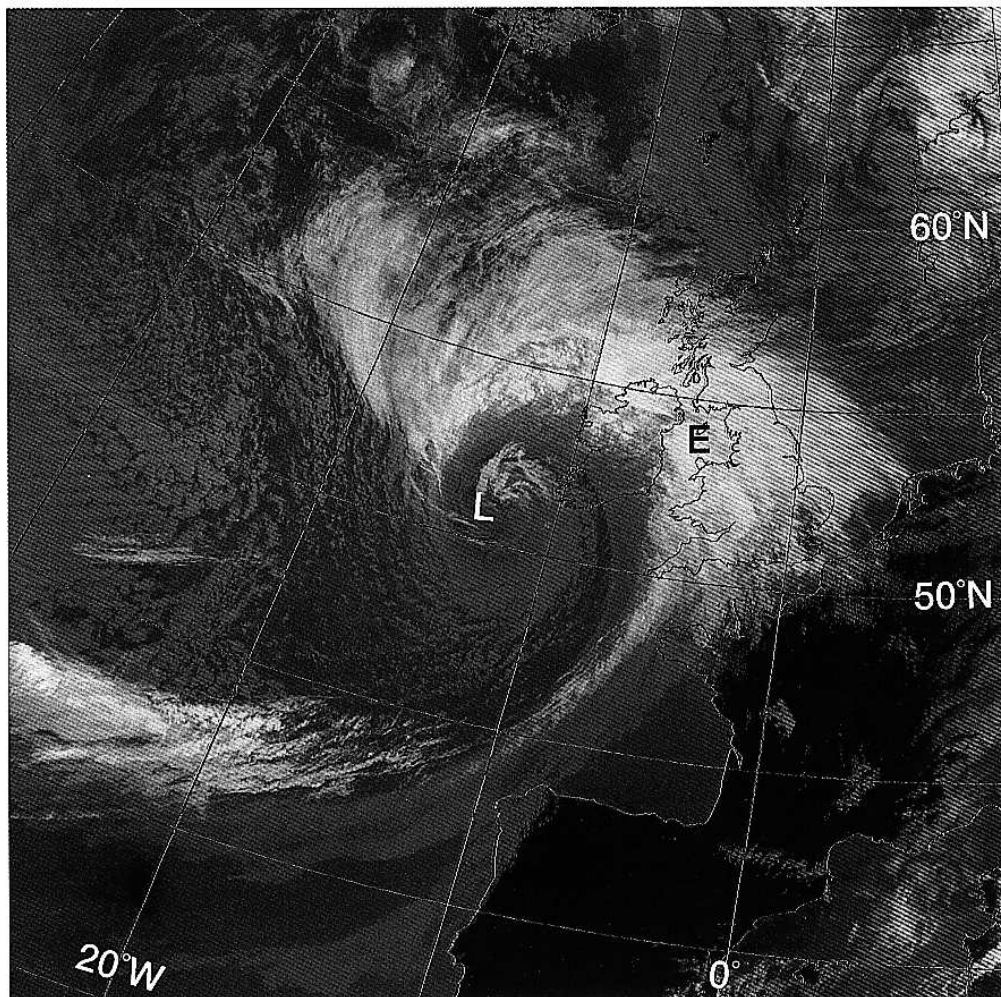


Fig.7: IR Bild eines Tiefdruckgebietes, 1455 UTC 1 August 1986.

Aufgabe: Vergleiche das IR Bild mit dem VIS Bild. Welche Strukturen sind klarer im VIS und welche klarer im IR Bild?

Schwierigkeiten bei der Interpretation können im Falle von dünnen, kleinen Wolken auftreten, oder bei sehr feuchter Luft (z.B. in den Tropen). Bei dünnen und kleinen Wolken kann eventuel Strahlung der darunterliegenden Erdoberfläche zum Satelliten gelangen, so dass die Wolken fälschlicherweise zu warm und damit zu tief erscheinen. In der sehr feuchten (aber wolkenfreien) Luft in den Tropen kann die Strahlung vom warmen Erdboden durch Absorption der H₂O Moleküle so stark reduziert werden, dass das wolkenfreie Gebiet grau (kühl) anstatt schwarz (heiss) erscheint.

Aufgabe: Animierte Satellitenbilder können auch verwendet werden, um Windgeschwindigkeiten abzuschätzen? Wie funktioniert das? Welche Probleme treten auf? Eine solche satellitenbasierte Windbestimmung verbessert die Wettervorhersage auf der Nordhemisphäre nur unwe-

sentlich. Auf der Südhemisphäre hingegen brachte die Einführung von Satellitenmessungen eine signifikante Verbesserung der Vorhersage. Warum?

[c] **Wasserdampf:** WV Bilder entstehen durch Strahlungsmessung in einem der Absorptionsbänder von Wasserdampf. Dabei stammt die Strahlung, welche vom Satelliten gemessen wird, von der obersten stark feuchten Schicht in der Atmosphäre. Im Falle von feuchter Luft in der oberen Troposphäre werden wegen den tiefen Temperaturen tiefe Intensitäten gemessen. Diese werden wie im IR Bild weiss dargestellt. Ist die obere Troposphäre sehr trocken, so stammt die gemessene Strahlung von der unteren Troposphäre (oder vom Erdboden). In diesem Fall werden hohe Intensitäten gemessen, welche schwarz dargestellt werden. WV Bilder sind also besonders nützlich, um die Feuchteverhältnisse in der *oberen* Troposphäre (300-600 hPa) abzuschätzen. Beachte, dass auch in einer ganz "trockenen" Region in einem WV Bild feuchte Luft in Bodennähe vorhanden sein kann.

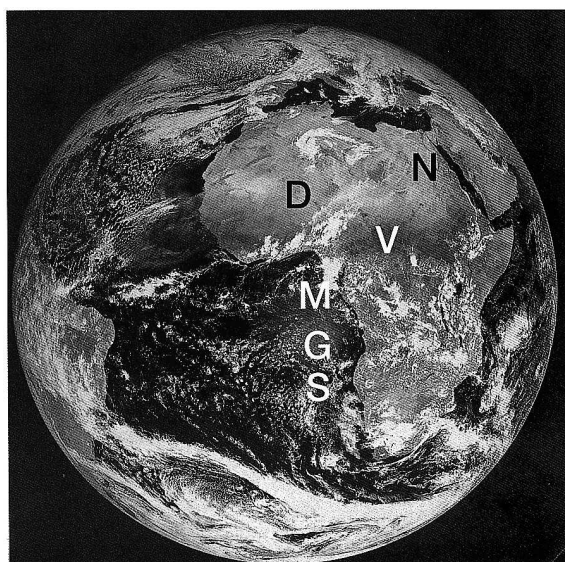
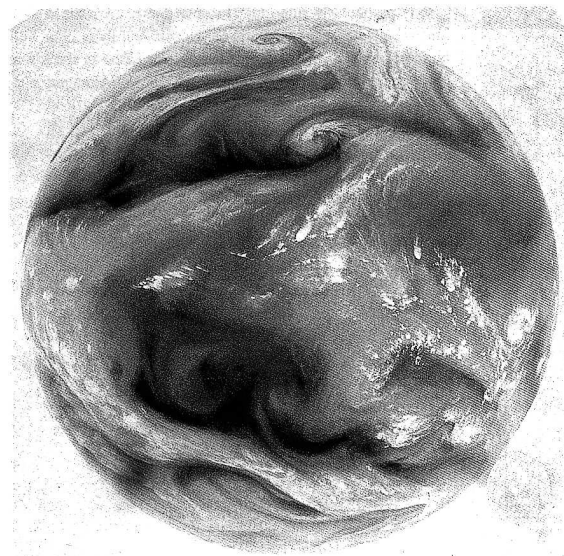
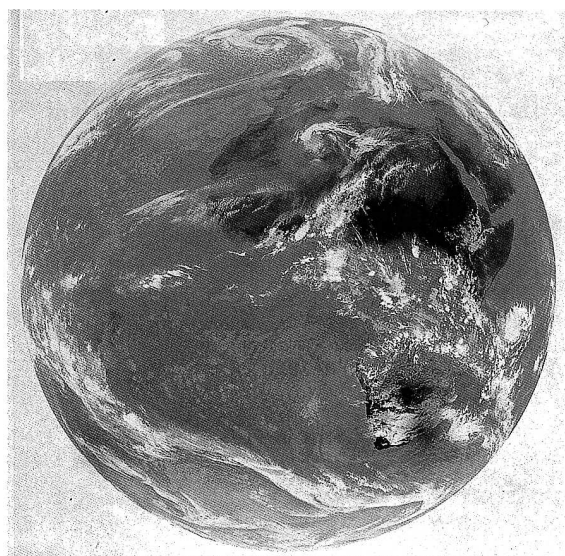


Fig.8: METEOSAT Bilder um 1155 UTC 9 Februar 1988: IR (oben links), WV (oben rechts) und VIS (unten).

Da Wasserdampf als passiver Tracer der atmosphärischen Strömung aufgefasst werden kann, zeigen WV Bilder (insbesondere eine Animation von WV Bildern) oft eindrücklich die Strömungsverhältnisse in der mittleren und oberen Troposphäre. Deutlich erkennbar sind Wirbel in der Tropopausengegend (durch spiralförmige Muster), absinkende Luftmassen (als dunkle Bänder) und Jet Streams (durch einen scharfen Feuchtekontrast, mit trockener Luft auf der zum Pol gerichteten Seite).

[d] Die folgenden Abbildungen zeigen IR und WV Bilder für den 4. Januar 2005, 12 UTC.

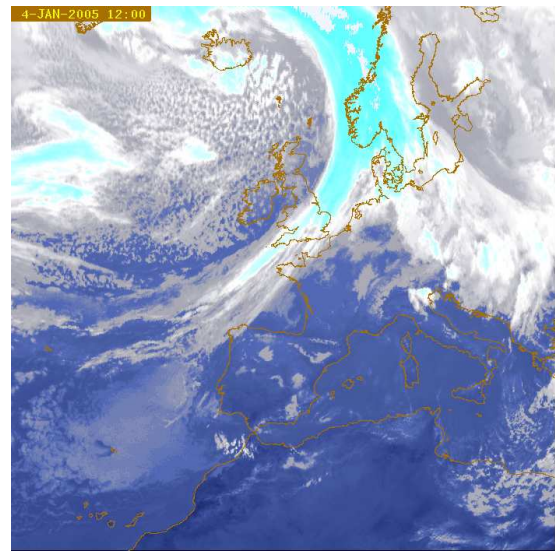
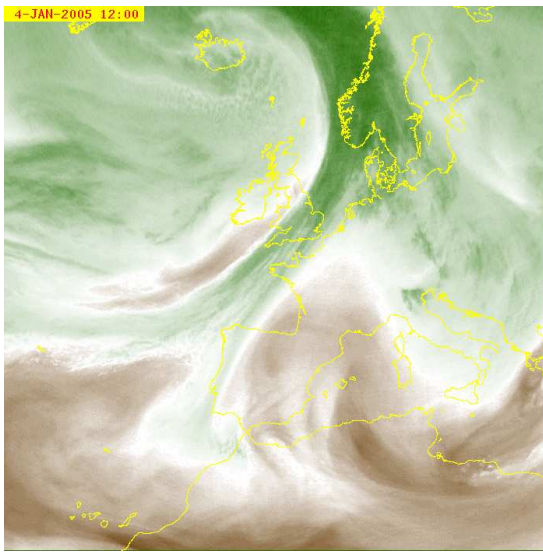


Fig.9: WV und IR Satellitenaufnahmen für den 4. Januar 2005, 12 UTC.

Aufgabe: Welches Bild entspricht dem WV und welches dem IR-Kanal? Wo befinden sich Wolken? Wo beobachtet man trockene Luft in Tropopausenhöhe?

In den folgenden zwei Abbildungen ist das Geopotential auf 250 hPa und 500 hPa gezeichnet, wie es vom ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting) analysiert wurde.

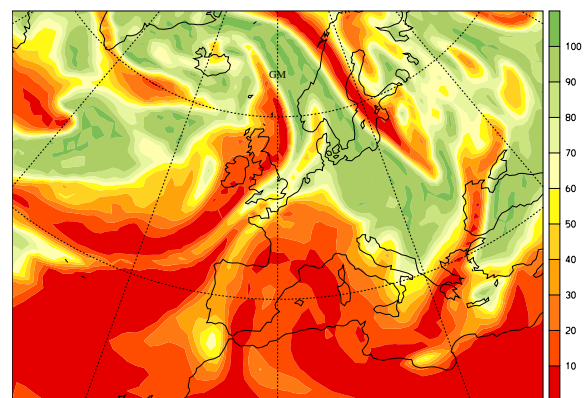
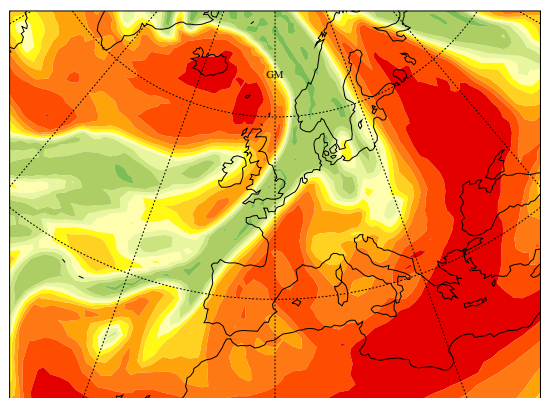
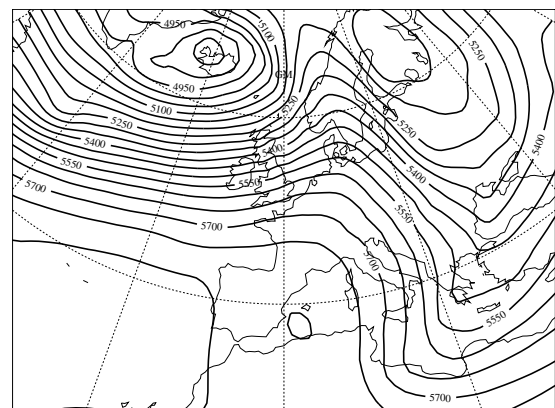
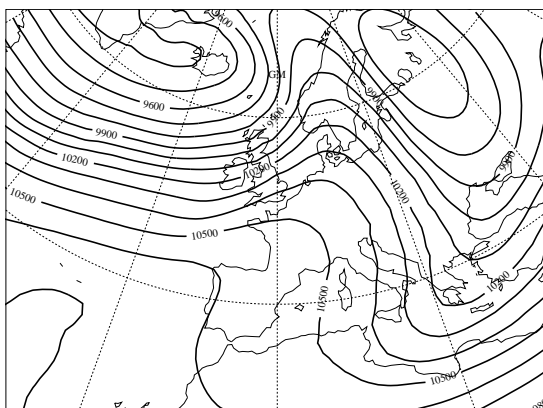


Fig.10: Geopotential und relative Luftfeuchtigkeit für den 4. Januar 2005, 12 UTC. Die Felder stammen von der operationellen Analyse des ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts [<http://www.ecmwf.int>]).

Aufgabe: Ordne den Bildern die korrekte Bezeichnung zu ($Z@250$ hPa, $Z@500$ hPa). Bringe die Satellitenbilder mit den Analysen des ECMWF in Zusammenhang. Wo herrschen gemäss diesen

2.4 Anwendungsbeispiele für Satellitenbeobachtungen

[a] In diesem Kapitel sind vor allem die Kanäle VIS, IR und WV der Satellitenfernerkundung zur Sprache gekommen. Eine zentrale Anwendung dieser Beobachtungen ist die Wettervorhersage. Für eine globale Wettervorhersage müssen möglichst viele Beobachtungen beigezogen werden. Zum Beispiel ist es mit Satelliten möglich vertikale Temperaturprofile zu bestimmen. Das ist insbesondere in der Südhemisphäre wertvoll, wo wenig Radiosondierungen durchgeführt werden. In der Nordhemisphäre ist der Gewinn durch die Satelliten geringer, da die bessere Abdeckung durch Radiosondierungen genügend Daten liefert. Die folgende Abbildung vergleicht die geographische Abdeckung mit Satelliten mit derjenigen von „konventionellen“ Beobachtungen.

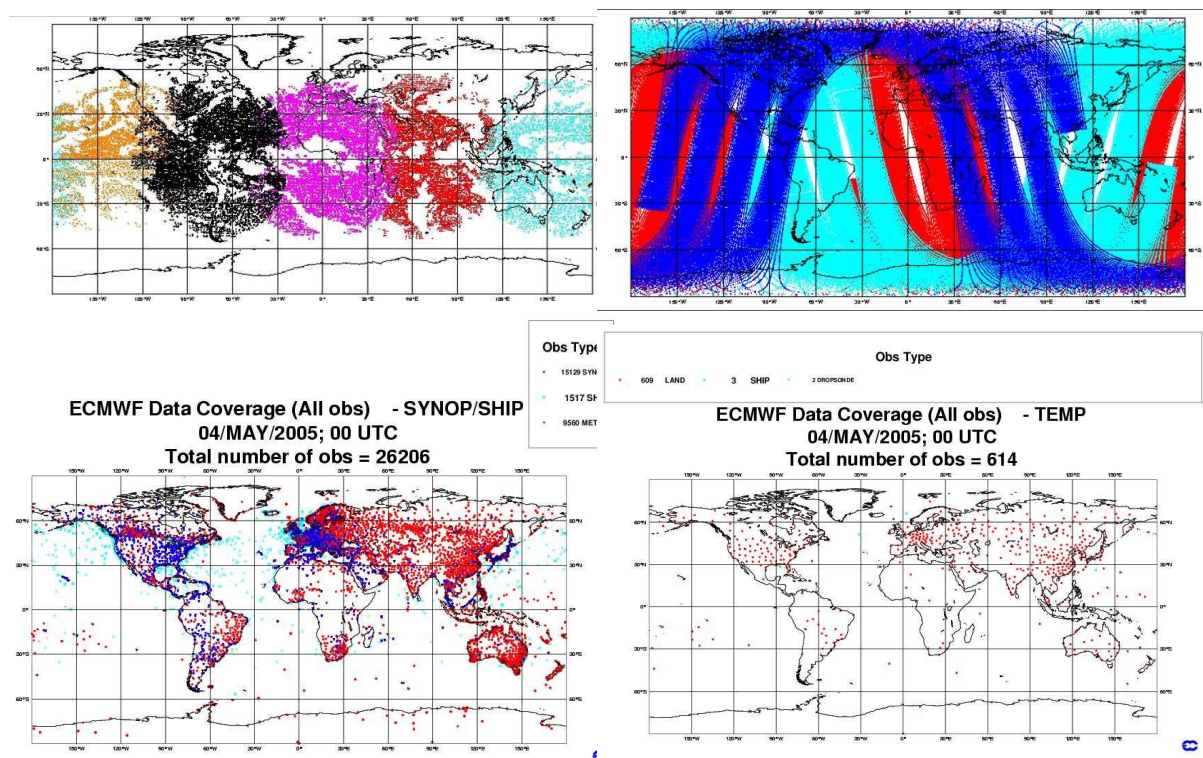


Fig.11: Oben: Geographische Abdeckung durch Satellitenbeobachtungen (links: GOES-W, GOES-E, MET-7, MET-5, GMS (GOES-9), rechts: NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17. Unten: SYNOP/SHIP-Bodenbeobachtungen (links) und TEMP (Radiosondierungen) [entnommen von der www.ecmf.int].

Aufgabe: Die obigen Bilder zeigen die geographische Abdeckung von Satelliten mit geostationären und polaren Orbits. Ordne sie korrekt dem Orbittyp zu.

[b] Die folgende Abbildung zeigt eine Anwendung von Satellitenmessungen, die nicht unmittelbar in die Wettervorhersage einfließt. Dargestellt ist die jährliche mittlere Wolkenbedeckung.

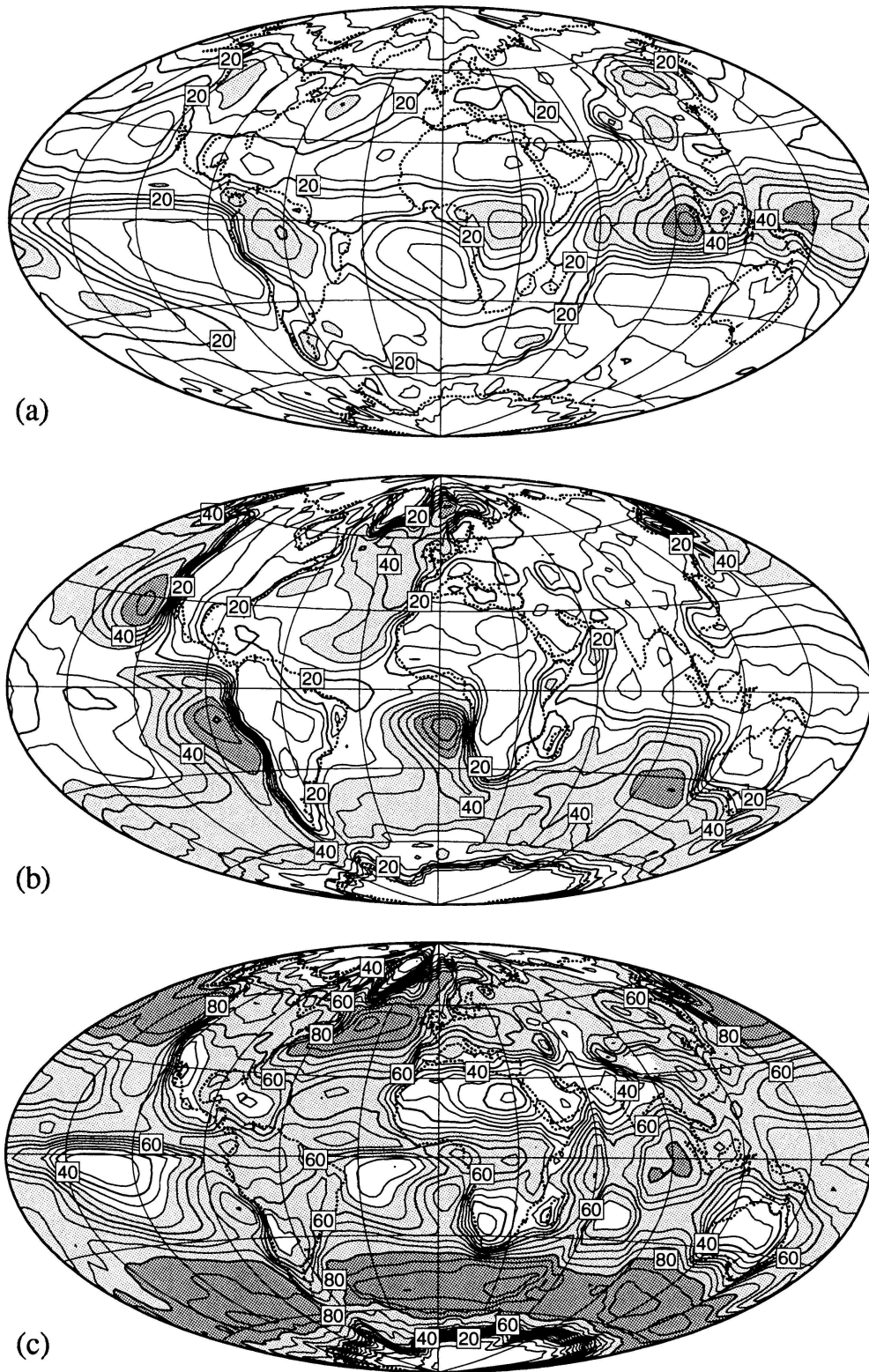


Fig.12: Mittlere jährliche prozentuale Wolkenbedeckung (bestimmt aus Satellitendaten des International Satellite Cloud Climatology Project [ISCCP, Rossow und Schiffer (1991)]). (a) Wolken mit oberem Rand höher als 440 mbar, (b) Wolken mit oberem Rand unter 680 mbar, (c) alle Wolken. In (a) und (b) ist das Konturintervall 5%. Werte über 30% sind leicht schattiert, Werte über 50% stark schattiert. In (c) beträgt das Konturintervall ebenfalls 5%, aber leichte Schattierung kennzeichnet Region mit mehr als 50% Wolkenbedeckung und starke Schattierung mit mehr als 80% Wolkenbedeckung [entnommen aus „Global Physical Climatology“, D.L. Hartmann].

Hohe Wolken sind besonders in den konvektiven Zonen über dem äquatorialen Südamerika und Afrika zu finden. Ein weiteres Maximum an hochreichenden Wolken befindet sich über Indonesien und den umliegenden Gebieten. Tiefe Wolken beobachtet man vor allem in den subtropischen östlichen Rändern der Ozeanbecken und in den mittleren Breiten. Die Maxima in den subtropischen Ozeanen sind bedingt durch unterdurchschnittlich tiefe Temperaturen der Meeresoberfläche (SST=Sea Surface Temperature). Dies führt zur Ausbildung von Stratocumulusbewölkung, die unter einer Inversion „gefangen“ ist. Tiefe Wolken sind insbesondere über den Ozeanen beobachtbar und weniger über Festland. Betrachtet man die totale Wolkenbedeckung, findet man wiederum eine Konzentration der Maxima über den Ozeanen. Grösste totale Wolkenbedeckungsgrade findet man in den mittleren Breiten. Minima befinden sich über den Subtropen und über Wüstengebieten.

[c] Satellitenbilder sind sehr hilfreich, um die Entstehung, Intensivierung und den Zerfall von Tiefdruckgebieten zu erkennen und zu verfolgen. Es wurden verschiedene Versuche unternommen, Tiefdruckgebiete anhand ihrer Strukturen in Satellitenbildern zu klassifizieren und typische Lebenszyklen zu identifizieren. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel: die Entstehung der Zyklone ist im IR oder VIS Bild als „leaf cloud“ zu sehen, die meist parallel zu einer intensiven baroklinen Zone oder Kaltfront liegt.

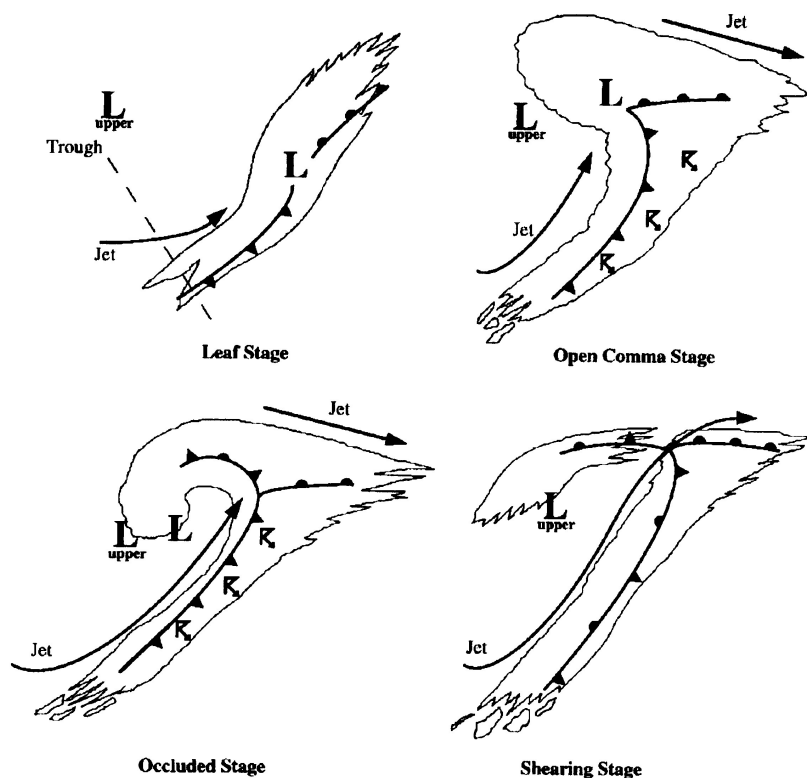


Fig.13: Wolkenstrukturen, die im Lebenszyklus eines extratropischen Tiefdrucksystems auftreten können.

Wenn sich das Tiefdruckgebiet intensiviert, wird aus der „leaf“ eine „comma cloud“ mit einem erkennbaren „cloud head“ westlich des Tiefdruckzentrums. Im Stadium der maximalen Intensität der Zyklone verformt sich der „cloud head“ zu einer spiralförmigen Struktur mit einem wolkenfreien „dry slot“, der sich zwischen dem „cloud head“ und dem kaltfrontalen Wolkenband befindet. Im zerfallenden Stadium löst sich die Wolkenformation auf und oft bleibt eine spiralförmige Struktur zurück, während sich das kaltfrontale Band weiter nach Osten verschiebt.

Diese schematische Darstellung ist nur eines von vielen sogenannten „conceptual models“, wie sie vor allem von operationellen Leuten bei den Wetterdiensten oft benutzt werden. Die Variabilität der Lebenszyklen von Tiefdruckgebieten ist jedoch zu gross, um sie mit wenigen

schematischen Illustrationen erfassen zu können.

In der folgenden Abbildung sind vier extratropische Zyklonen im Pazifischen Ozean erkennbar. Jede der vier Zyklonen befindet sich in einem anderen Stadium der Entwicklung: (A) Ein junger Sturm mit kommaförmiger Wolkenstruktur; (B) eine ausgebildete Zyklone mit okkludierter Komma Wolke; (C) ein Cut-Off-Tiefdruckwirbel mit einer Wolkenstruktur, die von einer früheren Komma Wolke stammen; (D) ein Sturm, bei dem sich eine Komma Wolkenstruktur ausbildet.

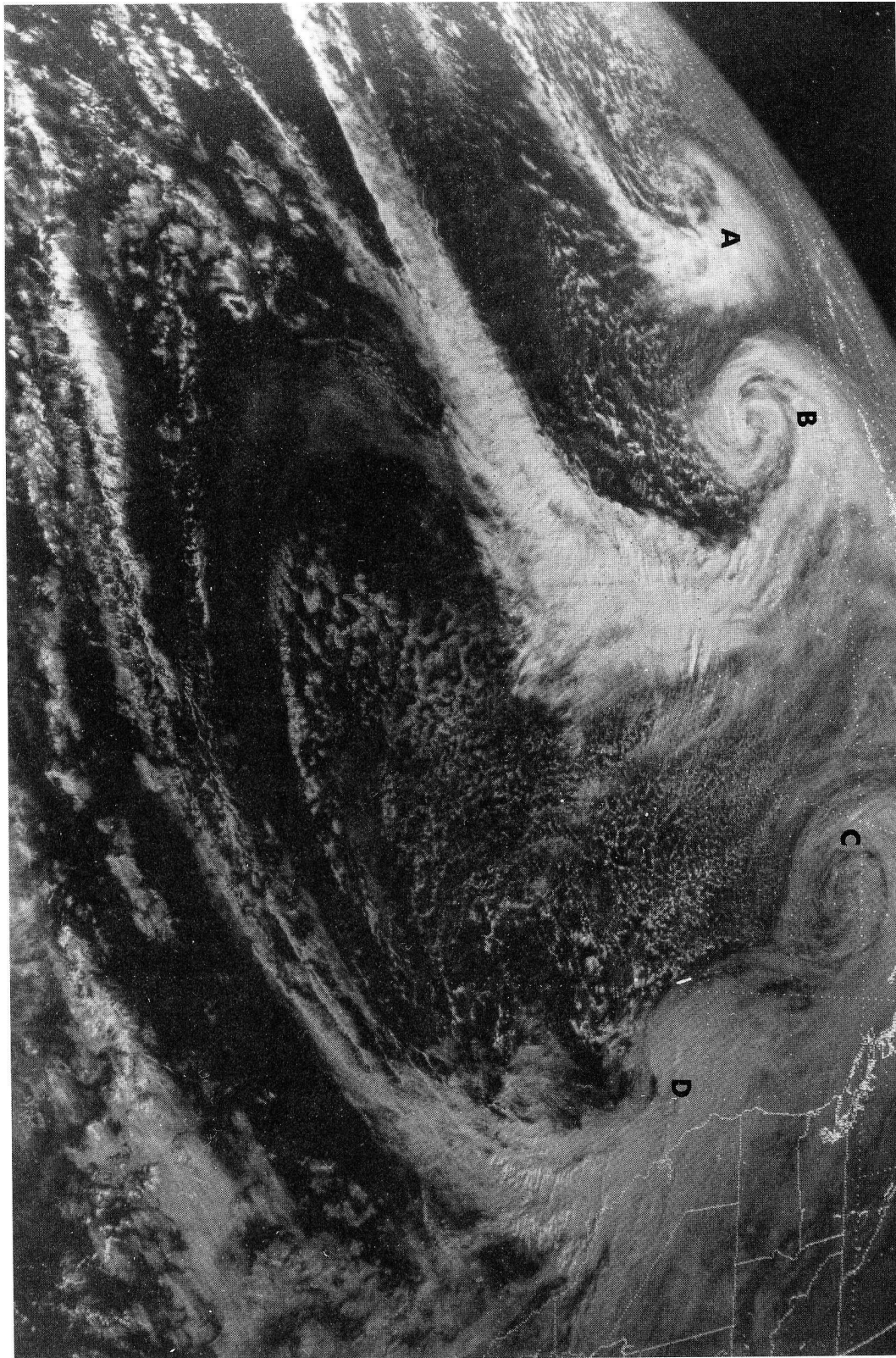
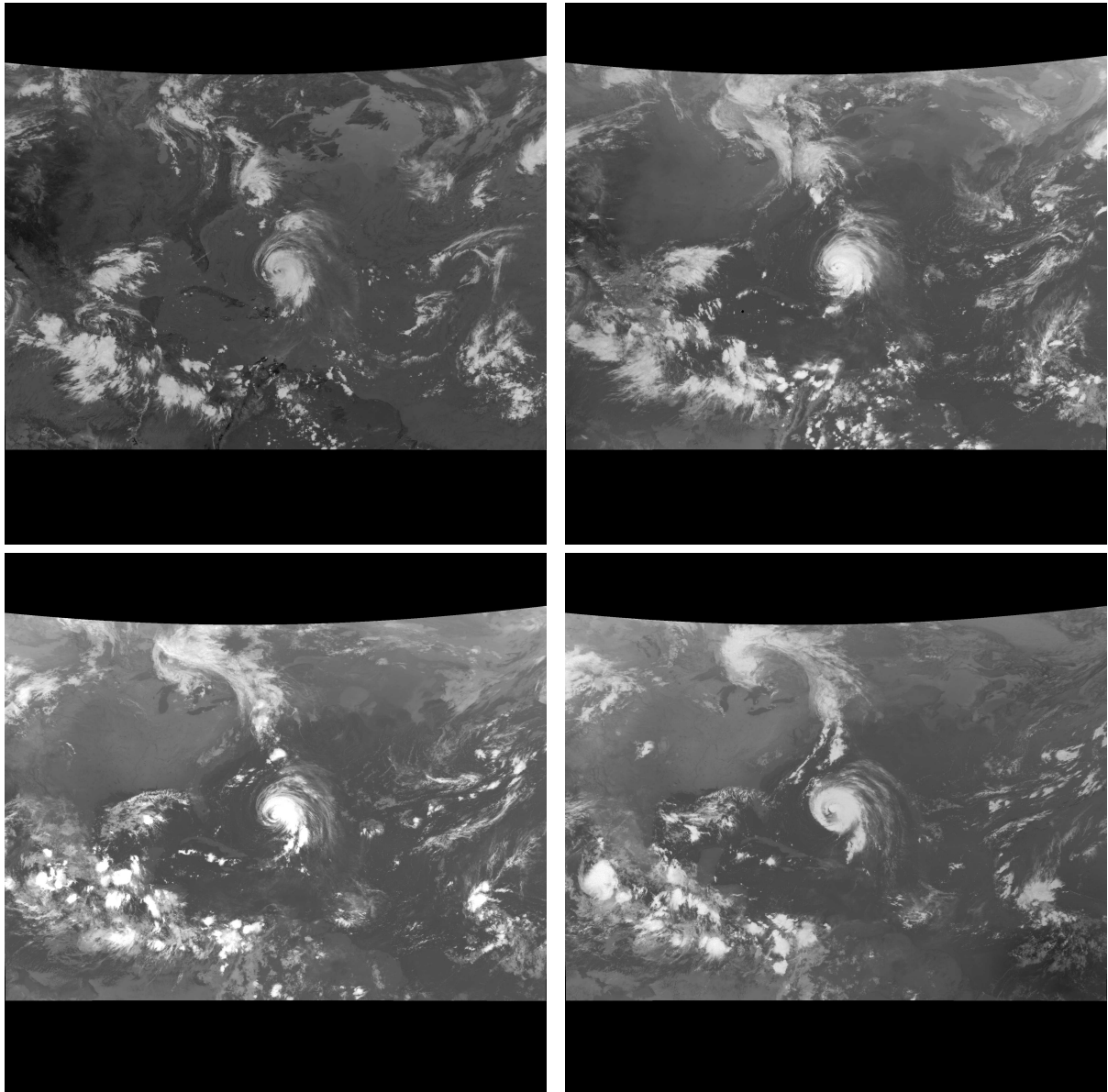


Fig.14: Zyklonogenese im Pazifischen Ozean, GOES VIS, 28. Januar 1983 (entnommen aus „An INTroduction to Satellite Imgae Interpretation“ von E. D. Conway und dem Maryland Space Grant Consortium).

Aufgabe: Suche im Internet nach Satellitenaufnahmen von Zyklonen. Versuche anhand dieser Momentaufnahmen der Zyklonen den Entwicklungszustand den obigen vier Phasen zuzuordnen. Versuche aber nicht die Satellitenbilderbilder zu „zwanghaft“ in das konzeptionelle Schema einzuordnen!

[d] Das folgende Beispiel zeigt die Entwicklung des Hurricanes Isabel. Sehr schön ist die Wolkenstruktur und das Auge des Hurricanes erkennbar. Beachte die weitgehende achsensymmetrische Wolkenstruktur der tropischen Zyklone, ganz im Gegensatz zur ausgeprägten Asymmetrie (mit frontalen Wolkenbändern) der außertropischen Zyklone. Dies deutet auf ganz unterschiedliche physikalische Prozesse bei der Entstehung hin. Sehr interessant ist bei der tropischen Zyklone die spiralförmigen Wolkenbänder. Der Ursprung dieser Bänder ist auch heute noch nicht vollständig geklärt.



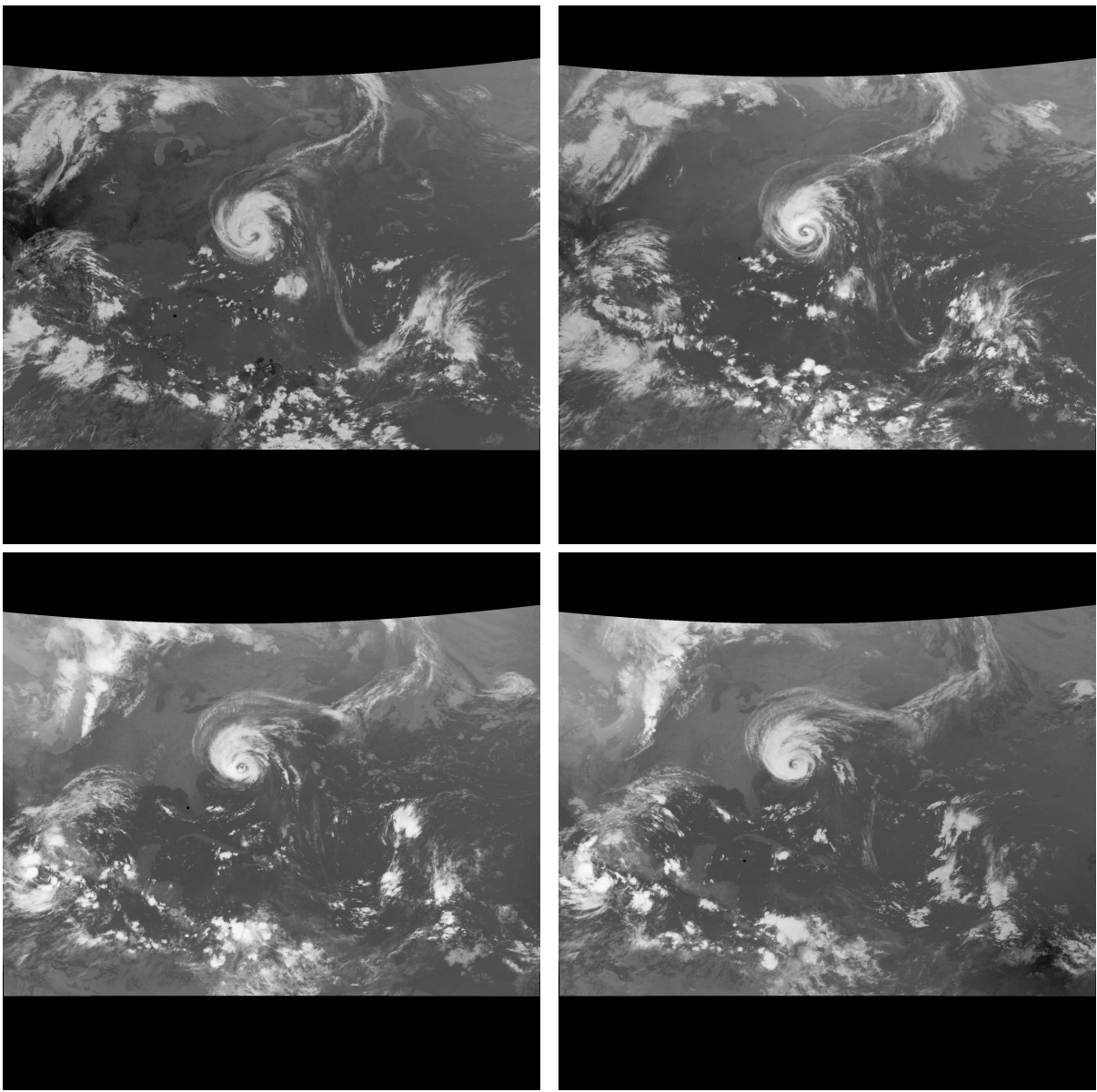


Fig.15: Entwicklung des Hurricanes Isabel.

Mit solchen Satellitenaufnahmen lässt sich die Intensivierung und Abschwächung des Hurricanes beobachten. Auch kann die Zugbahn sehr genau verfolgt werden. Besonders interessant ist es, die Zugbahn des Hurricanes im Zusammenhang mit den Strömungsverhältnissen ausserhalb der Tropen zu vergleichen. So lässt sich eventuell etwas aussagen, wann und wo der Hurricane auf Land trifft. Beachtenswert ist ausserdem die bandartige Struktur der Bewölkung. Diese Struktur lässt sich auch auf Radarbildern erkennen.

[e] Die folgende Abbildung zeigt die Überlagerung des Meteosat IR-Bildes mit dem Geopotential auf 500 hPa aus der ECMWF-Analyse. Deutlich erkennbar ist ein Trog über Europa. Auf der Vorderseite dieses Trogs erkennt man im IR-Bild eine ausgeprägte hochreichende Bewölkung. Dies deutet darauf hin, dass auf der Vorderseite die Atmosphäre weniger stabil geschichtet ist und dass es deshalb zur vermehrten Auslösung von hochreichender Konvektion (Gewitterwolken, Cumulonimbus-Wolken) kommt. Auf der Rückseite des Trogs hingegen beobachtet man keine hochreichende Bewölkung. Hier ist die Atmosphäre offensichtlich stabiler geschichtet.

Geopotential @ 500 hPa + IR Satellite / 200609241600

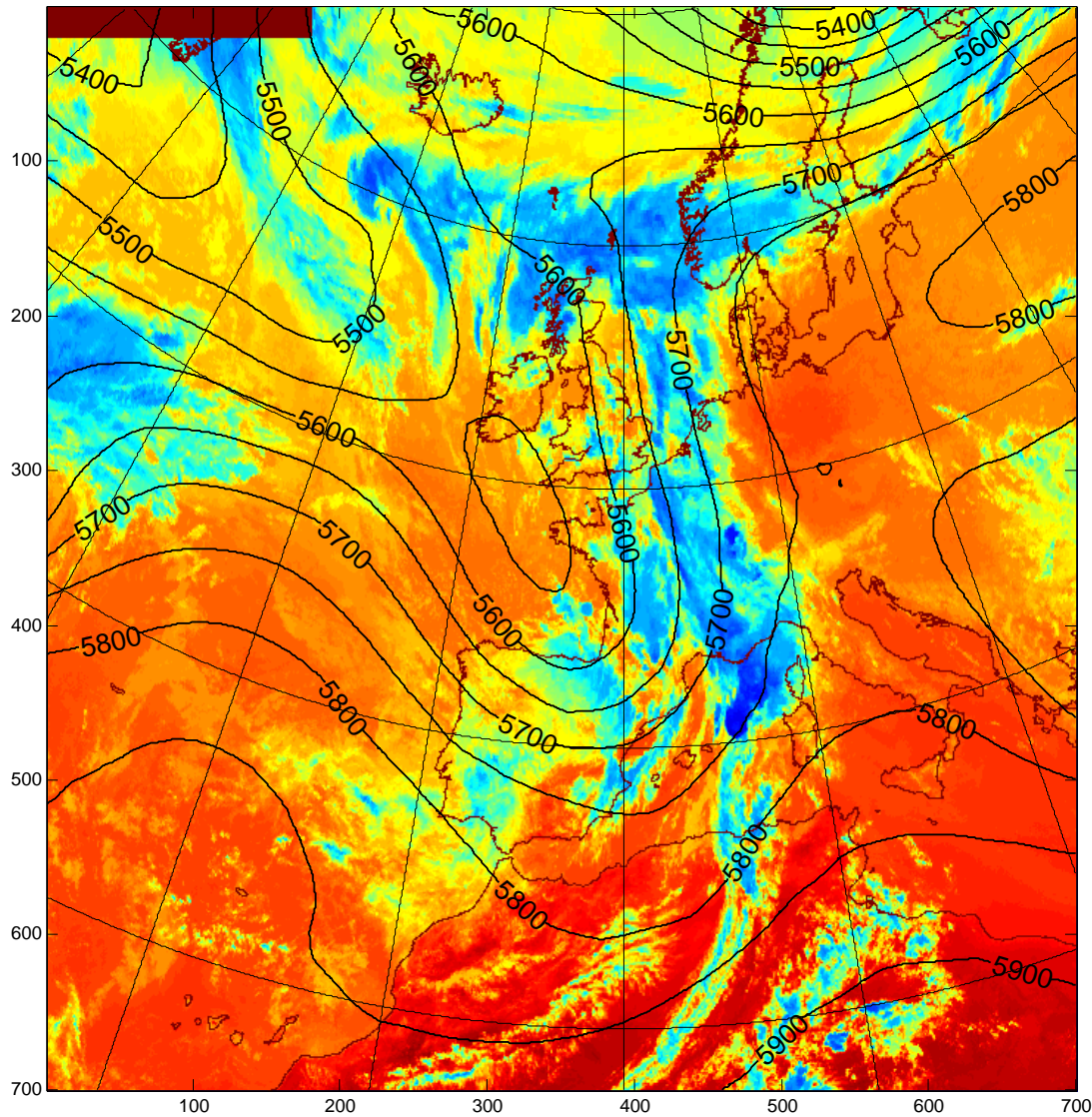


Fig.16: Überlagerung des IR-Bildes von Meteosat mit dem Geopotential auf 500hPa der ECMWF-Analyse. Die Analyse und die Satellitenaufnahme entsprechen dem 24. September 2006, 16 UTC.

Die Abbildung illustriert ausserdem sehr schön, wie man aus der Kombination/Überlagerung von Beobachtungsdaten und Modelldaten sehr viel lernen kann. Insbesondere kann auf diese Art auch die Qualität der Modelldaten beurteilt werden. Denn markante Strukturen im Modell sollten oft mit Strukturen im Satellitenbild zusammenfallen.

2.5 Literaturhinweise

1. **Dundee Satellite Receiving Station:** Viele hochaufgelöste Satellitenbilder können im Internet betrachtet werden. Ein umfangreiches Archiv wird von der Empfangsstation Dundee zur Verfügung gestellt. Besuche die Internetseite <http://www.sat.dundee.ac.uk> und studiere einige der Aufnahmen. Die Seite enthält ausserdem weitere Informationen zu den verschiedenen Satelliten.
2. **The Physics of Atmospheres, John Houghton:** Dieses Buch enthält ein kurzes Kapitel zur Satellitenbeobachtung.

3. **ECMWF:** Auf der Webseite des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (www.ecmf.int) findet man mehrere Artikel, die den Einsatz von Satellitenbeobachtungen (unter anderem) in der Datenassimilation und Wettervorhersage beschreiben.
4. **An Introduction to Satellite Image Interpretation, Eric D. Conway and the Maryland Space Grant Consortium:** In diesem Buch (mit beiliegender CD) werden sehr viele Aspekte der Satellitenmeteorologie erklärt. Es enthält eine Sammlung von Fallbeispielen, die mit Hilfe von Satellitenbildern diskutiert werden.