

WETTERSATELLITENBILD UND KLIMAÖKOLOGISCHE ZONIERUNG

Ein kritischer Beitrag zur Bedeutung des Satellitenbildes für geographische Fragestellungen am Beispiel Tropisch-Westafrikas¹⁾

Mit 8 Abbildungen und 4 Luftbildern im Text und 2 Beilagen (V+VI)

WILHELM LAUER und TONI BREUER

Summary: Climatic vegetation zones and weather satellite pictures—a critical examination of the significance of satellite pictures in the solution of geographical questions.

This work examines the extent to which the daily radio photos from weather satellites can be used by geographers for non-meteorological purposes. An interpretation of satellite pictures oriented to terrestrial structures can hardly be based on conventional methods, unlike the conventional air photograph which has long been indispensable as a tool of geographical research. The enormous height at which satellites fly and the consequently limited amount of disaggregation possible with weather satellite pictures permit only investigations which differentiate shading. Thus contrast is the most important criterion for the interpretation of satellite pictures. All shadings are only a relative expression of differences.

In order to arrange the tonal differences on an air photo clearly into specific ranges of a density scale, a so-called equidensity film was used. This enables a photograph to be split up into areas of equal density. Using this method it was possible to identify, on satellite photographs of West Africa, the stepwise sequence of various shading belts between the Sahara and the rain forests near the Equator, almost corresponding to lines of latitude. There is here an obvious parallel to the relevant climatic zones.

Further work was carried out on selected individual structures shown on the satellite pictures of the area studied.

The last step was to test the extent to which the pictures could show seasonal changes in this area. Photo extracts of the Sahel Zone are presented to show changing seasonal rhythm.

Seit künstliche Satelliten die Erde umkreisen, gibt es eine neue Kategorie von Luftbildern, die rasch zum anerkannten und unentbehrlichen Hilfsmittel verschiedener Forschungszweige geworden sind. Von der „konventionellen“ Luftaufnahme unterscheidet sich das Satellitenbild²⁾ durch die Flughöhe des Kamera-Trägers. Aus der enormen Distanz, die für eine Kreisbahn um die Erde notwendig ist, resultiert das wesentliche Charakteristikum des SB, der bis dahin noch nie

möglich gewesene Blick auf die Erde von einem außerirdischen Standpunkt aus.

Von daher wird verständlich, daß das SB sich in erster Linie als analytisches Arbeitsmittel für große Fragestellungen und Überblicke anbietet. Für Detailuntersuchungen wird man in der Regel auf konventionelle Luftbilder zurückgreifen, denn der Vorteil globaler Bilderfassung und damit einer kleinstufigen Aufnahme muß erkauft werden durch ein geringes Auflösungsvermögen der Bilder. Je größer die noch eben erfassbaren Flächendimensionen werden, desto weniger räumliche Verbreitungsmuster lassen sich unterscheiden. Dadurch kann eine detaillierte Interpretation wesentlich erschwert bzw. unmöglich werden. Im allgemeinen wird sich das SB nur für Darstellungszwecke eignen, die in der Größenordnung von Weltatlas-Karten liegen. Der Maßstab der SB ist wesentlich abhängig von der Flughöhe, die von Satellit zu Satellit erheblich schwanken kann, so etwa zwischen 130 km, dem Perigäum der US-amerikanischen Mercury-Raumschiffe, und 36 050 km, der Höhe des geostationären Wettersatelliten ATS 3.

Von der Aufnahmetechnik her müssen zwei Bildtypen unterschieden werden: Film-Bild und Funk-Bild. Das Film-Bild wird auf der Basis der üblichen Photographie gewonnen, wobei man sich auf die längst erprobten Materialien und Methoden der herkömmlichen Luftbildphotographie stützen kann. Voraussetzung ist die Rückkehr des unzerstörten Filmmaterials zur Erde.

Im anderen Falle werden die Aufnahmen nach dem TV-Prinzip von einer vollautomatisch arbeitenden Kamera aufgenommen und auf dem Funkwege zur Erde übermittelt. Das Film-Bild wird in der Regel aus bemannten Raumkapseln individuell aufgenommen. Aus der relativ niedrigen Flughöhe der erdumkreisenden Flüge resultiert ein vergleichsweise großer Maßstab. Die Aufnahmen aus Gemini-Raumschiffen z. B. unterschreiten selten den Maßstab 1:3 Mill. In Verbindung mit leistungsstarken Objektiven erreichen sie sogar solche bis ca. 1:250 000 (BODECHTEL/GIERLOFF-EMDEN 1969).

Von Satelliten sowjetischer Bauart ist bekannt, daß neben bemannten Raumkapseln auch Wettersatelliten (z. B. einzelne Satelliten der Kosmos-Serie) mit Film-Bildern arbeiten, die durch Abwurf bzw. Landung des

¹⁾ Diese Arbeit ist Teil eines Forschungsprojektes, das am Geographischen Institut Bonn unter Leitung von Prof. Dr. W. Lauer durchgeführt wird. Die Verfasser danken dem Herrn Minister für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen – Landesamt für Forschung – für die freundliche Unterstützung.

²⁾ Im folgenden immer abgekürzt als SB.

Satelliten „geerntet“ werden. Infolge der sehr sparsamen Veröffentlichung entsprechender Aufnahmen sind sie aber vorläufig für die internationale wissenschaftliche Forschung nicht zugänglich, obwohl sie wegen ihrer (im Vergleich zu amerikanischen Wettersatelliten) sehr niedrigen Umlaufbahnen (z. B. Kosmos 122: Apogäum 654 km; Perigäum 585 km) über ein beträchtliches Auflösungsvermögen verfügen (NEWELL et al. 1969).

Die überwiegende Mehrzahl der z. Z. öffentlich zugänglichen Aufnahmen wird von amerikanischen Satellitensystemen produziert. Auf sie stützen sich auch die vorliegenden Ausführungen.

Das TV-Bild gehört zu einer völlig anderen Satellitenbild-Gattung. Die Satelliten der TIROS-Serie (*Television and Infra Red Observation Satellite*) wurden einzig zu dem Zweck konstruiert, für die meteorologische Forschung Aufschluß über die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre zu geben. Dabei kommt den Bildern der Wolkenverteilung auf der Erde besondere Bedeutung zu. Die TIROS-Satelliten bilden die erste von inzwischen vier Generationen, die unter der Bezeichnung „Wettersatelliten“ zusammengefaßt werden.

Das Wettersatellitenbild (WSB) kann in Anbetracht der meteorologischen Fragestellung auf hohes Auflösungs- und Differenzierungsvermögen verzichten. Der Maßstab des aus großen Höhen aufgenommenen Bildes bewegt sich zwischen rd. 1:14 Mill. (Nimbus) und 1:18 Mill. (ITOS). Er beträgt damit nur etwa $\frac{1}{10}$ (!) des Abbildungsverhältnisses der meisten Astronautenaufnahmen. Es ist einleuchtend, daß die daraus resultierende geringe Auflösung die WSB für eine nicht-meteorologische Nutzung nur noch bedingt als geeignet erscheinen läßt. Dennoch wurde schon früh auf diese Möglichkeit hingewiesen (BIRD/MORRISON 1964 a) und nach Vorliegen der ersten TIROS-Aufnahmen bereits ein Bild-Atlas zusammengestellt (BIRD et al. 1964 b). Auch die Arbeit von MERIFIELD et al. (1966) ist in dieser Hinsicht als wegweisend anzusehen. Enthusiasmus ist allerdings fehl am Platze. Das bestätigt WOBBERs nüchterne Feststellung: „Little more than confirmatory data can be collected, and the value of this image for earth surface studies is limited.“³⁾

Trotz dieser z. T. nicht unerheblichen Einschränkungen stützt sich die vorliegende Untersuchung im wesentlichen auf die Analyse von WSB⁴⁾. Nur die Wettersatelliten bieten bisher in räumlicher wie in zeitlicher Hinsicht eine lückenlose Erfassung der Erde. Die damit gegebene Materialfülle ermöglicht gleichzeitig den vielfachen Vergleich der Bilder untereinander, wodurch grobe Fehlinterpretationen vermieden werden können. Zudem darf erwartet werden, daß das TV-Bild gerade im Hinblick auf die zunehmende tech-

nische Perfektionierung der zukünftigen Satelliten immer bessere Chancen hat. So ist für 1972 ein Satellitenprogramm für nicht-meteorologische Zwecke geplant (ERTS – *Earth Resources Technology Satellite*), dessen Start unmittelbar bevorsteht.

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Material wurde ausnahmslos durch das Institut für Weltraumforschung in Bochum zur Verfügung gestellt⁵⁾. Es handelt sich um Aufnahmen der US-Wettersatelliten Nimbus 2, ESSA 6 und ITOS 1. Um die Abbildungsverhältnisse des SB in ihrer Größenordnung besser verdeutlichen zu können, sollen die wichtigsten photogrammetrischen Parameter wenigstens kurz angegeben werden.

Ist m_0 der Bildmaßstab im Bildmittelpunkt M, so folgt für

$$\text{Nimbus 2 } m_0 = \frac{1}{1,37 \times 10^7}$$

$$\text{ESSA 6 } m_0 = \frac{1}{1,78 \times 10^7}$$

$$\text{ITOS 1 } m_0 = \frac{1}{1,82 \times 10^7}$$

Für die Berechnung des im Abstand r' von M (längs r') bestehenden Bildmaßstabes m_b , hat REUSS (1968) eine Näherungsformel entwickelt. Danach beträgt z. B. in einer ITOS-Aufnahme in 5 cm Entfernung vom Bildmittelpunkt $m_b = 0,84 m_0$. In 9 cm Abstand sind es nur noch $0,54 m_0$. Unter Berücksichtigung des Bildmaßstabes m_0 sowie der Anzahl der Bildzeilen ergibt sich für den Bildmittelpunkt folgendes Auflösungsvermögen/Zeile:

Nimbus 2	2,74 km
ESSA 6	3,56 km
ITOS 1	3,70 km

Das bedeutet also, daß eine ITOS 1-Aufnahme eine Fläche von ca. 4 km² im Idealfall soeben noch als Punkt darstellen könnte. Dem mit wachsender Entfernung vom Bildmittelpunkt abnehmenden Maßstab entspricht ein ebenfalls nachlassendes Auflösungsvermögen. Bezogen auf das Beispiel der ITOS 1-Bilder wird z. B. im Abstand 5 cm vom Bildzentrum nur noch eine Auflösung von 4,45 km erzielt. In den Bild-ecken (9 cm) sind es 6,85 km.

Allerdings wird das errechnete Auflösungsvermögen nur dann erreicht, wenn zwei benachbarte Bildzeilen jeweils deutlich kontrastieren. In der Praxis sind aber überwiegend graduelle Übergänge anzutreffen. Aus

³⁾ WOBBER (1968) S. 28 zu einem Nimbus-Bild von West-Nevada und Kalifornien.

⁴⁾ Im folgenden immer vereinfacht abgekürzt als SB.

⁵⁾ Unser Dank gilt in erster Linie Herrn Direktor H. Kaminski, der Einsicht in das gesamte archivierte Filmmaterial gestattete. In dem Bochumer Institut wird beim Bildempfang mehr Wert gelegt auf die Erfordernisse einer an terrestrischen Strukturen orientierten Interpretation, da eine meteorologische Auswertung der Bilder nicht erfolgt.

dem begrenzten Auflösungsvermögen ergibt sich eine mehr oder weniger einschneidende, quantitative Beschränkung hinsichtlich der noch differenzierbaren Strukturen. Bei den Bildern von Wettersatelliten ist aufgrund dieser Voraussetzung z. B. keine direkte Releiefdarstellung der Erdoberfläche möglich.

Die Interpretationsmethodik

Die Analyse von SB kann deshalb auch nur bedingt anknüpfen an die Methodik der konventionellen Luftbild-Interpretation. Es entfällt sowohl die stereoskopische Auswertung als auch die Untersuchung der Textur. Die geometrische Musterung von Landflächen, das typische Erkennungsmerkmal menschlicher Kulturaktivität, wird z. B. im SB nicht sichtbar. Einziger Anhaltspunkt einer differenzierenden Untersuchung bleibt die Tönung.

Die SB-Interpretation kann allerdings (genau wie im Luftbild) bei der Betrachtung der Tönung phänologische Aspekte berücksichtigen, d. h. die unterschiedliche Abbildung desselben Objektes zu verschiedenen Zeitpunkten. Dieser Vergleich engt jedoch die Skala des möglichen Informationsgehaltes eines Grautons nicht ein, sondern erweitert sie dahingehend, daß absolute Angaben nur noch für einen sehr weiten Spielraum gemacht werden können.

Hell bilden sich z. B. ab: Wolken, Eis, Schnee, Salzseen, gelbe Sandwüsten, isolierte Dünenfelder, Trockentäler.

Dunkel erscheinen: alte geologische Formationen sowie vulkanische Decken (in vegetationslosen oder -armen Gebieten), Gebiete erhöhter Bodenfeuchte (Bewässerungsflächen in ariden Räumen, Flußniederungen, Sümpfe), Areal dichter Baum- und Strauchvegetation.

Aber auch diese Aussagen dürfen nicht ohne Einschränkungen bleiben. Fast jede Tönung kann bis zur Wertlosigkeit relativiert werden, indem z. B. Salzseen von einer helleren Umgebung nicht mehr zu unterscheiden sind, ebenso wie etwa Flußniederungen in Gebieten dichter Vegetation. Da alle Tönungen nur einen relativen Aussagewert besitzen, erweist sich letztlich der Kontrast als wichtigstes Kriterium für die SB-Interpretation. Damit kommt aber auch der Gradation des Filmmaterials bzw. Fotopapiers eine erhebliche Bedeutung zu.

Um Tönungsunterschiede im SB möglichst objektiv zu erfassen, erscheint eine Hilfe durch den sog. „Äquidensiten“-Film⁶⁾ höchst willkommen. Er ermöglicht es, eine beliebige photographische Vorlage in Flächen oder Linien gleicher Dichte, die Äquidensiten, zu zerlegen (RANZ/SCHNEIDER 1970). Nach Eichung an einem Graukeil kann jede Negativ-Vorlage in Äquidensiten der gewünschten Dichte und Breite zerlegt werden.

Der einzige Vorbehalt, der für die Benutzung des Contour-Films zu beachten ist, ergibt sich aus der Möglichkeit, Lage und Breite der Äquidensiten frei wählen zu können, so daß man Grenzen erhält, die u. U. einem fließenden Übergang in der Bildvorlage nicht entsprechen.

Für die Identifizierung linearer Elemente (z. B. Flußniederungen) ist das menschliche Auge hingegen sehr viel besser geeignet als der unbestechlich „messende“ Film, dem eine integrierende Erfassung synoptischer Strukturen, soweit sie nicht eine einheitliche Tönung aufweisen, normalerweise unmöglich ist.

Wenn der Äquidensitenfilm in erster Linie dazu dient, die vorhandenen Grauwerte im Luftbild eindeutig bestimmten Bereichen der Grauskala zuzuordnen, so enthebt er den Bearbeiter jedoch nicht der Mühe, die so ermittelten Tönungsdifferenzen zu interpretieren. Dabei muß der besonderen Natur des SB, d. h. vor allem des TV-Bildes, Rechnung getragen werden. Für die angeschnittene Frage bedeutet das, daß geringe Tönungsunterschiede im SB zufälliger Natur sein können. Entsprechende Fehlinterpretationen werden aber weitgehend ausgeschlossen durch den Vergleich von jahreszeitlich und regional entsprechenden Bildern. Dieser dauernde und vielfache Vergleich der SB untereinander ist eine fundamentale Voraussetzung für die Interpretation. Ein weiterer Schritt besteht darin, die als eindeutig erkannten Strukturen zu identifizieren. Auch das ermöglicht nur der Vergleich, und zwar zum Teil mit der vorhandenen landeskundlichen Literatur, vor allem aber mit Kartenvorlagen. Dabei leistete der ZEISS-Luftbild-Umzeichner (LUZ) gute Hilfe.

Er gestattet mit relativ einfachen Mitteln, das SB für Teilbereiche (d. h. nur für Teilstrecken) zu entzerren. Die Dimension dieser Ausschnitte muß so gewählt sein, daß die Verzeichnung durch die Erdkrümmung vernachlässigt werden kann. Aufgrund der meist geringen Anzahl von Paßpunkten sowie deren ungenauer Begrenzung kann mit diesem Verfahren auch für Teilräume keine absolute geometrische Genauigkeit erreicht werden. Für den Vergleich der im SB sichtbaren Einzelstrukturen mit dem vorhandenen Kartenmaterial hat sich diese Methode jedoch als hinreichend genau erwiesen.

Als bestes konventionelles Hilfsmittel zur Identifizierung der Objekte hat sich die möglichst großmaßstäbige topographische Karte erwiesen (die jedoch nicht für alle Gebiete zur Verfügung steht). Die an sich recht naheliegende Hinzuziehung thematischer Karten war weniger erfolgreich. Eine großmaßstäbige Karte der Vegetation z. B. wird in der Regel Vegetationseinheiten nach Kriterien ausscheiden, die sich in der Generalisierung des SB nicht wiedererkennen lassen. Eine kleinmaßstäbige Vegetationskarte ist hingegen so generalisiert, daß sie in den Konturen mit Hell-Dunkel-Strukturen des SB kaum Gemeinsamkeiten mehr zeigt. Ähnliches gilt auch für geologische bzw. Bodenkarten, wo beispielsweise Sedimente bzw. Bo-

⁶⁾ „Contour“-Film der Fa. AGFA-GEVAERT, Leverkusen.

dentypen erst ab einer gewissen Mächtigkeit kartiert werden. Schließlich wird kaum jede kleinmaßstäbige thematische Kartierung auf einer Reduktion der wirklich erfaßten Gegebenheiten des fraglichen Gebietes basieren. Deshalb hat sich für die vorliegende Untersuchung auch die Kombination verschiedener thematischer Karten zur Identifizierung von Einzelstrukturen als nicht mehr ergiebig erwiesen. Es bestehen sowohl zwischen den jeweiligen Karten als auch zwischen ihnen und dem SB teilweise erhebliche Abweichungen, die durch die unterschiedlichen Abgrenzungskriterien erklärt werden müssen. Hier kann aber das SB das günstigste Generalisierungsmuster liefern!

Auch konventionelle Luftbilder eignen sich für einen Vergleich mit SB nur bedingt, da die Vielzahl von Tönungsstufen sich nicht zu einem generalisierten Bild zusammenfügen läßt, wie es das SB in synoptischer Weise vollzieht. Im übrigen weist aber auch ein Mosaik von Einzelluftbildern zahlreiche Tönungsstufen von Bild zu Bild auf, die bei einer Verkleinerung auf SB-Maßstäbe objektive Verteilungsmuster verfälschen. Anders verhält es sich mit Astronauten-Aufnahmen, die aufgrund ähnlicher Aufnahmebedingungen sowie kleinerer Maßstäbe durchaus mit dem SB vergleichbar sind⁷⁾.

Problemstellung

Wenn man annimmt, daß ein Nebeneinander von Hell-Dunkel-Tönungen im SB interpretierbare geographische Fakten widerspiegelt, so kann man erwarten, daß sich

1. zonale, gürtelförmige Strukturen abbilden, die durch ein großräumiges Naturgeschehen bedingt sind (wie z. B. klimaökologische Gürtel oder Vegetationszonen),
2. bei einem Vergleich von in unterschiedlichen Jahreszeiten aufgenommenen SB ähnliche Kontraste ergeben, die Aussagen über den saisonalen Wandel der Landschaftsphysiognomie zulassen. Dies ist besonders für ein Gebiet zu erwarten, in dem der jahreszeitliche Gegensatz sehr auffällig zutage tritt.

Als Testgebiet für die Überprüfung beider Thesen wurde das tropische Westafrika ausgewählt, wo 1. die breitenparallele Abfolge der klimabedingten Vegetationszonen in klassischer Weise ausgeprägt ist und 2. zwischen tropischem Regenwald und Wüste die wechselfeuchten Übergangszonen der laubwerfenden Wälder und Savannen einem deutlichen jahreszeitlichen Wandel in ihrer Physiognomie unterworfen sind,

⁷⁾ Diese Aufnahmen konnten aus drucktechnischen bzw. Kostengründen nicht in die vorliegende Arbeit aufgenommen werden. Die Bilder sind aber u. a. veröffentlicht in NASA 1967 und 1968. Lage und Anzahl der für diese Untersuchung hinzugezogenen Gemini-Aufnahmen sind aus Beilage V; c, ersichtlich.

den man als Tönungsdifferenzierungen im SB erwarten kann.

Als Interpretationsgrundlage dient zunächst eine Aufnahme von ITOS 1 (Beilage V; a). Sie wurde am 3. 3. 1970 um 14.49 GMT über Westafrika aufgenommen. Die Koordinaten des Bildmittelpunktes sind 16°50N; 0°06W. Das Bild wurde nach den von DUMITRESCU 1968 entwickelten Formeln mit einem geographischen Koordinatennetz belegt⁸⁾.

Dank der großen Flughöhe zeigt die Aufnahme einen Bereich, der in N-S-Richtung fast die gesamte westliche Sahara über die Sudanzone bis zur Guinea-Küste umfaßt, in W-E-Richtung das Gebiet von der Atlantikküste bis zum Tschadsee (vgl. Beilage V; c). Man erkennt diesen als dunkle, deutlich abgrenzbare Fläche am Bildrand rechts unten. Die Westküste ist am linken Bildrand bis etwa 17°N zu verfolgen, indem das Land heller als die dunkle Meeresfläche erscheint. Das ist weiter südlich nicht mehr der Fall. Erst ab 10°N wird der Verlauf der Guinea-Küste wieder durch eine dem Land aufsitzende Wolkendecke markiert, die über dem Meer fehlt. Sie bricht nach N mit einem außergewöhnlich scharfen Rand ab.

Das Bild weist gewisse Mängel auf, die bei der Bildübertragung durch Rauscheinbrüche verursacht wurden. Man erkennt sie als mehr oder weniger breite, zeilenparallele körnige Streifen, deren stärkster etwa den Bildmittelpunkt schneidet. Insgesamt sind sie aber nicht sehr intensiv ausgebildet, so daß sich daraus keine wesentliche Beeinträchtigung für die Bildinterpretation ergibt. Die Störungen sind bedingt durch die extrem niedrige Elevation des Satelliten zum Zeitpunkt des Bildempfangs.

Satellitenbild und Landschaftsgürtel in Westafrika

Das vorliegende Satellitenbild (Beilage V; a) wurde in der Trockenzeit aufgenommen, die sich in der Sudanzone im März/April ihrem Ende nähert. Das bedeutet für die vorliegende Aufnahme: Der Boden ist völlig ausgetrocknet, bildet sich relativ hell ab und bietet damit eine Gewähr für möglichst deutliche Kontraste zu dunkler erscheinenden Bildelementen. Ehe auf die Problematik der Zonierung des Gesamtbildes eingegangen wird, seien einige eindeutig interpretierbare Orientierungsmerkmale herausgestellt (s. Beilage V; b):

Man erkennt am Bildrand rechts unten den Tschadsee in seiner charakteristischen Form als dunklere Fläche. In der linken Bildhälfte hebt sich deutlich das fossile Binnendelta des Niger (1) ab. Im nördlichen Teil des Überschwemmungsgebietes erscheinen trotz der Bildstörung noch einzelne Restseen (Pfeile). Auf ihre genaue Identifizierung muß aber hier verzichtet wer-

⁸⁾ Die erforderlichen Rechenoperationen wurden mit Hilfe einer DVA IBM 7090/1410 der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH Bonn durchgeführt.

den, da der Vergleich mit topographischen Karten die Vermutung nahelegt, daß im SB mehrere Einzelseen miteinander verschmolzen werden. Dieser Prozeß ist soeben noch zu erkennen bei dem in sehr heller Umgebung liegenden Faguibine- und Komangui-See (2). Gemeinsam bilden sie sich als dunkler Keil ab. Der Niger selbst biegt aber schon vorher scharf in eine östliche Richtung um und strebt damit im Bild dem Subsatellitenpunkt zu. Man erkennt die in Deltanähe (südl. von Timbuktu) noch sehr breite Flußniederung, die sich nach E hin immer mehr verengt. Sie ist hier völlig in Kultur genommen, was weiter nach S (also zum eigentlichen Binnendelta hin) infolge ausgedehnter Felder E-W-verlaufender paralleler Dünen nicht mehr möglich ist.

In unmittelbarer Nähe des Bildmittelpunktes – hier allerdings nicht mehr sichtbar – biegt der Fluß nach S ab. Er ist noch sehr weit als dunkle Linie zu verfolgen, die sich von der grobkörnigen, hellen Umgebung absetzt, bis er in der allgemeinen Verdunkelung untertaucht.

Im W – am äußersten linken Bildrand – ist die Senegal-Niederung als ungewohnt breites, dunkles Band über eine kurze Strecke undeutlich zu erkennen. Als Grenze zwischen Mauretanien und Senegal überschwemmt der Fluß von Juli bis Oktober auf seinem letzten Teilstück ein ausgedehntes Niederungsgebiet, das Chemama (3). Es handelt sich um das einzige agrarisch intensiv genutzte Gebiet Mauretaniens, das zugleich auch die höchste Bevölkerungsdichte des Landes aufweist.

Wie schon angedeutet, kann die lebhaft Tönung in der oberen Bildhälfte im wesentlichen auf den Wechsel geologisch-morphologischer Formationen zurückgeführt werden (KAMINSKI/NEUMANN-MAHLKAU 1967). Die Leistungsfähigkeit des SB für die Wiedergabe auch kleinräumiger Einzelheiten in ariden Gebieten ist bereits hinreichend unter Beweis gestellt worden (HAFFNER 1966, KLITZSCH/JANY 1967), weshalb im folgenden nur die wichtigsten Großstrukturen tabellarisch benannt werden sollen, um in Verbindung mit dem Entwässerungsnetz eine relativ rasche Orientierung für den Betrachter zu ermöglichen. (Die beigegebenen Ziffern beziehen sich auf Beilage V; b.)

1. Niger-Binnendelta; 2. Faguibine-See; 3. Chemama; 4. Ahaggar-Gebirge (z. T. von Wolken verdeckt); 5. Air; 6. Adrar der Ifoghas; 7. Mauretanscher Adrar; 8. Tagant; 9. El Meraia; 10. Berg Bilma; 11. Erg Chech; 12. Edeien v. Mursuk.

In diesem Zusammenhang seien aber einige grundsätzliche Erläuterungen gestattet:

Dunkler erscheinende Bildelemente etwa können nicht bedenkenlos zu orographisch-morphologischen Gegebenheiten in Beziehung gesetzt werden, da sich Reliefunterschiede im SB bei den gegebenen Maßstabsverhältnissen ja nicht als solche darstellen. Entscheidend

für die Abbildung in ariden und damit vegetationslosen Gebieten ist die Färbung des Bodens. Im vorliegenden Fall besteht allerdings eine gewisse Beziehung zum Relief, da die gebirgsbildenden geologischen Formationen in der Regel eine dunklere Färbung aufweisen als Sedimente in Beckenlandschaften. Infolgedessen erscheinen Bergmassive tatsächlich dunkel, was natürlich nicht ausschließt, daß andere Bildelemente sich ebenso abbilden.

Als bestes Beispiel mag der Tschadsee dienen. Entsprechend erscheinen auch große Flüsse in arider Umgebung als schmale, schwarze Bänder. Dabei ist der Fluß selbst in den seltensten Fällen zu sehen, da seine Breite normalerweise das Auflösungsvermögen der Bilder nicht übersteigt. Sichtbar wird hingegen die sehr viel breitere feuchte Flußniederung. Nur aus diesem Grunde sind in der vorliegenden Aufnahme (Beilage V; a) die großen Entwässerungssysteme relativ deutlich zu identifizieren.

Als beherrschend für den Gesamteindruck des Bildes erweisen sich aber nahezu parallel verlaufende Tönungsunterschiede, durch Hell-Dunkel-Grenzen markiert, die das Bild fast diagonal von links oben nach rechts unten durchlaufen. Eine deutlich markierte Grenzlinie kann grob mit dem 15. Breitenkreis zur Deckung gebracht werden. Sie gliedert das Bild in zwei Bereiche, deren oberster durch eine Fülle von unterschiedlichen Grautönungen weiterhin differenziert wird. Bei näherem Zusehen erweist sich die untere Bildverdunkelung ebenfalls als mehrfach abgestuft.

Um die verschiedenen Zonen optisch eindeutiger abgrenzen zu können, wurde die ITOS 1-Aufnahme (Beilage V; a) in die oben erläuterten Äquidensiten-scharen zerlegt⁹⁾. Dafür ist es in jedem Falle notwendig, mit Hilfe von Densitometermessungen ein charakteristisches Dichteprofil der Vorlage anzufertigen (Abb. 1). Nach dieser Vorarbeit kann man Lage und Breite der einzelnen Äquidensiten entsprechend dem bei RANZ/SCHNEIDER 1970 dargelegten Verfahren so bestimmen, daß die Sprünge in der Dichteverteilung auch im Äquidensitenbild als solche zum Ausdruck kommen. Die in Abb. 1 angegebenen Werte wurden mit einem Densitometer am Bild-Negativ gemessen, da dieses auch als Grundlage für die Umwandlung in Äquidensiten dient. Zudem erwiesen sich Reflexionsmessungen am positiven Papierabzug als zu ungenau. Danach wurden die folgenden Dichtewerte jeweils zu einer Äquidensitenschar zusammengefaßt (vgl. auch den mitkopierten Dichtekeil in Beilage VI; a).

Beilage VI; a zeigt das in Äquidensiten zerlegte ITOS 1-Bild Nr. 490/1. Indem somit die einzelnen Tönungswerte dem jeweiligen Dichtebereich eindeutig zugeordnet werden, ist man bei der Interpretation der Schwierigkeit einer mehr oder weniger subjektiven

⁹⁾ Die Umwandlung in Äquidensiten erfolgte durch Frau K. Lück, Photo-Labor des Geographischen Instituts Bonn.

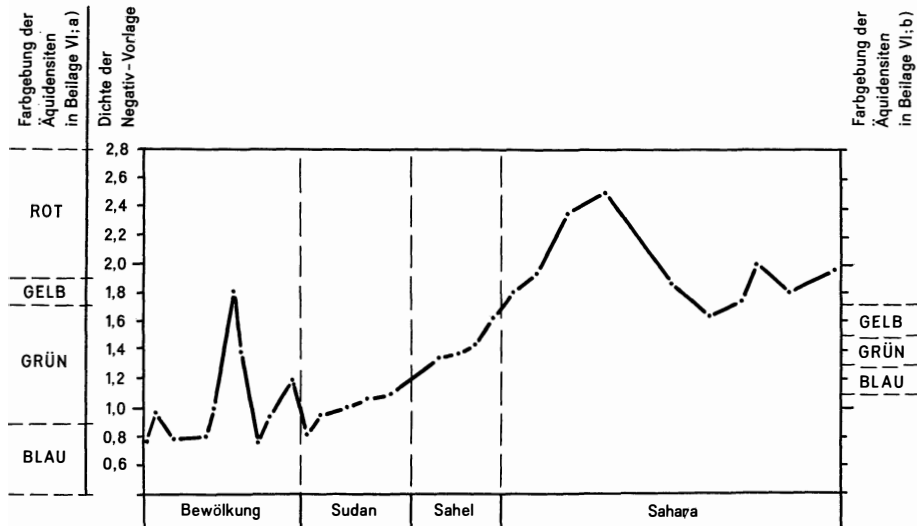


Abb. 1: Generalisiertes Dichteprofil von Luftbild 1. Die Lage des Profils wird in Beil. Vb angegeben.
Generalized density contour of aerial photography 1. The position of the profile is given in Suppl. Vb.

Grenzziehung entworfen. Dabei ist aber zu berücksichtigen:

Der Äquidensitenfilm kennzeichnet lediglich Flächen gleicher Dichte. Damit ist zur eigentlichen Interpretation nichts gesagt. Vielmehr bilden sich völlig unterschiedliche Erscheinungen der Erdoberfläche im SB in der gleichen Tönung ab. Hinzu kommt, daß viele im SB enthaltene Grauwerte auch zufälliger Natur sein können. Deshalb wäre es verfehlt, eine bestimmte Äquidensite (und damit einen absoluten Dichtewert) als eine genau definierbare Größe bestimmen zu wollen.

Selbst unter Berücksichtigung dieser höchst wesentlichen Einschränkung erscheint es aber außerordentlich bemerkenswert, daß die verschiedenen Dichtestufen der Beilage VI; a in der Gesamtschau eine deutliche breitenparallele Zonierung aufweisen, wobei sie eine exakte stufenweise Abfolge einhalten. Daß hier eine wie auch immer geartete Beziehung zu den klimaökologischen Gürteln Westafrikas besteht, darf zumindest als These angenommen werden.

Die auf diese Weise ausgegliederten Großzonen der Beilage V; a werden im folgenden einer schrittweisen Analyse zugrunde gelegt.

Der obere Bildbereich erfaßt einen Teilraum der westlichen Sahara. Für die Äquidensitendarstellung (Beilage VI; a) wurden dafür die Farben Rot und Gelb gewählt. Nach den bereits gegebenen Erläuterungen zum Äquidensitenfilm ist es natürlich selbstverständlich, daß nicht alle roten bzw. gelben Flächen als absolute Einheit interpretiert werden sollen. Der Blick auf Beilage V; a zeigt, daß auch die in der linken oberen Bildecke sichtbare afrikanische Westküste ebenso wie inselhafte Verdunkelungen innerhalb des roten Bildbereichs noch zur Sahara gehören, obwohl sie in der Äquidensitendarstellung bereits

grün abgebildet werden. Dieses gesamte Gebiet zeichnet sich im Photo aus durch einen lebhaften Wechsel unterschiedlicher Grautönungen, die z. T. recht markante Strukturen bilden und bereits teilweise benannt wurden. Daran schließt sich eine mittelgraue Übergangzone an, die den saharischen Raum nach S abgrenzt, sich ihrerseits aber auch wiederum gegen eine noch dunklere Bildzone weiter südlich verliert. Diese Übergangzone wird durch die Äquidensiten-Zerlegung klar markiert (Beilage VI; a, grüne Fläche).

Sie tritt auch in allen anderen weitgehend wolkenfreien Photos aus dem Weltraum deutlich hervor. Hier sei nur erinnert an das spektakuläre Farbphoto, das die Apollo-11-Mannschaft auf ihrem Flug zum Mond aus 130 000 km Entfernung von der Erde machte¹⁰⁾.

Es liegt sehr nahe, die insgesamt dunklere Tönung in den mittleren Bereichen des SB als Folge erhöhter Bodenfeuchtigkeit und einer nun einsetzenden, wenn auch noch schütterten und lichten Vegetation, zu erklären. Das entspricht der bisher an lokalen Beispielen gewonnenen Erkenntnis, daß Gebiete hoher Bodenfeuchte (z. B. das Niger-Überschwemmungsgebiet) sich dunkel abbilden. Tatsächlich gelangt dieser Teil Westafrikas im Vergleich zur vollarenid Sahara periodisch in den Genuß von Niederschlägen, die freilich äußerst gering sind und nur in den Monaten zwischen Juli und September fallen.

Für das hier ausgewählte SB aus dem Monat März darf ein solcher Schluß aber nur mit Vorbehalten gelten, denn der Bereich um das Niger-Knie präsentiert sich jetzt am Ende der Trockenzeit in der aridesten Phase. Was im SB in Form einer flächenhaften, schwachen Verdunkelung wirksam wird, dürfte hingegen als Ausdruck einer schütterten Vegetationsdecke gedeutet

¹⁰⁾ Veröffentlicht z. B. in ZEISS Weltraumkalender 1970.

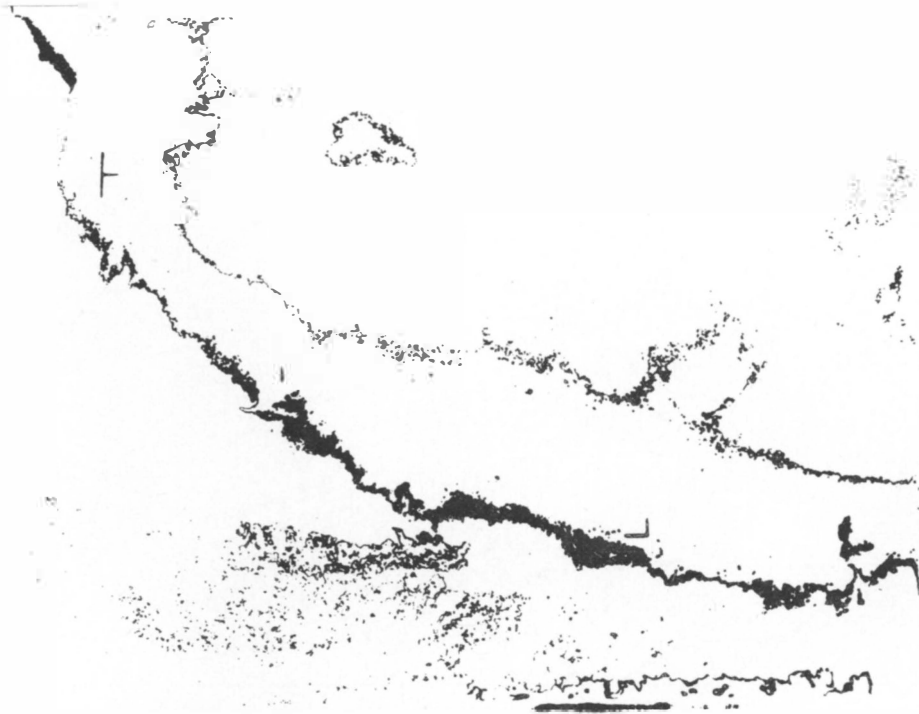


Abb. 2: Äquidensiten 2. Ordnung, die den in Beil. VIa grün gekennzeichneten Bereich einschließen.
Equidensiles of 2nd order which include the area, marked by green colour, of Suppl. VIa.

werden, und zwar als mittelbare Folge der saisonalen Humidität.

Die sich südlich anschließende noch dunklere Bildzone wird durch die Äquidensitenzerlegung als blauer Bereich ausgewiesen (Beilage VI; a). Analog zu den bisher gemachten Erfahrungen wäre zu folgern, daß es sich dabei um eine Zone dichter Vegetation bzw. höherer Bodenfeuchte handelt. Der Unterschied zwischen den beiden Zonen ist in Beilage V; a wiederum am klarsten ausgeprägt zwischen Senegal und Niger, und zwar im Aouker-Becken (13 in Beilage V; b). Vergleicht man die drei im SB erkennbaren Zonen und ihre Grenzen, wie sie durch die Äquidensiten gut verdeutlicht werden, so stellt man fest, daß reale Übereinstimmungen mit der bekannten Gliederung des wechselfeuchten Westafrika in *S a h a r a - S a h e l - S u d a n* gegeben sind^{10a)}.

^{10a)} Während des Drucks der Arbeit erreichte die Verfasser noch folgende Publikation: SABATINI, R. R., RABCHEVSKY, G. A., SISSALA, J. E. (1971): Nimbus Earth Resources Observations. Allied Research Associates, Techn. Rep. No. 2 Nov. 1971. Concord, Mass. Darin untersucht RABCHEVSKY mit Hilfe von Nimbus III Infrarot - Tagesaufnahmen u. a. die hydrologischen Verhältnisse im Bereich des Niger-Bogens. Die in dem gegebenen Beispielbild ebenfalls erscheinenden Grautonabstufungen werden vom Verfasser sogar gleichgesetzt mit den Vegetationseinheiten: Savannah Grasslands - Savannah Forest - Tropical Rain Forest.

Der Sahel-Gürtel

Unter Sahel versteht man einen ca. 400 km breiten Streifen fossiler Dünenfelder zwischen Senegal und Tschad, der heute von einer mehr oder weniger dichten Grasdecke, durchsetzt mit Dorn- und Sukkulentenbüschen, überzogen wird. Vegetationskundlich umfaßt der Sahel die Dorn- und Sukkulentensavanne, einschließlich der noch trockneren Wüstensavanne im Sinne der Gliederung von JÄGER und LAUER. Wichtigstes Kriterium für die Abgrenzung des Sahels gegen den nach S anschließenden Sudan ist das Maß an Feuchtigkeit, das beide jeweils empfangen. Dabei ist in der Regel in der Sudanzone im Gegensatz zum Sahel noch Regenfeldbau möglich. Abgesehen davon bildet der Sahel die Kontaktzone zwischen dem arabisch/berberischen und dem schwarzafrikanischen Kulturkreis, wo sich die Lebensformen der Wüste (Nomadismus) und des Sudans (vor allem Hirsehackbau) begegnen (vgl. MENSCHING 1971).

Zur Verdeutlichung der Lage der Sahelzone wurden die Grenzen der in Beilage VI; a grün gekennzeichneten Fläche erneut durch Äquidensiten zweiter Ordnung unter Verzicht auf farbige Wiedergabe noch einmal eingefaßt¹¹⁾ (Abb. 2).

¹¹⁾ Man erhält die Äquidensiten zweiter Ordnung, indem bereits gewonnene Äquidensiten erneut auf Contour-Film kopiert werden. Dieser gibt dann von der Vorlage erster

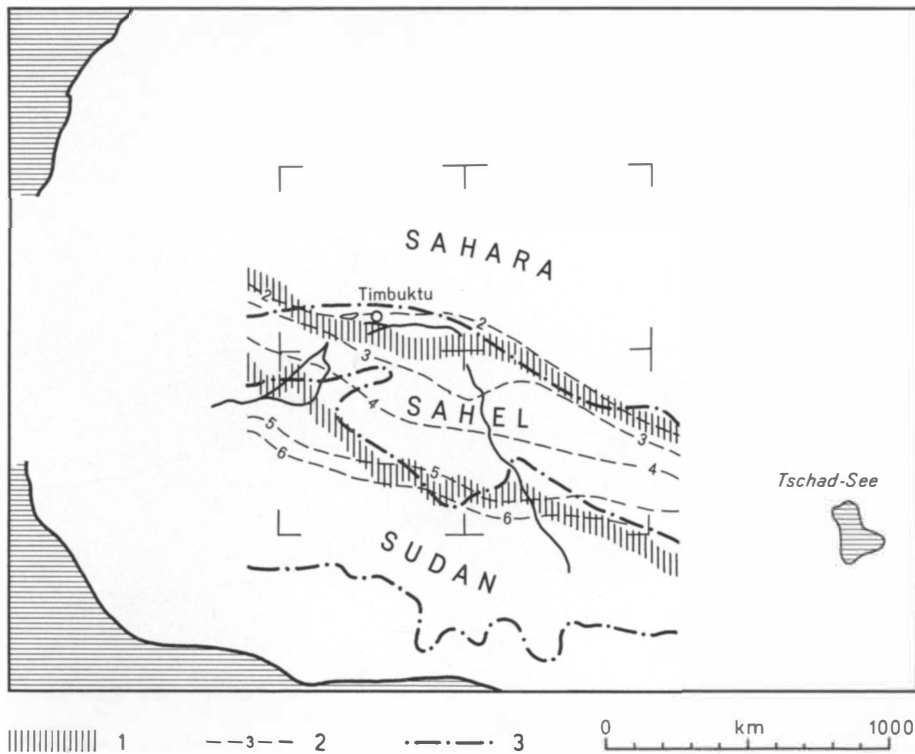


Abb. 3: Vergleich der in Beil. VIb ausgeschiedenen Bildzone mit Kartendarstellungen zur Klimaökologie Westafrikas
 1 Grenzen der Äquidensiten; 2 Isohygromenen n. LAUER 1952 (humide Monate); 3 Vegetationsgrenze von Sahel und Sudan n. GRANDIDIER, Atlas des Colonies Françaises
 Comparison of the picture section, given in Suppl. VIb, with cartographic presentations of the climatic ecology of West Africa
 1 Boundaries of equidensities; 2 Isohygromenes after LAUER 1952 (humid months); 3 Vegetation boundary of Sahel and Sudan after GRANDIDIER, Atlas des Colonies Françaises

Daß die Sahelzone ihrerseits jedoch nicht ohne innere Übergänge ist, zeigt eine weitere Zerlegung des für das Auge recht einheitlichen Tönungsbereichs. Das Ergebnis in Beilage VI; b zeigt, daß eine kontinuierliche Abfolge der einzelnen Dichtewerte vorliegt, die sich in gürtelförmiger Anordnung präsentieren. Auch dies entspricht den klimaökologischen Gegebenheiten abnehmender Trockenheit der Sahelzone mit immer dichter werdender Vegetation nach S.

Bemerkenswert erscheint, daß die Äquidensiten-Darstellung (Beilage VI; b) im mittleren Bildbereich (nordöstlich des Niger-Knies) eine klare Nord-Begrenzung der Sahelzone wiedergibt, obwohl hier die dunklere Grautönung weit in die Sahara übergreift und vom menschlichen Auge nicht mehr differenziert werden kann. Eine denkbare Erklärung bietet die Bodenkarte von SCHOKALSKAJA (1953), wonach der hier angesprochene Bereich übereinstimmt mit einer Zone

Ordnung die Flanken, die ja gleitende, wenn auch sehr steile Übergänge darstellen, erneut als Äquidensiten wieder, welche aber diesmal nur einen sehr schmalen Dichtebereich umfassen. Der gleiche Vorgang läßt sich wiederholen, um Äquidensiten dritter Ordnung zu erhalten.

roter Wüstenböden, die zwischen Adrar und Air gegen den Sahelrand vorstößt. Diese Böden übernehmen im Grenzbereich Wüste/Sahel im SB den Grauton, der in der Sahelzone unter normalen Bedingungen von einer gewissen Vegetationsdichte hervorgerufen wird.

Abb. 3 stellt den Versuch dar, die durch farbige Äquidensiten-Darstellung markierte Zone mit konventionellen Wiedergaben des Sahelbereichs zu konfrontieren. Der Vergleich beschränkt sich auf das Gebiet des Niger-Bogens, da das SB im zentralen Bildausschnitt die geringsten Verzerrungen aufweist. Ausgewählt wurde die Darstellung aus dem Atlas des Colonies Françaises¹²⁾, ergänzt durch charakteristische Isohygromenen n. LAUER 1952. Der Vergleich zeigt eine generelle Übereinstimmung zwischen Kartendarstellung und SB. Abweichungen treten vor allem dort auf, wo lokale Besonderheiten die zonalen Bildstrukturen durchbrechen. Im Raum Timbuktu ist die Grenze zuungunsten der klimaökologischen Situation nach S verschoben, da die extrem hellen Dünenfelder von

¹²⁾ GRANDIDIER (1934), Atlas des Colonies Françaises. Afrique occidentale française et Togo, Zones botaniques, S. 20/21.

El Meraia (Nr. 9)¹³) den eigentlichen Grenzverlauf im Photo überstrahlen. Andererseits bezieht die Vegetationskarte die Landstufe von Bandiagara (14) botanisch in den Sudan ein. Diese höher herausragende Stufe empfängt im Jahresmittel tatsächlich mehr Niederschlag, so daß sich hier feuchtere Bedingungen für die Pflanzendecke ergeben. Dies kommt in der Äquidensiten-Darstellung (Beilage VI; b) nicht zur Geltung, obwohl sich die Stufe im SB (Beilage V; a, bzw. V; b) durchaus als dunkles Element abhebt. Ob in diesem Fall die dunklere Färbung von der Gesteinsformation oder einem dichteren Bewuchs herrührt, muß offen bleiben.

Für die Identifizierung eindeutig abgrenzbarer Einzelstrukturen, die die zonale Bildgliederung ohnehin durchbrechen, sind die Äquidensiten weniger geeignet. Dies gilt für Gebiete edaphischer Feuchtigkeit wie auch für geologische Großformationen. Als anschauliches Beispiel kann in Beilage VI; b wiederum der Tschad-See dienen, der mehrere Dichtewerte umfaßt und bereits in zwei Äquidensiten zerlegt wird. Südlich des Sees differenziert das Auge noch den Zufluß des Schari (15), der sich nach seinem Zusammenfluß mit dem Logone noch einmal gabelt. In der südwestlichen Ecke ist sogar der Yadseram (16) als feine schwarze Linie zu erkennen. Von W fließt dem See der Komadugu (17) zu. Seine eigentliche Einmündung in den See wird durch eine Bildmarkierung verdeckt. Verfolgt man ihn aber flußaufwärts (d. h. im Bild nach links), so stößt man auf eine gabelförmige Verdunkelung (18). Hier im äußersten Norden von Nigeria, ca. 30 km südöstlich von Nguru, fließen Hadeija und Katagum zusammen zum Komadugu Yobe. Dabei bewässern sie ein ausgedehntes landwirtschaftliches Anbaugebiet, das sich infolge seiner Bodenfeuchte im SB abbildet und hier sehr gut den Zusammenfluß zweier Flüsse veranschaulicht.

Auch geologische Großstrukturen sind in der Sahelzone noch zu erkennen. In erster Linie ist das Tagant (8) zu nennen, das von allen drei hypothetisch ausgeschiedenen Bildzonen geschnitten wird. Wenngleich die Schwärzung dieser Struktur im Bild keineswegs homogen ist, wie die Äquidensiten nachdrücklich belegen, ist sie doch als Ganzes deutlich zu identifizieren. Sie stößt von N in die Sahel-Zone vor und bleibt hier sichtbar, bis ihre Südspitze in der Schwärzung der Sudanzone untertaucht.

Dieses Beispiel verdeutlicht, daß geologische Formationen in semiariden Gebieten, die durch höhere Bodenfeuchte im SB schon großflächig verdunkelt sind, solange unterschieden werden können, wie sie die Tönung der Umgebung übertreffen.

Der Sudan-Gürtel

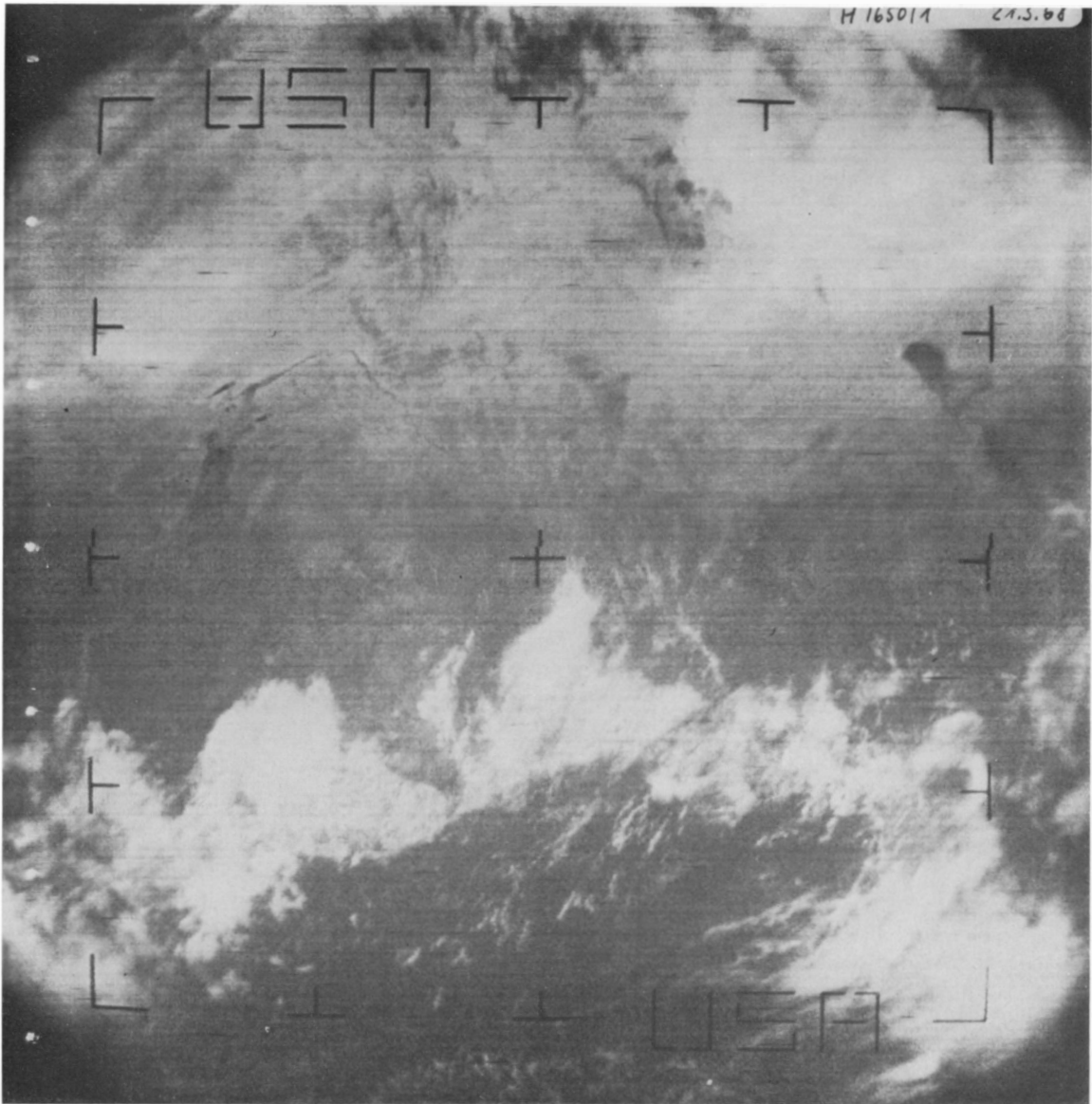
Wie gezeigt werden konnte, ist die Sahel-Zone nach S begrenzt durch eine deutliche Stufe in der Tönung,

die zu einem neuen Dichtebereich im SB überleitet. (Dieser ist in Beilage VI; a im blauen Bereich erfaßt.) Die Zone wurde oben bereits als Sudan dem Sahel gegenübergestellt. Es dürfte im wesentlichen ein Effekt der dichteren Vegetation und der höheren Bodenfeuchte sein, der den Wechsel in der Grautönung verursacht. Das SB zeigt aber weiterhin, daß sein Schwärzungsgrad sich nach Süden hin nicht mehr ändert und der Dichtewert an keiner Stelle des Bildes – selbst nicht einmal bei Zerlegung in Äquidensiten – deutliche Unterschiede aufweist. Hier gibt also die Tönung des Bildes keine Aussagen zu einer weiteren Zonierung des Raumes mehr preis, so daß eine Grenze der semihumiden Sudan-Zone mit Fallaubwäldern zu den humiden immergrünen Regenwäldern nicht zu erkennen ist. Der Versuch mit Äquidensiten hat gezeigt, daß innerhalb dieser Zone am linken Bildrand höhere Schwärzungen vorliegen. Diese konnten aber nicht als regelhaft belegt werden. Vielmehr dürfte es sich dabei um eine elektronisch bedingte randliche Verdunkelung handeln. Die im Bild sichtbare Bewölkungsgrenze, die auf vielen weiteren SB während der Trockenzeit an der gleichen Stelle zu finden ist, läßt die Vermutung zu, daß sich hier gewisse Grenzbedingungen zwischen dem Feuchtsavannenbereich der Sudanzone und dem der immergrünen Regenwälder ausdrücken, ohne daß dieser Gedanke hier weiter verfolgt werden soll.

An der zonalen Struktur der Sahel/Sudan-Grenze lassen SB und Äquidensiten-Darstellung kaum einen Zweifel. Doch existieren auch hier azonale Bildelemente, von denen einige auffällige interpretiert werden sollen (vgl. Beilage V; b). Das SB zeigt eine keilförmige Ausbuchtung (19) der helleren Sahelzone nach S bis etwa an den Fuß des Jos-Plateaus in Nord-Nigeria. Das Plateau selbst hebt sich merkwürdigerweise nicht als geschlossener Komplex heraus. Zu erwarten wäre hier eine Aufhellung für diese im Durchschnitt auf 1200 m liegende Plateaulandschaft, für die das Fehlen von Baumvegetation charakteristisch ist. Hingegen ist die Ausweitung westlich des Niger weitgehend identisch mit dem Gourma-Plateau (20), das nördlich von Pama von weiten, menschenleeren Sumpfgebieten eingenommen wird. Im gesamten übrigen Bereich sind die Böden ungewöhnlich stark laterisiert (s. HARRISON-CHURCH ⁶1968, S. 255 bzw. 259). Hier dürfen also sowohl die Färbung als auch die Feuchtigkeit des Bodens als verantwortlich für die dunklen Felder im SB betrachtet werden.

Auffallend ist weiterhin, daß unmittelbar südlich des Nigerbogens die im übrigen Bildbereich relativ geschlossen verlaufende nördliche Sudangrenze weit nach S zurückweicht. In diese Ausbuchtung des Sahel stößt fingerförmig eine dunkle Struktur (21) nach N vor, deren Spitze verdeckt wird durch ein schmales Wolkenband. Ingesamt gibt diese Struktur exakt das nähere Einzugsgebiet des Weißen Volta wieder, das identisch ist mit dem Waldreservat: «Forêt classé de

¹³) Die Zahlen beziehen sich wieder auf Beilage V; b.



Luftbild 2: a) ESSA 6 – APT-Aufnahme Rev. Nr. 1650/1 Datum: 21. 3. 1968
Telemetered ESSA 6 recording. Rev. Nr. 1650/1 Date: 3/21/1968

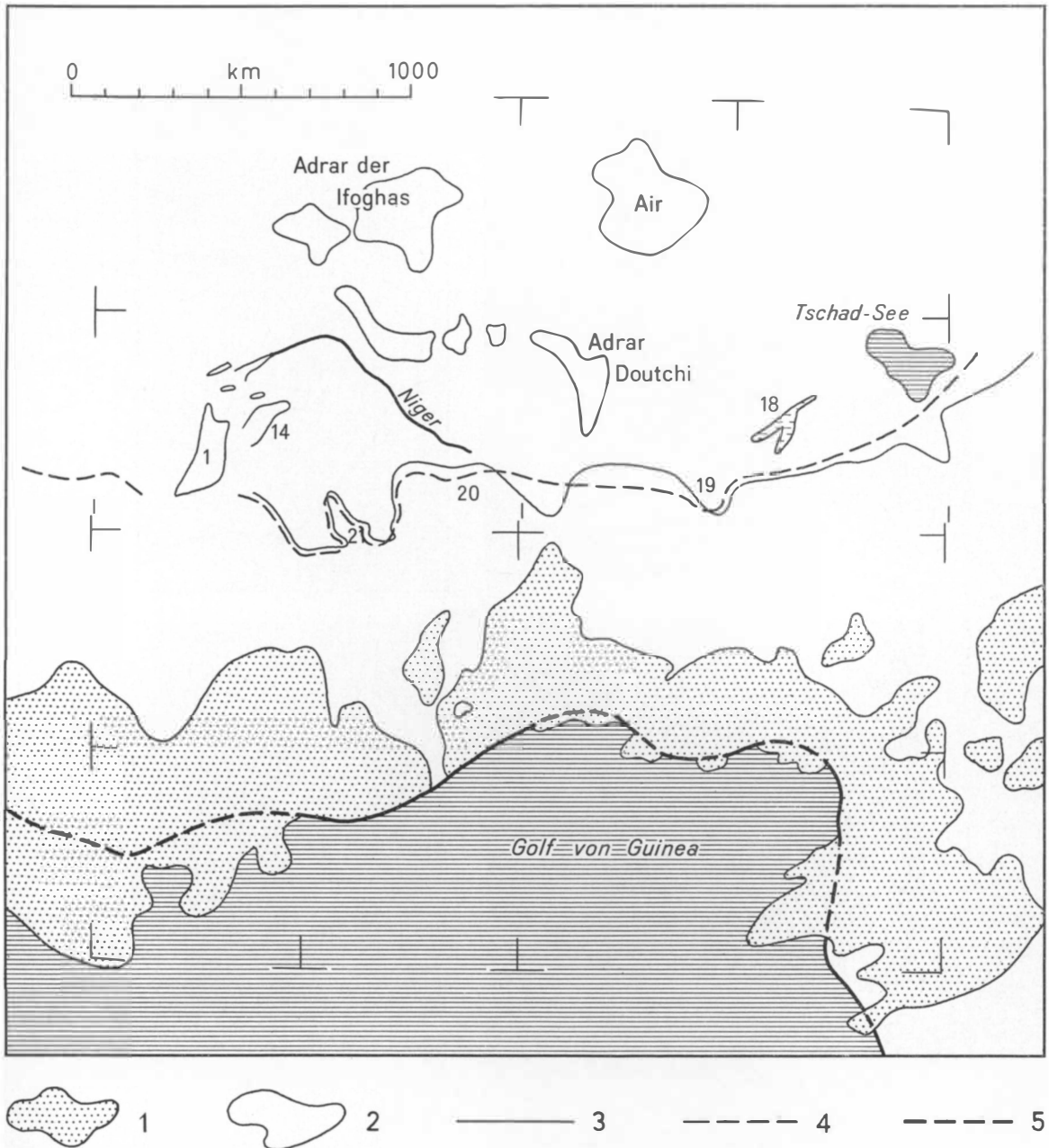
la Volta Blanche.»¹⁴⁾ Die ungewöhnliche Aufhellung westlich und östlich dieses Waldgebietes ist als Folge der intensiven Rodungstätigkeit durch die Mossi in den äußerst dicht besiedelten Zentralräumen Obervoltas anzusehen.

Um die Identität der Sudan/Sahel-Grenze mit ihren Eigenheiten zu erhärten, könnte man fast alle SB aus der Trockenzeit heranziehen. Wir beschränken uns auf einen Vergleich mit einer APT-Aufnahme von



c) Lageskizze zu Luftbild 2
Geographic position of aerial photography 2

¹⁴⁾ Vgl. Carte de l'Afrique de l'Ouest. 1: 200 000. Blätter: Koudougou/Ouagadougou/Boulsa/Pô/Tenkodogo.



b) Maßstabgleiche Erläuterungsskizze zu Luftbild 2. Die eingetragenen Zahlen entsprechen denjenigen in Beil. Vb. Die Einzeichnung der im Bild z. T. nicht sichtbaren Küstenlinien soll der Orientierung dienen.

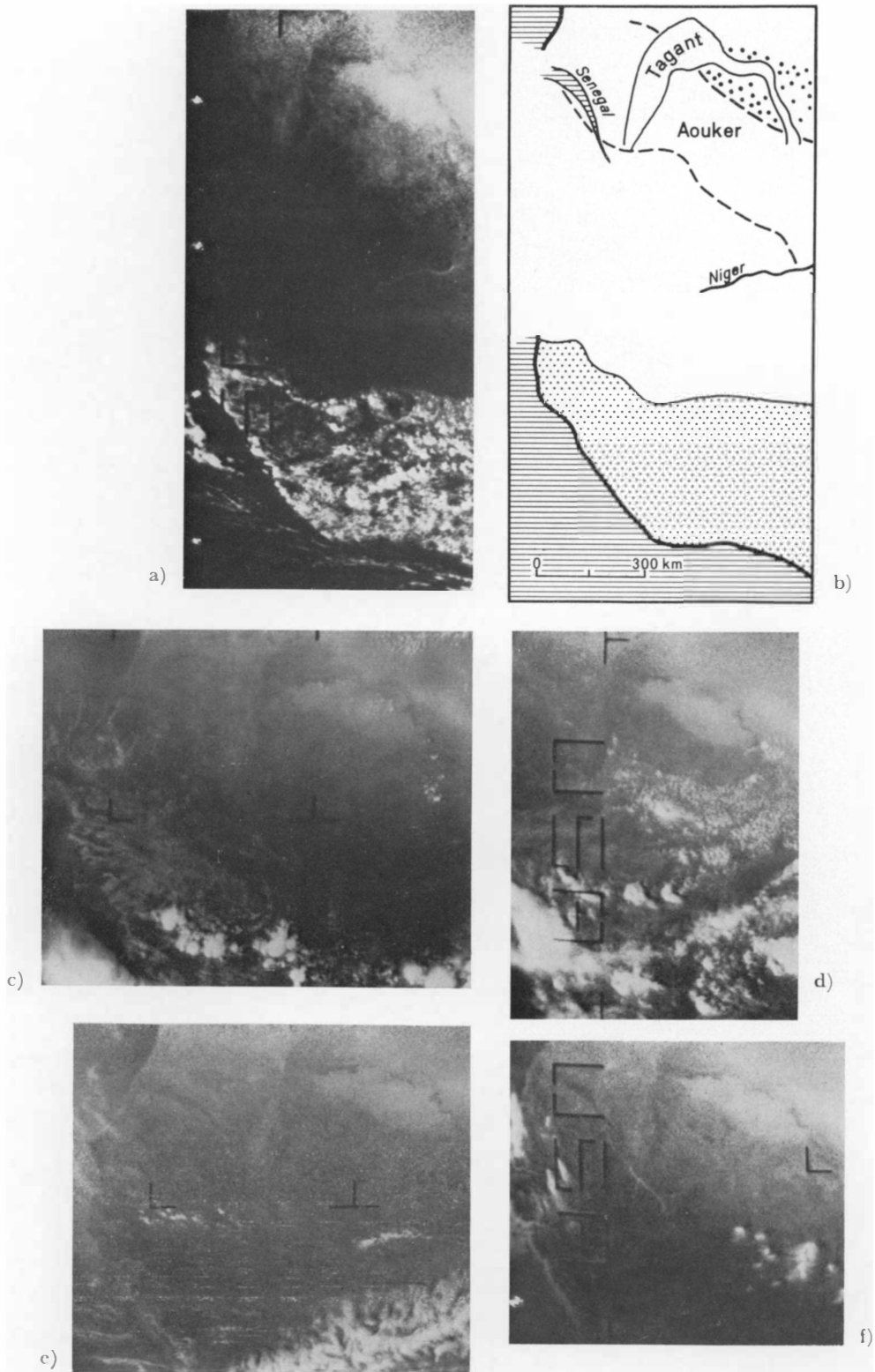
1 Bewölkung; 2 deutlich abgrenzbare geologisch-morphologische Einheiten; 3 markante zonale Tönungsgrenze; 4 markante zonale Tönungsgrenze, entnommen aus Luftbild 1 (Beil. Va); 5 im Bild nicht sichtbare Küstenlinie

Explanatory figure in true scale as to aerial photography 2. The recorded numerals correspond to those of Suppl. Vb. The drawing of the coast line partly not visible in the aerial photography is to serve as means of orientation.

1 Clouding; 2 clearly definable geologic-morphologic units; 3 striking zonally orientated tone step; 4 striking zonally orientated tone step, adapted from aerial photography 1 (Suppl. Va); 5 coast line not visible in the aerial photography

ESSA 6, die gleichfalls in der Trockenzeit, aber bereits zwei Jahre vorher gemacht wurde. Obwohl das Luftbild 2 einen Ausschnitt des afrikanischen Kontinents zeigt, der gegenüber dem ITOS-Bild (Beilage V; a) ge-

ringfügig verschoben ist, fällt eine schnelle Orientierung leicht (vgl. Skizze c zu Luftbild 2). Trotz der geminderten Qualität der Aufnahme läßt sich die als nördliche Sudangrenze gedeutete Tönungsstufe auch



Luftbild 3: Jahreszeitlich wechselnde Abbildung der weiteren Umgebung des Senegal-Unterlaufs im SB infolge unterschiedlicher Reflexionsverhältnisse

Seasonal reflectance changes of the further surroundings of the lower Senegal River recorded by weather satellite

a) März 1970; b) Erläuterungsskizze; c) Sept. 1970; d) Okt. 1970; e) Nov. 1970; f) Jan. 1971

hier deutlich ausmachen. In der beigegebenen Skizze b zu Luftbild 2 wird sie mit Hilfe einer durchgezogenen Linie dargestellt. Dabei ergibt sich in wesentlichen Punkten eine erstaunliche Übereinstimmung mit Beilage V; a, die durch die Übertragung der dort ermittelten Grenzlinien¹⁵⁾ in die Skizze b zu Luftbild 2 deutlicher gemacht werden soll. So findet sich z. B. die durch den Weißen Volta verursachte Verdunkelung (21), die Ausbuchtung nach N zum Gourma-Plateau (20) wieder, ferner der charakteristische Einschnitt im Bereich des Jos-Plateaus (19).

Die bisher gegebene Interpretation der Sahel- und Sudan-Zone nach dem SB kann für Teilbereiche durch Astronauten-Aufnahmen bestätigt werden. Die Photos von Gemini VI beispielsweise (NASA-Photo S 65-63247, S 65-63251 vom 6. 12. 1965)¹⁶⁾ unterstützen infolge ihrer hohen Auflösbarkeit sowie der zusätzlichen farblichen Differenzierungsmöglichkeit die Interpretation einer flächenhaften Vegetation an der nördlichen Sahel-Grenze südlich des Tagant.

Die vorhandenen Astronauten-Aufnahmen bieten aber leider noch keine kontinuierliche Bildüberdeckung (was im übrigen nicht nur für das Untersuchungsgebiet zutrifft). Andererseits ist dadurch die vorliegende Arbeit gerechtfertigt, die sich auf die zur Interpretation ungünstigeren Wettersatellitenbilder stützt.

Satellitenbild und jahreszeitlicher Wandel

Da die klimaökologischen Bedingungen einem jahreszeitlichen Wandel unterworfen sind, aus dessen mittlerem Verhalten sich gewisse naturräumliche Einheiten und Grenzen ergeben, darf man in einem weiteren Schritt die Frage stellen, ob denn der klimaökologische Wandel selbst in Satellitenbildern, die zu unterschiedlichen Jahreszeiten aufgenommen sind, zutage tritt.

Leider ist mit dem Vorrücken der Regenzeit auch eine Zunahme der Bewölkung verbunden, die eine geographische Interpretation oft sogar unmöglich macht. Auch ist die Bildqualität erheblich verschlechtert infolge stärkerer atmosphärischer Trübung. Darüber hinaus verursacht die Regenzeit durch die Befeuchtung der Landschaft (die sich ihrerseits in einer Begrünung der Vegetation niederschlägt) eine dunklere Tönung der betroffenen Bildbereiche und damit eine erhebliche Kontrastminderung. Insofern verschieben sich markante Grenzen oder treten bis zur Unkenntlichkeit zurück. Das soll an folgenden Beispielen demonstriert werden. Es handelt sich dabei um Teilgebiete des bisher behandelten Raumes.

¹⁵⁾ Die Umzeichnung erfolgte mit Hilfe des LUZ. Deshalb ist keine hohe geometrische Genauigkeit zu erwarten. Dementsprechend besteht der Zweck dieser Darstellung in erster Linie darin, den Vergleich optisch anschaulicher zu gestalten.

¹⁶⁾ Veröffentlicht z. B. in NASA 1968, vergl. auch Beilage V; c, Buchstaben a und b.

1. Senegal (Luftbild 3)

Bild a (März 1970, Trockenzeit) zeigt dasjenige Gebiet (Ausschnitt von Beilage V; a), dessen saisonal wechselnde Erscheinung im SB hier demonstriert werden soll. Das Augenmerk ist dabei im wesentlichen auf die Tönungsstufe zwischen Sahel und Sudan gerichtet, und zwar südlich des Tagant im Aouker-Becken. Gleichzeitig kann die Abbildung der Senegal-Niederung verfolgt werden.

Bild c (September 1970, Regenzeit)

Man erkennt noch deutlich die Sahelgrenze im Aouker-Becken. Die Tönung der Sahelzone wirkt aber bereits wesentlich homogener, d. h. innerhalb des Sahels (in diesem Bereich) sind keine punkthaften, dunkleren Einzelemente wie etwa in Bild a mehr erkennbar. Der Übergang zur Sudanzone ist nur noch schwach zu sehen. Der Senegalfluß kann nicht mehr mit Sicherheit erkannt werden, d. h. die Umgebung hat annähernd den gleichen Tönungswert erreicht wie die sonst dunkle Flußniederung.

Bild d (Oktober 1970, Regenzeit)

Auch hier ist die Senegalniederung nur nach vorheriger Kenntnis ihrer Lage zu „erahnen“. Die Tönung der Sahelzone (im Aouker-Becken) erscheint bemerkenswert dicht. Auffällig ist eine cumuliforme Wolkendecke, die mit scharfem Rand nach N abbricht. Der Rand der Bewölkung deutet also eine gewisse Grenzlage zwischen feuchtem und trockenem Milieu am Erdboden an (wobei über das Maß der Feuchtigkeit bzw. der Trockenheit nichts ausgesagt ist). Dieser Wolkentyp findet sich häufig über tropischen Waldarealen wie etwa der Amazonasniederung während der Regenunterbrechungen der Feuchtperiode (ANDERSON et al. 1969). Das bedeutet für das vorliegende Beispiel: Bis zu dieser Grenze hat sich das regenzeitliche Geschehen voll durchgesetzt. Nördlich davon (d. h. im Sahel), wo gleichfalls Regenzeit herrscht, drückt diese sich aber nur noch in Schauern aus, die in weiten, unregelmäßigen Zeitabständen niedergehen. Tagelange cumuliforme Wolkendecken sind deshalb hier selten, wie die Durchsicht der SB bestätigte. Dagegen konnte die nördliche Grenze dieses Wolkentyps in der Regenzeit häufiger in der gleichen Position beobachtet werden, und zwar genau da, wo nach bisheriger Erfahrung der Übergang zur Sahelzone durch eine Tönungsstufe (in der Trockenzeit) erkannt worden war. Dies unterstützt die Auffassung, daß das SB durch unterschiedliche Tönung hier einen Wechsel von dichter zu weniger dichter Vegetation erfaßt. Damit bildet die scharf ausgeprägte Grenze eines solchen Wolkentyps ein klimaökologisches Kriterium, auch wenn die Tönung des SB keine Differenzierung mehr zuläßt.

In diesem Zusammenhang sei nochmals verwiesen auf Beilage V; a, wo der scharfe Wolkenrand gegen N den Schluß nahelegt, daß hier ein ähnlicher Wechsel in der Landschaftsphysiognomie angedeutet wird.

Bild e (Nov. 1970, Beginn der Trockenzeit)

Trotz atmosphärischer Störungen beim Empfang des Bildes, die sich in Form von Streifen bemerkbar machen, ist zu erkennen, daß die gewohnte Abstufung zwischen Sahel und Sudan noch fehlt. Dafür hebt sich die Senegal-Niederung aber bereits wieder als dunkles Band gegen die geringfügig hellere Umgebung ab.

Bild f (Jan. 1971, Trockenzeit)

Diese Aufnahme demonstriert die Rückkehr zu den gewohnten Abbildungsverhältnissen der Trockenzeit. Die Abstufung zwischen Sahel und Sudan ist ebenso wie der Senegal deutlich sichtbar. Auch die Sahelzone selbst erscheint wieder unruhig strukturiert.

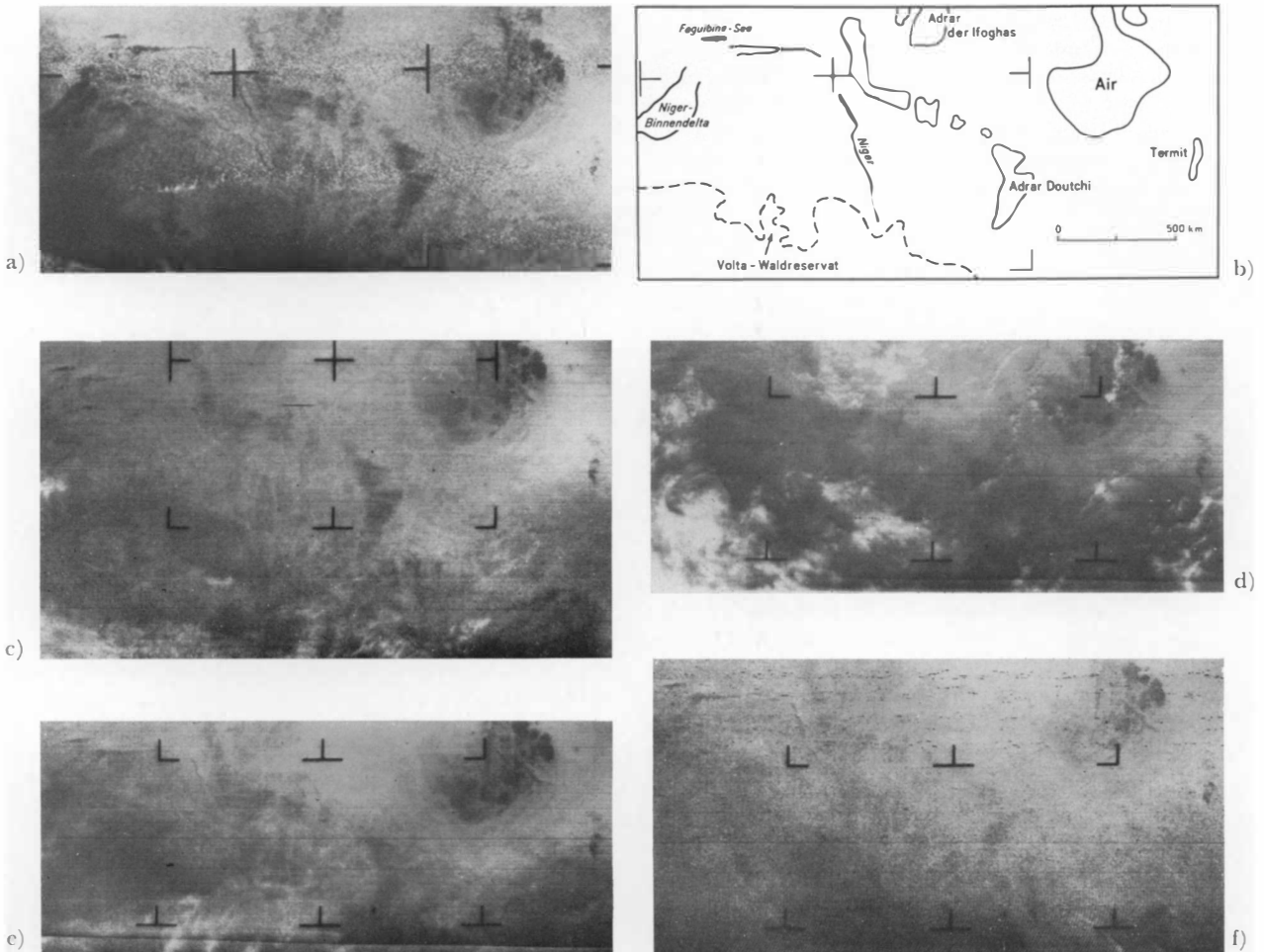
2. N i g e r (Luftbild 4)

Bild a (März 1970, Ende der Trockenzeit)

Am Anfang steht wiederum ein Ausschnitt aus Beilage V; a, der die trockenzeitliche Situation, die bereits eingehend analysiert wurde, wiedergibt. Die folgenden Bildbeispiele sind jedoch sämtlich von dem Satelliten NIMBUS 2 genommen. Gezeigt werden soll das Verhalten der Grenzen von Sahel und Sudan im Bereich zwischen Niger-Binnendelta und Air in verschiedenen Jahreszeiten.

Bild c (Juni 1966, Regenzeit)

Die Aufnahme vermag in gewisser Weise die Schwierigkeiten zu demonstrieren, die bei der Interpretation von Regenzeitaufnahmen wirksam werden.



Luftbild 4: Jahreszeitlich wechselnde Abbildung des Raumes Obervolta – Niger im SB infolge unterschiedlicher Reflexionsverhältnisse

Seasonal reflectance changes of the Upper Volta – Niger area recorded by weather satellite

a) März 1970 (Ausschnitt von Luftbild 1, Beil. V); b) Erläuterungsskizze; c) Jan. 1966; d) Sept. 1967; e) Okt. 1967; f) Febr. 1968

Gemeint sind dünne Cirrenschleier, wie sie hier in der unteren Bildhälfte auftreten. Sie sind zunächst nicht immer eindeutig als Wolken zu identifizieren und täuschen statt dessen Aufhellungen am Erdboden vor. Entsprechende Fehlinterpretationen können nur vermieden werden durch den Vergleich der zeitlich unmittelbar vorangehenden bzw. folgenden Aufnahmen. Auf diese Weise ist festzustellen, daß ein deutliches Vorrücken der bekanntesten Tönungsstufe südlich des Niger-Bogens nach N zu konstatieren ist. Auf diese Weise kommt die Begrünung der Landschaft zum Ausdruck. Allerdings hebt sich die durch das Waldreservat des Weißen Volta verursachte Struktur immer noch gegen die Tönung der Umgebung ab. Das Bild deutet somit den Vorgang einer allmählichen Befeuchtung der Landschaft an. Die nördliche Sahelgrenze ist jedoch (wie auch in Beilage V; a) nicht ohne weiteres erkennbar. Hervorzuheben ist allerdings, daß sich auch der Niger nur noch in unmittelbarer Nähe des Binnendeltas gegen die bereits dunkler gewordene Umgebung abzusetzen vermag.

Bild d (Sept. 1967, Regenzeit)

Diese Aufnahme ist trotz des relativ hohen Bewölkungsgrades von zentraler Bedeutung für die vorliegende Fragestellung, wo sie als Musterbeispiel dienen kann. Denn die Nordgrenze der Sahelzone, die in den Aufnahmen aus der Trockenzeit im Bereich zwischen Adrar der Ifoghas und Air nicht mit bloßem Auge identifiziert werden konnte, bildet sich hier mit ungewöhnlicher Deutlichkeit ab. Der Verdunkelungsgrad dieser Zone, der als Folge rezenter Niederschläge erklärt werden muß, ist so hoch, daß er die vorher bereits dunkle Bodenfärbung übertrifft. Der Adrar Douchi hebt sich soeben noch schwach heraus; der Faguibine-See ist ebenfalls nur mit Mühe zu finden, und der Tschadsee bleibt sogar unsichtbar, so daß das Termit-Massiv dessen Rolle als Orientierungspunkt in der rechten Bildhälfte übernehmen muß. Da die angesprochene Grenzlinie im September über mehrere Wochen im SB festzustellen ist, kann die Möglichkeit eines einmaligen starken Regengusses ausgeschlossen werden.

Bild e (Okt. 1967, ausgehende Regenzeit)

Die Trockenheitsmerkmale der Sahelzone verbinden sie wieder mit dem saharischen Raum. Man kann den Lauf des Niger wie gewohnt verfolgen, und zwar über das Niger-Knie hinaus nach S. Das Waldreservat des Weißen Volta ist jedoch noch nicht eindeutig auszumachen. (Aufhellungen am unteren Bildrand sind durch Cirren bedingt.)

Bild f (Febr. 1968, Trockenzeit)

Trotz relativ schlechter Bildqualität (der NIMBUS-2-Satellit war zu diesem Zeitpunkt bereits über anderthalb Jahre im Einsatz) ist der Nigerlauf bis weit nach S zu verfolgen. Die vordem noch sichtbare Grenze der Sahelzone nach N fehlt, dafür profiliert

sich die Grenze gegen den Sudan mit den Umrissen des Volta-Waldreservats wieder undeutlich heraus.

3. T s c h a d - S e e (Luftbild 5)

Bild a (März 1970, Trockenzeit)

Der Tschadsee liegt in der Sahelzone und hebt sich entsprechend gegenüber dieser ab, wie die Aufnahme nachdrücklich beweist. Mit gewissen Abstrichen läßt sich das auch von der dunklen V-förmigen Struktur sagen, die den Zusammenfluß von Hadeija und Katagum verdeutlicht.

Bild c (Juni 1970, Regenzeit)

Obwohl die Jahreszeit bereits vorgeschritten ist, hat die Regenperiode noch nicht wirksam eingesetzt. Abgesehen von der Bewölkung deutet im unmittelbaren Umkreis des Sees noch nichts auf eine wesentliche Veränderung gegenüber der Aufnahme im März hin.

Bild d (August 1970, Regenzeit)

Trotz der cirroformen Bewölkung, die die südlichen Teile des Sees überlagert, ist deutlich zu sehen, daß der Kontrast zwischen dunkler Wasserfläche und den (an sich) helleren umgebenden Landflächen merklich zurückgegangen ist. Der Zusammenfluß von Hadeija und Katagum ist z. B. schon nicht mehr zu differenzieren.

Bild e (Sept. 1970, Regenzeit)

Die dunkle Seefläche ist jetzt nahezu völlig in der ebenso dunklen Umgebung integriert, so daß der See nur noch dem geübten Auge erkennbar bleibt. Die Regenzeit wirkt sich voll aus.

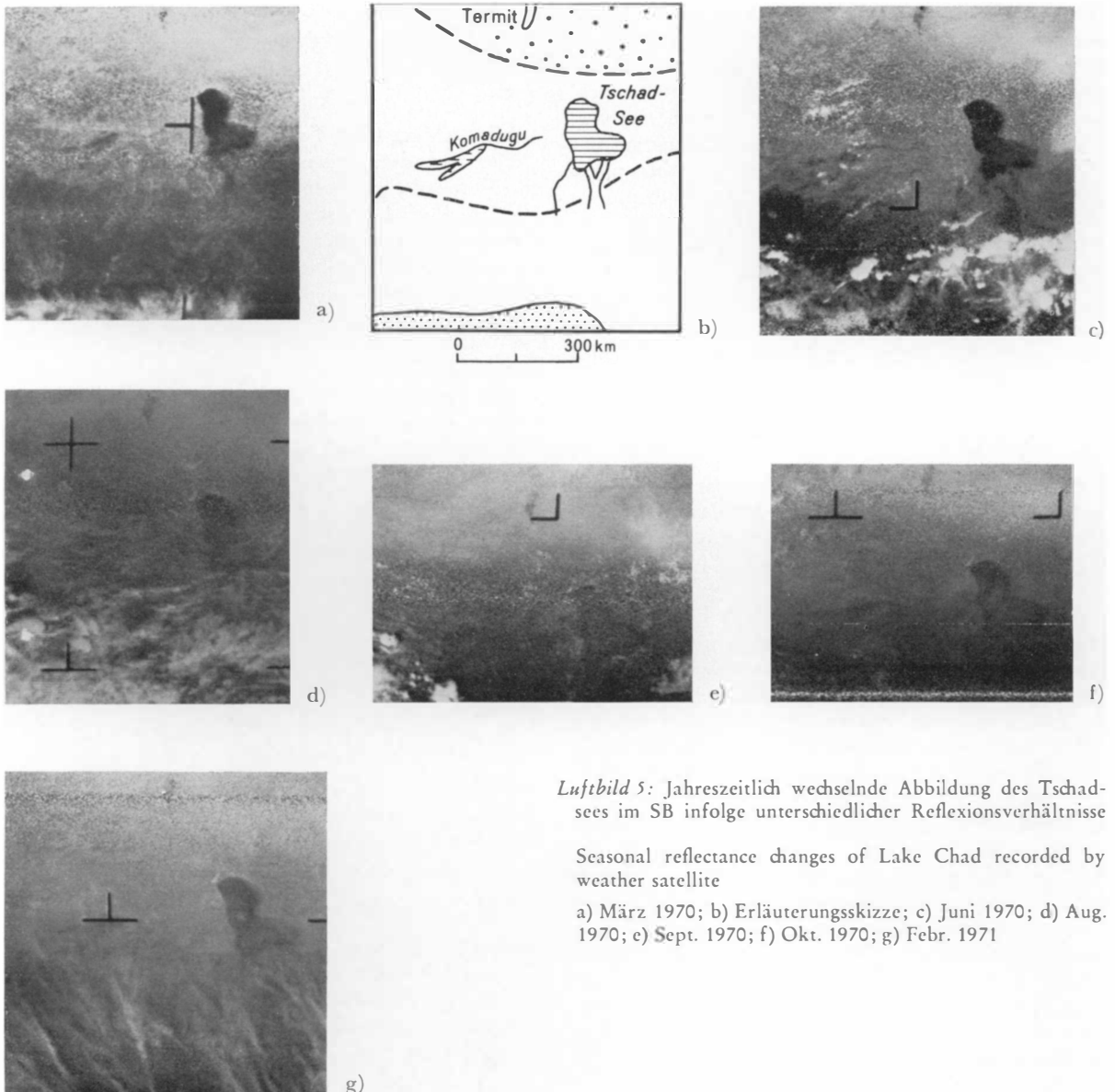
Bild f (Okt. 1970, ausklingende Regenzeit)

Hier ist die Rückkehr zu den gewohnten Abbildungsverhältnissen der Trockenzeit zu konstatieren. Sowohl der Tschadsee wie auch die Komadugu-Gabelung setzen sich wieder von ihrer Umgebung ab, wenngleich der Kontrast noch sehr gering ist.

Bild g (Febr. 1971, Trockenzeit)

Die Ausgangsposition ist nahezu wieder erreicht (vgl. Bild a), wenngleich (zusätzlich zu einer Bildmarkierung) schirmförmige Cirrenbänder nord-südlicher Erstreckung die Komadugu-Gabelung überlagern, so daß sie sich nicht mit der gewohnten Deutlichkeit gegenüber der Umgebung absetzt.

Alle gegebenen Beispiele zeigen, daß im Übergangsbereich zwischen Wüste und Savanne saisonale Veränderungen im SB sichtbar werden, und zwar dahingehend, daß in erster Linie die Befeuchtung und damit die Begrünung der Landschaft durch eine geringere Albedo, d. h. im Bild durch Verdunkelung zum Ausdruck kommt. Der höhere Feuchtigkeitsgehalt der Luft äußert sich in unschärferen Konturen.



Luftbild 5: Jahreszeitlich wechselnde Abbildung des Tschad-sees im SB infolge unterschiedlicher Reflexionsverhältnisse

Seasonal reflectance changes of Lake Chad recorded by weather satellite

a) März 1970; b) Erläuterungsskizze; c) Juni 1970; d) Aug. 1970; e) Sept. 1970; f) Okt. 1970; g) Febr. 1971

Die relative Bewertung der Grautönungen macht deutlich, daß charakteristische Tönungsabstufungen, wie sie durch die unterschiedliche Reflexion verschieden dichter Vegetation hervorgerufen werden, sich mit Einsetzen der Regenzeit immer weiter annähern, um schließlich ganz zu verschwinden. In gleicher Weise tauchen auch sonst scharf abzugrenzende Bildelemente unter, d. h. sie heben sich nicht mehr von der Umgebung ab, da diese ebenso dunkel geworden ist.

Andererseits hat die Begrünung der Sahelzone während der Regenzeit zur Folge, daß sie sich jetzt deutlicher gegen die Sahara abhebt, vor allem im Bereich zwischen Adrar der Ifoghas und Air, wo in der Trockenzeit aufgrund der dunkleren Böden am Sahara-

Südrand kein Grenzverlauf mit bloßem Auge zu erkennen war (vgl. Beilage V; a).

Die in der Trockenzeit deutlichen Grenzen werden durch die gleichmäßige Befeuchtung während der Regenzeit sukzessive verwischt. Darin drückt sich das jahreszeitlich wandelnde Naturgeschehen aus.

Schlußbemerkungen

Die Äquidensitzerlegung erwies sich als ein sehr brauchbares Mittel, Tönungsunterschiede deutlicher zu machen, die mit bloßem Auge nicht ohne weiteres erkennbar sind. Auf diese Weise konnten am Beispiel Westafrikas, wo die Landschaftsgürtel besonders mar-

kant ausgeprägt sind, die klimaökologischen Großraumeinheiten Sahara – Sahel – Sudan aus dem Satellitenbild entnommen werden.

Dabei kommt den Aufnahmen aus der Trockenzeit besondere Bedeutung zu. Der Blick zur Erde wird in dieser Zeit nicht durch Wolkenbedeckung gestört, und das Mosaik verschiedener Landschaftstypen als Folge des unterschiedlichen Wasserhaushalts drückt sich kontrastreicher aus.

Während der Regenzeit vermindert die gleichmäßige Befeuchtung der Landschaft die Tönungsunterschiede im Satellitenbild, die in Einzelfällen sogar aufgehoben werden können. Um so deutlicher markiert sich dann aber die Grenze beregneter und begrünter Zonen gegen ganzjährig regenlose Trockenräume.

Die zonalen Tönungsabfolgen sind intensiv verzahnt mit mehr azonalen Bildstrukturen. Diese besitzen hinsichtlich ihrer Tönung und Konfiguration im Satellitenbild einen eher stetigen, unverwechselbaren Charakter. Sie werden lediglich saisonal überlagert von den klimaökologisch bedingten Strukturen, die sich ihrerseits aber sehr wechselnd abbilden. Diese zonalen Bildelemente sind deshalb weniger markant und am besten mit Hilfe der Äquidensiten zu verdeutlichen.

Vor einer Überbewertung der Ergebnisse muß freilich gewarnt werden. Es war nicht das Anliegen der Verfasser, eine detaillierte Analyse nach dem Vorbild der Interpretation großmaßstäbiger Luftbilder zu liefern. Dies kann ein Wettersatellitenbild nicht leisten. Das Luftbild ist in seinen Maßstäben weitgehend identisch mit der topographischen Karte, während das geringe Auflösungsvermögen des Satellitenbildes nur sehr generalisierte Strukturen wiedergibt. Sie sind jedoch durchaus für eine Darstellung in Kartenmaßstäben geeignet, wie sie in Weltatlanten verwendet werden. Der Vorteil einer Direktentnahme von Strukturen aus dem annähernd gleichmaßstäbigen Satellitenbild liegt in der maßstabgerechten Generalisierung, die objektiver sein dürfte als eine Generalisierung, welche durch sukzessive Übertragung von Karteninhalten in immer kleinere Maßstäbe erreicht wird. In diesem Sinne kommt der Satellitenbild-Interpretation eine eigenständige Bedeutung zu. KOEMAN 1971 äußert den entsprechenden Gedanken im Hinblick auf die Verbesserung kleinmaßstäbiger topographischer Karten. Im vorliegenden Beitrag wird dieser Aspekt auf die thematische Atlas-Kartographie erweitert.

Literatur

ALBERT, E. G. (1968): The Improved TIROS Operational Satellite. ESSA Technical Memorandum NESCTM 7, Washington D.C.

ANDERSON, R. K. et al. (1969): Application of meteorological satellite data in analysis and forecasting. Air Weather Service, Technical Report 212.

Atlas international de l'Ouest Africain. Sous les auspices de l'Organisation de l'Unité Africain. Première livraison 1968. 8 planches. IFAN, Dakar.

BIRD, J. B., MORRISON, A. (1964a): Spacephotography and its geographical applications. Geogr. Rev. 54, 463–486.

BIRD, J. B. et al. (1964b): World Atlas of photography from TIROS satellites I to IV. NASA Contractor Report No. 98, Washington D.C.

BODECHTEL, J., GIERLOFF-EMDEN, H. G. (1969): Weltraumbilder der Erde. München.

Carte géologique de l'Afrique. (1963) 1:5 Mill., hrsg. v. UNESCO Paris.

DUMITRESCU, V. T. (1968): Cartographic solution for deciphering spacephotographs. Int. Jb. f. Kartogr. VIII, 66–74.

GRANDIDIER, G. (1934): Atlas des Colonies Françaises. Paris.

HÄFFNER, W. (1966): Satelliten-Luftbild: Zentrale Sahara. Erde 97, 81–83.

HARRISON-CHURCH, R. J. (1968): West Africa. London, 6. Aufl.

KAMINSKI, H., NEUMANN-MAHLKAU, P. (1967): Kleinmaßstäbliche Luftbilder, aufgenommen von Wettersatelliten, und ihre geologische Aussage. N. Jb. Geol. Paläont. Mh. 10, 589–596.

KEAY, R. W. J., AUBREVILLE, A. (1959): Vegetation map of Africa, south of the Tropic of Cancer. 1:10 Mill. London.

KLETTER, L. (1968): Die Verwendung der Bilder von Wettersatelliten zur Verbesserung der Wetteranalyse und der Wettervorhersage. Arch. f. Met., Geoph. u. Bioklimat. A 17, 215–245.

KLITZSCH, E., JANY, E. (1967): Bemerkungen zu der Interpretation eines Satelliten-Luftbildes der Zentralsahara. Erde 98, 298–300.

KOEMAN, C. (1971): Die Geländedarstellung von Hochgebirge in kleinmaßstäbigen Karten, überprüft durch Satellitenbilder. In: Kartogr. Nachr. 21. Jg. H. 1. 1–16

KRENKEL, E. (1957): Geologie und Bodenschätze Afrikas. Leipzig, 2. Aufl.

LAUER, W. (1952): Humide und aride Jahreszeiten in Afrika und Südamerika und ihre Beziehung zu den Vegetationsgürteln. Studien zur Klima- und Vegetationskunde der Tropen. Bonner Geogr. Abh. 9., 9–98.

MENSCHING, H. et al. (1970): Sudan – Sahel – Sahara. Jb. Geogr. Ges. Hannover 1969.

MENSCHING, H. (1971): Der Sahel in Westafrika. in: Wirtschafts- und Kulturräume der außereuropäischen Welt. Festschrift f. Albert Kolb. Hamburger Geogr. Studien. 24., 61–73.

MERIFIELD, P. M., RAMMELKAMP, J. R. (1966): Terrain seen from TIROS. Phot. Engin. 32, 44–54.

NASA (1967): Earth photographs from Gemini III, IV and V. Washington D.C.

NASA (1968): Earth photographs from Gemini VI through XII. Washington D.C.

NEWELL, W. et al. (1969): Satelliten erkunden Erde und Mond. Frankfurt.

- QUEZEL, P. (1965): La végétation du Sahara. Du Tchad à la Mauritanie. Geobotanica selecta. Bd. 2. Stuttgart.
- RANZ, E., SCHNEIDER, S. (1970): Der Äquidensitenfilm als Hilfsmittel bei der Photointerpretation. Bildmessung u. Luftbildwesen 123–134.
- REUSS, J., (1968): Die photogrammetrischen Aspekte der meteorologischen Satellitenbild-Interpretation. Allg. Vermess. Nachr. 7, 289–298.
- SCHOKALSKAJA, S. J. (1953): Die Böden Afrikas. Berlin.
- URVOY, Y. (1937): Notes sur la végétation au Sahara soudanais central. Ann. de Géogr. 46, 270–277.
- WOBBER, F. J. (1968): Orbital photography: applied earth survey tool. Phot. Appl. in Science 7, 21–29.
- WOBBER, F. J. (1969): Environmental studies using earth orbital photography. Photogrammetria 24, 107–165.
- ZEISS – Weltraumkalender 1970.

ABGRENZUNG UND GLIEDERUNG DER HOCHGEBIRGSSTUFE DER ALPEN MIT HILFE VON SOLIFLUKTIONSFORMEN

Mit 6 Abbildungen, 4 Photos und 2 Tabellen

GERHARD FURRER / GUIDO DORIGO*

Summary: Delineation and classification of the high mountain area of the Alps with the aid of solifluction forms.

The IGU Commission on High-Altitude Geoecology proposes the following three criteria for the delineation of the high-mountain area: the upper limit of forest, the snow line of the glacial period, and the lower limit of the solifluidal processes currently at work.

In the research presented here the delineation of the so-called "high region" of the Swiss Alps follows the third criterion, i. e., the use of certain forms of solifluction that takes place under the vegetation cover, called "Girlanden" (see Fig. 3) and "Wanderblöcke" (shifting boulders). These solifluidal forms are mapped in the field along chosen routes. Their vertical distribution reveals a frequency of occurrence of a normal distribution. Hence, within a zone of \pm one standard deviation from the average altitude of the phenomenon in question, nearly 70% of all the findings of that particular form should be situated. This is called the core zone. (See Figs. 1–3.)

The limit of solifluction is defined as the arithmetic average of lower limits of the core zone of "Wanderblöcke" and "Girlanden". The limit of solifluction was determined for forty-eight areas within the Swiss Alps and thereupon statistically generalized with the use of a regression equation (Fig. 4).

Zur Abgrenzung der Hochgebirgsstufe schlug TROLL (1955) die drei folgenden Kriterien vor:

- die heutige obere Waldgrenze als Ausdruck der gegenwärtigen klimatischen und vegetationskundlichen Verhältnisse
- die (letz)-eiszeitliche Schneegrenze als Ausdruck des im Eiszeitalter entstandenen, heute noch in Vorzeifformen vorhandenen und das Hochgebirge beherrschenden Formenschatzes
- die rezente Untergrenze der subnivalen Bodenabtra-

gung als Ausdruck der gegenwärtigen bodenkundlichen und geomorphologischen Dynamik (Untergrenze der gegenwärtigen solifluidalen Vorgänge)

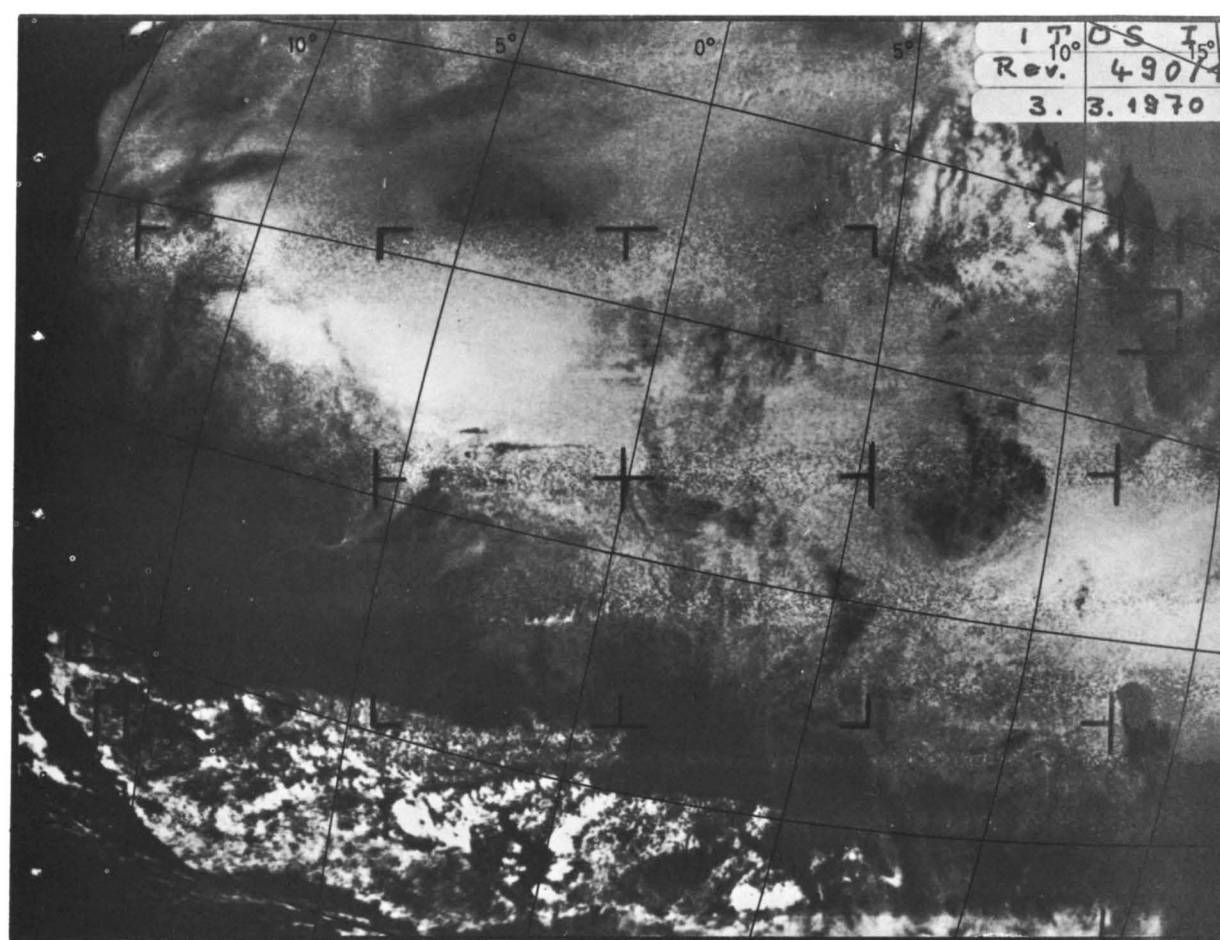
Auch die Kommission für erdwissenschaftliche Forschung der Mainzer Akademie der Wissenschaften und der Literatur (Jahrbuch 1970) hält weiterhin an diesen drei Kriterien zur unteren Begrenzung der Hochgebirgslandschaften fest.

Die gegenwärtige obere Waldgrenze ist in den Alpen schwer zu erfassen, da sie in hohem Maße anthropogen beeinflusst worden ist. Noch größeren Schwierigkeiten begegnet die Rekonstruktion der (letz)eiszeitlichen Schneegrenze. Hingegen eröffnet sich, wie die nachfolgenden Ausführungen darzulegen suchen, in der Abgrenzung der Hochgebirgsstufe mit Hilfe der Solifluktionen(unter)grenze ein durchaus erfolgversprechender Weg.

Die „subnivale Höhenstufe“ (von einzelnen Autoren auch als „rezentes Periglazial“ bezeichnet) erstreckt sich von der Solifluktionen(unter)grenze zur Schneegrenze. Ihr Formenschatz bildet seit etwa 30 Jahren das Objekt geomorphologischer Untersuchung. Dabei liegt u. a. das Schwergewicht auf dem Studium der Verbreitung von Solifluktionsformen, sowohl im Hinblick auf das Problem der Grenzziehung als auch, um Auskunft über die Entstehungsbedingungen von subnivalen Formen zu erhalten.

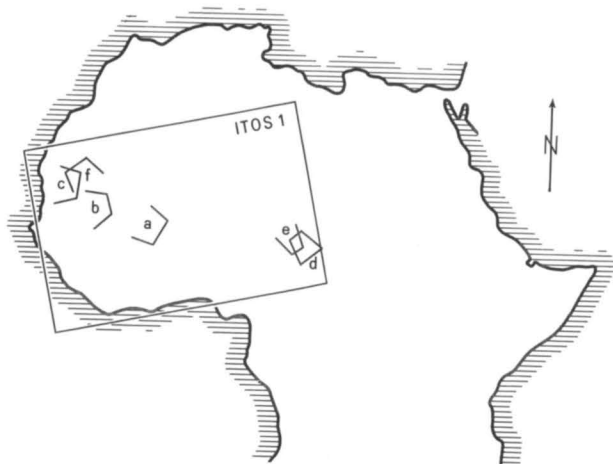
In der subnivalen Höhenstufe bildet zwar die Solifluktion nicht den einzigen Vorgang, der reliefgestaltend wirkt, doch kommt ihr auf Flächen, deren Neigungswinkel einen Maximalwert von etwa 30° nicht übersteigt, die wesentlichste Bedeutung zu. Das Kleinrelief nämlich ist weitgehend durch die Auswirkung solifluidaler Vorgänge geprägt (vgl. auch KAISER, 1965). Somit dürfen Solifluktionsformen im Sinne des 3. Kriteriums von TROLL zur Grenzziehung herangezogen werden, da sie das ausgesprochene Charakteristikum für die subnivale Bodenabtragung bilden. Auf

* Wir danken der Stiftung für wissenschaftliche Forschung an der Universität Zürich für die Unterstützung unserer Feldarbeit.



Luftbild 1: a) ITOS 1 - APT Aufnahme von Westafrika (3. 3. 1970, 14.49 GMT); Rev. Nr. 490/1;
 Bildmittelpunktkoordinaten: 16°50'N 0°06'W
 Telemetered ITOS 1 - recording of West Africa. (3. 3. 1970. GMT: 14. 49) Rev. No. 490/1;
 subsatellite point picture location: 16°50'N 0°06'W

Lageskizze zu Luftbild 1 a).
 Geographic position of aerial photography 1 a).

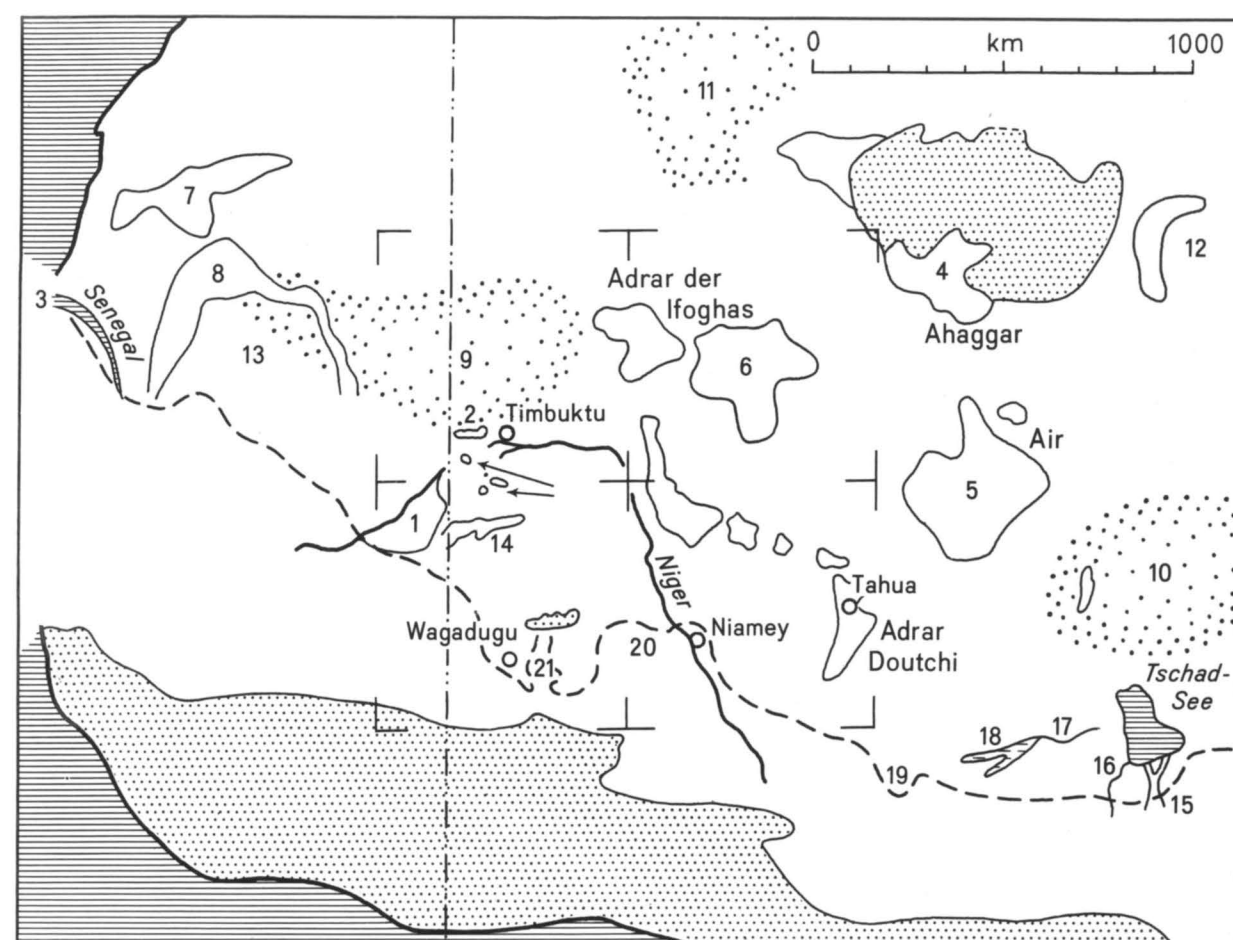


Die Graphik gibt gleichzeitig die Größenordnung und Lage der Gemini - Aufnahmen an (n. einer Vorlage bei NASA 1968), die zum Vergleich in dieser Untersuchung herangezogen wurden, aber aus drucktechnischen Gründen nicht in der Arbeit erscheinen. Sie sind veröffentlicht in NASA 1968.

Die Kleinbuchstaben beziehen sich dort auf folgende Photo - Nummern:

The figure (partly adapted from NASA 1968) simultaneously indicates the relative scale and the position of the Gemini space photographs referred to in this study, but not published here by reason of printing. They are published in NASA 1968.

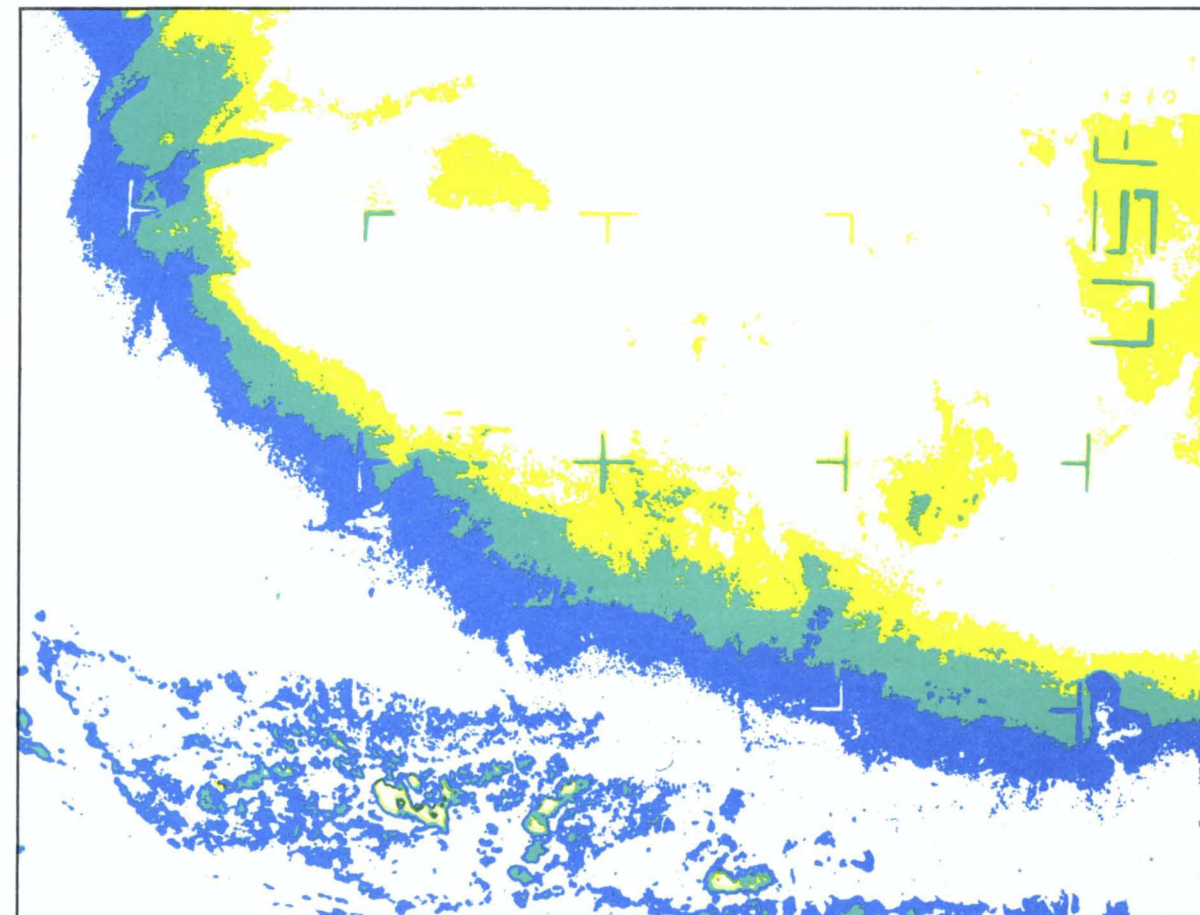
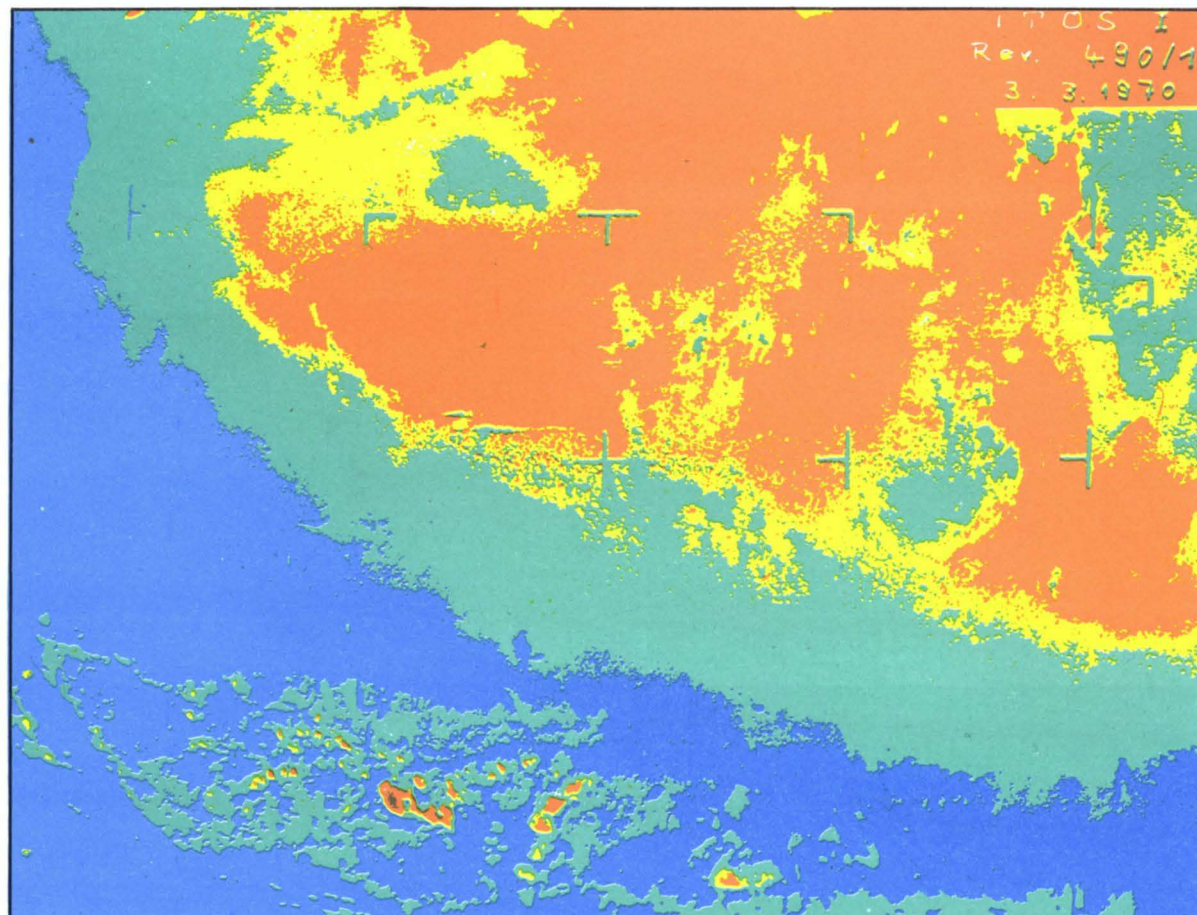
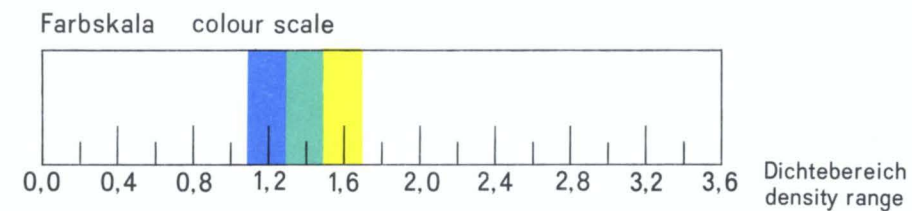
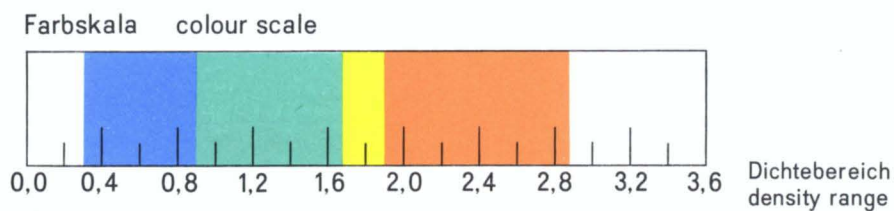
There, the small letters refer to the following photo numbers:



b) Maßstabsgleiche Erläuterungsskizze zu a). Die Zahlenangaben beziehen sich auf den Text.
 Explanatory figure in true scale as to aerial photography a). The numerical data refer to the text.

- | | | | |
|--|---------------------------------|--|--|
| | Bewölkung
clouding | | deutlich abgrenzbare geologisch - morphologische Einheiten
clearly definable geologic - morphologic units |
| | Sandwüste
sandy desert | | markante zonale Tönungsgrenze
striking zonally orientated tone step |
| | Lage des Dichteprofils (Abb. 1) | | position of the density profile (Fig. 1) |

- a - Gemini VI, S 65 - 63247 (16. 12. 1965)
- b - " VI, S 65 - 63251 (16. 12. 1965)
- c - " VI, S 65 - 63255 (16. 12. 1965)
- d - " VII, S 65 - 63969 (17. 12. 1965)
- e - " IX, S 66 - 38444 (6. 6. 1966)
- f - " XII, S 66 - 63471 (13. 11. 1966)



a) Zerlegung der Aufnahme des Wettersatelliten ITOS 1 vom 3. 3. 1970, Revolutionsnummer 490, (Beil. V a) in Flächen gleicher Dichte (Äquidensiten) mit Hilfe des Äquidensitenfilms. Der jeweils erfaßte Dichtebereich geht aus den Zahlenwerten hervor, die der Farbskala untergelegt sind.

Division of the photo taken by the ITOS 1 weather satellite on 3. 3. 1970, revolution number 490, (Suppl. V a) into areas of equal densities (equidensities) with the help of equidensity film. The density range is derived from the values determined from the colour scale.

b) Äquidensitendarstellung eines ausgewählten Dichtebereichs des ITOS 1 - Satelliten - Luftbildes vom 3. 3. 1970, Rev. Nr. 490. (Beil. V a) Die Intervalle von Dichtestufe zu Dichtestufe sind jeweils gleich. Die Lage der einzelnen Äquidensiten in der Dichteskala geht aus dem mitkopierten Dichtekeil hervor.

Equidensity image of a selected density range of the ITOS 1 satellite photo of 3. 3. 1970, revolution number 490. (Suppl. V a) The intervals between shading grades are constant. The location of the individual equidensities in the density scale is derived from the colour scale.