

Aspekte der satellitengestützten Umweltbeobachtung^{*}

Michael Bittner

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR-DFD)
Oberpfaffenhofen, D-82234 Wessling

1. Bedeutung der satellitengestützten Fernerkundung für die Umweltbeobachtung

Die zentrale Bedeutung des Zustands unserer Umwelt für das Leben auf der Erde ist unumstritten. Ebenso unumstritten ist die Tatsache, dass sich diese Umwelt verändert, und zwar global. Das ist zunächst nichts Ungewöhnliches, denn dynamischen Systemen sind Veränderungen eigen. Jahreszeitliche und klimatische Zyklen oder evolutionäre Prozesse beispielsweise sind natürliche Vorgänge, die unsere Umwelt charakterisieren. Das Leben hat sich darauf eingestellt. Neu jedoch ist der Umstand, dass der Mensch nicht länger Zuschauer dieser Veränderungen ist. Der außergewöhnlich rasche Wandel, den wir in den letzten Jahrzehnten beobachten, ist maßgeblich auf ihn zurückzuführen und nicht länger Teil der natürlichen Dynamik, sondern Teil der Geschichte der Menschheit: Zunahme der Treibhausgaskonzentration, Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht, Verschmutzung des Grundwassers, der Oberflächengewässer und der Weltmeere – das sind die jüngsten Schlagzeilen dieser Geschichte (siehe z.B. GRAEDEL und CRUTZEN, 1997).

Die Konsequenzen, die diese Veränderungen potentiell in sich tragen, sind atemberaubend: Temperaturen könnten ansteigen, die bodennahe ultraviolette Strahlungsbelastung könnte zunehmen, die Nahrungsgrundlagen könnten nachhaltig beschädigt werden. Einige denkbare sekundäre Folgen wären:

- Beeinträchtigungen der Gesundheit (z. B. Ausweitung von Seuchen, Schwächung des Immunsystems, Hautkrebs, Allergien, Augenschäden),
- Schäden für die Volkswirtschaften (z. B. Einbußen bei Ernte- und Fischereierträgen, vorzeitige Erosion von Werk- und Baustoffen, eine Zunahme von Schäden aus Sturm- und Flutkatastrophen),
- Auswirkungen auf die Biosphäre (z. B. Einschränkung von pflanzlicher Photosynthesefähigkeit und Artenvielfalt, Veränderungen der Biomasseproduktion, Smog, saurer Regen).

Eine Beeinträchtigung der Ressourcen könnte sich in der Folge insbesondere auch auf die Sicherheit Europas auswirken. So wird insbesondere eine mit dem Klimawandel einhergehende Umverteilung von Wasserströmen auf der Erdoberfläche und in den Ozeanen die Lebensgrundlagen ganzer Völker nachhaltig verändern. Bei all diesen Aussagen herrscht jedoch der Konjunktiv vor und das aus gutem Grund, denn das System Erde stellt ein komplexes System aus ineinander greifenden und sich

^{*} Beitrag zum Tagungsband „Umweltgeschichte und Landesgeschichte in Bayern“

wechselseitig beeinflussenden dynamischen, chemischen und energetischen Prozessen dar. Die eindeutige und quantitative Zuordnung von Ursache und Wirkung in diesem vielschichtigen Beziehungsgeflecht, in dem letztlich auch sozial- und wirtschaftswissenschaftliche Aspekte berücksichtigt werden müssen, ist außerordentlich schwierig (z.B. BRASSEUR et al., 1999).

Die Prognose, wie sich Atmosphäre und Klima in Zukunft entwickeln werden, erfordert ein genaues Verständnis all dieser komplexen Mechanismen. Ein Verständnis, das noch längst nicht auf allen Gebieten ausreichend entwickelt ist. Die noch existierenden wissenschaftlichen Unsicherheiten müssen beseitigt werden, und zwar rasch. Die Wissenschaft ist hier in der Pflicht, den politischen Entscheidungsträgern möglichst präzise und belastbare Informationen bereitzustellen, denn signifikante politische Entscheidungen in diesem Umfeld werden unvermeidbar tief greifende wirtschaftliche und soziale Konsequenzen nach sich ziehen (COENEN und KOPFMÜLLER, 1997). Dabei ist es unerheblich, ob politisches Handeln primär auf die Begrenzung des Klimawandels oder auf die Anpassung von Wirtschaft und Gesellschaft an eine veränderte Umwelt ausgerichtet ist. Gleichwohl: angesichts der langen Zeitskalen und der globalen Dimension der zu erwartenden und zumindest teilweise irreversiblen Umweltveränderungen ist politisches Eingreifen erforderlich, lange bevor wissenschaftliche Gewissheit erreicht ist; bewusstes, durchdachtes und künftigen Generationen verpflichtetes Management der Erde ist eine der großen gegenwärtigen Herausforderungen.

Als Konsequenz des erklärten politischen Willens, globalen Umweltveränderungen entgegenzuwirken, hat die internationale Staatengemeinschaft in den letzten Jahren eine Reihe von Abkommen zum Schutz der Umwelt beschlossen. Unter diesen sogenannten „Umweltschutzkonventionen“ nehmen das Montrealer Ozonschutzprotokoll und das Kyoto-Protokoll zum Klimaschutz einen besonderen Stellenwert ein. Dies zeigt sich insbesondere darin, dass sich die konsequente Umsetzung der letztgenannten Umweltschutzkonventionen angesichts einer Vielzahl partikulärer - zumeist wirtschaftlicher – Einzelinteressen nicht ohne Delikatesse gestaltet. Dabei hat sich längst das Bewusstsein etabliert, dass der Erhalt einer lebensfreundlichen globalen Umwelt davon abhängt, ob sich der Fortbestand der gesamten Menschheit auf eine tragfähige, auf Dauer angelegte Entwicklung gründet. Wenn 80 Prozent der Menschen arm sind, können wir nicht hoffen, in einer friedlichen Welt zu leben; und wenn die armen Nationen ihre Lage dadurch zu verbessern suchen, dass sie die Methoden anwenden, welche die reichen bisher reich gemacht haben, wird früher oder später der ökologische Ruin die Folge sein. Vor diesem Hintergrund erhalten Umweltforschung und Umweltbeobachtung ein ganz besonderes Gewicht, stellt sie in eine enge Beziehung zur Politik. Denn es ist um so schwerer, wissenschaftliche Erkenntnisse in politisches Handeln umzusetzen, je unsicherer diese Erkenntnisse und je schmerzlicher die Konsequenzen des Handelns sind. Europäische Union (EU) und Raumfahrtagentur (ESA) dokumentieren mit der GMES- (Global Monitoring for Environment and Security) Initiative die Entschlossenheit Europas, einen signifikanten Beitrag zu einer Politik zu leisten, die auf dauerhafte Entwicklung („sustainability“) insbesondere durch den Erhalt der Umwelt ausgerichtet ist (ESA, 2002). Wissenschaftliche Forschungsvorhaben und weltweite operationelle Überwachungsmaßnahmen (sogenannte „GMES-Services“) werden in den kommenden Jahren etabliert, um die noch existierenden wissenschaftlichen Unsicherheiten zu reduzieren, mit dem Ziel, eine belastbarere politische Handlungsbasis zu schaffen. Gleichzeitig soll überprüft werden, inwieweit die beschlossenen Umweltschutzmassnahmen greifen bzw. tatsächlich

umgesetzt werden. Hervorzuheben ist, dass besonders Deutschland traditionell durch nationale Förderprogramme – gegenwärtig durch das „Atmosphärenforschungsprogramm (AFO) 2000“ und das „Deutsche Klimaforschungsprogramm (DEKLIM)“ – zum Verständnis des globalen Wandels beiträgt.

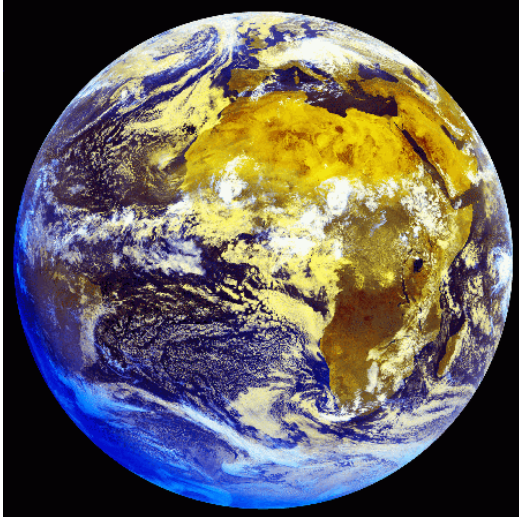
Die Bereitstellung präziser und belastbarer Informationen, dieses Wissen produktiv zu machen („Handlungswissen“), setzt aus den oben genannten Gründen ein fachübergreifendes Vorgehen voraus. Unsere Fähigkeit, vom Weltraum aus auf uns selbst herabzuschauen, gewährt uns dabei wertvolle Über- und Einblicke in unsere Umwelt. Die satellitengestützte Erdbeobachtung ermöglicht die integrale Beobachtung des Systems Erde – integral im Sinne der möglichst umfassenden, gleichzeitigen, validierten Messung einer Vielzahl von geo- und biophysikalischen Parametern und dieses über längere Zeiträume mit homogener Genauigkeit global und flächendeckend. Fallstudien und Stichproben, sowohl zeitlich wie räumlich, sind aufgrund der hohen Variabilität von Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre über einen weiten Skalenbereich nicht ausreichend; sie erlauben keine Unterscheidung zwischen einem Klimatrend und einer Episode (BITTNER et al., 2002). Aber Satelliten sind teuer und der Aufwand zur Entwicklung solcher Instrumente ist enorm; Entwicklungszeiten von 10 Jahren und mehr sind typisch. Das „Committee on Earth Observing Satellites (CEOS)“, ein Gremium, in dem die nationalen Raumfahrtagenturen vertreten sind, hat daher die Initiative einer „Integrated Global Observing Strategy (IGOS)“ ergriffen, Satellitenmissionen künftig international besser aufeinander abzustimmen: es soll vermieden werden, dass es bisweilen mehrere ähnliche Instrumente gleichzeitig im Orbit gibt, während dann, unter Umständen, kein Instrument zur Beobachtung des Systems Erde zur Verfügung steht. Neben der Vermeidung von Datenlücken sollen Kosten so effizienter verteilt werden (WMO, 2000). Nachfolgend wird anhand von Beispielen das Nutzungspotential der satellitengestützten Fernerkundung für die Umweltbeobachtung beleuchtet.

2. Beispiele für die satellitengestützte Umweltbeobachtung

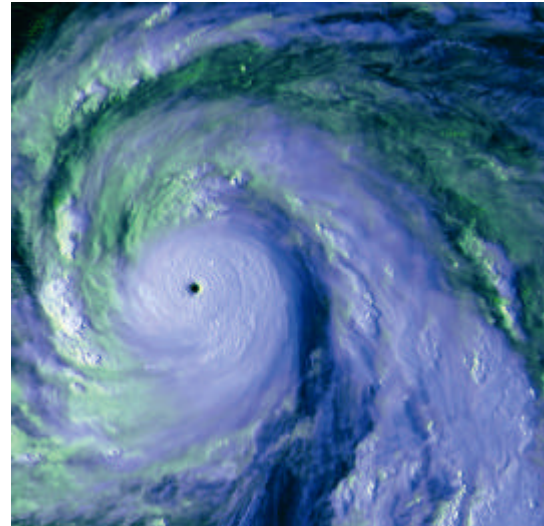
Fernerkundung bedeutet die berührungslose Messung geo- und biophysikalischer Parameter. Die physikalische Grundlage hierfür bildet die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit der Erdoberfläche und den Gasen und Partikeln der Atmosphäre. Satelliten werden etwa seit Anfang der 70er Jahre im größeren Umfang als Plattform für verschiedenste Instrumente – je nach Fragestellung - zur Erdbeobachtung eingesetzt (Eine gute Zusammenstellung findet man z.B. bei MORAIN und BUDGE, 1997). Je nachdem, ob beispielsweise die Beobachtung der Vegetation, der Verteilung der Wolken, der Gase in der Atmosphäre oder aber die Bestimmung der Temperatur der Meeresoberfläche von Interesse ist, werden verschiedene Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums verwendet und die Instrumente entsprechend ausgelegt. So wird der für das menschliche Auge sichtbare Bereich des Lichts (etwa 0,4 Mikrometer (violett) – 0,7 Mikrometer (rot)) häufig zur Analyse des globalen Wettergeschehens verwendet. Messungen im kürzerwelligen ultravioletten und längerwelligen infraroten Spektrum dienen häufig zur Beobachtung von atmosphärischen Spurengasen. Sehr viel größere Wellenlängen im Bereich von etwa 3 Zentimeter – 25 Zentimeter werden von Radarsensoren zur Abtastung etwa des Reliefs der Erdoberfläche benutzt. Je nach Anwendung sind solche Messungen, freilich immer auch bedingt durch technologische Grenzen, mit

verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen möglich. Nachfolgend werden einige Beispiele gegeben.

Beobachtung des Wetters



a)



b)

Abb.: 1 a) Typische Aufnahme des europäischen Wettersatelliten METEOSAT im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. b) Aufnahme des Hurricans „Gilbert“ im Jahre 1988 vom AVHRR-Instrument an Bord des US-amerikanischen Satelliten NOAA-11 im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

Zu den prominentesten Anwendungen der satellitengestützten Fernerkundung zählt ohne Zweifel die Wettervorhersage. Eine ganze Flotte von Wettersatelliten stellt heute die lückenlose und kontinuierliche Beobachtung des Wettergeschehens sicher. In einer Höhe von etwa 36000 Kilometern über der Erdoberfläche drehen sie sich praktisch synchron mit der Erde und scheinen so immer über dem gleichen Punkt der Erdoberfläche zu stehen. Der europäische Satellit METEOSAT (Meteorological Satellite) liefert auf diese Weise alle 30 Minuten eine Aufnahme der „europäischen Seite“ der Erde. Wolkenbewegungen oder die Entstehung von Stürmen können so beobachtet werden (Abbildung 1a). Derartige Satelliten liefern allerdings nur eine horizontale Auflösung im Bereich von etwa 5 Kilometern über dem Äquator und, wegen der Krümmung der Erdoberfläche, von nur noch etwa 10 Kilometern in höheren Breiten; die polaren Gebiete sind auf diese Weise gar nicht mehr zugänglich. Tiefer fliegende Satelliten auf polaren Umlaufbahnen jedoch erschließen auch diese Gebiete. Aufgrund ihrer niedrigeren Flughöhe (typischerweise 700 Kilometer) erlauben sie horizontal höheraufgelöste Aufnahmen (typischerweise 1 Kilometer). Abbildung 1b zeigt als typisches Beispiel den Hurrican Gilbert, wie er 1988 vom AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)-Instrument an Bord des NOAA-11-Satelliten beobachtet wurde.

Beobachtung der stratosphärischen Ozonschicht

Es wurde schon erwähnt, dass sich die Atmosphäre unseres Planeten aus einer Vielzahl von verschiedenen Gasen zusammen setzt. Dabei machen die Hauptkonstituenten Stickstoff, Sauerstoff und Argon etwa 99.9% unserer Atmosphäre aus. Das restliche 0.1% entfällt auf eine ganze Reihe

anderer Gase - wir sprechen wegen dieses außerordentlich geringen Anteils dieser Konstituenten an der Atmosphäre von „Spurengasen“. Man könnte annehmen, dass sie wegen ihrer minimalen Konzentration ohne Einfluss auf das atmosphärische Geschehen sind. Doch diese Annahme ist - zumindest für einige dieser Gase - weit gefehlt. Eines dieser Spurengase ist Ozon. Diesem Gas, das an keiner Stelle der Atmosphäre mehr als ein 1/100 000stel der Atmosphäre ausmacht, kommt eine enorme Bedeutung zu: es absorbiert im hochenergetischen Ultraviolett fast sämtliche Sonnenstrahlung. Diese Absorption ist für die Biosphäre ganz entscheidend. So steigt beispielsweise in dem Wellenlängenbereich von etwa 320 bis 280 Nanometer die relative biologische Empfindlichkeit der DNA um etwa vier Größenordnungen an; eine lineare Abnahme der Absorption von UV-Strahlung etwa durch die Abnahme der Ozonschicht geht somit nichtlinear mit der biologischen Beeinträchtigung des Erbgutes einher. Neben dem Effekt der Filterung biologisch schädigender UV-Strahlung, wird die hier absorbierte solare Energie in Form von Wärme an die umgebende Atmosphäre abgegeben. Auf diese Weise bestimmt Ozon maßgeblich die vertikale Temperaturstruktur der Stratosphäre und prägt somit auch die großräumigen Zirkulationsmuster mit. Die dritte wichtige Funktion von Ozon für unsere Umwelt liegt in seiner Eigenschaft als natürliches Treibhausgas. So verteilt sich die von der Erde abgestrahlte Energie wesentlich auf den Wellenlängenbereich von etwa 5 bis 100 Mikrometer. Ozon absorbiert Strahlung bei 9.6 Mikrometer und strahlt diese teilweise wieder auf die Erde zurück. Ozon trägt damit zu dem natürlichen Treibhauseffekt bei, ohne den die mittlere Temperatur der Erdoberfläche nicht bei +15 Grad Celsius, sondern bei rund -18 Grad Celsius liegen würde (z.B. HASSELMANN, 1999).

Ozon wird auf natürlich Weise über den Prozeß der Photosynthese erzeugt. Hierbei wird ein Sauerstoffmolekül durch energiereiche solare Strahlung in zwei Sauerstoffatome aufgespalten. Die so entstandenen Sauerstoffatome verbinden sich dann mit Sauerstoffmolekülen zu Ozon. Dieser Prozeß läuft in größeren Höhen ab (z.B. SCHMIDT, 1991). Ist erst einmal eine gewisse Menge Ozon entstanden, so kann das energiereiche UV-Licht nicht mehr durch sie hindurchdringen, da das Ozon, wie oben beschrieben, UV-Strahlung besonders effektiv absorbiert. Das bedeutet, dass in der Atmosphäre unterhalb dieser Menge kein Ozon mehr gebildet wird. Dies ist, ganz vereinfacht dargestellt, die Ursache für die Schichtbildung des Ozons. Es ist daher zu etwa 90% im Höhenbereich von etwa 15 bis 30 Kilometer konzentriert. Die übrigen 5 bis 10% verteilen sich dann im wesentlichen auf die Troposphäre. Ein bisweilen im Sommer zu beobachtender Anstieg der Ozonkonzentration im Bereich der bodennahen, sogenannten atmosphärischen Grenzschicht („Sommersmog“), hat andere Ursachen und wird weiter unten diskutiert.

Das stratosphärische Ozon wird insbesondere im Bereich tropischer Breiten wegen der dort herrschenden intensiven solaren Strahlung produziert. Betrachtet man nun die mittlere Breitenverteilung des gesamten Ozons, so findet man das erstaunliche Bild, dass die Ozonsäulenkonzentration gerade in äquatorialen Breiten relativ niedrig ist. Verantwortlich für diese Verteilung sind Transportprozesse: das über niedrigen geographischen Breiten gebildete Ozon wird mit der großräumigen stratosphärischen Zirkulation in höhere Breiten und abwärts verfrachtet, wo es sich akkumulieren kann.

Die weitreichende Bedeutung des stratosphärischen Ozons für unsere Umwelt begründete schon früh ein Forschungsinteresse an diesem Thema. So gelang bereits 1913 die erste Messung des Gesamt Ozons und der experimentelle Nachweis der Existenz der Ozonschicht. In den zwanziger Jahren baute Dobson 6 identische Spektrophotometer mit denen er das erste Messnetz begründete. Hierdurch war es dann erstmals möglich, nicht nur Aussagen über die zeitliche, sondern auch über die räumliche Verteilung der Dicke der Ozonschicht zu treffen. Dann, im Jahre 1957, dem internationalen geophysikalischen Jahr, wurde dieses Messnetz weltweit ausgedehnt. Auf der Grundlage dieses bis heute betriebenen Netzwerkes von interkalibrierten Stationen konnte 1968 eine erste Ozonklimatologie erstellt werden. Regelmäßige Messungen vom Satelliten aus gibt es seit dem Start von Nimbus 7 im Oktober 1978 mit dem TOMS -Gerät der US-Amerikaner. Vornehmlich durch die Installation von Spektrophotometern auf Ballonen wurden auch erste Informationen über die vertikale Verteilung des Ozons gewonnen.

Obschon das Ozon von Natur aus hochgradig variabel ist - und das über weite Skalenbereiche - so wissen wir heute dank dieser langen Messreihen, dass die Dicke der Ozonschicht seit geraumer Zeit abnimmt. So präsentierten 1984 eine japanische und 1985 eine britische Forschergruppe Gesamt ozonmessungen ihrer antarktischen Messstationen, die eine stetige Ozonabnahme im antarktischen Frühjahr bereits seit etwa 1975 nachwiesen.

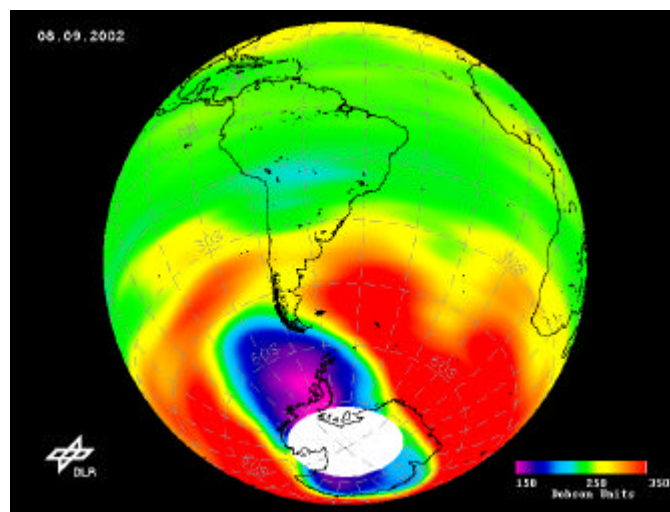


Abb.: 2 Verteilung der globalen Ozonsäulenkonzentration über der Südhemisphäre am 8. September 2002, 12 Uhr UT, wie sie aus Messungen des ERS-2-GOME-Instruments abgeleitet wurde. Das weiße Gebiet wurde nicht vom Satelliten beobachtet; hier liegen keine Messwerte vor.. Das antarktische Ozonloch (blau und lila) ist bereits ausgeprägt. Die Elongation des Ozonlochs ist auf dynamische (strömungsbedingte) Einflüsse zurückzuführen.

Die Analyse der amerikanischen Satellitendaten bestätigte schließlich nicht nur diesen dramatischen Ozontrend über der Antarktis, sondern zeigt vielmehr auf, dass das Ozonproblem ein globales Problem ist: sieht man einmal von den Polarregionen ab, so nimmt der Ozongehalt im Bereich von 60°N bis 60°S um etwa 6% pro Dekade ab. Zudem ist der Trend nicht einheitlich, sondern regional und jahreszeitlich verschieden. So sind die Ozonverluste über der Nordhemisphäre besonders während der Winter- und Frühjahrsmonate ausgeprägt und betragen über 6% pro Dekade. In tropischen Breiten gibt es hingegen nur geringe Verluste. In mittleren Breiten der Südhemisphäre betragen sie fast unabhängig

von der Jahreszeit etwa 4%. In südpolaren Breiten schließlich - also über der Antarktis - erreichen die Verluste während des dortigen Frühlings leicht 10-12% und mehr (Abbildung 2). Bemerkenswert ist ferner, dass die Ozontrends zudem längenabhängig sind. Demnach hat die Ozonsäule in den Monaten Februar-März aus den Jahren 1992-1997 gegenüber dem Vergleichszeitraum aus 1979-1984 über dem asiatischen Raum um etwa bis zu 20% abgenommen (WMO, 1998)

Die chemischen Reaktionen, die zur Zerstörung des Ozons führen, sind zahlreich und bilden ein kompliziertes Netz von gegenseitigen Abhängigkeiten. Dabei ist es eine bemerkenswerte Tatsache, dass in verschiedenen Bereichen der Stratosphäre auch verschiedene Abbauprozesse am Werk sind, je nachdem ob es sich um gemäßigte oder polare Breiten handelt. Auf alle diese Prozesse kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Erwähnt werden soll hier nur, dass der Ozonabbau neben der photolytischen Spaltung, also dem Aufbrechen von Ozonmolekülen durch intensive Sonnenstrahlung auch mittels einiger Radikale wie Hydroxyl, Stickoxid oder Chlor erfolgen kann (z.B. SCHMIDT, 1991). So bewirkt Chlor eine Umwandlung von Ozon in molekularen Sauerstoff. Das dabei erzeugte Chlormonoxid reagiert weiter mit atomarem Sauerstoff; das Ergebnis ist ein weiteres Sauerstoffmolekül und - das ist das Bemerkenswerte an dieser Reaktion - das Chloratom wird wieder freigesetzt und steht zur Zerstörung eines weiteren Ozonmoleküls zur Verfügung. Im Durchschnitt kann jedes Chloratom auf diese Weise bis zu 100 000 Ozonmoleküle zerstören, bis es schließlich selbst deaktiviert wird.

Es leuchtet unmittelbar ein, dass eine Zunahme der Konzentration solcher Katalysatoren in der Atmosphäre, wie sie seit einigen Jahren beobachtet wird, den beobachteten Ozontrend mit begründen. Insbesondere die Chlorkohlenwasserstoffe, die unter anderem lange Zeit in großem Stil als Treibgase in Spraydosen, als Kühlmittel in Kühlschränken und Klimaanlage und einer Vielzahl von großtechnischen Prozessen eingesetzt wurden, sind maßgeblich an dem Eintrag von Chlor in die Atmosphäre beteiligt. Als Folge der im Montrealer Protokoll von 1987 vereinbarten Produktionsbeschränkungen von FCKW beobachten wir heute, dass in der Troposphäre der Zuwachs von CFC-12 in den letzten Jahren signifikant abgenommen hat; bei CFC-11 ist sogar schon eine leichte Konzentrationsabnahme erkennbar. Diese Stoffe allerdings benötigen lange Zeiten, bis sie in die Stratosphäre gelangen. Die Zeitkonstanten, d.h., die Zeit, nach denen die Schadstoffe erst ihre volle schädigende Wirkung entfalten, liegen bei den Chlor-Kohlenwasserstoffen in der Größenordnung von 10-25 Jahren. Nach den uns heute bekannten Werten ist davon auszugehen, dass die maximale Ozonreduktion noch bevorsteht und vermutlich innerhalb der kommenden 20 Jahre eintreten wird. Eine Erholung der Ozonschicht wird also erst in etwa 50 Jahren zu erwarten sein, sofern - und das ist der entscheidende Punkt - alle anderen Umstände, die die Ozonschicht beeinflussen, stabil bleiben. Hinzuweisen ist hier auf eine Kopplung des Ozonproblems mit der Klimaproblematik. So hat die Klimaänderung eine allmähliche Abkühlung der Stratosphäre zur Folge: sinkende Temperaturen in der polaren Stratosphäre wirken aber einer Ozoneholung entgegen. Mit anderen Worten: eine Klimaänderung könnte die Erholung der Ozonschicht verzögern.

Die bisherigen Ausführungen machen deutlich, dass die Atmosphäre ein außerordentlich komplexes System aus miteinander verbundenen und rückgekoppelten Prozessen ist. Dieser Umstand macht sofort die Bedeutung von Computermodellen deutlich, die das Verhalten des Ozons nicht nur unter

dem Einfluß der verschiedenen Schadstoffe, sondern auch unter Berücksichtigung der vielen anderen Faktoren, die das System Atmosphäre ausmachen, simulieren. Nur mit der Hilfe solcher Modelle sind Zukunftsprognosen überhaupt erst möglich. Viele Vorgänge, die die Ozonschicht beeinflussen, gelten heute als im Prinzip verstanden. Allerdings aber - überspitzt ausgedrückt - eben nur im Prinzip. So unterschätzen heutige Modellrechnungen den globalen Ozonabbau immer noch um einen Faktor 1,5 bis 4, je nach Modell. Zum großen Teil immer noch nicht verstanden sind insbesondere regionale Unterschiede im Ozontrend. Hier werden dynamische Prozesse, also Transportprozesse zum Beispiel durch Strömungen, Wirbel und Turbulenzen, immer wichtiger. Aus diesem Grunde ist das Zusammenwirken von Modellentwicklung und der Analyse von Messdaten eminent wichtig für die Weiterentwicklung unseres Verständnisses des Systems Atmosphäre. Wir müssen also messen. Hier treten aber zwei gravierende Schwierigkeiten auf, die damit zusammenhängen, dass man mögliche Veränderungen des Ozongehalts der Atmosphäre auf wenige Prozent genau bestimmen muß. Einerseits ist es nämlich sehr schwierig, Ozon wirklich genau zu messen. Die besten heute verwendeten Verfahren erreichen Absolutgenauigkeiten von 3-5%. Andererseits ist das Ozon in der Atmosphäre von Natur aus hochgradig variabel - und das sowohl räumlich als auch zeitlich. So beobachtet man an einem Ort nicht selten Änderungen des Gesamt Ozons von einem Tag auf den anderen von bis zu 20 - 30% (BITTNER et al., 1998). Diese zeitliche Variabilität über einem Ort hängt mit der starken räumlichen Heterogenität der Ozonverteilung zusammen. Hier beobachtet man immer wieder starke horizontale Gradienten auf Skalen von wenigen 100 Kilometern und sogar darunter. Angesichts dieser natürlichen Variabilität ist es offenkundig, daß Einzelmessungen des Ozons über das Ozonproblem ebensowenig aussagen können, wie man aus einer Messung in einer Regenwolke auf den globalen Wasserdampfgehalt der Atmosphäre schließen kann. Globale Messungen mittels Netzwerken von Meßstationen und Satelliten - und zwar kontinuierlich und langfristig - sind vielmehr erforderlich. Dabei kommt dem Satelliten als Meßplattform der besondere Vorteil zu, daß er eine globale Messung auch über dem Ozean und über unbewohntem Gebiet erlaubt.

Beobachtung der Luftqualität

Das Thema „Luftqualität“ ist nicht neu. So schreibt bereits Plinius der Ältere im Jahre 61 n.Chr.: „Sobald ich die schwere Luft von Rom verlassen hatte und den Gestank der qualmenden Kamine, die bei Betrieb alle möglichen Dämpfe und Ruße ausstießen, verspürte ich einen angenehmen Wandel meines Befindens“ (zitiert in STERN et al., 1984). Neu allerdings ist die Dimension, die die Luftverschmutzung seit jener Zeit angenommen hat. Der Begriff „Smog“ gehört heute zum Alltagswortschatz insbesondere der Einwohner größerer Städte und Metropolen (Abbildung 3).

Die Luft vornehmlich in den Ballungszentren der Erde wird zunehmend mit Stickoxiden, Ozon, Schwefel und Aerosolen belastet. Dies ist in erster Linie auf eine zunehmende Intensität des Kraftverkehrs und der Industrialisierung zurückzuführen. Daneben stellen aber auch Brandrodungen oder außer Kontrolle geratene großflächige Kohle- und Torfbrände wie wir sie derzeit beispielsweise in China, Russland und Indonesien erleben, eine signifikante Rolle. Hinzu kommen natürliche Schadstoffquellen wie etwa Vulkanausbrüche. Führt man sich vor Augen, dass der Mensch täglich etwa 10 000 Liter Luft inhaliert, bekommt man eine Ahnung davon, welche gesundheitlichen

Konsequenzen mit einer weiter zunehmenden Luftverschmutzung in Zukunft verbunden sein mögen (CROSIGNANI et al., 2002). Hinzu kommt, dass diese Schadstoffe mit den Strömungen und Zirkulationen in der Atmosphäre über weite Strecken, teilweise kontinentalen Ausmaßes, vom Ort ihrer Entstehung wegtransportiert werden. Luftverschmutzung ist damit längst kein regionales Problem mehr; es ist ein Problem globalen Ausmaßes.



a)



b)

Abb.: 3 Smogsituationen über der Stadt Santiago (a) und über Los Angeles (b)

Die satellitengestützte Fernerkundung ermöglicht bereits heute die Überwachung der Emission einiger der genannten Schadstoffe und die Beobachtung ihrer Ausbreitung. So zeigt Abbildung 4 die Verteilung von Stickstoffdioxid auf einem Teil der Erde für den August im Jahr 2001, wie sie aus den Messungen des ERS-2-GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)-Instruments abgeleitet wurden. Stickstoffdioxid ist biologisch wirksam; es greift Schleimhäute an und verursacht Schäden im

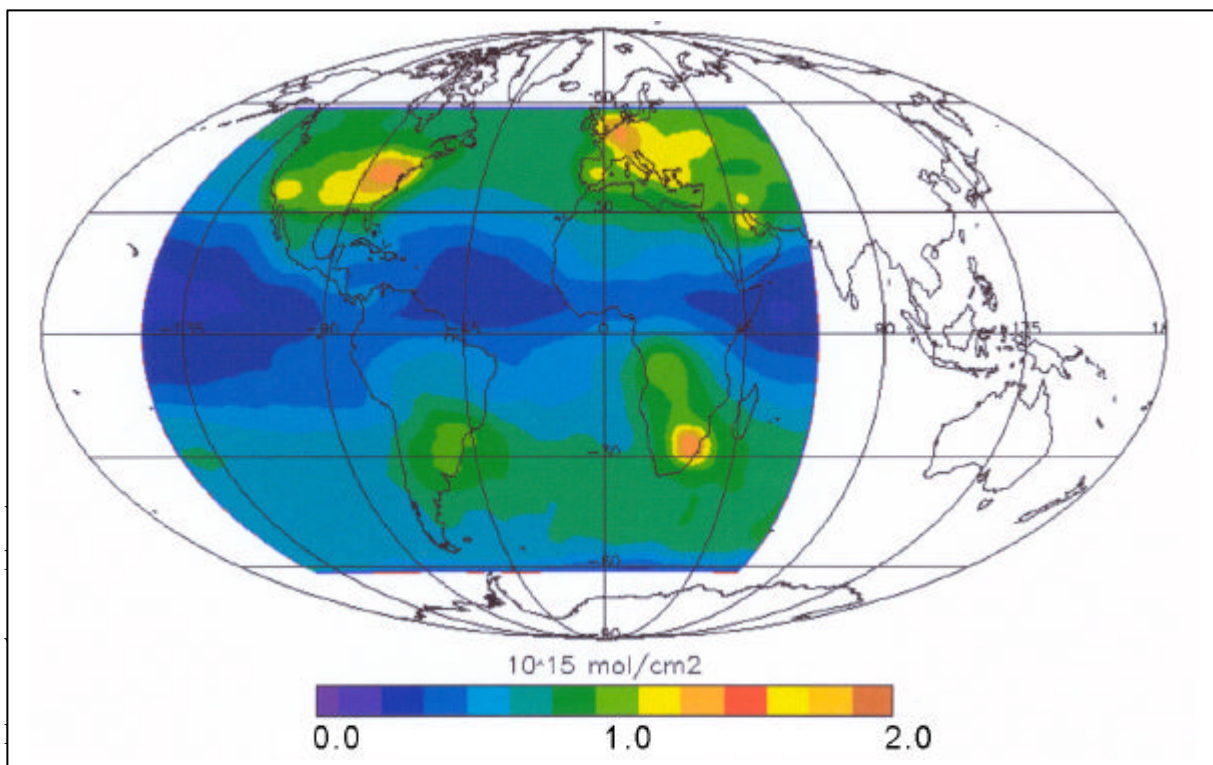
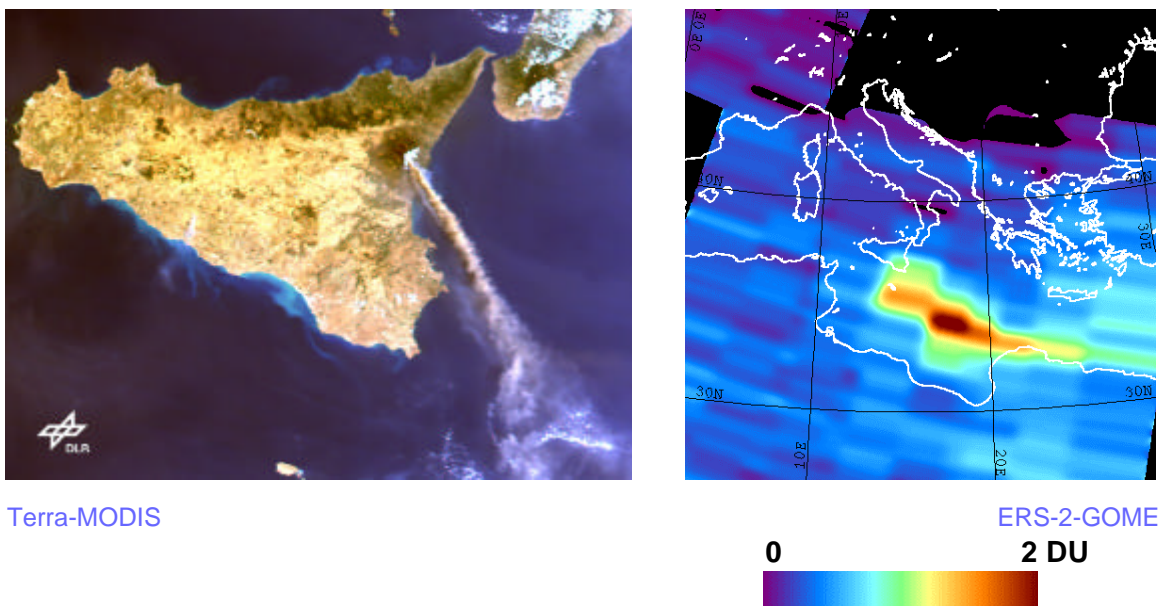


Abb.: 4 Globale Verteilung von Stickstoffdioxid (NO_2) gemittelt über den August 2002. Hohe NO_2 -Konzentrationen sind gelb und rot gefärbt.

respirativen Bereich. Zudem trägt es bei intensiver Sonneneinstrahlung zur Bildung von Ozon in der sogenannten atmosphärischen Grenzschicht, also unserer unmittelbaren Umgebung, bei: man spricht dann vom sogenannten „Ozonsmog“ oder „Sommersmog“ (WMO, 1999). Ozon selbst hat ganz erhebliche Auswirkungen auf den Organismus. Klar erkennbar sind in Abbildung 4 als Quellen die großen industriellen Zentren in Nordamerika, Europa und Südafrika sowie die Gebiete der intensiveren Ölförderung in Saudi-Arabien. Aber auch die Auswirkungen von Biomassebränden in Südamerika zeichnen sich ab. Auffällig ist zudem, dass aufgrund der atmosphärischen Zirkulation die geographischen Breitenbänder, in denen sich die Schadstoffquellen befinden, systematisch erhöhte Belastungen aufweisen.

Es wurde erwähnt, dass auch natürliche Quellen wie Vulkane erhebliche Mengen von Schadstoffen in die Atmosphäre einbringen können. Abbildung 5 zeigt als Beispiel, wie der Ausbruch des Ätna im Juli 2001 vom Satelliten aus gesehen wurde. So zeigt die Aufnahme des MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer)-Instruments an Bord des US-amerikanischen Terra-Satelliten deutlich die Rauchfahne des Ätna im sichtbaren Spektrum des Lichts (Abbildung 5a). Die Auswertung der Daten des europäischen GOME-Instruments an Bord des ERS-2-Satelliten, dessen Beobachtungen im ultravioletten Spektrum des Lichts liegen, ermöglicht zudem die Abschätzung des Schwefeldioxidgehalts, der mit dieser Rauchfahne verbunden ist (Abbildung 5b). Schwefeldioxid ist neben seinem Potential zur direkten Beeinträchtigung der Gesundheit auch Ursache des sogenannten „sauren Regens“, der wiederum massive Auswirkungen auf die Vegetation hat.



a)

b)

Abb.: 5 (a) Aufnahme der Rauchfahne des Vulkans Ätna, Sizilien, am 22. Juli 2001 durch das MODIS-Instrument von Bord des Terra-Satelliten. **(b)** Schwefeldioxidbelastung in Dobson Einheiten über dem Mittelmeer für den Zeitraum vom 22.-24. Juli 2001, wie sie aus Messungen des ERS-2-GOME-Instruments abgeleitet wurde (b). Rote Färbung markiert hohe Konzentration von SO₂.

Schliesslich soll noch ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang angesprochen werden. Es wurde bereits oben erwähnt, daß die Atmosphäre, und im Besonderen die Verteilung des stratosphärischen Ozons, dynamisch bedingt auch auf kleineren Skalen hochgradig variabel ist. Ein prominentes

Beispiel hierfür sind die sogenannten "Streamer". Hierbei handelt es sich um fingerförmige Ausläufer, die z.B. aus äquatorialen bis hinauf zu gemäßigteren geographischen Breiten reichen und in deren Folge Luftmassen abgereicherten Ozons immer wieder auch bis nach Europa hinein transportiert werden. Solche Strukturen sind variabel auf Zeitskalen von nur wenigen Tagen und können so eine erhebliche Erhöhung z.B. der den Boden erreichenden biologisch schädigenden solaren UV-Strahlung von einem Tag auf den anderen bedingen (Abbildung 6). Damit verbunden ist eine rapide Erhöhung des Sonnenbrandrisikos innerhalb nur weniger Stunden. Satellitengetragene Instrumente ermöglichen es, derartige Phänomene sorgfältig zu identifizieren und die Bevölkerung frühzeitig vor dem Herannahen solcher ozonabgereicherter Luftmassen, besonders im Sommer, zu warnen (BITTNER und ERBERTSEDER, 2000).

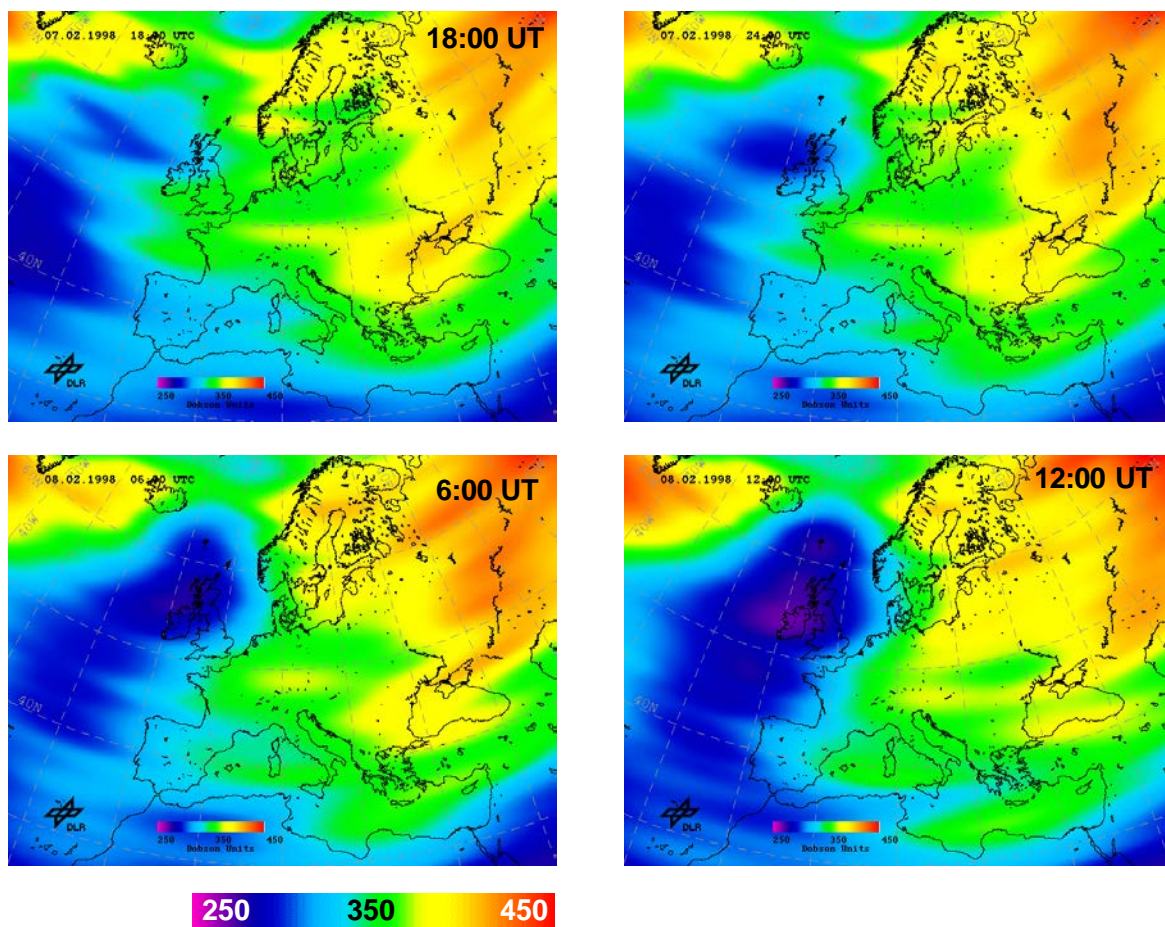


Abb.: 6 Zeitliche Entwicklung der Ozonsäulenkonzentration (in Dobson Einheiten*) über Europa vom 7.-8. Februar 1998 im Abstand von jeweils 6 Stunden. Blaue Färbung bedeutet niedrige Ozonsäulenkonzentration. Innerhalb weniger Stunden nimmt die Ozonschicht über den britischen Inseln ab.

* Eine Dobson Einheit entspricht einer Ozonschicht von einem hundertstel Millimeter Dicke bei 0 Grad Celsius und 1013 Hektopascal

Beobachtung der Landoberfläche

Der Beobachtung der Landoberfläche kommt traditionell eine besondere Bedeutung zu. Informationen zu Topographie, Art und Zustand der Vegetation, Landnutzung, Urbanisierung usw. in verschiedenster Auflösung in Zeit und Raum werden für eine Vielzahl von Fragestellungen benötigt.

Zur möglichst präzisen Erfassung der Topographie werden heute vermehrt satellitengetragene Radarsysteme eingesetzt, Diese tasten die Erdoberfläche mit elektromagnetischen Wellen im Zentimeter- und Dezimeterbereich (Mikrowellen) kontinuierlich ab. Aus Laufzeit und Intensität des Radarechos kann dann – ganz vereinfacht dargestellt – auf die Topographie geschlossen werden (z.B. BAMLER UND HARTL, 1998). Abbildung 7 zeigt das auf diese Weise abgeleitete Relief Bayerns (rechts). Dem Bild wurden zur Orientierung Landesgrenzen (schwarz), Städte (rot) und Seen (blau) überlagert. Deutlich sind Strukturen wie etwa das Nördlinger Ries nordwestlich von Augsburg zu erkennen. Der Ausschnitt links zeigt das Gebiet um den Ammersee und Starnberger See (ohne Überlagerungen). Der Ausschnitt rechts oben zeigt das Gebiet um die Mainschleife bei Volkach, im Hauptbild durch das rote Quadrat gekennzeichnet (aus ROTH und KNÖPFLE, 2000). Mit dieser Technik werden heute Auflösungen von typischerweise 30 Metern in der Horizontalen und 6 bis 10 Meter in der Vertikalen erreicht.

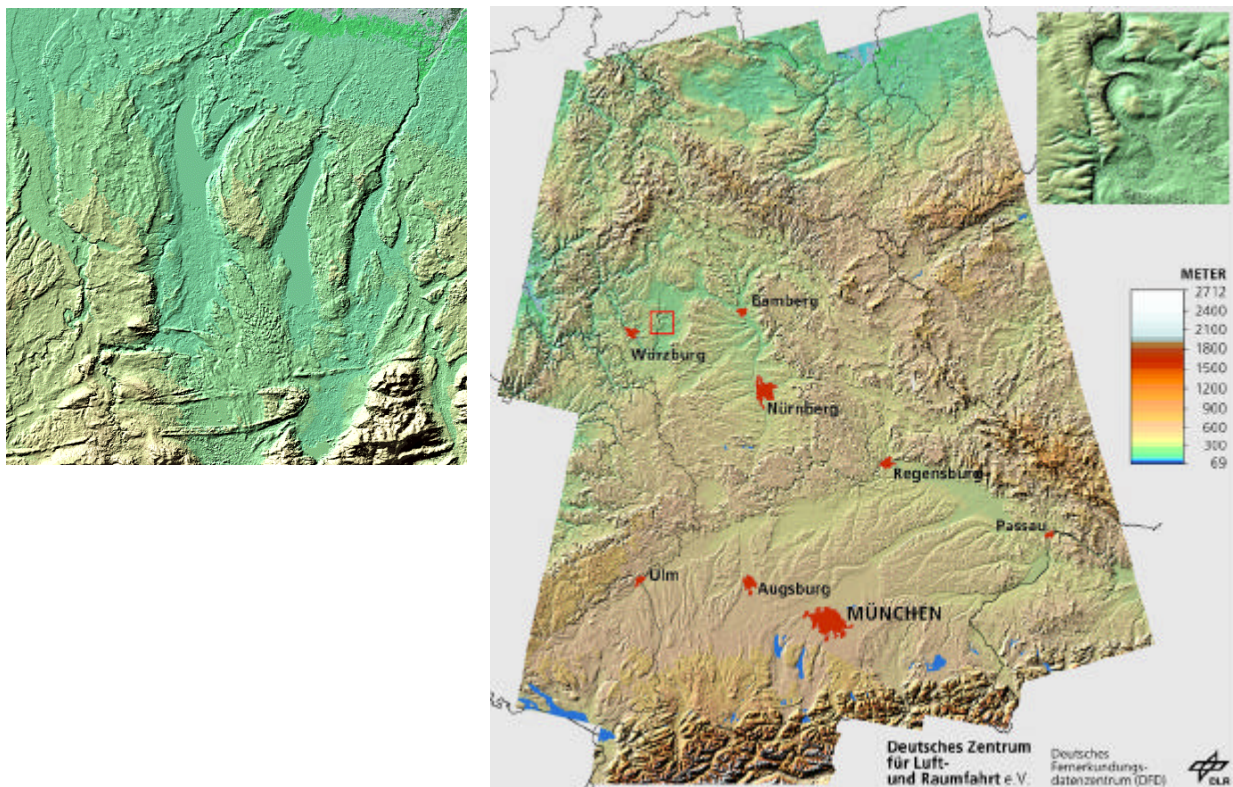


Abb.: 8 Digitales Höhenmodell von Oberbayern, erstellt aus Daten der Satelliten ERS-1 und ERS-2

Landbeobachtende Satelliten werden insbesondere auch eingesetzt für das Katastrophenmanagement. So zeigt Abbildung 9 beispielsweise die Situation während der Elbeflut im August 2002, wie sie mit dem Satelliten Landsat-7, ETM+, zwischen Dresden und Havelberg registriert wurde. Das linke Bild

zeigt die Situation am 14. August 2002, rechts ist der gleiche Ausschnitt für den 20. August dargestellt. Wasser ist blau und Vegetation rot eingefärbt. Die enormen Ausmaße der Flut sind klar zu erkennen.

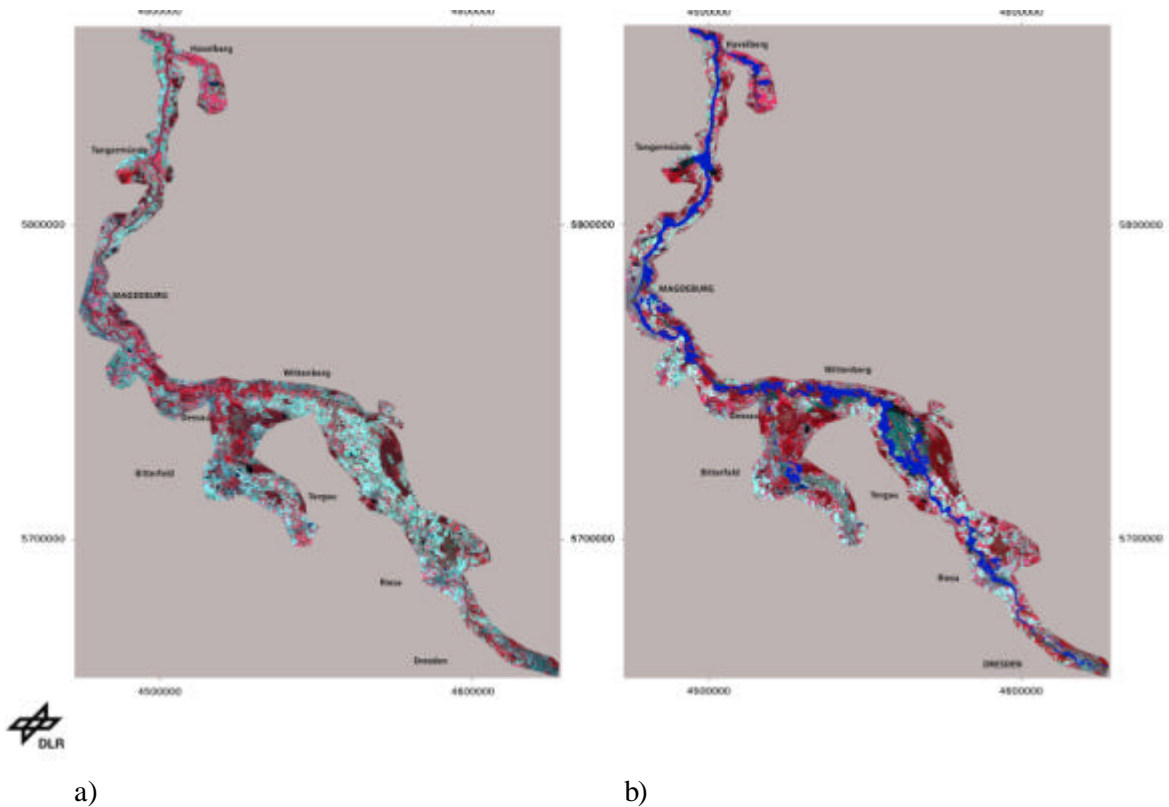
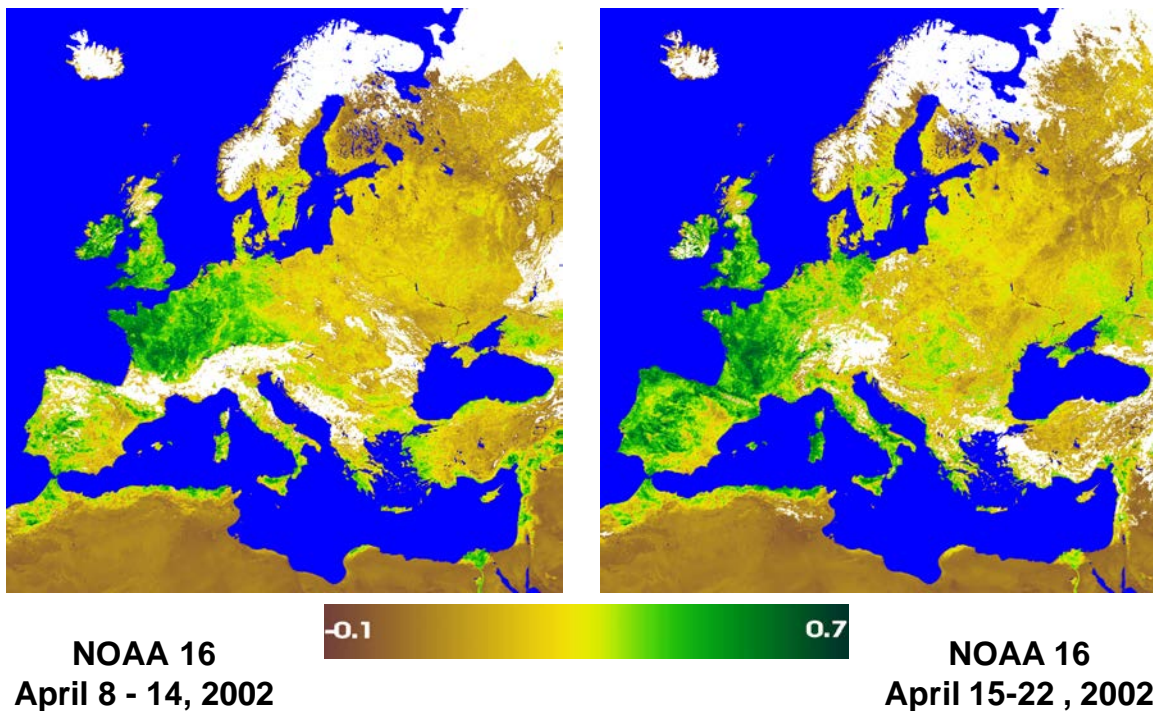


Abb.: 9 Ausschnitt einer Satellitenaufnahme von Landsat-7, ETM+, am 14.08.2002 (a) und 20.08.2002 (b), die den Elbflußlauf von Dresden bis Havelberg zeigt. Wasserflächen sind blau und Vegetationsflächen rot eingefärbt.

Die Landoberfläche steht in ständiger Wechselwirkung mit der Atmosphäre. So beeinflussen beispielsweise Änderungen der Oberflächenalbedo sowie der Oberflächenrauigkeit z.B. durch das Abholzen des Regenwaldes unmittelbar die Strömungs- und Zirkulationsmuster der Atmosphäre. Modifikationen der Vegetationscharakteristika (Zustand, Dichte, Typ) etwa durch die Änderung der Landnutzung und der Landbedeckung bewirken zudem eine Modifikation des Gas- und Feuchte austausches mit der Atmosphäre. Dies wiederum verändert den globalen Wasserzyklus der Erde (z.B. DICKINSON, 1995). Die kontinuierliche Beobachtung der globalen terrestrischen Biosphäre wird heute vornehmlich mit Satellitensensoren mittlerer horizontaler Auflösung (ca. 250 Meter bis 1 Kilometer) vorgenommen. Vorkommen, Entwicklung und Dynamik aktiven Chlorophylls sind Informationen, die für die Identifikation und Bewertung der fortschreitenden und teilweise anthropogen verursachten Desertifikation und erosiver Prozesse in ariden und semiariden Gebieten aber auch bei der Quantifizierung zunehmender Landversiegelung beispielsweise auf Grund einer zunehmenden Verstädterung beobachtet werden müssen. Mit Hilfe dieser Informationen können auch frühzeitig Dürren erkannt und Abschätzungen der Biomasseproduktion und somit zum CO₂-Haushalt gemacht werden (z.B. PREUSSER et al., 2000). So zeigt Abbildung 10 die Verteilung des sogenannten „Normalized Difference Vegetation Index, NDVI“, ein Mass für die „Grünheit“, also den Zustand der Vegetation über Europa, für die erste und zweite Hälfte des April 2002, wie sie mittels des AVHRR-

Instrumente an Bord des amerikanischen NOAA-16-Satelliten abgeleitet wurde. Die Ausdehnung des Frühlings in diesem kurzen Zeitraum wird klar an einer Zunahme des aktiven Chlorophylls erkannt. Weiße Flächen bezeichnen schneebedeckte Gebiete oder Wolken.



a) b)
Abb.: 10 Verteilung des Vegetationsindexes (NDVI) über Europa während des Zeitraumes vom 8.-14. April 2000 (a) und 15.-22. April 2002 (b). Grün bedeutet hohe Chlorophyllaktivität.

Aufbauend auf diesen Messdaten kann eine Kartierung der Landnutzung wie z.B. landwirtschaftlicher Flächen, Weideland, Wälder, Siedlungsgebiete, sowie deren zeitliche und räumliche Änderung routinemässig vorgenommen werden. So zeigt Abbildung 11 beispielsweise die Landnutzung in Deutschland, wie sie unter Verwendung von Daten des deutschen MOS (Multispectral Optical Sensor)-Instrumente an Bord des indischen IRS-P3-Satelliten erstellt wurde (ARNDT, 2001).

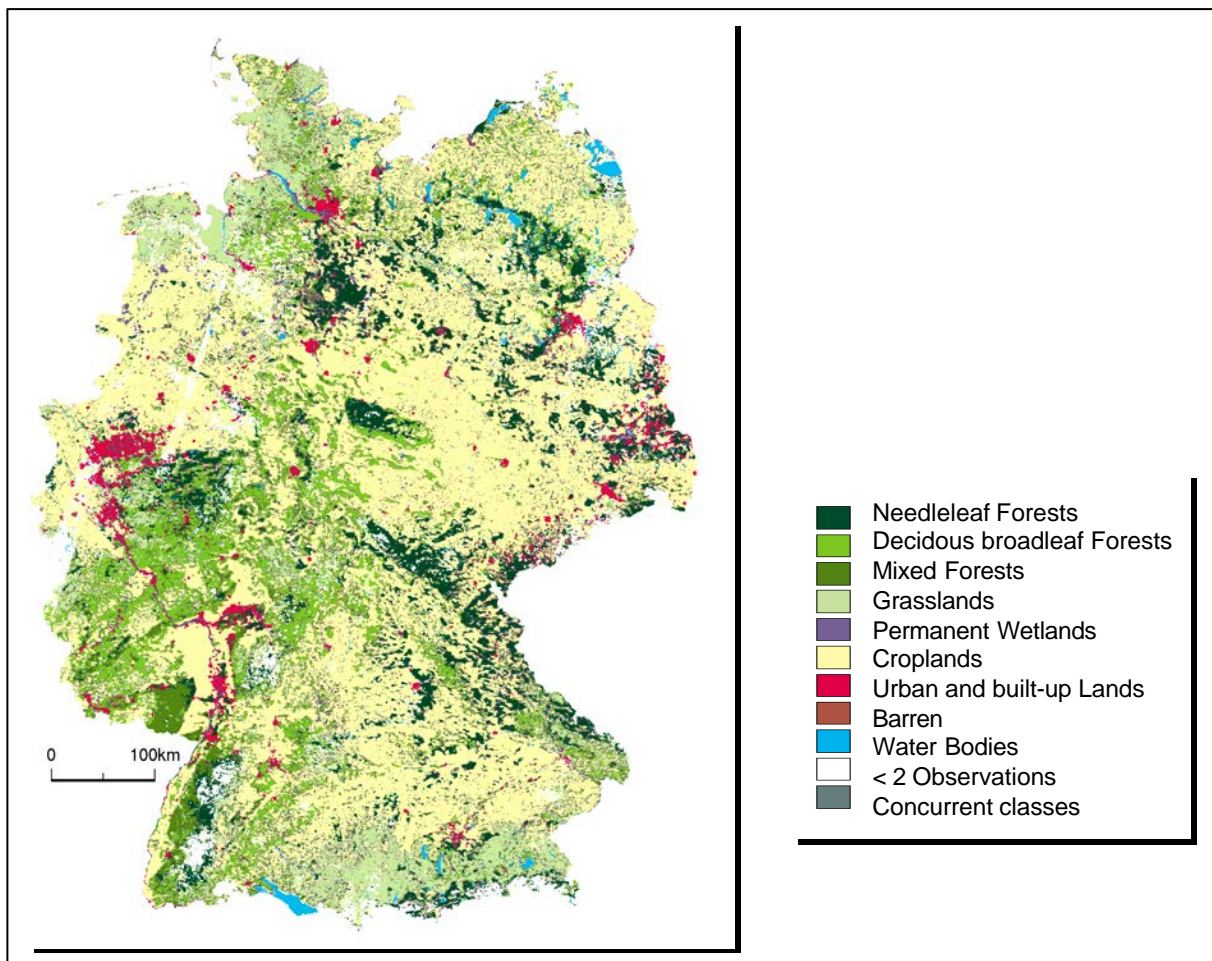


Abb.: 11 Klassifikation der Landnutzung in Deutschland auf der Grundlage von MOS-Daten. Ausgewiesen werden Nadelwald, Laubwald, Mischwald, Grasland, Feuchtgebiete, Ackerland, Städte und bebaute Flächen, vegetationslose Gebiete und Wasserflächen

3. Zusammenfassung

Satelliten werden heute zur Beobachtung verschiedenster Prozesse in unserer Umwelt eingesetzt. Hierzu gehören Gebiete wie hydrologischer Zyklus in der Atmosphäre, atmosphärische Strahlung und Wolken, Spurenstoffkreisläufe und dynamische Prozesse sowie Landoberflächenprozesse und ozeanische Vorgänge. Fernerkundungsdaten liefern damit wesentliche Informationen für verschiedene Bereiche etwa in der Wissenschaft, der Wettervorhersage, der Umweltpolitik und der Landschafts- und Raumplanung. Im Vergleich zu herkömmlichen Beobachtungsmethoden zeichnet sich die Satellitenfernerkundung dadurch aus, daß sie die Erfassung großer Flächen auch in schwer oder nicht zugänglichen Gebieten ermöglicht. Zudem liefert sie standardisierte und kontinuierliche Messreihen. Beide Aspekte sind von erheblicher Bedeutung beispielsweise für die Untersuchung globaler natürlicher und anthropogener Umweltveränderungen. Satelliten eignen sich dadurch prinzipiell auch für die Überwachung von Umweltschutzkonventionen.

Danksagung: Ich danke den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR in Oberpfaffenhofen für die Zurverfügungstellung von Bildmaterial.

4. Literatur

- Arndt, M.: Landbedeckungskartierung von Deutschland auf der Grundlage einer optischen Satellitendaten-Zeitreihe, Diplomarbeit, Universität zu Köln, Geographisches Institut, 2001
- Bamler, R. und P. Hartl: Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, Vol. 14, pp. 1-54, 1998
- Bittner, M., D. Offermann, H.H. Gräf, M. Donner und K. Hamilton: An 18-year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 64, pp. 1147-1166, 2002
- Bittner, M. und T. Erbertseder: The STREAMER-Project: An overview, in *Air Pollution 2000*, pp. 472-482, WIT Press Southampton, Boston, 2000
- Bittner, M., S. Dech und W. Balzer: Ozonkartierung per Satellit, *Spektrum der Wissenschaft*, Vol. 9, pp. 54-62, 1998
- Brasseur, G.P., J.J. Orlando und G.S. Tyndall (Eds.): *Atmospheric Chemistry and Global Change*, Oxford University Press, New York, 1999
- Coenen, R. und J. Kopfmüller: Risiko Klima – Der Treibhauseffekt als Herausforderung für Wissenschaft und Politik, Campus Verlag, Frankfurt, 1997
- Crosignani, P., A. Borgini, E. Cadum, D. Mirabelli und E. Porro: New directions: air pollution-how many victims?, *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 4705-4706, 2002
- Dickinson, R.E.: Land Surface, in *Climate System Modeling*, K.E. Trenberth (Ed.), pp. 149-172, Cambridge University Press, 1995
- ESA, European Space Agency: Earthwatch Programme GMES Services Element, PB-EO 25, rev.1, Frascati, 2002
- Graedel, T.E. und P.J. Crutzen: *Atmosphere, Climate, and Change*, Scientific American Library, New York, 1997
- Hasselmann, K.: Modellierung natürlicher und anthropogener Klimaänderungen, *Physikalische Blätter*, Vol. 55, pp. 27-30, 1999
- Morain, S.A. und A.M. Budge: *Earth Observing Platforms and Sensors, The Manual of Remote Sensing*, 3rd Edition, Volume 1, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1997
- Preusser, C., S. Dech, P. Tungalagsaikhan, T. Erbertseder und R. Meisner: Ableitung biophysikalischer Parameter aus NOAA/AVHRR-Daten, *Petermanns Geografische Mitteilungen*, Vol. 144, pp. 28-35, 2000
- Roth, A. und W. Knöpfle: Digitale Höhenmodelle aus Radarinterferometrie, *Petermanns Geografische Mitteilungen*, Vol. 144, pp. 4-5, 2000
- Schmidt, U.: Arktisches Ozon und PSC's, *Promet*, Vol. 2-4, pp. 106-113, 1991
- Stern, A. et al.: *Fundamentals of air pollution*, 2nd Ed., Academic Press, Orlando, 1984
- WMO, World Meteorological Organization: WMO/CEOS Report on a Strategy for integrating satellite and ground-based observations of ozone, Report No. 140, Geneva, 2000
- WMO, World Meteorological Organization: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998*, Report

No. 44, Geneva, 1999
WMO, World Meteorological Organization: The Global Climate System Review, Report No. 856,
1998