

81.437

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR  
Forschungsbereich Geo- und Kosmoswissenschaften  
**ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIK DER ERDE**

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde  
Nr. 61

Q  
2548  
—  
61

13



**BEITRÄGE ZUR FERNERKUNDUNG**

Geologische Forschungen mit kosmischen Mitteln



Als Manuskript gedruckt  
Potsdam 1979

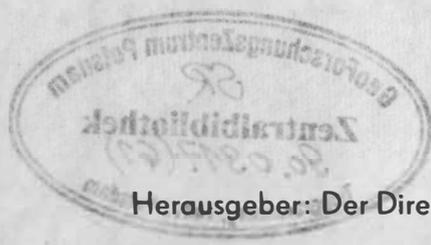
Journal für die  
Physik der Erde  
1970

Die Erde als ein System



ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIK DER ERDE

Geophysikalische Forschungen mit kosmischen Mitteln



Herausgeber: Der Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde Potsdam

12 Monate  
Potsdam 1970

Wissenschaftliche Redaktion: Dr. K.-H. John

Technische Redaktion : Dr. K.-H. John, Dipl.-Ing. G. Marek

Veröffentlichungsgenehmigung der Verwaltung  
Vermessungs- und Kartenwesen Nr. P 96/80

F 363/80

## I n h a l t s v e r z e i c h n i s

Vorwort	5
BANKWITZ, P.; BANKWITZ, E.: Tektonische Fotointerpretation eines Sojus-22-Bildes (MKF-6) vom Südtjanshan-Pamir-Gebiet (UdSSR)	7
МАКАРОВ, В.И.; СКОБЕЛЕВ, С.Ф.; ТРИФОНОВ, В.Г.; ФЛОПЕНСКИЙ, П.В.: Карта линеаментов территории СССР	17
BAŻYŃSKI, I.; MOTYL-RAKOWSKA, I.: Vorläufige Interpretation des Satellitenbildes "Meteor 25" für das Gebiet Polens	28
BANKWITZ, P.; BANKWITZ, E.; FRISCHBUTTER, A.: Fototektonische Inter- pretation von Mitteleuropa nach Aufnahmen der sowjetischen Wettersatelliten Meteor 25 und 28	37
KRULL, P.: Zum bruchtektonischen Bau des Territoriums der DDR und angrenzender Gebiete	61
FEIRER, K.; VIEHWEG, M.; NAUMANN, M.: Vorläufige Ergebnisse zur geologischen Interpretation der METEOR-Aufnahmen vom Territorium der DDR	72
ХОСБАЯР, П.: О Южно-Монгольском полигоне	76
BANKWITZ, P.: Einige methodische Aspekte der Interpretation aerokosmischer Aufnahmen für bruchtektonische Analysen	80
SÖLLNER, R.: Anwendung der digitalen Bildfilterung zur Auf- bereitung aerokosmischer Aufnahmen für die visuelle geologische Interpretation	96
WELLER, M.; LEITERER, U.; SÖLLNER, R.: Erste Arbeiten zur Bestimmung der spektralen Eigenstrahlung der Atmosphäre in Zenitrichtung unter Verwendung der MKF-6-Aufnahmen	99
FREY, L.; KRÄMER, I.: Informationen über Möglichkeiten der Nutzung von aerokosmischen Aufnahmen für die Herstellung von Kartengrundlagen der thematischen Kartographie	104
WEICHELT, H.: Probleme der Bildbearbeitung mit kohärentem Licht	110

## V o r w o r t

Mit dem im Jahre 1967 beschlossenen gemeinsamen INTERKOSMOS-Programm wurde den Ländern der sozialistischen Staatengemeinschaft durch die Sowjetunion die Möglichkeit gegeben, an der Kosmosforschung als einer der modernsten Entwicklungsrichtungen von Wissenschaft und Technik teilzunehmen. Inzwischen haben die Ergebnisse dieser Kooperation eine hohe internationale Wertschätzung erlangt. Eine der bedeutendsten Aufgaben im Rahmen dieser Zusammenarbeit zwischen der UdSSR und der DDR war das im September 1976 durchgeführte Experiment RADUGA zur fotografischen Fernerkundung der Erde aus dem Kosmos. Bei diesem Experiment wurde mit der Multispektralfotografie ein Fernerkundungs-Verfahren eingesetzt, das zu den effektivsten Verfahren der Informationsgewinnung über unsere natürlichen Ressourcen und den Umweltzustand gehört. Bei der Auswertung der während dieses Experiments mit Hilfe der Multispektralkamera MKF-6 gewonnenen Aufnahmen der Erdoberfläche konnten inzwischen in den beteiligten Institutionen der DDR und der UdSSR eine große Zahl methodischer Erkenntnisse für eine Nutzung bei der Lösung verschiedenartiger volkswirtschaftlicher Aufgaben erzielt werden. Sie haben Eingang gefunden u. a. in die Bereiche Kartographie, Geographie und Territorialplanung, Geologie und Bergbau, Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Umweltschutz u. a.

Besonders interessant und wertvoll ist der Beitrag der Fernerkundung für die Lösung geowissenschaftlicher Aufgaben. Bisherige weltweit gesammelte Erfahrungen besagen, daß z. Z. etwa 2/3 aller Nutzenwendungen der Fernerkundung auch auf diesem Gebiet liegen. Bereits diese Tatsache läßt erkennen, daß die Fernerkundungsdaten im Komplex mit den anderen geowissenschaftlichen Informationen bereits gegenwärtig effektiv zur Lösung konkreter geologischer Problemstellungen, insbesondere bei der Kartierung und Suche natürlicher Ressourcen, beitragen.

Ein prinzipielles Problem der Fernerkundung besteht darin, daß die mit aerokosmischen Mitteln aufgenommenen Daten als direkt beobachtbare Größen nicht identisch mit den Parametern sind, die die eigentlich interessierenden Erscheinungen der natürlichen Umwelt charakterisieren. Die Umsetzung der aus den Fernerkundungsdaten gewonnenen Informationen in geowissenschaftlich relevante Größen, die einen großen Erfahrungsschatz an geophysikalisch-geographisch-ökologischen und anderen Erkenntnissen über das jeweils untersuchte Territorium voraussetzt, steht aus diesem Grunde im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten zur Entwicklung einer naturwissenschaftlich begründeten Methodik der Interpretation von Fernerkundungsdaten, wie sie z.B. auch am Methodisch-diagnostischen Zentrum für Fernerkundung (MdZ) des Zentralinstituts für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR betrieben werden. Die Interpretation aerokosmischer Fernerkundungsdaten beruht auf der Existenz enger Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Objekten, Erscheinungen und Prozessen in der Natur, der Widerspiegelung dieser Beziehungen an der Erdoberfläche und der Abbildung dieser Oberflächenerscheinungen auf den aerokosmischen Aufnahmen. Für den Fall der geologischen Interpretation sei als Beispiel

nur auf die Wechselbeziehungen zwischen linienförmigen, bis in große Tiefen reichenden Schwächezonen der Erdkruste mit den in den Fernerkundungsaufnahmen erkennbaren linienförmigen Landschaftselementen (Relief, Gewässer, Boden, Vegetation, Verkehrswege usw.) verwiesen. Erkennbar werden diese direkten und indirekten Interpretationsmerkmale durch geometrische und spektrale Abbildungscharakteristiken auf den Aufnahmen. Zweckmäßig angesetzte Bildbearbeitungstechniken als Vorstufe zur gegenwärtig meist noch visuell ausgeführten Bildinterpretation steigern dabei den Interpretationsertrag.

Fragen der geologischen Interpretation aerokosmischer Aufnahmen, ersten Ergebnissen sowie den diese Aufgabe eng berührenden Problemen der interpretationsgerechten Bildvorverarbeitung war das vom MdZ vom 4. bis 10. 9. 1977 in Merseburg veranstaltete wissenschaftliche Kolloquium "Geologische Forschung mit kosmischen Mitteln" gewidmet, an dem Vertreter aus der UVR, DDR, CSSR, MVR, VRP und der UdSSR teilnahmen.

Das vorliegende Heft enthält im wesentlichen die überarbeiteten Fassungen der Vorträge dieser Veranstaltung - der ersten, die zum Themenkreis der geologischen Interpretation von Fernerkundungsdaten im Rahmen der INTERKOSMOS-Zusammenarbeit durchgeführt wurde.

Allen, die zu ihrem Gelingen beigetragen haben - insbesondere dem Vorbereitungs-komitee unter Leitung von Dipl.-Phys. R. SÖLLNER - gilt nochmals unser herzlicher Dank.

Potsdam, Dezember 1979

K.-H. MAREK

Tektonische Fotointerpretation eines Sojus-22-Bildes (MKF-6)  
vom Südtjanshan-Pamir-Gebiet (UdSSR)

von

Peter BANKWITZ und Elfriede BANKWITZ 1)

Z u s a m m e n f a s s u n g

Eine Sojus-22-Aufnahme (Kamera MKF 6) von Mittelasien wurde tektonisch interpretiert. Aus verschiedenen geomorphologischen und geologischen Indikationen wird eine Vorstellung über den möglichen neotektonischen Deformationszustand diskutiert.

S u m m a r y

A picture of a part from Central Asia (USSR) taken from the spacecraft Sojus 22 is explained in a tectonic manner. From different geomorphological and geological informations one possibility of the neotectonic state of deformation is discussed.

Р е з ю м е

Снимок Средней Азии, полученный с космического корабля "Союз-22" камерой МКФ-6, интерпретируется в целях тектоники. Исходя из различных геоморфологических и геологических признаков, рассматривается представление о возможном неотектоническом состоянии деформации.

1. Allgemeiner Überblick

Die 1978/79 sehr oft abgedruckte Mittelasien-Aufnahme, aufgenommen von der Mannschaft des sowjetischen Raumschiffs Sojus 22, zeigt einen Ausschnitt von Teilgebirgen des Südtjanshan (südlich des Fergana-Beckens) sowie den Nordteil des Pamir. An den Südrand des Fergana-Beckens schließt sich das Alai-Gebirge bis zum Fluß Kysylsu an. Der Kysylsu folgt einer jüngeren Kreidesenke, die das Paläozoikum beider Flanken trennt und im Bild (rechts) deutlich als andersartiges Gesteinsmaterial an Unterschieden in der Textur zu erkennen ist. Zwischen Kysylsu und Muksu erstreckt sich der Transalai. Die Störungszone im Muksu-Tal bildet den Nordrand des Pamir (Pamir-Überschiebung). Die Höhe der Gebirgszüge nimmt von Süden (über 7000 m) nach Norden (3000 - 5000 m) hin ab (im Bild von unten rechts nach oben links). Der große Schwemmfächer im Bild links oben leitet über zu der Ebene, in der die Stadt Fergana und das gleichnamige Becken liegen.

1) Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Physik der Erde, Institutsteil Berlin, Bereich Geologie

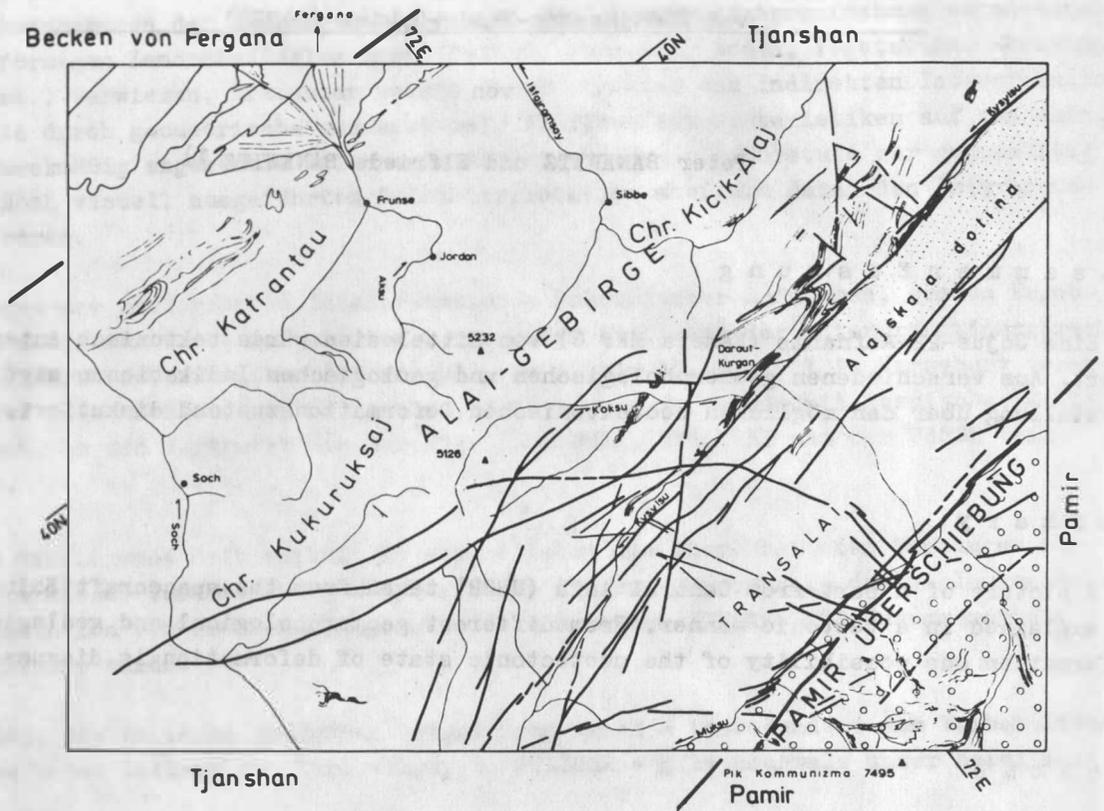


Abb. 1 Fotointerpretation einer Multispektralaufnahme von Sojus 22  
 Bildausschnitt: Teile von Südtjanshan und Pamir; linke obere  
 Ecke: Rand des Fergana-Beckens  
 Bildinhalt: Orientierungsskizze mit größeren Flüssen und  
 Störungslinierungen  
 Kreissymbole: Pamir; Punkte: Kreidesedimente im Alai-Tal;  
 gebänderte Zonen rechts und links oben im Bild:  
 Schicht-Streichen; rechts unten: Talgletscher  
 im Pamir.

Das aride Klima des Gebiets wird deutlich an der geringen Vegetation und der intensiven mechanischen Verwitterung: tiefe Taleinschnitte, große Schuttfächer. Die geringe morphologische Maturität dieser Gesteinswüste zeigt sich an den jungen Verwitterungsformen: geringe Einebnung, steile Hänge, scharfe Gebirgsgrate, scharfkantige Grenzscheiden zwischen den Nebentälchen, tiefe keilförmige Erosionsrinnen, schmale Talböden der Hauptflüsse, Schuttkegel, die sich gegenseitig überschneiden. Das Gebiet muß neotektonisch aktiv sein; rezente Seismizität wäre auch dann anzunehmen, wenn keine diesbezüglichen Kenntnisse über das Gebiet vorlägen.

## 2. Geologische Interpretation

Im Mittelpunkt der Interpretation stand die Bruchtektonik dieses Gebietes. Doch sollen auch einige auffallende Bildmerkmale anderer Natur erwähnt werden.

### 2.1. Drainagesystem

Am deutlichsten charakterisiert das Drainagesystem die geomorphologischen Gegebenheiten dieses Gebiets. In Abb. 1 sind zum besseren Überblick lediglich die wichtigsten Flüsse, Gletscher und Störungen eingetragen, so wie sie dem Satellitenbild zu entnehmen sind. Sie lassen im Zentrum der Abb. 1 und 2 eine Wasserscheide erkennen, die sich am Nordhang des Kysylsu weiter nach Osten erstreckt. Die Flußläufe führen ständig Wasser, erkennbar an der linearen Vegetation innerhalb des Flußtales bzw. an den Oasen. Die überwiegende Anzahl der Nebenflüsse sind perennierend; eine Ausnahme bilden Gebiete, deren Bäche durch Gletscher gespeist werden.

Im Bild sind zahlreiche Gebirgs- und Talgletscher zu erkennen, denen eine große Bedeutung für den Wasserhaushalt dieses Gebietes zukommt. Eingetragen in Abb. 1 sind nur die größten Talgletscher, die am weitesten in die Täler hinabreichen. Sie sind eine charakteristische Erscheinung durch das Streifenmuster des Moränenschutts auf dem Gletscher in der Abschmelzzone.

Eine extrem enge Zertalung ist typisch für aride Hochgebiete (Abb. 2); sie soll im einzelnen hier nicht besprochen werden. Doch ist zu verweisen auf geomorphologische Erscheinungen, die als direkter Ausdruck t e k t o n i s c h e r Vorgänge zu interpretieren sind:

- 1) An mehreren Stellen sind Flußanzapfungen zu beobachten, die durch rückschreitende Erosion infolge rezenter Hebung des Gebiets entstehen. Beispiel: je ein Nebenfluß des Muksu und des Kysylsu bei Daraut-Kurgan.
- 2) Die feine enge Zertalung der steilen Nordhänge des Alai-Gebirges, welche den stufenweisen Übergang zum Fergana-Becken bilden, wird durch Störungen beeinflusst. Das abrupte Einsetzen der Zertalung an den scharfen Graten der Gebirgskämme oder an anderen Linien zeigt die Lage von Störungen an. Das gilt besonders für die sehr schmalen Gebirgsrücken westlich der Ortschaft Frunse; südöstlich Frunse ist der Grat eines Rückens fiedrig versetzt durch spitzwinklig darüber hinweglaufende Störungen. Ebenso fiedrig setzen - geradlinig aneinander gereiht - die Erosionsrinnen ein.

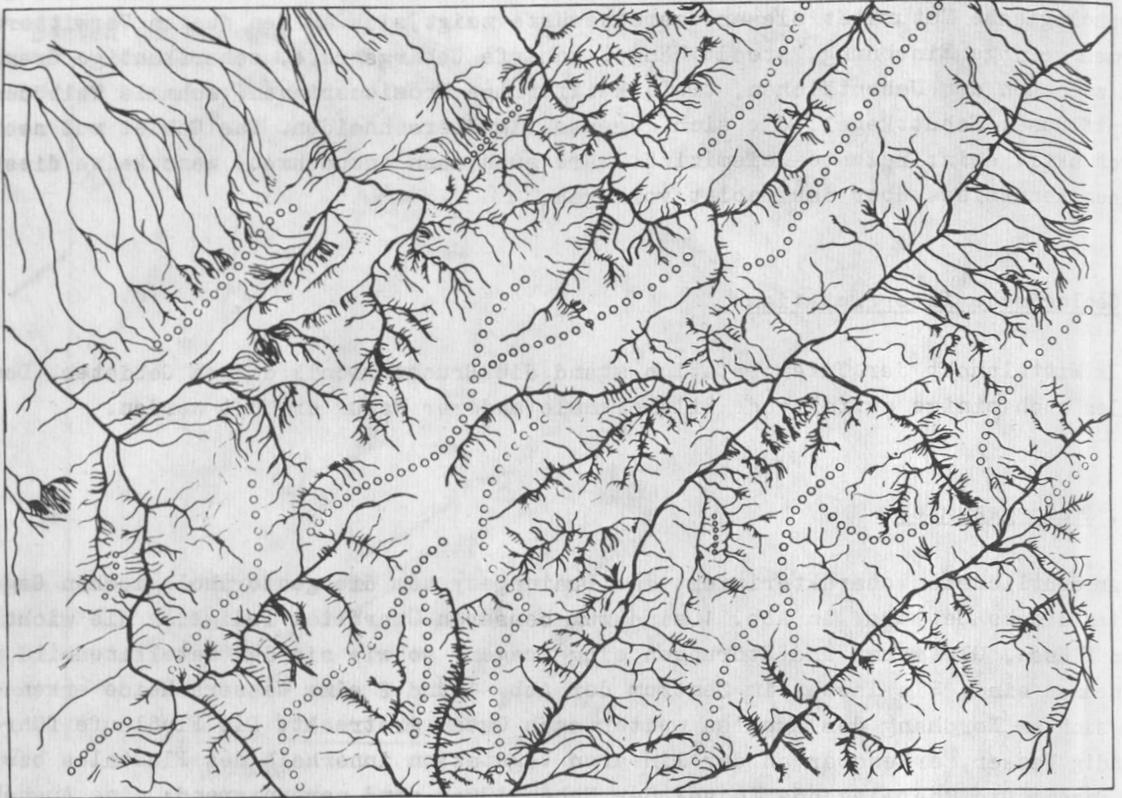


Abb. 2 Fotointerpretation einer Multispektralaufnahme von Sojus 22  
 Bildausschnitt: Teile von Südtjanshan und Pamir; linke  
 obere Ecke: Rand des Fergana-Beckens

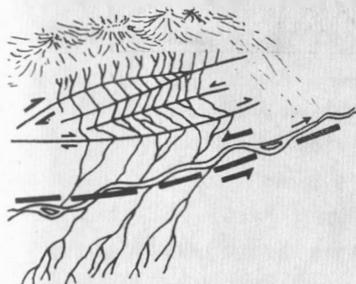
Bildinhalt: Drainagesystem; Punktreihen: Wasserscheiden

Unterschiede in der Art des Drainagenetzes geben sehr deutlich Unterschiede des Gesteinsuntergrundes und der geologischen Strukturen wieder. Es ist das Bild einer unreifen Landschaftsformung.

Geradlinig erscheint ferner an manchen Stellen der untere Teil solcher Erosionsrinnen abgeschnitten, z. B. am Südhang des Kysylsu-Tales. Auch hier wird durch den unterschiedlichen Einschnitt der Nebentälchen eine Störung angezeigt. Starke Schuttfächer überdecken den unteren Teil. Der Transalai südlich dieser Störung unterliegt rezenter Hebung, die offenbar an dieser Störung in der Intensität wechselt. Das führt zu verstärkter Erosion unterhalb (südlich) der Störungslinie und zu verstärkter Ablagerung des Erosionsschutts hangabwärts. Dieses Beispiel ist in seiner Erscheinung lehrbuchhaft. Die Störungslinie selbst ist zu erkennen als feine Fotolineation, wird jedoch in erster Linie deutlich durch das Verhalten des Drainagesystems.

- 3) An zahlreichen Stellen (20 davon sind in Abb. 3 dargestellt) sind aus dem Verlauf der Erosionsrinnen horizontale Verschiebungen abzulesen oder zu mußmaßen. Bei gleichförmiger Richtungsänderung vieler paralleler Abflußrinnen an Störungslinien in eine der generellen Geländeneigung entgegengesetzte Richtung, darf man auf Verschiebungen flüßaufwärts schließen. Wäre diese Verschiebung schon vor längerer Zeit ausgeklungen, sollten sich die Zuflüsse inzwischen einen gravitativ bedingten Abfluß geschafft haben und die alten Einmündungen wären erodiert bzw. zugeschüttet worden. Hier liegen also deutliche Hinweise auf rezente bzw. neotektonische Horizontalverschiebungen vor.

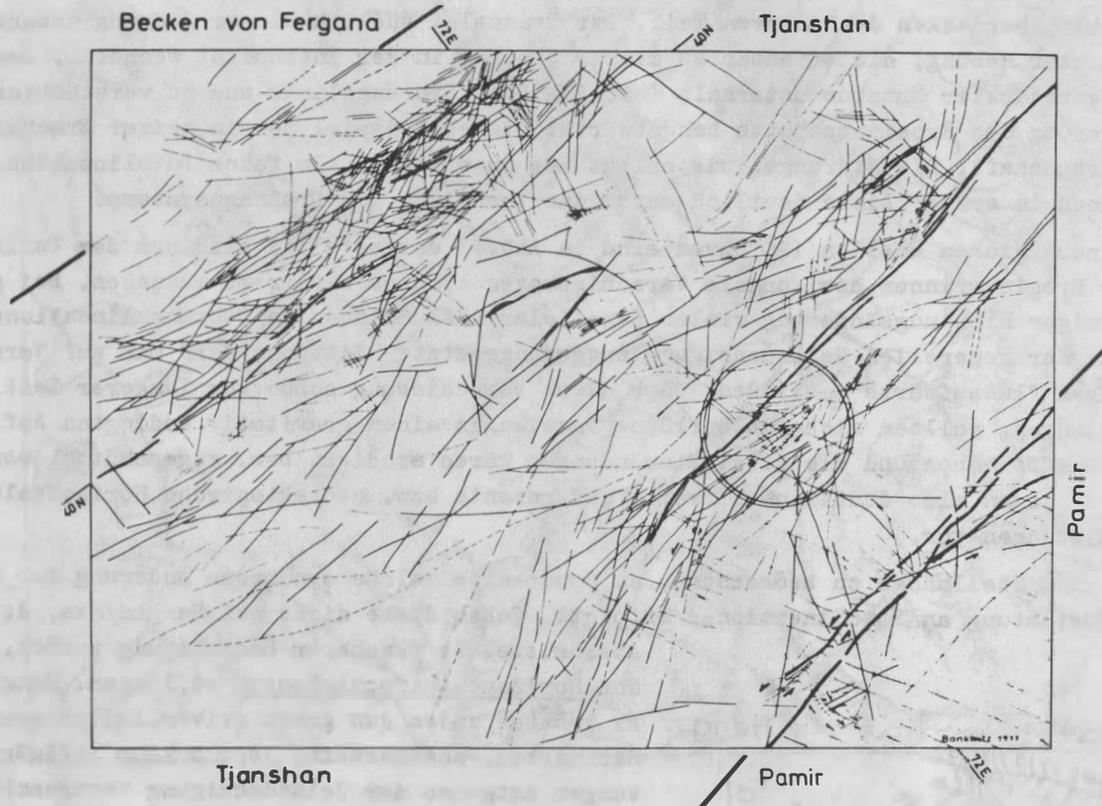
Es sind Steilhänge zu beobachten, an denen eine solche synchrone Änderung der Abflußrichtung an Fotolineationen erfolgt. Gehen diese nicht auf Hangknicke, d. h. Abschnitte mit flacherer Hangneigung zurück, müssen Horizontalverschiebungen vorliegen. Hangknicke könnten zudem den gravitativen Abfluß zwar modifizieren, andererseits jedoch kaum Abflußrichtungen entgegen der Geländeneigung verursachen. Hangverflachungen würden sich durch Ablagerungen von Lockermassen erkennen lassen, sie kommen als Ursache für das skizzierte Beispiel nicht in Frage. Es handelt sich vermutlich um eine Zone relativ enger Zerblockung mit differenzierten Horizontalverschiebungen.



## 2.2. Gesteinsformationen

Eine Erläuterung der im Bild erkennbaren Gesteinsformationen wird hier nicht gegeben. Erwähnt werden sollen nur vier Erscheinungen wegen der Besonderheiten ihres Auftretens.

- 1) Im Zentrum des Bildes, vor allem im Bogen des Koxu-Flusses, treten nach der geologischen Karte magmatische Körper auf (Abb. 1). Vermutlich stehen die ringförmigen Strukturen dieses Gebietes, die teilweise durch ein ringförmiges Entwässerungssystem hervorgerufen werden, damit im Zusammenhang.
- 2) Die Gesteine des Alajskaja dolina (Kreidesedimente) heben sich deutlich vom älteren Paläozoikum beider Flanken ab. Das Tal bildet eine tektonische Senke, die zu beiden Seiten von Störungen begrenzt ist. Der nördlichen Störung folgt der Lauf des Kysylsu. Die Kreide wird von breiten Schuttfächern des Transalai überdeckt.



**Abb. 3** Fotointerpretation einer Multispektralaufnahme von Sojus 22  
 Bildausschnitt: Teile von Südtjanshan und Pamir; linke  
 obere Ecke: Rand des Fergana-Beckens  
 Bildinhalt: Störungslineationen

Durchgezogene Linien: deutliche Lineationen; gestrichelte  
 Linien: weniger deutliche Lineationen; kleine Pfeile mar-  
 kieren Fotolineationen mit Horizontalverschiebung.

- 3) In Abb. 1 wurden einige Stellen mit besonders deutlichem Schichtstreichen dargestellt. Die feinen Streifen entsprechen einem beobachteten Gesteins- bzw. Materialwechsel. Nördlich der Kysylsu-Störung sind schmale, *f a l t e n f ö r m i g e* Streifen zu erkennen, die den Schichtlauf des Kambrium bis Silur sichtbar machen. Die Schichtstreifen sind in sich deutlich gebändert, zeigen also eine Wechsellagerung an, und werden durch eine spezifische Parallelzertalung charakterisiert. Das bedeutet, daß es sich um sehr feinklastisches Material handeln dürfte. Nördlich Daraut-Kurgan ist der Ausstrich einer langgestreckten Synklinale zu beobachten, deren N-Flanke über den Taleinschnitt des Koxu hinwegstreicht. Weiter nach Osten (zur rechten oberen Bildecke) sind die Flanken der sich anschließenden Umbiegungen an *Q u e r s t ö r u n g e n* versetzt.
- 4) An der Grenze des Alai-Gebirges zum Fergana-Becken sind - bereits unter Bedeckung - rückenförmige Ausstriche von (dunklen) devonischen Gesteinsfolgen sichtbar (nördlich Frunse). An wenigen Stellen streichen sie inselartig an der Oberfläche zutage. Ihre zusammenhängenden Zonen sind unter der Bedeckung gut zu identifizieren.

### 2.3. Lineationen

Die markantesten Richtungen des Bildausschnitts ergeben sich durch Fotolineationen (als teils vermutlicher, teils sicherer Ausdruck von Bruchzonen) und einige Haupttäler (Abb. 1), die wiederum diesen Störungen parallellaufen (Kysylsu-Störung, Muksu-Störung = Pamir-Überschiebung) sowie durch die Gebirgskämme. Die Gebirgskämme verlaufen im Bild mit ENE--WSW-Streichen diagonal.

Die Hauptlineationen (Abb. 3), die sich oft deutlich als Störungen zu erkennen geben, haben eine E--W-Richtung und schneiden die Gebirgskämme spitzwinklig. Sie entsprechen den *n e o t e k t o n i s c h e n* Richtungen dieser Region (NIKONOV 1977). Im ganzen ist eine etwas verwirrende Fülle von Lineationen zu beobachten, von denen die E--W-gerichteten dominieren. Sie sind teilweise deutlich als Auf- oder Abschiebungen zu identifizieren. An ihnen sind - vor allem im Bereich des 40. Breitengrades am Nordrand des Alai-Gebirges - *h o r s t a r t i g e* Aufschiebungen und *t r e p p e n - f ö r m i g e* Absenkungen zu beobachten. Steilstufenbildungen sind auch im Transalai zu beobachten (südlich der Kreidesenke), bevorzugt an dessen Nordrand.

Die als Störungen anzusprechenden Lineationen sind inhomogen verteilt. Sie häufen sich besonders in einer Zone am Nordrand des Alai-Gebirges, d. h. am Abfall zum Fergana-Becken. Eine 2. Häufungszone liegt im Bereich der Kysylsu-Störung bzw. nördlich davon, also an der Grenze zwischen Alai und Transalai. An mehreren Stellen sind junge Horizontalverschiebungen zu beobachten. Diese Beobachtungen werden gestützt durch geologische, geodätische und seismotektonische Untersuchungen, die in diesem auch rezent seismisch aktiven Gebiet seit vielen Jahren durch sowjetische Geowissenschaftler erfolgen.

Eine Analyse der Richtungen zeigt, daß sich offenbar hauptsächlich zwei orthogonale Systeme spitzwinklig überlagern, von denen jeweils das um E--W-streichende wesentlich bedeutsamer ist (häufiger, dichter, deutlicher). Vor allem zur E--W-Richtung gehören langdurchhaltende Lineationen; sie treten gehäuft in 2 bzw. 4 Zonen auf und besitzen regionale Bedeutung. Sie bilden die Grenzen der Hauptstrukturen Tjânshan und Pamir sowie

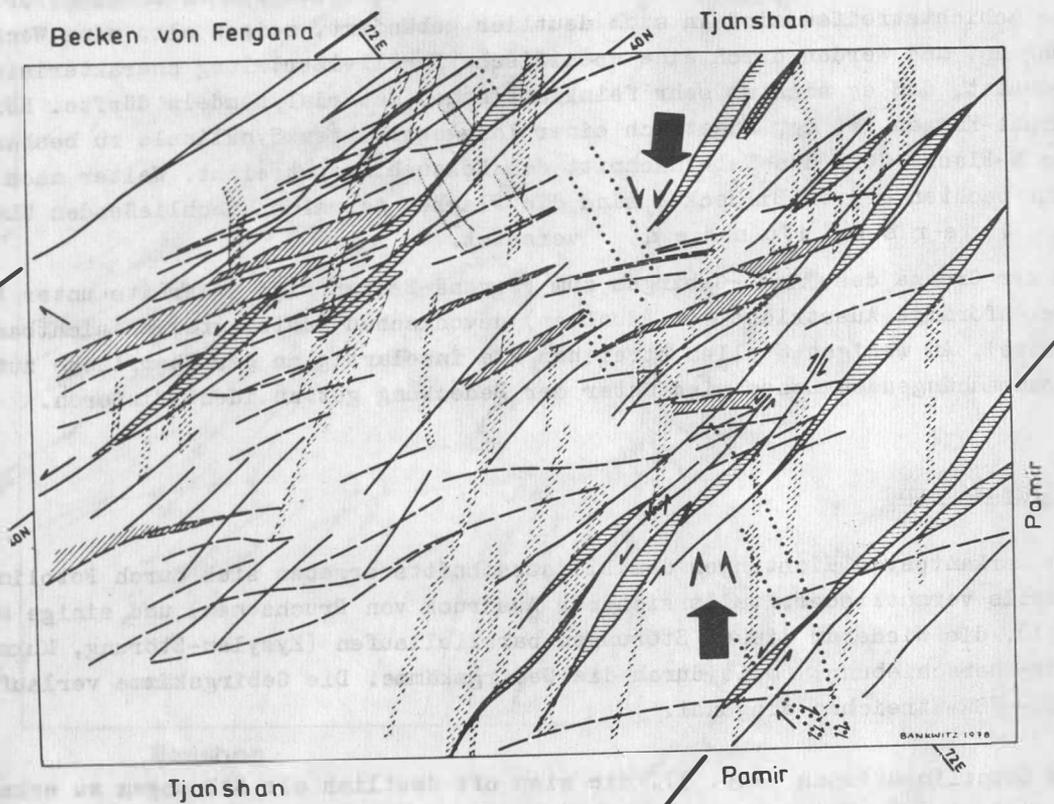


Abb. 4 Fotointerpretation einer Multispektralaufnahme von Sojus 22  
 Bildausschnitt: Teile von Südtjanshan und Pamir; linke  
 obere Ecke: Rand des Fergana-Beckens  
 Bildinhalt: Schematische Darstellung des durch Fotolinea-  
 tionen angezeigten Bruchmusters, abgeleitet  
 aus Abb. 3

Dargestellt wurden die vier häufigsten Lineationsrichtungen;  
 Zonen mit höherer Lineationsdichte sind schraffiert einge-  
 tragen. Aus den im Sojus-Bild zu erkennenden Vertikal- und  
 Horizontalbewegungen wurde im Zusammenhang mit dem Linea-  
 tionsverlauf die mögliche Orientierung der Hauptdruckrich-  
 tung abgeleitet.

des Transalai. Die komplementäre N--S-Richtung ist seltener und tritt meist in Form von kürzeren Lineationen auf.

Die WNW--ESE-Richtung ist ebenfalls sehr zahlreich vertreten, aber durch nicht so weit durchhaltende Lineationen; ihre Gegenrichtung mit NE--SW-Streichen ist vor allem in der Südhälfte des Bildes gut zu erkennen; sie bilden zusammen kein rechtwinkliges System. Je eine Richtung beider Systeme (E--W- und NE--SW-Richtung) zeigt bevorzugt die Merkmale horizontaler Verschiebungen.

### 3. Tektonische Schlußfolgerungen

Aus den dokumentierten Beobachtungen lassen sich u. a. diese tektonischen Schlußfolgerungen ableiten:

- 1) Die noch nicht erodierten Taleinschnitte kleiner Nebentäler mit flußaufwärts gerichteten Lauf belegen eine junge Horizontalverschiebung der Erdkruste.
- 2) Diese Horizontalverschiebungen dokumentieren, daß die Horst- und Treppenstufenbildungen teilweise komplexe Bewegungen mit Diagonalverschiebung anzeigen, d. h. Krustenbewegungen mit einer Vertikal- und einer Horizontalkomponente.
- 3) Die inhomogene Verteilung der Störungsrichtungen ungefähr parallel zum Streichen der Gebirgskämme deutet auf zwei (bzw. vier) Zonen maximaler Kompression in der Kruste hin (Abb. 3).
- 4) Die inhomogene Verteilung weist in den Häufungsstellen 1. Ordnung und in den entsprechenden Kreuzungsstellen von zwei Richtungen auf möglicherweise seismisch aktive Gebiete mit einer Tendenz zur Mineralisationshöflichkeit.
- 5) Auf die Erstreckung seismisch besonders gefährdeter Gebiete zwischen E--W-streichenden Störungszonen und im Bereich von Kreuzungspunkten mit anderen Lineationsrichtungen wurde bereits durch TRIFONOV u. a. (1978) und NIKONOV (1977) hingewiesen. Die vorliegende Analyse könnte diese Vorstellungen festigen.
- 6) Auffällig ist, daß zahlreiche der in Abb. 3 und 4 dargestellten Lineationen über die geologischen Strukturen spitzwinklig hinweggehen, sie also schneiden. Das betrifft Teilstrukturen ebenso wie die Großstrukturen des Südtjanshan und des Pamir. Im Zusammenhang mit den übrigen Beobachtungen läßt das den Schluß zu, daß die Bewegungen und die Krustendeformationen sehr differenziert ablaufen, aber darüber hinaus beide Teile, Tjanshan und Pamir, neotektonisch von einem übergeordneten Deformationsgeschehen gemeinsam erfaßt werden.

Betrachtet man die einzelnen Richtungen detaillierter, so wird deutlich, daß eine Reihe besonders markanter Zonen mit Häufung von Lineationen zwischen zwei spitzwinklig sich kreuzenden Richtungen pendeln. Die heute aktiven Zonen benutzen offensichtlich streckenweise ältere Störungsrichtungen. In Abb. 4 sind Häufungszonen der Hauptrichtungen dargestellt, ferner die markantesten Horizontalverschiebungen, die mit ihrem Verschiebungssinn den Ergebnissen seismotektonischer Untersuchungen in diesem Gebiet zu entsprechen scheinen.

Das aus der fotogeologisch-tektonischen Interpretation sich ergebende Bild in Abb. 4 läßt eine Aussage über die rezent vermutlich herrschende Orientierung der Hauptspannungsrichtungen im dargestellten Gebiet zu. Die maximale Hauptspannung (Kompression) verläuft wahrscheinlich ungefähr NE--SW. Die Horizontalverschiebungen sind am häufigsten und deutlichsten in der Nordrandzone des Alai-Gebirges und des Transalai sowie im Bereich einer Überschiebung des Pamir auf den Tjanshan zu beobachten. Die Annahme einer N--S-Einengung senkrecht zur Überschiebung, mit einer Achse der maximalen Hauptspannung in N--S-Richtung, läßt sich nicht mit den zu beobachtenden Horizontalverschiebungen in Einklang bringen und könnte auch nicht die deutlich erkennbaren Schrägauf- bzw. -abschiebungen bewirken.

Im Rahmen von regionalen Interpretationen verschiedener Disziplinen in der hier angedeuteten Weise kann die Fotointerpretation einen Beitrag zur Untersuchung der Krustendeformation leisten.

#### Literaturverzeichnis

- NIKONOV, A.A.: Golocenovyje i sovremenyje dviženija zemnoj kory  
Moskva: Nauka 1977, 240 S.
- TRIFONOV, V.G. u. a.: Geologičeskoe izučenie Zemli is kosmosa  
Trudy geol. inst. ANSSSR, Moskva 317 (1978) 227 S.

Карта линеаментов территории СССРВ.И. МАКАРОВ, С.Ф. СКОБЕЛЕВ, В.Г. ТРИЗОНОВ и П.В. ФЛОРЕНСКИЙ<sup>1)</sup>

## Резюме

В этой работе дается анализ карты линеаментов для территории СССР, которая была составлена на основе космической информации, полученной с космических аппаратов различных систем, как тип "Метеор", "Ландсэт" и с пилотируемых кораблей типа "Союз" (фототелевизионные и сканерные изображения). Приводится таблица характеристик космических изображений, использованных при составлении этой карты. Подробно обсуждаются линеаменты и геологическая структура земной поверхности. Рассматриваются ориентировка, протяженность и плотность линеаментов и их соотношение с известными структурами земной коры. В конце работы даются выводы.

## Summary

The present work offers a regional geological analysis of the map of the photo-lineaments of the territory of the U.S.S.R. This map has been made on the basis of cosmic photos taken by different types of manned and unmanned satellites (e. g. Meteor, Sojus, Landsat) by means of photo, television, and Scanner systems. Frequency, orientation, and length of the discovered photo lineaments are investigated and the relations to already known local, regional and transregional structures of the crust of the earth especially to territories with frequent occurrences of recent movements are discussed.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gibt eine regionalgeologische Analyse der Karte der Foto-lineamente für das Territorium der UdSSR. Diese Karte wurde auf der Grundlage kosmischer Aufnahmen, die von verschiedenen Typen bemannter und unbemannter Satelliten (z. B. Meteor, Sojus, Landsat) mittels Foto-, Fernseh- und Scannersystemen gewonnen wurden, erstellt. Es werden Häufigkeit, Orientierung und Länge der aufgefundenen Foto-lineamente untersucht und die Beziehungen zu bereits bekannten lokalen, regionalen und überregionalen Strukturen der Erdkruste, besonders zu Gebieten mit gehäuftem Auftreten rezenter Bewegungen, diskutiert.

<sup>1)</sup> Академия Наук СССР, Геологический институт, Москва

## I. Введение

Одной из особенностей структуры земной поверхности, которая особенно ярко проявилась на изображениях поверхности Земли из космоса, являются так называемые линеаменты. Они видны в горно-складчатых областях и на платформенных равнинах, в древних и молодых структурах, в разных климатических зонах и на изображениях разных масштабов. Космическая съемка вызвала огромный интерес к этим образованиям, которые по ряду признаков были известны геологам с середины XIX века, начиная с работ Седжвина и Хопкинса в Англии, Дюбре во Франции, Кьерулфа в Норвегии и Хоббса в США. Последний впервые предложил и сам термин "линеамент". Об этом интересе свидетельствуют, в частности, организация Всесоюзного совещания по планетарной трещиноватости в Ленинграде в 1973 г. и Международной конференции по "новой тектонике основания" ( *The New Element Tectonics* ) в Солт Лэйк-сити (США) в 1974 г. В соответствии с программой Рабочей группы социалистических стран по изучению природных ресурсов Земли дистанционными методами в Геологическом институте АН СССР ведутся работы по созданию карты линеаментов территории СССР, которая и рассматривается в данной статье.

В ее составлении приняли участие В.И. МАКАРОВ, С.Ф. СКОБЕЛЕВ, В.Г. ТРИФОНОВ и П.В. ФЛОРЕНСКИЙ (Геологический институт АН СССР), Р.И. ГРИШКЯН (Институт тектоники и геофизики ДВНЦ АН СССР), И.И. БАШИЛОВА, В.А. БУШ, А.В. ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКИИ, Г.В. МАХИН, Л.И. СОЛОВЬЕВА, С.И. СТРЕЛЬНИКОВ (Объединение "Аэрогеология" Министерства геологии СССР). Сводка материалов и общая редакция осуществлена В.И. МАКАРОВЫМ (ГИН АН СССР).

## 2. Использованные материалы

Карта (рис. 1) составлена по данным дешифрирования изображений, полученных с космических аппаратов различных систем (табл. 1). Это – фототелевизионные и сканерные изображения, полученные в разное время с автоматических спутников "Метеор" (СССР) и *Landsat-I* (США), и фотографии, сделанные космонавтами с космических кораблей "Союз-8" (В.А. ШАТАЛОВ, А.С. ЕЛИСЕЕВ), "Союз-9" (А.Г. НИКОЛАЕВ, В.И. СЕВАСТЬЯНОВ), "Союз-12" (О.Г. МАКАРОВ, В.Г. ЛАЗАРЕВ), "Союз-22" (В.Ф. БЫКОВСКИЙ, В.В. АКСЕНОВ) и орбитальных станций "Салют-1" (Г.Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, В.Н. ВОЛКОВ, В.И. ПАЦАЕВ), "Салют-4" (П.И. КЛИМЖ, В.И. СЕВАСТЬЯНОВ).

Разрешение всех этих материалов или степень генерализации рисунка земной поверхности весьма различны (см. табл.), дробность или ранг дешифрируемых объектов, следовательно, также различны. Для получения однородной картины все материалы были приведены к единому уровню генерализации. Это – уровень изображений, получаемых со спутников "Метеор", которым обеспечена вся территория СССР и которые, таким образом, могли быть определенным эталоном в данном отношении. Этот уровень генерализации определен избранным масштабом карты (1:10.000.000), отвечает состоянию изученности линеаментов всей территории СССР. Конечно, для многих крупных областей и районов СССР выполнены более детальные исследования линеаментов. Это – Кавказ, Туркмения, Казахстан и Средняя Азия, которые стали опытными объектами с самого начала применения космических методов для геологических исследований в СССР (Исследование природной среды космическими средствами, т. 1, 1973; т. 2, 1974; т. 5, 1976; Известия ВУЗ-ов, геология и разведка, № 7, 197; № 2, 1974; № 11, 1976).

Табл. 1 Характеристика космических изображений, использованных для составления карт линейментов СССР.

Спутники	Съемочная аппаратура	Средняя высота съемки, в км	Разрешение изображения на местности, в метрах	Спектральный диапазон съемки, в мкм
"Сояз-9"	фотографическая	250	100 - 300	видимый
"Сояз-12"	"-"	350	40 - 210	0,47 (макс.) 0,54 (макс.) 0,58 (макс.) 0,64 (макс.) 0,66 (макс.) 0,68 (макс.)
"Сояз-22"	"-"	250	20 - 60	0,46 - 0,52 0,52 - 0,56 0,58 - 0,62 0,64 - 0,68 0,70 - 0,74 0,79 - 0,89
"Салют-1"	"-"	250	20 - 300	видимый
"Салют-4"	"-"	340	200	0,50 - 0,60 0,60 - 0,70 0,70 - 0,80 0,80 - 0,84
(Ландсат-1)	сканирующая	900 - 920	90	0,50 - 0,60 0,60 - 0,70 0,70 - 0,80 0,80 - 1,10
"Метеор"	телевизионная оптическая			0,50 - 0,60 0,60 - 0,70 0,70 - 0,80 0,80 - 1,10
	телевизионная оптико-механическая (сканирующая)	600 - 900	250 - 1500	0,70 - 0,80 0,80 - 1,10

автоматические

пилотируемые

### 3. Линейменты и геологическая структура земной поверхности

Не повторяя опубликованные ранее материалы и выводы по разнообразным аспектам изучения линейментов (Трифонов и др., 1978) мы остановимся лишь на тех моментах, которые дают предварительный анализ построенной карты.

Сопоставление схем линейментов, оглашифрованных по космическим снимкам с извест-

ными структурными картами показывает, что лишь часть линеаментов отвечает разломам, выраженным в структуре поверхности. Многие же линеаменты не находят прямой связи с известными элементами приповерхностной структуры. Среди линеаментов отождествленных с известными разломами, назовем, например, зоны Копетдагского, Таласо-Ферганского, Джалаир-Найманского, Восточно-Саянского и ряда разломов Урала. В большинстве своем эти и подобные им разломы достаточно активно развиваются в неотектоническую стадию, представляя деформации сколового типа. Такие разломы обычно хорошо изучены и освещены в литературе, поэтому подробное их рассмотрение здесь опускается.

Особенный интерес представляют линеаменты, не находящие прямого отражения в приповерхностной структуре земной коры. Обращает внимание то, что частота линеаментов равномерна как в горных и орогенических областях, так и в равнинных, платформенных. Если выделение линеаментов в областях первого типа не вызывает особых вопросов, так как линеаменты здесь отвечают долинам рек, значительным переходам рельефа, разломам, то в платформенных областях изучение линеаментов по космическим снимкам ознаменовало получение принципиально новой информации об их структуре. На платформах разломы выделяют по смещению геологических границ, резкому изменению фации и мощностей, а разломы в погребенном под осадочным чехлом фундамента – по большим градиентам геофизических полей. Почти все выделенные по этим признакам разломы отождествлены с линеаменами.

Но кроме того, на космических изображениях разных масштабов хорошо видна весьма сложная закономерная сетка линеаментов, которая лишь находит отражение в сопоставлении с общими структурными направлениями. При более детальных сопоставлениях часть этих линеаментов можно отождествить с предполагаемыми разломами фундамента, часть – с зонами трещиноватости. По-видимому, при описании платформенных областей необходимо выделить и этот тип линеаментов, отвечающих разрывам без сколько-нибудь существенно однонаправленного перемещения, но с систематическими взаимно компенсирующими движениями. Поэтому, не разделяя условными знаками линеаменты складчатых и платформенных областей на карте, необходимо подчеркнуть их значительные отличия. Это особенно необходимо подчеркнуть, ибо такие "разломы без смещения" контролируют зоны трещиноватости, определяющие коллекторские свойства нефтегазоносных горизонтов.

Анализ некоторых избранных из множества линеаментов, выполненный в различных горно-складчатых и платформенных областях СССР (Кавказ, Средняя Азия, Русская и Туранская плиты, Западно-Сибирская плита и Восточно-Сибирская платформа) показал, что они, как правило, соответствуют крупным линейным деформациям и, в частности, разломам более или менее глубоких слоев земной коры и верхней мантии, так как они соответствуют определенным элементам структур различных геофизических полей, а также закономерностям пространственного распространения сейсмических явлений, магматизма и пневмо-гидротермальной деятельности (МАКАРОВ и др., 1974; МАКАРОВ и СОЛОВЬЕВА, 1976; ТРИФОНОВ и др., 1975).

В приповерхностных структурах такие линеаменты проявляются повышенной трещиноватостью, зонами изменения фации и (или) мощности отложения складчатым закономерным расположением новейших и, в меньшей мере, древних структурных форм, развитием в их пределах зон так называемых поперечных деформаций, секущих основные структурные направления, и другими геологическими и ландшафтными особенностями, генетическая, а нередко и пространственная связь которых друг с другом ранее не предполагалась или представлялась

достаточно неоднозначной. Необходимо обратить внимание на такую замечательную особенность многих линеаментов, как принадлежность территориям с существенно различной историей геологического развития и структурой или, иначе говоря, трансзональность линеаментов. Крупные линеаменты связывают, например, воедино структуры Тимана и Урала, Скандинавского щита и Русской плиты, Восточно-Европейской платформы Туранской плиты и Тянь-Шаня (линия Карпинского), Западно-Сибирской плиты, Восточно-Сибирской платформы и мезозойд Верхояно-Колымской области. Не все в этом явлении понятно, но несомненно, что между разнородными и разновозрастными областями существует значительно больше структурных связей, чем это предполагалось до сих пор.

Определенное однообразие повторяемости рисунка этих связей состоит, очевидно, в том, что линеаменты проявляют на земной поверхности не только молодые структуры верхних горизонтов земной коры ("покрова" по Э. АРГАНУ), но, может быть, в большей мере деформации кристаллического основания и более глубоких слоев земной коры и верхней мантии, которые, можно предполагать, отличаются специфическим рисунком деформаций, в которых большой удельный вес принадлежит планетарной составляющей. Это доказывается, в частности, единством линеаментов, уходящих с массива докембрийских пород Балтийского щита в поле распространения платформенного покрова Русской плиты. Это же подтверждается различными геофизическими и сейсмологическими данными о структуре глубинных слоев земной коры (МАКАРОВ и др., 1974).

Построенная карта хорошо подтверждает перекрестный характер структуры земной коры, который обеспечивает механизм передачи, обеспечивает пластичность земной коры, возможность автономного развития разных ее структурных этажей или блоков и вместе с тем, их тесное структурное взаимодействие и связь (МАКАРОВ, СОЛОВЬЕВА, 1976). Линеаментную сеть можно представить только как инфраструктуру, преломленную и преобразованную структурами "покрова", которые активизируются в тех элементах, которые обеспечивают реализацию тектонических напряжений, связанных с глубинной линеаментной сетью.

Таким образом, и глубинные, и поверхностные структуры проявляют одна другую, во всяком случае, в некоторых своих элементах. Это позволяет на космических снимках, равно как и просто в облике земной поверхности, видеть и изучать элементы глубинной тектоники, а в свете последней более целенаправленно и с более общих позиций изучать и интерпретировать структуры "покрова".

Подобное соотношение позволяет и в той или иной мере решать вопрос о разделении в структурах "покрова" локальной региональной с одной стороны и глобальной составляющей - с другой, что позволит создать иерархическую шкалу линеаментов и объяснить целый ряд геохимических, гидрогеологических, геофизических, сейсмологических и других "аномалий".

#### 4. Обсуждение

Карта линеаментов территории СССР представляет собою первую попытку рассмотрения в единой системе линеаментов литосферы, более или менее детально изученных ранее в разнородных областях. Именно такое рассмотрение позволяет вскрыть определенные закономерности в пространственном размещении этих элементов структуры.

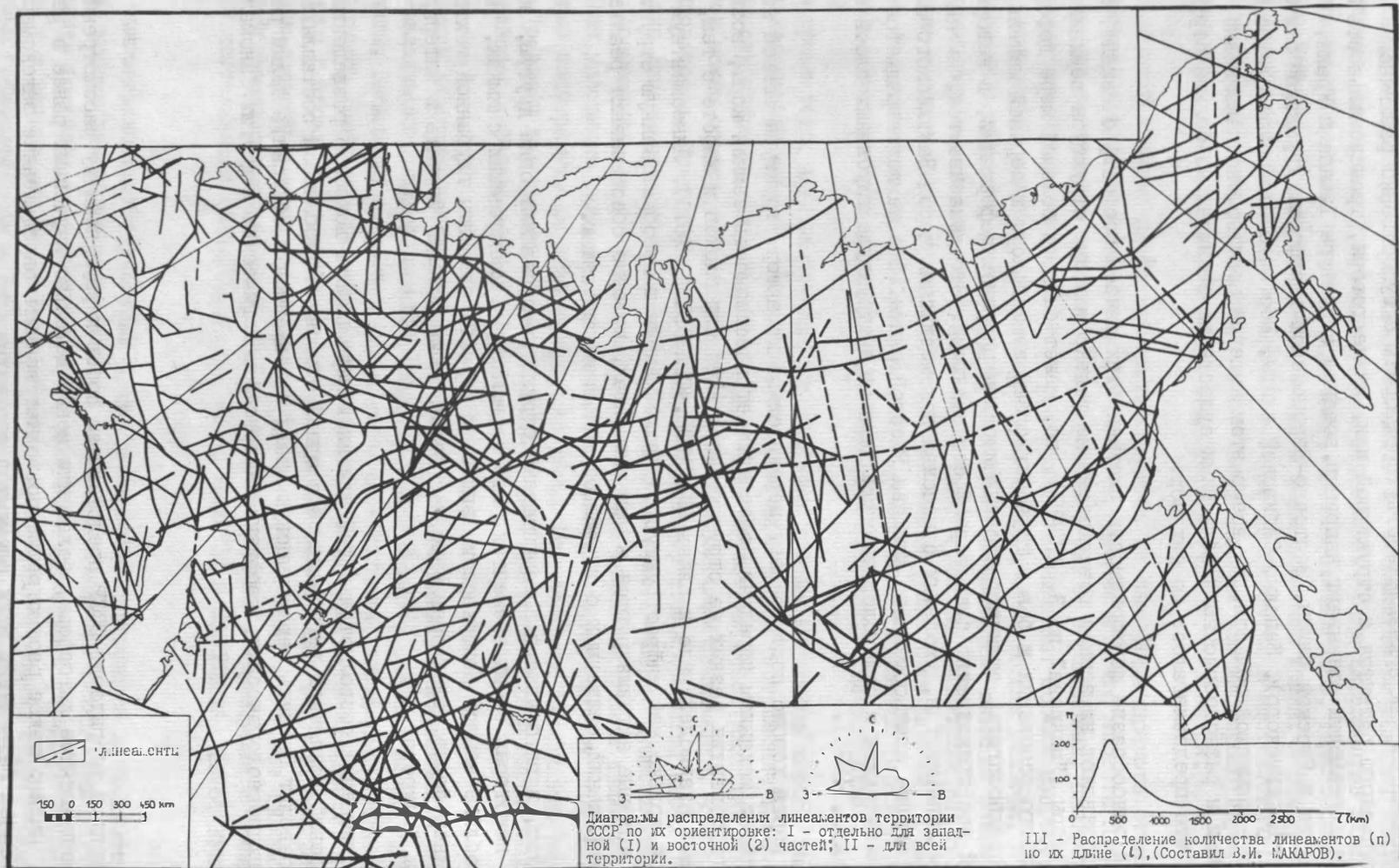


Рис. I: Карта тектонических линеаментов СССР и сопредельных территорий, отдешифрированных на мелкомасштабных космических снимках

Составлена Геологическим институтом АН СССР совместно с объединением "Аэрофотогеология" Министерства геологии СССР, Институтом тектоники и геофизики ДВНЦ АН СССР и геологическим факультетом МГУ (Составили В.И. МАКАРОВ, ответственный исполнитель и редактор; И.И. БАШИЛОВА; В.А. БУШ; Р.И. ГРИШКЯН; А.В. ДОЛИБО-ДОБРОВОЛЬСКИЙ; Г.В. МАХИН; В.Д. СКАРИТИН; С.Ф. СКОБЕЛЕВ; Л.И. СОЛОВЬЕВА; С.И. СТРЕЛЬНИКОВ; В.И. ТИХОНОВ; В.Г. ТРИФОНОВ; П.В. ФЛОРЕНСКИЙ)

Все выводы, которые можно получить и в дальнейшем обсуждать вытекают, очевидно, из следующих параметров: ориентировки, протяженности, плотности линеаментов и их соотношения с известными структурами земной коры.

#### 4.1. Ориентировка линеаментов

Хаотическое, на первый взгляд, множество линеаментов на самом деле представляет вполне организованную структуру. Все линеаменты подчинены четырем достаточно определенно выраженным направлениям: северо-запад – юго-восточному, меридиональному и широтному (рис. 1). Все эти направления проявлены в любой части территории СССР, вскрывая автономность линеаментной сети от региональных различий структуры земной коры. Эта сеть образует, вероятно, генетически единую систему, которая вполне отвечает планетарной трещиноватости ("Планетарная трещиноватость", 1973; *Proceedings of the first Intern. Conference on the New Basement Tectonics, 1974*).

Карта показывает, что планетарная трещиноватость рассматриваемого ранга не представляет собою правильную сетку разрывов, индифферентную по отношению к местоположению. Здесь мы должны обратиться сразу же к другому критерию – изменению в пространстве плотности по-разному ориентированных линеаментов или, иначе говоря, активности их проявления в том или ином районе. Так, диагональные линеаменты в целом более активны по сравнению с ортогональными. При этом северо-западные доминируют в западной половине, а северо-восточные – в восточной половине рассматриваемой территории (рис. 2, 3).

Ортогональные линеаменты также по-разному развиты на территории СССР: на западе ее они имеют явно подчиненное значение и прослеживаются лишь в виде структурных элементов скрытого типа, в восточной же половине являются характерными рельефообразующими элементами, проявленными весьма отчетливо наряду с северо-восточными, а нередко и ярче последних.

Таким образом, количественное распределение в пространстве и сочетание разноориентированных линеаментов обозначает деление рассматриваемой территории на два сектора, которые условно названы Европейско-Центрально-Азиатским и Восточно-Азиатским. Это деление отвечает, вероятно, разделу между Атлантическим и Тихоокеанским сегментами альпийско-неотектонической структуры Земли. Линия раздела между ними в весьма общем виде проходит от Полярного Урала на юго-западный конец впадины оз. Байкал и далее на юг. Несомненно то, что она должна отвечать одному из крупнейших разделов Евразии, прямо связанных с молодой динамикой ее литосферы.

#### 4.2. Протяженность линеаментов

Среди линеаментов, выделяются и относительно короткие, которые можно назвать локальными или внутрирегиональными, и очень протяженные, которые пересекают целые горно-складчатые пояса или платформенные массивы, нередко уходя далеко за их пределы и которые поэтому можно назвать вслед за В.Е. ХАИНЫМ (1964) суперрегиональными или просто суперлинеаментами, многие из которых относятся, вероятно, к категории глобальных.

На рассматриваемой карте отражены в основном линеаменты длиной не менее 100 км. То-есть, это исключительно крупные деформации земной коры. Наибольшее количество приходится на линеаменты длиной около 400 км (рис. 3).

Отнесение линеаментов или разломов к внутрорегиональным, региональным или суперрегиональным только по их протяженности и отношению к границам той или иной тектонической области не строго определено. Так, например, на Кавказе, на Урале и в других протяженных системах продольные линеаменты, как правило, целиком вписываются в структуру их, тогда как поперечные линеаменты нередко уходят в соседние области, несомненно представляя собою элементы трансорогенного или, формально, суперрегионального типа. Но по длине первые нередко на целый порядок превышают вторые. Поэтому, вопрос о порядке, глубинности и структурной значимости тех и других линеаментов без привлечения дополнительных геолого-геофизических данных не решается. Более того, целый ряд весьма протяженных (более 1000 км) продольных линеаментов в подобных случаях отвечает региональным деформациям верхних слоев земной коры (структурам покрова), тогда как значительно менее протяженные секущие линеаменты связаны с деформациями более глубоких сфер коры и верхней мантии, выходящими за рамки региональных. Таковы многие секущие линеаменты Тянь-Шаня, Кавказа, Урала и других областей. Кроме того, из анализа карты следует, что относительно короткие линеаменты нередко являются лишь отдельными звеньями более протяженных, суперрегиональных и планетарного порядка линеаментов, которые в этом случае правильнее называть линеаментными зонами. При более высокой степени генерализации эти зоны выражены в виде отдельных линеаментов, и поэтому по отношению к ним уместны оба термина. Это подтверждается и сравнительным анализом ряда линеаментов, показанных на карте, кроме того, на материалах более крупномасштабных, где единый линеамент оказывается состоящим из ряда непротяженных линеаментов, обычно кулисообразно подставляющих друг друга. В качестве примера, укажем на Каракуль-Балхашский линеамент, уходящий через вершину Памирской дуги на западный конец озера Балхаш. Севернее он как бы теряется, но его продолжением становится ряд субмеридиональных линеаментов, последовательно смещающихся к востоку. Крайним северным звеном этого ряда является линия известного Пурского разлома, вдоль которой на протяжении 560 км вытянута долина р. Пур, продолжающаяся еще на 160 км Газовской губой.

Можно предполагать, что преобладающее большинство крупных линеаментов представляет собою достаточно сложнопостроенные зоны линейных деформаций земной коры, ряды или системы линеаментов меньшего порядка. Каждый из обозначенных на карте линеаментов требует в этом отношении специального рассмотрения.

#### 4.3. Плотность линеаментов

Весьма густая сеть линеаментов отделирована в Памиро-Тянь-Шаньской области, в Прикаспии и на Кавказе, на Урале и на севере Восточно-Европейской платформы. Вся восточная половина территории (к востоку от Урала) характеризуется в целом меньшей плотностью линеаментов по сравнению с западным сектором. При этом на равнинах Западно-Сибирской низменности их значительно меньше, чем на нагорьях Восточной Сибири и Забайкалья.

Эти различия могут объясняться субъективными и объективными причинами. Субъектив-

ность состоит в том, что территории, подвергавшиеся более интенсивному длительному и разностороннему исследованию с применением не только мелкомасштабных, но и крупномасштабных изображений (Средняя Азия и Кавказ, например) естественно могут быть охарактеризованы и более густой сетью линеаментов, чем районы, исследования которых выполнено преимущественно по мелкомасштабным снимкам (Сибирь). Однако следует еще раз отметить, что этот фактор мы пытались устранить или, во всяком случае, ослабить в максимально возможной степени, "просеивая" весь использованный материал через "сито" мелкомасштабных снимков.

Следовательно, неравномерность пространственного распространения линеаментов имеет под собой геологические причины, которые могут состоять в статических и динамических факторах. Первые связаны с различиями формаций, выходящих на поверхность: в одних районах это более или менее древние дислоцированные комплексы (горноскладчатые сооружения или щиты платформ), в других районах — обширные пластовые или близкие к ним поверхности платформенных плит (Западная Сибирь, Туранская плита, Русская плита). Однако, на космических изображениях рассматриваемого уровня генерализации и масштаба, структурно-формационные различия субстрата, по-существу, полностью сnivelированы, а более или менее густая сеть тектонических трещин, хорошо заметная и картируемая при крупномасштабных исследованиях, здесь перестает различаться. Исключение составляют лишь прупнейшие разломы древнего заложения, как, например, Каратауский и Таласо-Ферганский на Тянь-Шане, Джалаир-Найманская зона разломов и Джунгарский разлом в Казахстане, Восточно-Саянский разлом в Сибири, прекрасно выраженные и на этих изображениях. Можно предполагать, что статические структурно-формационные факторы не определяют или определяют в незначительной мере изменения плотности линеаментов.

Динамические факторы, заключающиеся в пространственных вариациях неотектонической, в большей мере современной подвижности земной коры, являются, очевидно, главной причиной, определяющей степень проявления линеаментов или их плотность в том или ином районе. Очевидно, плотность линеаментов наилучшим образом отвечает неотектонической структуре земной коры и ее проявляет. При этом в блоках, где древние массы горных пород выведены на поверхность или залегают близко к ней, линеаменты обозначены резче, чем в погружающихся районах. Здесь линеаменты как бы размазываются, а иногда и вовсе теряются. В качестве примера можно привести смежные области Урала и Западно-Сибирской плиты, Тянь-Шаня и Туранской плиты, Балтийский щит и Русскую плиту и т. д.

Плотность линеаментов является, таким образом, определенным показателем современной подвижности земной коры. При этом речь может идти не только об амплитудах новейших и современных движений или их знаке (поднятие — опускание). Обратим внимание, например, на повышенную густоту линеаментов на западе Туранской плиты или в пределах Прикаспийской синеклизы. Здесь современные движения не проявлены сколько-нибудь выразительно в амплитудах вертикальных смещений и, следовательно, в гипсометрии рельефа. Повышенная же густота линеаментной сети, проявляющей определенным образом структуру глубокого погребенного фундамента (ФЛОРЕНСКИЙ и др., 1976), связана, вероятно, с повышенной активностью малоамплитудных колебательных движений. Это — своего рода "вибрация" земной коры, которая поддерживает в "живом" состоянии или открытыми многочисленными разрывы. По определенным их зонам осуществляется, очевидно, повышенный выходящий поток флюидов, предопределяющих некоторые элементы геохимической структуры поверхности и, следовательно, ландшафта и формирующих таким образом линеаменты (МАКАРОВ, СОЛОВЬЕВА, 1976).

Причины же повышенной подвижности могут быть разными. В указанном участке Туранской плиты ее можно связывать с активностью зоны Мангышлакского разлома, являющегося фрагментом гигантской системы дислокаций, намеченной в свое время еще А.П. КАРПИНСКИМ и хорошо проявленной на космических снимках и на данной карте. Можно предполагать, что повышенная активность именно этого участка объясняется тем, что здесь эта система пересекается и взаимодействует с системой активных субмеридиональных глубинных деформаций литосферы, с которыми связано формирование Уральского поднятия и впадины Каспийского моря.

## 5. Заключение

Предварительный анализ карты линеаментов территории СССР позволяет сделать или подтвердить следующие выводы:

1. Линеаменты распространены повсеместно и являются неперенными элементами структуры литосферы.
2. Линеаменты характеризуются определенной автономией от приповерхностных структур и отвечают структуре глубинных слоев литосферы (инфраструктуре).
3. Линеаментная сеть образует строго закономерную сетку включающую линеаменты северо-западного и северо-восточного меридионального и широтного направлений и отвечают, вероятно, системам глубинной планетарной трещиноватости.
4. Анализ линеаментов может быть использован также в оценке роли и при поисках элементов локального, регионального и глобального тектонических полей в приповерхностных горизонтов коры.

## Литература

- АРГАН, Э.: Тектоника Азии.  
ОНТИ. М., 1935
- Известия высших учебных заведений (геология и разведка). 1973, № 7, 1974, № 12, 1976, № 11.
- Исследование природной среды космическими средствами (геология и геоморфология).  
1973, т. 1; 1974, т. 2; 1976, т. 3; М., ВИНТИ.
- МАКАРОВ, В.И.; СКОБЕЛЕВ, С.Ф.; ТРИФОНОВ, В.Г.; ФЛОРЕНСКИЙ, П.В.; и др.: Глубинная структура земной коры на космических изображениях. В кн.: Исследование природной среды космическими средствами (геология и геоморфология). т. 2; М., ВИНТИ, 1974.
- МАКАРОВ, В.И.; СОЛОВЬЕВА, Л.И.: Перекрестный структурный план земной коры и проблема проявления ее глубинных элементов на поверхности. Исследование природной среды космическими средствами (геология и геоморфология).  
Том У. Москва, ВИНТИ, 1976.
- МАКАРОВ, В.И.; ТРИФОНОВ, В.Г.; ЩУКИН, Ю.К.: Отражение глубинной структуры складчатых областей на космических снимках. Геотектоника, 1974, № 3.
- Планетарная трещиноватость. Ред.: ШУЛЬЦ, С.С.  
Изд-во Ленинград. ун-та, 1973.
- ТРИФОНОВ, В.Г.; МАКАРОВ, В.И. и др.: Геологическое изучение Земли из космоса.  
Труды ГИН АН СССР. вып. 317, "Наука", М., 1978.
- ФЛОРЕНСКИЙ, П.В.; ПЕТРЕНКО, А.С.; ШОРИН-КОНСТИНТИНОВ, Б.П.; ВЕДЕШИИ, А.Л.: Место космического изображения при комплексной обработке геолого-геофизической информации при изучении глубинного строения Нижнего Поволжья. Сб. Исследование природной среды космическими средствами (геология и геоморфология). т. 5.  
М., ВИНТИ, 1976.

Vorläufige Interpretation des Satellitenbildes "Meteor 25" für das Gebiet Polens

von

JOSEF BAŻYŃSKI UND JANINA MOTYL-RAKOWSKA <sup>1)</sup>Z u s a m m e n f a s s u n g

Es wird die geologische Interpretation einer Satellitenaufnahme ("Meteor 25") des Territoriums der Volksrepublik Polen beschrieben. Ausgangspunkt hierfür ist eine ausführliche Analyse der vorhandenen Literatur über die Deutung von Fotolineamenten im europäischen Raum.

S u m m a r y

Description of the geological interpretation of a satellite image ("Meteor 25") of the territory of People's Republic of Poland. Starting-point for this is a detailed analysis of the available literature on the explanation of photo-lineaments in the European area.

Р е з ю м е

Даётся геологическая интерпретация территории ПНР по космическому снимку ("Метеор-25"). Подробный анализ о значении фототочечных элементов для Европы сделан на основе существующих литературных данных.

1. Grundlagen der Interpretation

Der Interpretation des Satellitenbildes "Meteor 25" ging eine Analyse der schon heute umfangreichen Literatur über die geologische Deutung von Fotolineamenten voraus. Von dieser sind u. a. die Arbeiten von W. TRIFONOW u. a. (1973), die in der durch die AdW der UdSSR im Jahre 1973 herausgegebenen Serie: "Untersuchung des natürlichen Milieus mit Hilfe kosmischer Methoden: Geologie und Geomorphologie" veröffentlicht wurden, von großer Bedeutung. Die genannten Autoren befassen sich mit methodischen Fragen der Interpretation von Satellitenbildern für geologische Zwecke. Besondere Aufmerksamkeit wurde den Fotolineamenten gewidmet.

1)

Instytut Geologiczny, Warszawa

In vielen Referaten der 1. Internationalen Tektonischen Konferenz in Utah (USA) wurde der enge Zusammenhang zwischen Fotolineamenten und geologischen Störungszonen hervorgehoben. H. A. EL-ETR (1974) hat eine Klassifikation von Lineationen entsprechend deren Länge vorgeschlagen: Megalineamente ( $> 100$  km), Lineamente (10 - 100 km), und Makrolineare (2 - 10 km). Da diese Termini in der Tektonik schon einen definierten Sinn besitzen, wird hier ganz allgemein von Fotolineamenten gesprochen. Unter diesem Begriff werden alle natürlichen linearen Elemente, die auf den Satellitenbildern sichtbar sind (unabhängig von ihrer Genese), zusammengefaßt.

Für die vorläufige Interpretation des Satellitenbildes "Meteor 25" für das Gebiet Polens sind entsprechende Arbeiten aus dem Europäischen Raum von größter Bedeutung. Interessant sind in diesem Sinne die Ergebnisse von E. BARBIER und M. FANELLI (1975). Es wurde ein enger räumlicher Zusammenhang zwischen Thermalquellen und Fotolineamenten festgestellt, was auf eine Strukturgebundenheit der letzteren hinweist (Abb. 1). Auf der Abbildung ist ein in N-S-Richtung laufendes Fotolineament, das sich von Sizilien bis zu den Alpen, also über eine Länge von ca. 1200 km erstreckt, sichtbar. Entlang diesem strukturgebundenen Fotolineament treten im Abstand von je ca. 44 km Thermalquellengebiete auf. Ungefähr 78 % aller Thermalquellen sind an ähnliche Fotolineamente gebunden. Aus diesen Gründen wurden sie von den Autoren als "heiße" Lineamente bezeichnet. In fast allen Arbeiten aus dem Gebiet Europas wird der Zusammenhang zwischen den Fotolineamenten und den strukturellen Hauptrichtungen eindeutig hervorgehoben. Dabei zeigt sich, daß nur ein Teil der Fotolineamente geologisch nachgewiesen wurde, obwohl die derzeitig noch nicht geologisch belegten Fotolineamente sich in ihrer Richtung den belegten genau anpassen. Nach P. KRONBERG (1975) gilt diese Feststellung für das gesamte Gebiet Zentraleuropas. Entsprechend dieser Verallgemeinerung sind die Untersuchungsergebnisse von A. SESOREN (1976), der einen klaren Zusammenhang zwischen der Richtungsverteilung von Fotolineamenten und der Richtungsverteilung von geologisch belegten Störungen und Verwerfungen des variszischen Untergrundes in Holland feststellen konnte (Abb.2), nicht verwunderlich.

Ganz ähnliche Ergebnisse wurden auch in Polen erhalten. Schon in den ersten Arbeiten (J. BAŻYŃSKI, 1974) konnte nachgewiesen werden, daß mindestens ein Teil der sichtbaren Fotolineamente geologischen Störungen und Verwerfungen folgt. In einer späteren Arbeit (J. BAŻYŃSKI, J. SOKOŁOWSKI, 1976) konnte für den Raum zwischen Wrocław und Poznań festgestellt werden, "daß einige Elemente der rezenten Topografie richtungsmäßig den Fotolineamenten folgen und daß die letzten wahrscheinlich durch Störungs- und Verwerfungszonen bedingt sind. Als Bewegungsbahnen waren diese sowohl in der geologischen Vergangenheit wie auch in der jüngsten geologischen Zeit aktiv, obwohl die Richtung und Geschwindigkeit der Bewegungen zeitlich schwankte."

Zu ähnlichen Schlüssen kommt man auch auf Grund einer rein theoretischen Betrachtungsweise der Gesetzmäßigkeiten der geologischen Entwicklungsgeschichte der Erde. J. ZNOSKO (1975) schreibt dazu:

"Bis vor nicht langer Zeit wurde angenommen, daß der Diastrophismus und Magmatismus vergangener geologischer Epochen unvergleichbar intensiver als die der jüngsten und rezenten geologischen Zeiten waren. Diese Annahme dürfte aber grundsätzlich falsch sein. Es wurde aber dabei nicht berücksichtigt, daß man zwei verschiedene Phänomene vergleicht, nämlich: die Intensität und flächenhafte Ausbreitung der Erscheinungen jüngster und rezenter Tektonik mit der Summe (!) dieser Erscheinungen



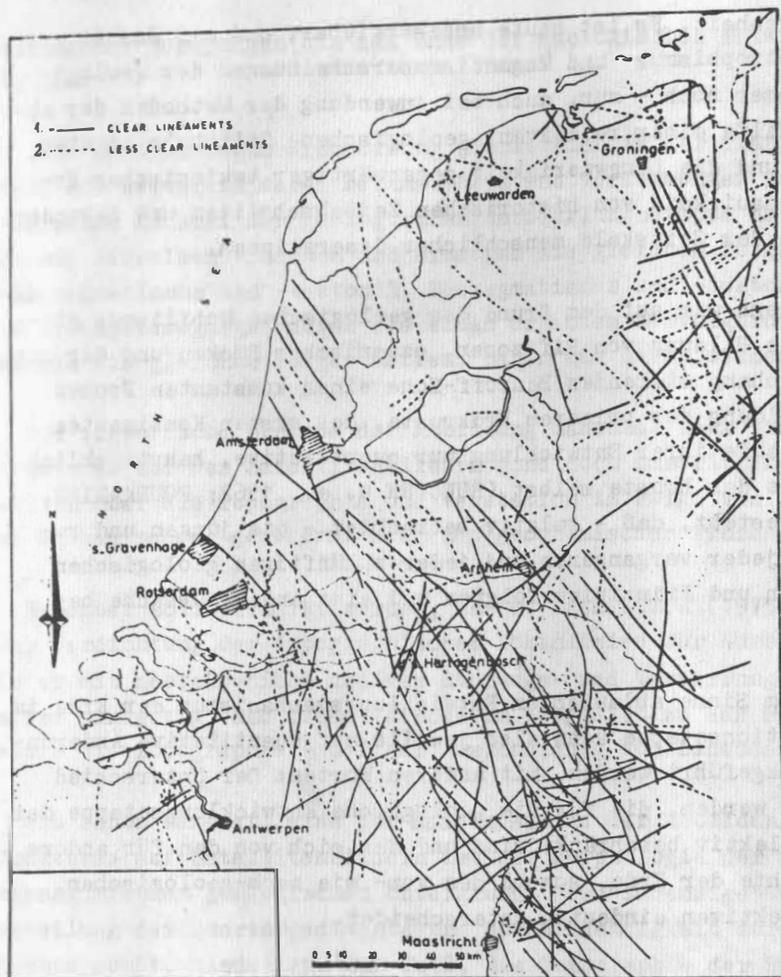


Abb. 2. Photointerpretations-Skizze von Holland nach A. SESÖREN (1976) (ausgearbeitet auf Grund von Landsat-Bildmaterial).  
1 - Photolineamente deutlich, 2 - Photolineamente, weniger deutlich

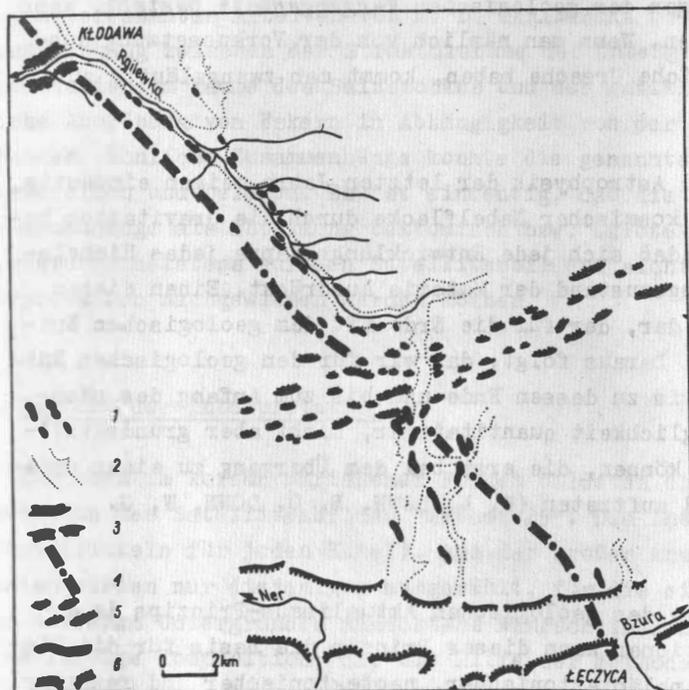


Abb. 3. Verteilung von Spaltenakkumulations-Formen entlang des Rgilewka-Flusses im Vergleich zur Richtung der Achse der Salzstruktur von Kłodawa.  
1 - Spaltenakkumulationskuppeln, 2 - Grenzen der Flußtäler, 3 - Durchbruch-Abschnitt des Rgilewka-Flußtales, 4 - Längsachse der Salzstruktur von Kłodawa und der Antikline von Łęczyca, 5 - Moränenzüge der Kutno-Staffel, 6 - Urstromtal der Bzura-Ner-Flüsse

der ganzen geologischen Vergangenheit. Es ist heute unbestreitbar, daß wir das Alter und die Langwierigkeit der Diastrophismus- und Magmatismuserscheinungen der geologischen Vergangenheit - leider immer noch - nur, auch bei Anwendung der Methoden der absoluten Altersbestimmung, mit Hilfe einer relativen, geologischen Zeitskala angeben können. Dagegen kann das Alter und die Langwierigkeit gegenwärtiger tektonischer Erscheinungen absolut, mit der Genauigkeit von historischen Zeitabschnitten und Sekunden, gemessen werden, also mit Hilfe der Zeitskala menschlicher Generationen.

Es muß betont werden, daß, wenn wir auf dem Grund des geologischen Mobilismus stehen möchten, also wenn z. B. die Bildung von Riftzonen, ozeanischen Rücken und der mit ihnen in engem kausalen Zusammenhang stehenden Benioff-Zone einen konstanten Prozeß darstellt - von der Zeit der Bildung der primären Erdkruste, des ersten Kontinentes und des ersten Ozeans, die im Laufe ihrer Entwicklung nur quantitative, hauptsächlich in Folge der Mächtigkeitzunahme der Kruste selbst (RUNCORN u. a., 1962; FOURMARIER, 1967), kein Grund zur Annahme besteht, daß - relativ betrachtet - die jungen und rezenten tektonischen Bewegungen jeder vergangenen und jeder zukünftigen geologischen Epoche anderen Gesetzmäßigkeiten und Prinzipien folgten und eine andere Ursache besaßen.

Der Unterschied des in diesem Sinne ablaufenden Entwicklungsmechanismus der Erde im Rahmen ihrer geologischen Evolutionsetappe kann also jeweils auf quantitative Änderungen der gleichen Funktion zurückgeführt werden. Mit anderen Worten: Der Unterschied kann auf Begriffe zurückgeführt werden, die für die geologische Entwicklungsetappe der Lithosphäre auf das gleiche Kollektiv beschränkt sind und das sich von den für andere Etappen der Entwicklungsgeschichte der Erde, sowohl den vor- wie nach-geologischen, charakteristischen Begriffskollektiven eindeutig unterscheidet.

Der enge Zusammenhang, der zwischen den Erscheinungen der jüngsten und rezenten Tektonik und des Vulkanismus und denjenigen der geologischen Vergangenheit besteht, kann auch auf andere Weise analysiert werden. Wenn man nämlich von der Voraussetzung ausgeht, daß diese Zusammenhänge die gleiche Ursache haben, kommt man zwangsläufig zu den gleichen Schlußfolgerungen.

Die Erkenntnisse der Astronomie und Astrophysik der letzten Jahre zeigen eindeutig, daß der langwierige Entwicklungstrend kosmischer Nebelflecke durch die Gravitation bestimmt wird. Die Gravitation bewirkt, daß sich jede Entwicklungsetappe jedes Himmelskörpers in einem bestimmten Entwicklungszustand der Materie ausdrückt. Einen dieser Zustände stellt der planetare Zustand dar, der für die Erde mit dem geologischen Entwicklungsabschnitt gleichzusetzen ist. Daraus folgt, daß wir für den geologischen Entwicklungsabschnitt der Erde, und das bis zu dessen Ende und bis zum Anfang des nächsten kosmischen Zustandes, nur die Möglichkeit quantitativer, nicht aber grundsätzlicher qualitativer Änderungen annehmen können, die erst bei dem Übergang zu einem anderen, nicht-geologischen Materiezustand auftreten (W. L. DONN, B. O. DONN, W. G. VALENTIN, 1965).

Diese Ansicht zwingt uns zur Annahme des geologischen Aktualismus-Prinzips im erweiterten Sinne. Mit einigen Modifikationen kann dieses Prinzip die Basis für die Diskussion über die Genese und das Wesen paläotektonischer, neotektonischer und rezenter

tektonischer Bewegungen bis zum Ende der geologischen Entwicklungsetappe der Erde darstellen.

Jede geodynamische Erscheinung drückt sich in der Transformation von Magma in Gestein und weiter in deren Metamorphose und Verformungen aus. Diese sind ein charakteristisches Merkmal der geologischen Entwicklungsetappe der Erde und als solche besitzen sie dieselben Ursachen und erzeugen die gleichen Folgen. Daraus schließt, daß Paläomagnetismus und -tektonik, Neomagnetismus und -tektonik und rezenter Magmatismus und Krustenbewegungen durch dieselben Ursachen hervorgerufen wurden und werden und daß sie die gleichen Folgen hatten, haben und haben werden."

Die eigentliche Ursache der Abbildung manchmal sehr tief liegender geologischer Strukturen auf den Satellitenbildern sind noch umstritten. Es wird vermutet, daß die letzten über die Topographie und Vegetation in Folge von sich entlang ihnen abspielender mechanischer, geothermischer und geochemischer Prozesse sichtbar werden.

Nebenbei soll vermerkt werden, daß S. OSTAFICZUK (1975) unter Anwendung der Methode der Verdichtung der topographischen Höhenlinien zur Ausscheidung von Lineationen kam, die er mit neotektonisch aktiven Störungs- und Verwerfungszonen in Verbindung brachte. Es ist eindeutig, daß diese Methode im Vergleich zu den Fotolineamenten nur ein Element - die Topographie - bei der Ausscheidung von Lineamenten benutzt.

Wie schon bemerkt, eine der Hauptursachen der Abbildung tiefliegender geologischer Strukturen auf Satellitenbildern ist die Morphologie der Quartärdecke und deren Zusammenhang mit dem geologischen Untergrund. Der "lebendige" Untergrund kontrollierte die Verteilung der Quartärsedimente und deren Mächtigkeit zur Zeit ihrer Bildung und bestimmte somit, mindestens zum Teil, die Topographie der Erdoberfläche. Daß das nicht nur Vermutungen, sondern geologisch belegte deduktive Feststellungen sind, beweisen die interessanten Arbeiten von M. D. BARANIECKA (1975). Abb. 3 zeigt als Beispiel den Zusammenhang zwischen der Strukturachse des Untergrundes und der quartären Spaltensedimentation im Raume des Salzstockes und der Antikline von Leczyca, Abb. 4 die räumliche Anordnung von Eskern in Abhängigkeit von der Tiefanlage des jurassischen Untergrundes. Ähnliche Zusammenhänge konnte die genannte Autorin in vielen anderen Fällen feststellen und belegen. Es ist eindeutig, daß die von M. D. BARANIECKA festgestellten Zusammenhänge als Abbildung tektonisch bzw. halotektonisch aktiver Störungszonen und Strukturen meistens auf den Satellitenbildern sichtbar sind, bzw. auf Grund ihrer Interpretation nachgewiesen werden können.

## 2. Technik der Interpretation

Die oben im kurzen umrissenen Fragen bildeten die Basis für die geologische Interpretation des Satellitenbildes "Meteor 25". Die Interpretation wurde visuell durchgeführt (einzeln für jeden Kanal). Aus der großen Anzahl von ausgeschiedenen Fotolineamenten wurden nur diejenigen ausgewählt, für die ein Zusammenhang mit Strukturelementen des tieferen Untergrundes mindestens wahrscheinlich war. Eine große Hilfe war hierbei eine farbige Komposition, die mit Hilfe der Methode "Diazo" vorbereitet wurde. Wegen der geometrischen Verzerrung des Bildes mußte an die Interpretation mit großer Vorsicht

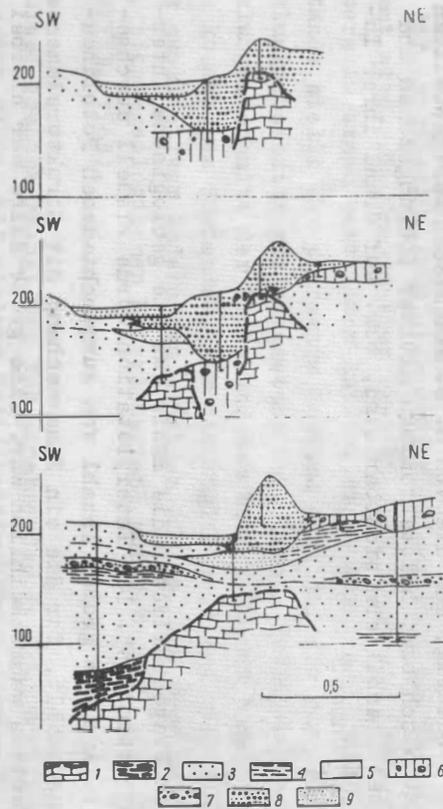
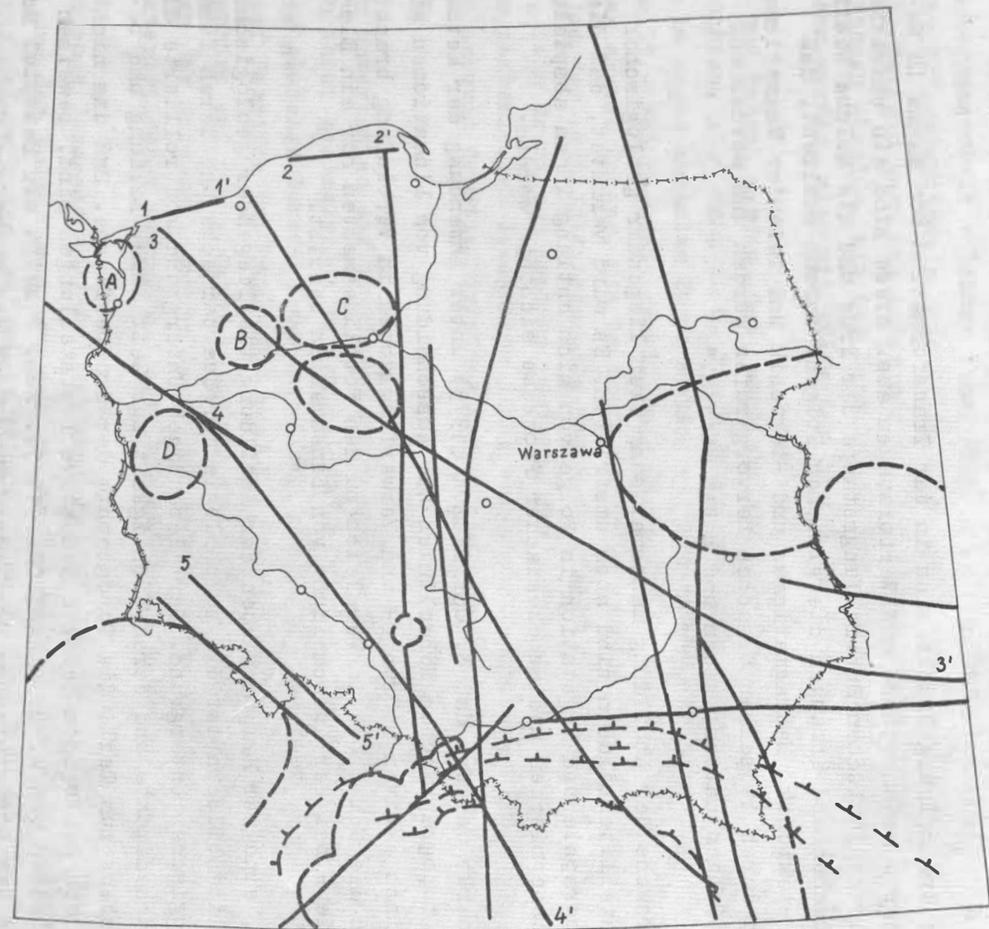


Abb. 4. Zusammenhang zwischen der räumlichen Anlage des Eskers von Atoniówka und der Tiefanlage des jurassischen Untergrundes (nach M.D. BARANIECKA, in: M.D. BARANIECKA und Z. SARMACKA, 1971).  
 1 - jurassische Kalksteine, 2 - tertiäre Tone, 3 bis 9 - Quartär (3 - glazifluviatile Sande, 4 - Beckentone und -Schluffe, 5 - Beckensande, 6 - Grundmoränenlehme, 7 - residuale Sande, 8 - Esker-Sande und -Kiese, 9 - fluviatile Sande)

DOI: <https://doi.org/10.2312/zjpe.1979.061>



1 —, 2 (○), 3 - - -

Abb. 5. Vorläufige Interpretation des Satellitenbildes "Meteor 25" für das Gebiet der Volksrepublik Polen.  
 1 - Photolineamente, 2 - Ringstrukturen, 3 - Aufschiebungen

herangegangen werden, was den vorläufigen Charakter der Arbeit entschuldigt. Eine detailliertere Interpretation ist einer späteren Arbeit vorbehalten (nach Auswertung auch anderer Satellitenbilder).

Es wurde festgestellt, daß auf Bildern aus verschiedenen Kanälen unterschiedliche Fotolineamente sichtbar waren. Die Auswahl der strukturell bedingten Fotolineamente nur mit Hilfe der Bilder selbst, also ohne Kenntnis des geologischen Baues, ist schwierig. Aus diesen Gründen wurden nur Fotolineamente, die auch auf Landsat-Bildern sichtbar waren, zur weiteren Untersuchung ausgewählt. Das belegt selbstverständlich noch nicht den geologischen Sinn der ausgeschiedenen Fotolineamente, vergrößert aber die Wahrscheinlichkeit ihrer strukturellen Bedeutung.

### 3. Ergebnisse der Interpretation (Abb. 5)

Das als Fotolineament 1 - 1' ausgeschiedene verläuft entlang der Küste der Ostsee zwischen Kamień Pomorski und Kołobrzeg. Obwohl die Existenz einer tiefliegenden Störung entlang dieser Linie geologisch nicht nachgewiesen ist, so dürfte doch interessant sein, daß eben dieser Küsten-Abschnitt einen mehr oder weniger abrasiven Charakter besitzt.

Das Fotolineament 2 - 2' fällt mit einer Verwerfung des kristallinen Untergrundes zusammen, welche - durch seismische Untersuchungen belegt - das Żeba-Gewölbe von der Litauischen (=Baltischen) Senke trennt. Das Fotolineament verläuft parallel zu den meridionalen Abschnitten der Flüsse Żeba und Rędawa. Die Täler der beiden Flüsse gehören dem System des wärmeiszeitlichen Urstromtalnetzes des Pommerschen Stadials an, sind demnach relativ sehr jung. Trotzdem erhebt sich die Frage, ob sie vielleicht tektonisch gebunden sind.

Das Fotolineament 3 - 3' durchtrennt das ganze Gebiet Polens in Richtung NW - SE. Der nordwestliche Abschnitt dieses Lineaments entspricht sehr genau der Grenze zwischen dem Mittelpolnischen Wall und der im SW angrenzenden Szczecin-Mogilno-Żódź-Senke. Von den meisten polnischen Tektonikern wird angenommen, daß diese lineare Grenze durch eine tiefliegende Störungszone bzw. Verwerfungsstaffel im paläozoischen Untergrund bedingt ist. Diese Annahme stützt sich hauptsächlich auf die Ergebnisse geophysikalischer Untersuchungen, besonders seismischer Sondierungen. Der mittlere Abschnitt des Fotolineaments verläuft entlang der nördlichen orographischen Grenze des Świętokrzyskie-Gebirges. Eine durchgehende Störungszone konnte hier bis jetzt noch nicht nachgewiesen werden. Es ist möglich, daß die Fotogeologie hier ein neues geologisch-strukturelles Element ausgeschieden hat, das bisher - wegen dessen Tiefenlage - nicht vermutet wurde. Dagegen ist die tektonische Gebundenheit des SW-Abschnittes dieses Fotolineaments eindeutig nachgewiesen und entspricht einer neotektonisch bis rezent aktiven Verwerfungszone, die die nördliche Grenze der Karpaten-Vorsenke auf dem Gebiet Polens darstellt. Das Fotolineament verläuft weiter nach SE in Richtung auf Wolhynien.

Das Fotolineament 4 - 4' entspricht einer z. T. bekannten, geophysikalisch belegten tiefgreifenden Störungszone, welche den Vorsudetischen Block (mit altpaläozoischen Bildungen unter Zechstein-Sedimentbedeckung) von dem Ostrawa-Block (mit mächtiger

mesozoischer und känozoischer Sedimentdecke über jungpaläozoischem Untergrund) trennt. Wegen der starken tektonischen Beanspruchung dieses Gebietes und der noch lückenhaften Ergebnisse der **Reflexionsseismik** wird der Verlauf dieser Störungszone auf tektonischen Karten recht unterschiedlich dargestellt.

Das Fotolineament 5 - 5' entspricht genau dem geologisch einwandfrei nachgewiesenen und auch morphologisch wirksamen Sudeten-Bruch. Es ist eine altangelegte, neotektonisch reaktivierte, bis heute aktive Verwerfungszone.

Die Ringstrukturen A, B, C liegen im Bereich der Moränenzüge und Sander der Pommerischen Phase der letzten Eiszeit. Sie dürften Mächtigkeitsanomalien bzw. Änderungen der Grundwasserverhältnisse und Lithologie der Quartärdecke entsprechen (vielleicht aber auch anderen Ursachen). Ihr Zusammenhang mit Strukturen des tieferen Untergrundes ist wenig wahrscheinlich. Dasselbe gilt für die Ringstruktur D, die im Bereich der mittelpolnischen Vereisung liegt. Auch hier ist ein Zusammenhang mit dem Untergrund bis jetzt nicht bekannt bzw. sogar unwahrscheinlich. Die anderen Fotolineamente und Ringstrukturen sind geologisch schwer zu deuten.

Aus den angeführten Ergebnissen darf geschlossen werden, daß die Satellitenbilder "Meteor 25" ein wertvolles Hilfsmittel für geologische Erkundungszwecke darstellen. Mit ihrer Hilfe können nicht nur schon aus geologischen Kartierungsarbeiten bekannte Störungszonen nachgewiesen werden, sondern auch neue, bisher nicht bekannte, ausgeschieden werden. Das Auftreten der letzteren soll im Rahmen zukünftiger geologischer Arbeiten überprüft werden.

Fototektonische Interpretation von Mitteleuropa nach Aufnahmen  
der sowjetischen Wettersatelliten Meteor 25 und 28

---

von

Peter BANKWITZ, Elfriede BANKWITZ und Alexander FRISCHBUTTER <sup>1)</sup>

Z u s a m m e n f a s s u n g

Aufnahmen der sowjetischen Wettersatelliten Meteor 25 und 28 von Mitteleuropa wurden geologisch interpretiert. Besonderer Wert wird auf die Informationsgewinnung für tektonischen Fragen gelegt. Die Unterscheidbarkeit verschiedener Lineationsarten wird betont.

S u m m a r y

Pictures of Central Europe taken by the Soviet weather satellites Meteor 25 und 28 are geologically interpreted. Tectonic problems are emphasized. Possibilities to classify lineations are discussed.

Р е з ю м е

Для целей геологии интерпретируются снимки Средней Европы, полученные с метеорологических спутников Meteor 25 и 28. Особое значение придаётся получению информации в области тектонического исследования. Подчёркивается отличие разных видов линейментов.

1. Benutztes Bildmaterial

Aufnahmen der Erdoberfläche von Wettersatelliten, die - wie ja schon der Name sagt - eigentlich ganz speziellen Zwecken dienen, können bei fehlender Wolkenbedeckung auch für geologische Interpretationen genutzt werden. Obwohl ihre Aufnahmetechnik nicht auf geologische Fragestellungen ausgerichtet ist, enthalten wolkenfreie Bilder dennoch zahlreiche Informationen über geologische Strukturen.

Das hier interpretierte Material stammt von den sowjetischen meteorologischen Satelliten:

---

1) Zentralinstitut für Physik der Erde, AdW der DDR; Bereich Geologie

- Meteor 25; Aufnahme vom 1.7.1976; Wellenlängenbereiche: 500 - 600 nm, 600 - 700 nm, 700 - 800 nm; 800 - 1 000 nm
- Meteor 28; Aufnahme vom 5.9.1977; Höhe 652 km; Wellenlängenbereich 500 - 700 nm.

Mit Nachdruck muß betont werden, daß die anschließenden fotogeologischen Aussagen sich nur auf das genannte Material beziehen. Es ist trivial, daß andere Aufnahmehöhen, -materialien, -maßstäbe usw. im einzelnen andere Interpretationsergebnisse erbringen.

Die Aufnahmen überdecken weite Gebiete Mittel- bzw. Osteuropas und geben damit einen Überblick über Verbreitung, Anordnung und Verlauf von Großstrukturen der Erdkruste und ihre räumlichen Beziehungen. In erster Linie eignen sich Aufnahmen dieser Art und aus Höhen zwischen 600 und 900 km zur Erfassung größerer Zusammenhänge, was sich besonders bei der Suche nach der Fortsetzung von Störungszonen als vorteilhaft erweisen kann.

## 2. Geologische Bildinformationen

Die Hauptstruktureinheiten Mitteleuropas sind flächig gut zu erkennen und abzugrenzen. Das stark zertalte und durch zahlreiche feine Lineationen als bruchtektonisch deformiert ausgewiesene Band des Alpen-Karpaten-Bogens (Abb. 1) sowie die flankierenden Po-, Pannonisches und Transsilvanisches Becken heben sich deutlich ab. Das Böhmisches Massiv erscheint zusammen mit Erzgebirge, Lausitz und Westsudeten in den interpretierten Aufnahmen wie ein großer Ringkomplex (Abb. 1, 2). Die fleckenartige Internstruktur, die auf die Verteilung der Magmatite, Metamorphite und undeformierten Einheiten zurückgeht, wie auch erkennbare tektonische Strukturen kleinerer Ausdehnung (z. B. Moravosilesische Zone, Barrandium, Boskovicer Furche, Pfahl) weisen nachdrücklich auf die heterogene Entstehung aus verschiedenen Teilstrukturen hin. Auch im Satellitenbild wird also sichtbar, daß es sich nicht um eine fotogeologische Ringstruktur handelt, sondern um einen Grundgebirgskomplex, der allseitig von Störungszonen bzw. eigenständigen Randzonen umgeben ist (Abb. 1 bis 4).

Ferner heben sich deutlich einige kleinere Struktureinheiten ab (in Abb. 1 flächig gekennzeichnet): Südwestdeutsche Großscholle (3), Thüringer Becken und Subherzynes Becken (4), getrennt durch die Horststrukturen Thüringer Wald und Harz (5). Den Westrand bildet in den Interpretationen der Oberrheingraben bzw. dessen Fortsetzung nach Norden und Süden.

Nördlich der genannten Einheiten erstreckt sich zwischen der Ostsee und einer Linie, die vom Gardelegen-Wittenberger Hauptabbruch über den Nordrand der Lausitz zum Oderlineament abbiegt und zum Karpatennordrand verläuft, der breite Streifen des Norddeutsch-Polnischen Tieflandes. Es weist eine charakteristische unruhige Graustruktur auf. In den höheren Spektralbereichen verstärken sich die Kontraste; die dunkleren Grautonfelder werden dunkler und vergrößern sich in den Aufnahmen (Abnahme der Reflektanz).

Besonders deutlich wird das an den breiten Talniederungen (Warta, Notec, Wisla) und Niederungen allgemein (vom Schweriner See über die Müritz bis Oderberg), welche Eisrand-

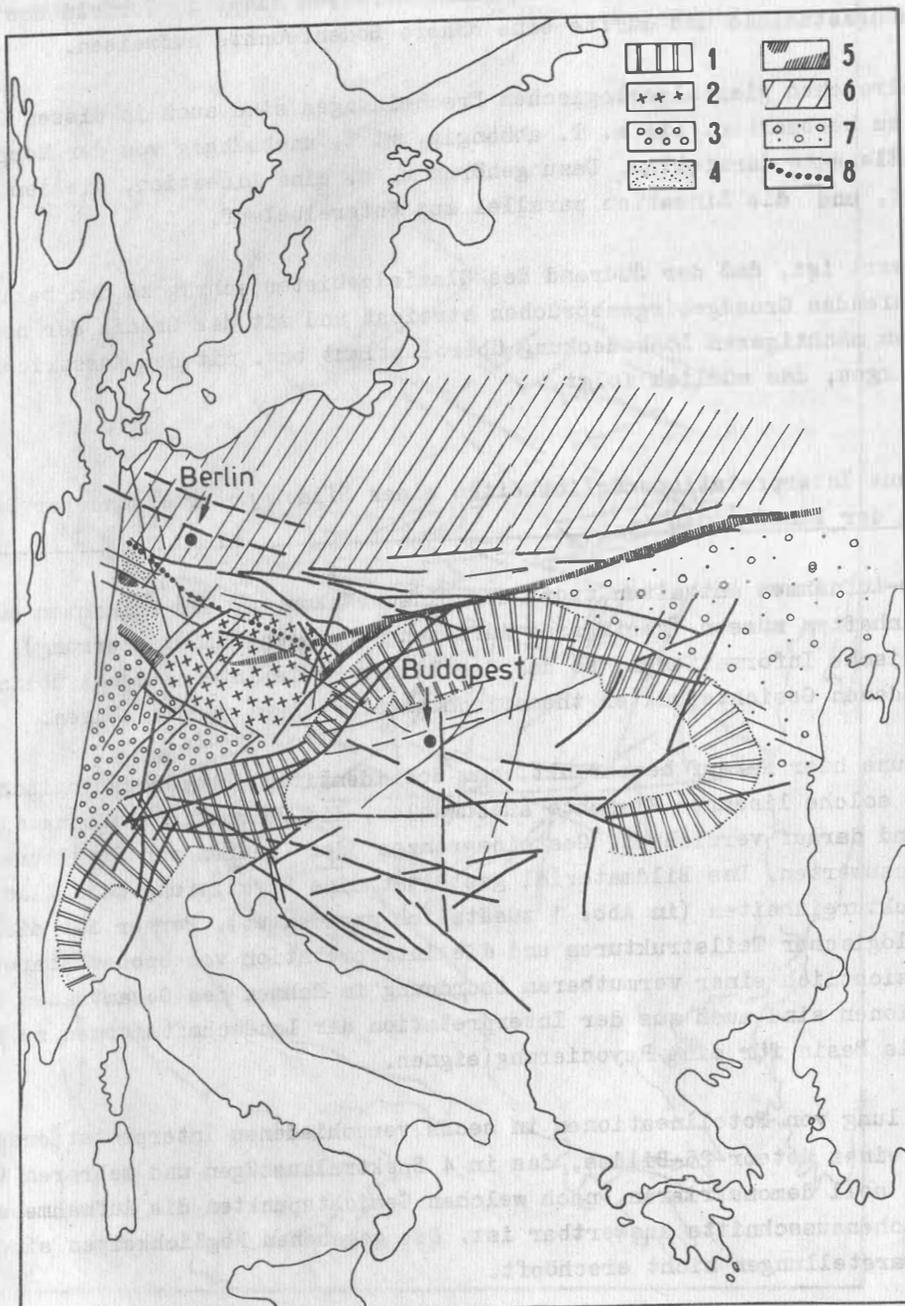


Abb. 1 Auswahl der deutlichsten Fotolineationen im Gebiet Mitteleuropas nach Interpretation von Meteor 25-Aufnahmen

- 1 - Alpen und Karpaten; 2 - Böhmisches Massiv;  
 3 - Südwestdeutsche Großscholle; 4 - Thüringer  
 und Subherzynes Becken; 5 - Harz, Thüringer Wald;  
 6 - Norddeutsch-Polnisches Tiefland; 7 - Skythische  
 Platte; 8 - Elbzone

lagen nachzeichnen. Dieser remissionsschwache Streifen liegt im Vorfeld des Pommer-schen Vereisungsstadials und dürfte eine höhere Bodenfeuchte aufweisen.

Neben zahlreichen glazialgeologischen Erscheinungen sind auch in diesen Gebieten Lineationen zu beobachten, die z. T. abhängig, z. T. unabhängig von der Morphologie tektonische Elemente darstellen. Dazu gehören u. a. eine Lineation, die dem Oderli-neament folgt, und die Lineation parallel zum Untereifelbelauf.

Bemerkenswert ist, daß der Südrand des Glazialgebietes schräg zu den bekannten NW--SE-verlaufenden Grundgebirgsabbrüchen streicht und mit der Grenze der nach Süden anschließenden mächtigeren Lößbedeckung übereinstimmt bzw. mit der Ausstrichgrenze des Grundgebirges, das südlich folgt.

### 3. Verschiedene Interpretationsmöglichkeiten eines Bildes unter besonderer Berücksichtigung der Lineationen

Die Meteor-Aufnahmen enthalten trotz der Einschränkungen, die Aufnahmen aus so großer Höhe anhaften müssen (geringeres Auflösungsvermögen, Randverzerrung), umfangreiche geologische Informationen, so daß die Bilder - wie international üblich - nach ganz verschiedenen Gesichtspunkten thematisch interpretiert werden können.

Wir haben uns hier darauf beschränkt, aus den identifizierbaren geologischen Bildmerkmalen nur solche linearen Elemente auszuwählen, die vermutlich Deformationsformen darstellen, und darauf verzichtet, Gesteinsgrenzen oder Grenzen von Struktureinheiten thematisch auszuwerten. Das Bildmaterial gestattet eine Rayonierung nach flächig erkennbaren Struktureinheiten (in Abb. 1 zusätzlich angedeutet). Ferner ist die Identifizierung geologischer Teilstrukturen und die Interpretation von beobachtbaren Zusammenhängen hinsichtlich einer vermutbaren Zuordnung im Rahmen des Gesamtbaues möglich. Neue Informationen sind auch aus der Interpretation der Landschaftsformen zu gewinnen, da sie sich als Basis für eine Rayonierung eignen.

Die Darstellung von Fotolineationen in sechs verschiedenen Interpretationen (Abb. 1 - 4, 6 - 7) eines Meteor-25-Bildes, das in 4 Spektralauszügen und mehreren Vergrößerungen vorlag, soll demonstrieren, nach welchen Gesichtspunkten die Aufnahme eines so großen Oberflächenausschnitts auswertbar ist. Die gegebenen Möglichkeiten sind mit diesen sechs Darstellungen nicht erschöpft.

#### 3.1. Interpretationsreihe eines Bildes

Die Abb. 1 - 4 zeigen bei gleichem Ausschnitt und gleicher Vergrößerung die schrittweise Dokumentation von beobachteten Fotolineationen. Es wurden möglichst nur solche Lineationen ausgewählt, für die eine geologisch-tektonische Ursache vermutet werden kann. Eine große Anzahl der erkennbaren Lineationen bilden bekannte Bruchstörungen zumindest abschnittsweise ab, andere Lineationsrichtungen oder -teile sind dagegen bisher aus der Geologie nicht bekannt. Die Beispiele der Abb. 1 - 4 stellen keine einfache, quantitative schrittweise Ergänzung dar, sondern eine Interpretation nach verschiedenen Gesichtspunkten.

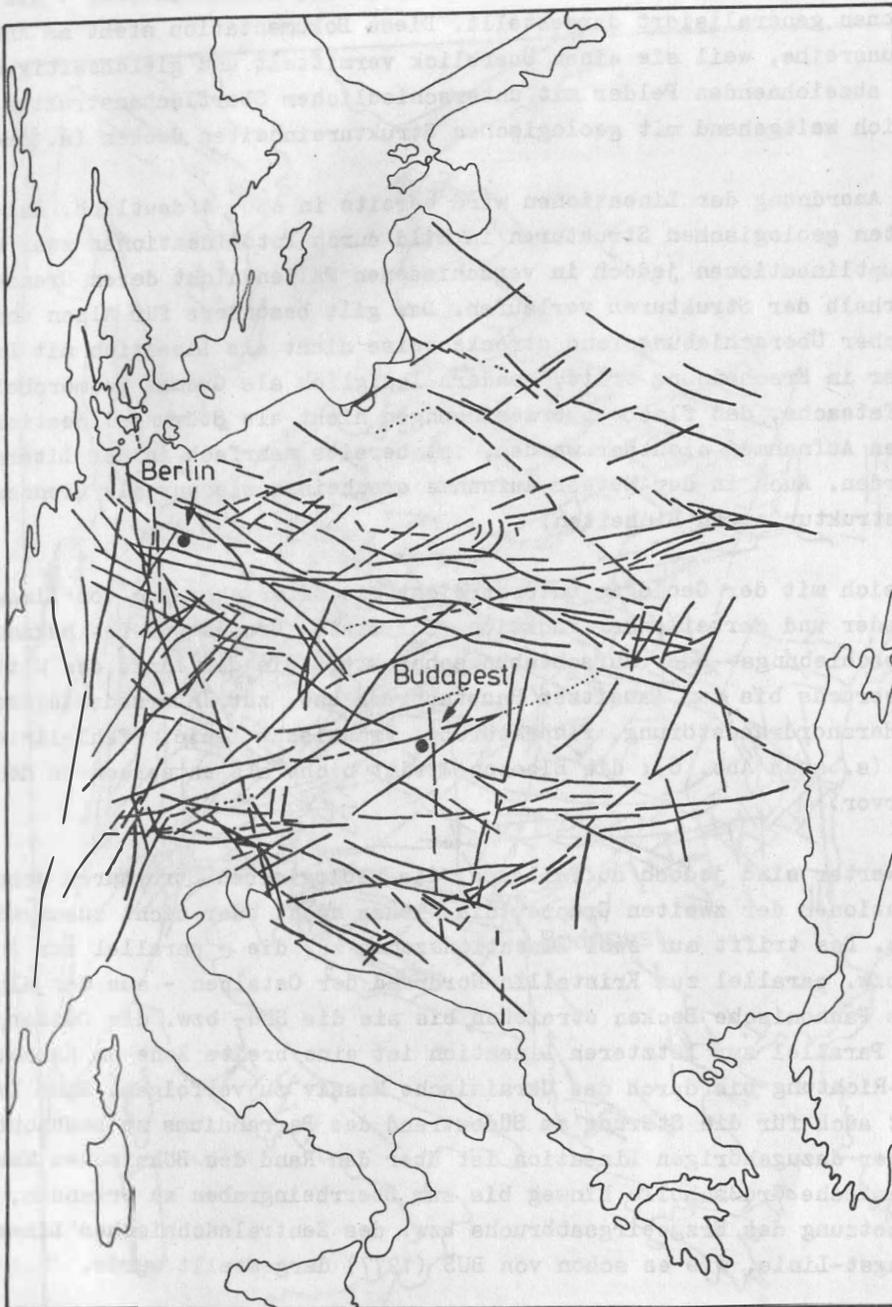


Abb. 2 Hauptfotolineationen Mitteleuropas nach Interpretation von Meteor-25-Aufnahmen

Um die Verteilung der Hauptlineationen zu erfassen, wurden in Abb. 1 die deutlichsten Lineationen generalisiert dargestellt. Diese Dokumentation steht am Anfang der Interpretationsreihe, weil sie einen Überblick vermittelt und gleichzeitig über die im Bild sich abzeichnenden Felder mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur informiert, die sich weitgehend mit geologischen Struktureinheiten decken (s. oben).

Durch die Anordnung der Lineationen wird bereits in Abb. 1 deutlich, daß die Lage der wichtigsten geologischen Strukturen im Bild durch Fotolineationen zwar angezeigt wird, die Hauptlineationen jedoch in verschiedenen Fällen nicht deren Grenzen bilden, sondern innerhalb der Strukturen verlaufen. Das gilt besonders für Alpen und Karpaten, deren nördlicher Überschiebungsrand streckenweise nicht als Lination mit Bruchstörungscharakter in Erscheinung tritt, sondern lediglich als Grenze geomorphologischer Körper. Die Tatsache, daß flache Überschiebungen nicht als Störungslineationen in aerokosmischen Aufnahmen sichtbar werden, ist bereits mehrfach in der Literatur beschrieben worden. Auch in der Meteor-Aufnahme erscheinen sie nur als Grenzen zwischen verschieden strukturierten Einheiten.

Ein Vergleich mit der Geologie unterstreicht die Unterscheidung von Lineationen mit begrenzender und zerteilender Funktion. Zur ersten Gruppe gehören bekannte Störungen mit Abschiebungs- oder Aufschiebungscharakter, wie die Linie des Mitteldeutschen Hauptabbruchs bis zum Lausitzer Hauptabbruch bzw. zur Innersudetischen Hauptverwerfung, Harznordrandstörung, Finnestörung, Fränkische Linie, Pfahl-Linie, Boskovicer Furche (s. auch Abb. 6); die Elbezone tritt nicht als entsprechend deutliche Lination hervor.

Bemerkenswerter sind jedoch auffallende, die geologischen Strukturen schneidende Störungslineationen der zweiten Gruppe, die bisher nicht oder nicht zusammenhängend bekannt waren. Das trifft auf zwei Lineationszonen zu, die - parallel zur Insubrischen Linie bzw. parallel zum Kristallin-Nordrand der Ostalpen - aus den Alpen heraus durch das Pannonische Becken streichen, bis sie die Süd- bzw. die Ostkarpaten durchqueren. Parallel zur letzteren Lination ist eine breite Zone am Karpatennordrand in E--W-Richtung bis durch das Ukrainische Massiv zu verfolgen. Eine längere Erstreckung ist auch für die Störung am Südostrand des Barrandiums zu beobachten. Die Fortsetzung der dazugehörigen Lination ist über den Rand des Böhmisches Massivs und die Südwestdeutsche Großscholle hinweg bis zum Oberrheingraben zu erkennen, ebenso wie die Fortsetzung des Erzgebirgsabbruchs bzw. des Zentralsächsischen Lineaments in die Neckar-Jagst-Linie, wie es schon von BUŠ (1977) dargestellt wurde.

Zu dieser Gruppe von Lineationen gehören zwei N--S-Zonen: Eine rheinisch streichende Lination (NNE) quert die Alpen und ist über die Südwestdeutsche Großscholle bis auf das Territorium der DDR zu verfolgen (Abb. 3); eine doppelte, eggisch streichende Lineationszone (NNW) ist in Teilstücken von der Ostsee über den Raum Halle - Leipzig durch das Böhmisches Massiv hindurch bis zur Adriaküste zu erkennen. Im Böhmisches Massiv entsprechen ihre Abschnitte zwei bekannten Störungszonen; der westliche Teilabschnitt bildet südlich Cheb die Grenze zwischen Moldanubikum und höherem Proterozoikum. Im Abschnitt zwischen Magdeburg und Halle kennzeichnet diese Zone die Grenze der an der Oberfläche aufgeschlossenen Gesteine der Trias.

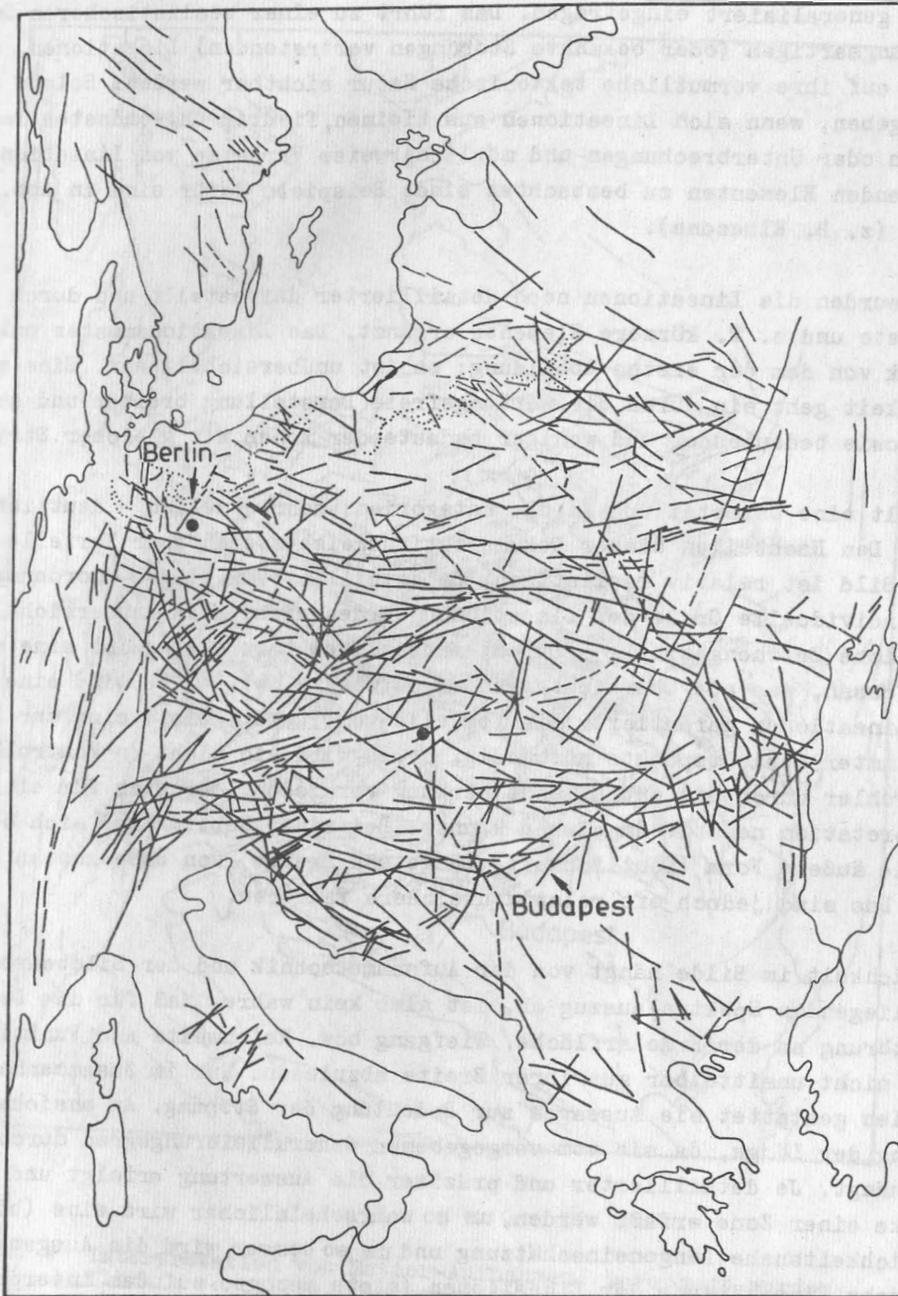


Abb. 3 Gliederung Mitteleuropas, angedeutet durch die Verteilung der Fotolineationen in kosmischen Aufnahmen sowie-tischer Satelliten (Meteor 25). Tektogengebiete geben sich durch engstündigere Lineationen zu erkennen (Böhmisches Massiv, Alpen- und Karpatenbogen)

Abb. 2 enthält nicht nur eine größere Anzahl von Lineationen, sie wurden auch weniger stark generalisiert eingetragen. Das führt zu einer realistischeren Darstellung von störungsartigen (oder bekannte Störungen vertretenden) Lineationen, wobei auch Hinweise auf ihre vermutliche tektonische Natur sichtbar werden. Solche Hinweise sind z. B. gegeben, wenn sich Lineationen aus kleinen, niedrig angeordneten Teilstücken zusammensetzen oder Unterbrechungen und möglicherweise Versätze von Lineationen an anderen kreuzenden Elementen zu beobachten sind. Beispiele dafür sind in Abb. 2 vielfach zu sehen (z. B. Elbezone).

In Abb. 3 wurden die Lineationen noch detaillierter dargestellt und durch weitere feinausgebildete und z. T. kürzere Elemente ergänzt. Das Lineationsmuster unterscheidet sich stark von dem der ersten Abbildung; es ist unübersichtlicher. Eine zusätzliche Ungenauigkeit geht ein durch die wertungsfreie Darstellung breiter und schmaler Lineationen sowie bedeutender und weniger bedeutender Zonen mit gleicher Strichstärke.

Ferner fehlt eine Unterteilung in die Kategorien: sehr deutlich - deutlich - weniger deutlich. Den Nachteilen dieser Dokumentationsweise stehen aber Vorteile gegenüber: 1. Das Bild ist relativ realistisch, da detailliert. 2. Lage, Anordnung, Verteilung und individuelle Größe der Lineationen werden nicht noch unübersichtlicher durch zusätzliche Zeichengebung. 3. Durch einheitliche Darstellung ist eine maximale Dichte zu erfassen, was aus Übersichtsgründen notwendig ist. 4. Es wird eine Vergleichbarkeit der Lineationen garantiert. Die Vorteile von Punkt 1 bis 4 sind zur Herausarbeitung bestimmter Gesichtspunkte notwendig. 5. Es wird ein nicht zu kontrollierender, subjektiver Fehler durch die entfallende Wertung vermieden, der sich für eine tektonische Interpretation negativ auswirken könnte. Bei einer Wertung muß sich der Bearbeiter auf die äußere Form (Deutlichkeit, Länge und Breite) von unbekanntem Lineationen stützen. Das sind jedoch oft relativ unsichere Faktoren.

Die Deutlichkeit im Bilde hängt von der Aufnahmetechnik und der Bildbearbeitung bzw. dem vorliegenden Spektralauszug ab, ist also kein wahres Maß für die Deutlichkeit einer Störung an der Erdoberfläche. Tiefgang bzw. Reichweite und Funktion einer Störung sind nicht unmittelbar aus ihrer Breite abzulesen. Nur im Zusammenhang mit anderen Merkmalen gestattet sie Aussagen zur Bedeutung der Störung. Am unsichersten ist die Ermittlung der Länge, da sie vom vorgegebenen Generalisierungsgrad durch den Interpreten abhängt. Je detaillierter und präziser die Auswertung erfolgt und die realen Teilstücke einer Zone erfaßt werden, um so wahrscheinlicher wird eine (bildorientiert) wirklichkeitsnahe Längeneinschätzung und um so besser wird die Ausgangsbasis für eine tektonische Einschätzung der Lineationen (stets bezogen auf das interpretierte Bild; bezüglich methodischer Probleme der Lineationsanalyse verweisen wir auf den Beitrag BANKWITZ: "Einige methodische Aspekte der Interpretation aerokosmischer Aufnahmen etc.", dieses Heft).

Die Darstellungsweise der Abb. 3 wurde gewählt, um die Verteilung und Häufigkeit von Lineationen zu überprüfen bzw. zur tektonischen Interpretation heranzuziehen. Es läßt sich leicht feststellen, daß - wie bekannt - die Orogene (Alpen, Karpaten, Böhmisches Massiv) besonders stark bruchtektonisch deformiert sind. Es wird dabei jedoch darüber hinaus deutlich, daß junge wie auch alte Tektogene durch ihre intensive Deformation ein flächiges Strukturmuster aufweisen. Es ermöglicht eine Abgrenzung von

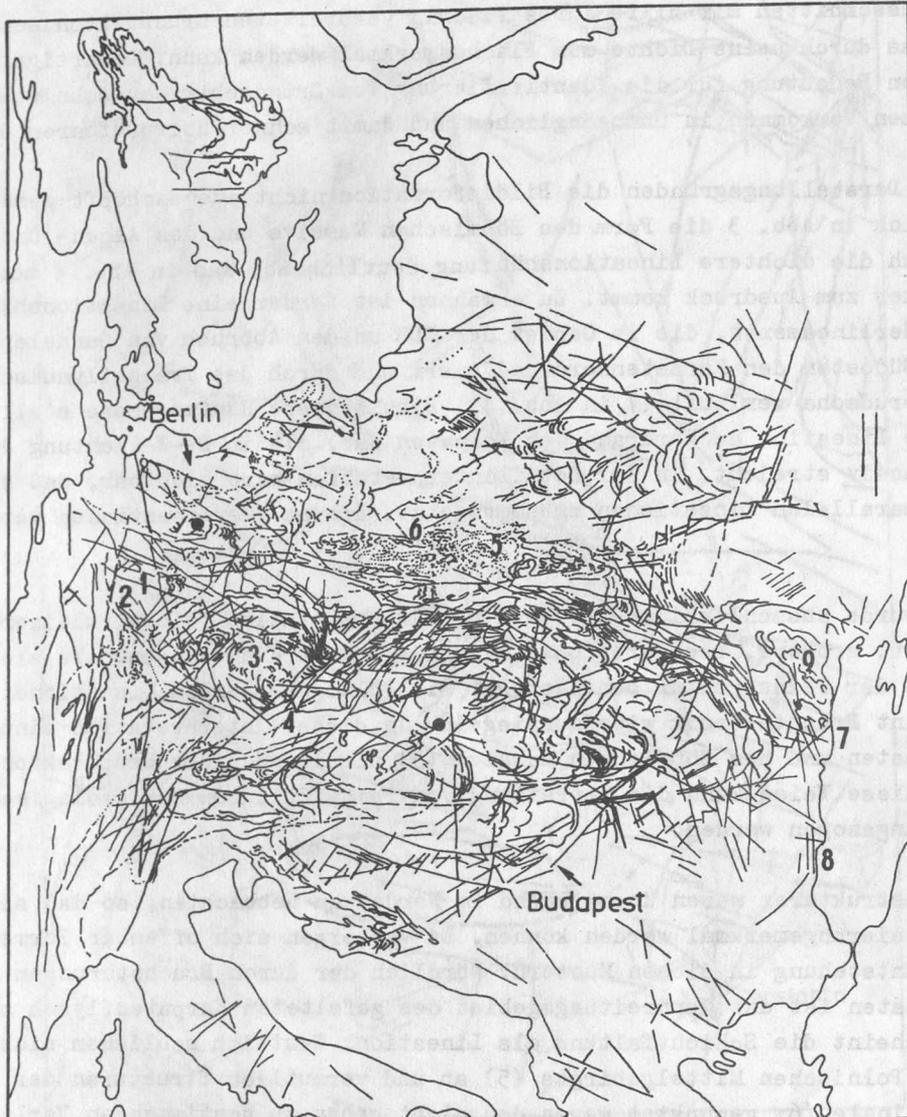


Abb. 4 Interpretation von Meteor-Aufnahmen; bevorzugt wurden flächig verteilte, kleinere Lineationen dargestellt.

Allein durch die unterschiedliche Dichte und Art feiner Lineationen werden geologische Strukturen deutlich: besonders das Böhmisches Massiv (3) mit der NE-streichenden Moravischen Überschiebung und der Boskovicer Furche bei Brno (oberhalb 4), das Polnische Mittelgebirge (5), die vorsudetische Monoklinale mit schwach sichtbaren Strukturen in Sedimenten (gepunktet; 6), der Karpatenbogen mit engen, gradlinigen Lineationen; das Grundgebirge der Dobrudscha (7); Störungen bei Varna (8); Sedimentstrukturen im Bereich der Skythischen Platte (9). Zur Orientierung: (1) - Harz, (2) - Thüringer Wald.

Grundgebirgsausschnitten mit Hilfe ihres flächig verbreiteten bruchtektonischen Strukturmusters, das durch seine Dichte zum Flächenmerkmal werden kann. Derartige Flächenmuster sind von Bedeutung für die Identifizierung von Grundgebirgsausschnitten oder oberflächennahen Vorkommen in unzugänglichen und damit schwer überprüfbar Gebieten.

Obwohl aus Darstellungsgründen die Bildinformation nicht ausgeschöpft werden konnte, zeichnen sich in Abb. 3 die Form des Böhmisches Massivs und des Alpen- und Karpatenbogens durch die dichtere Lineationshäufung deutlich ab, was in Abb. 4 noch wesentlich stärker zum Ausdruck kommt. Zu erwähnen ist ferner eine Lineationshäufung im Bereich des Oderlineaments, die im Gebiet der DDR an den Abbruch von Gardelegen heranstreicht, im Südosten den Karpatennordrand quert und durch das Transsilvanische Becken bis in die Dobrudscha verläuft (7 in Abb. 4). Eine weitere Häufungszone stellt die bereits erwähnte Lineation am Nordrand der Karpaten dar, die in E--W-Richtung durch das Ukrainische Massiv streicht. In der Detailinterpretation wird sichtbar, daß sie sich aus mehreren parallelen Lineationen zusammensetzt, die an Querlineationen versetzt erscheinen.

In Abb. 4 wurde ausschließlich Wert auf die Interpretation feiner, kleiner Bildmerkmale gelegt, größere, breitere Zonen sind nur soweit eingetragen, als sie nicht die Wiedergabe der Feinstruktur behinderten. Die Fülle der kurzen Lineationen in den Karpaten scheint Bruchtektonik widerzuspiegeln. In dieser Interpretation sind die Umrisse der Karpaten und des Böhmisches Massivs (3) allein nach der Bruchtektonik abzugrenzen. Auf diese Weise kann die Verteilung von Feinstrukturen zur geologischen Rayonierung herangezogen werden.

Bogige Feinstrukturen waren überwiegend im Norden zu beobachten, so daß sie ebenfalls zum Rayonierungsmerkmal werden können. Es verbergen sich offenbar Formen unterschiedlicher Entstehung in diesen Mustern. Nördlich der durch Bruchstörungen charakterisierten Karpaten ist das Verbreitungsgebiet des gefalteten Karpatenflysch zu erkennen, hier erscheint die Schichtfaltung als Lineation. Westlich schließen sich die Schichten des Polnischen Mittelgebirges (5) an und vermutlich Strukturen der Vorsudetischen Monoklinale (6: gepunktet wegen des nicht genau zu bestimmenden Verlaufs der einzelnen Linien). Alle gepunkteten Bogenformen im weiter nördlich anschließenden Gebiet sind glazigener Entstehung. Schichtlagerung ist auch auf der Skythischen Platte angedeutet, ferner im Böhmisches Massiv die typische Struktur der Svatka-Kuppel (NE-Ecke) und in den Ostalpen das Tauern-Kristallin.

Die vier Abbildungen sollten einen Eindruck davon vermitteln, wie vielfältig die Informationen einer einzigen Satellitenaufnahme sind und nach welchem unterschiedlichen Gesichtspunkten ein Bild ausgewertet werden kann. Dabei wurde hier wie in den dazugehörenden Abb. 6 und 7 allein der tektonische Aspekt berücksichtigt.

### 3.2. Zusatzinformation durch Ausschnittsvergrößerungen

Ein vergrößerter Ausschnitt aus einer Meteor-25-Aufnahme zeigt den Bogen der Ost- und Südkarpaten, die sich als Struktureinheit im Bild gut abgrenzen lassen. Spätere Störungsversätze des Faltengebirges sind gut sichtbar, z. B. in den Ostkarpaten, aber auch im Bihar-Gebirge und den übrigen Muntii Apuseni.

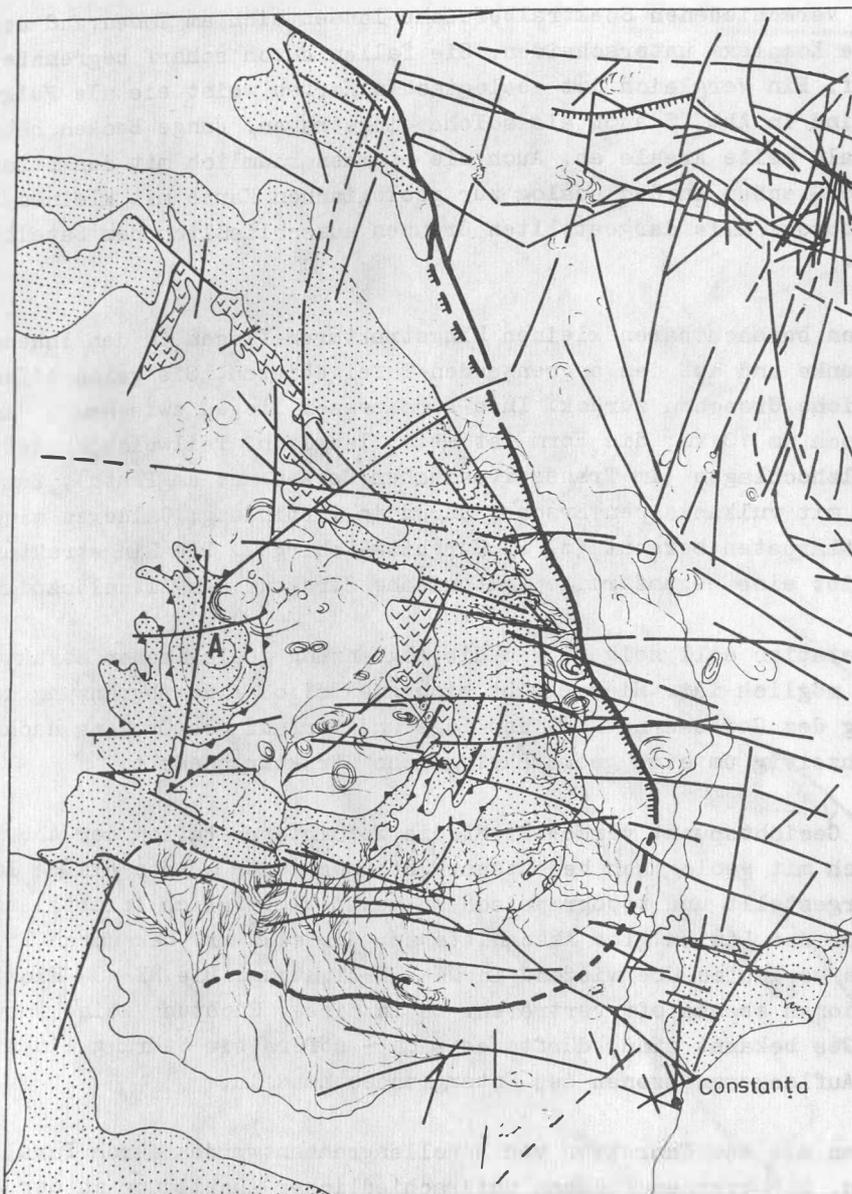


Abb. 5 Fotointerpretation eines Ausschnitts von Südosteuropa nach Aufnahmen von Meteor 28

Gepunktet: Flächen mit stärkerer Textur und dunklerem Grauton (Karpatenbogen, Muntii Apuseni; Karpatenflysch im Norden; Grundgebirge der Dobrudscha bei Constanta);

v-Signatur: Flächen mit abweichenden Grauwerten, nach der geologischen Karte: Vulkanite;

Lineationen mit Dreieckssignatur: Grenzen von flächenhaften Grauwertkontrasten, die sich mit geologischen Grenzen decken (Senken); Einfallsrichtung von Störungslineationen: nach geologischen Daten.

Mit Hilfe der verschiedenen Spektralbereiche lassen sich am Innenrand des Karpatenbogens mehrere Komplexe unterscheiden. Sie fallen durch scharf begrenzte, sehr dunkle Flecke auf. Ein Vergleich mit geologischen Karten weist sie als Vulkanitkomplexe aus; sie sind in Abb. 5 auch als solche eingetragen. Junge Becken heben sich in den Karpaten als helle Areale ab. Auch sie stimmen räumlich mit den bekannten Senken überein; ihre Grenzen wurden analog zur geologischen Karte mit kleinen Dreiecken gekennzeichnet, obwohl alle dargestellten Grenzen ausschließlich dem Satellitenbild entnommen sind.

Die zahlreichen beobachtbaren kleinen Ringstrukturen liegen in den Innensenken, in der Karpatenvorsenke und auf den angrenzenden Tafelgebieten. Sie gehen offensichtlich auf unterschiedliche Ursachen zurück. Ihre Durchmesser liegen zwischen 5 und 50 km, in der Regel jedoch um 10 km; die Form ist meist länglich. Teilweise handelt es sich vermutlich um Salzhochlagen (im Transsilvanischen Becken und am Pruth). Zum Teil stehen sie offenbar mit vulkanischen Erscheinungen in Verbindung; Calderen sind aus dem Innenrand der Ostkarpaten bekannt (z. B. Harghita-Gebirge). Die Ringstruktur A in den Muntii Apuseni gibt eine bogenförmige tektonische Struktur des Altpaläozoikums wieder.

Diese Interpretation soll zeigen, daß die Abgrenzung geologischer Strukturen durch mehrere Faktoren möglich ist. Hier ergibt sich zusätzlich eine Abgrenzung des Orogens aus der Anordnung des Gewässernetzes, das Lage und Verlauf des Orogens nachzeichnet, da es sich gleichzeitig um eine geomorphologische Struktur handelt.

Einen anderen Gesichtspunkt verdeutlicht die Fotointerpretation der Abb. 6. Zum besseren Vergleich mit geologisch bedeutsamen Störungszonen wurden einige Lineationen generalisiert dargestellt und topographisch so genau wie möglich lokalisiert. Die zusätzliche Signatur der Linien gibt Abschnitte an, die sich mit bekannten Bruchstörungszonen decken. Sie verlaufen überwiegend in NW--SE-Richtung. Die NE--SW-Richtung ist unter den Lineationen ebenso oft vertreten. Da in dieser Richtung keine Verwerfungen regionalen Ausmaßes bekannt sind, dürfte es sich - sofern sie Störungslineationen darstellen - um Auflockerungszonen des Untergrundes handeln.

Lineationszonen mit dem Charakter von Schollengrenzen wurden durch Parallelschraffur hervorgehoben. Sie trennen Flächen unterschiedlicher Ausbildung in der Aufnahme (s. Abb. 1), die geologischen Schollen entsprechen.

In einer N--S-Zone häufen sich Lineationen, deren Teilabschnitte sich tangieren können, so daß nicht mit Sicherheit zu entscheiden ist, welche Fortsetzung die Teilabschnitte haben bzw. welche Teile die Hauptrichtung repräsentieren.

### 3.3. Tektonische Interpretation

Auf dem Territorium der DDR sind die gleichen Lineationsrichtungen zu identifizieren, wie sie von den angrenzenden Gebieten beschrieben wurden. Die N--S-Richtung ist nicht nur auf die Häufungszone in Abb. 6 beschränkt, sondern allgemein in Satellitenaufnahmen von Mitteleuropa verbreitet; eine Vorstellung davon gibt vor allem Abb. 8. Sie scheint in Westeuropa jedoch häufiger aufzutreten als im Ostteil. Dabei sind

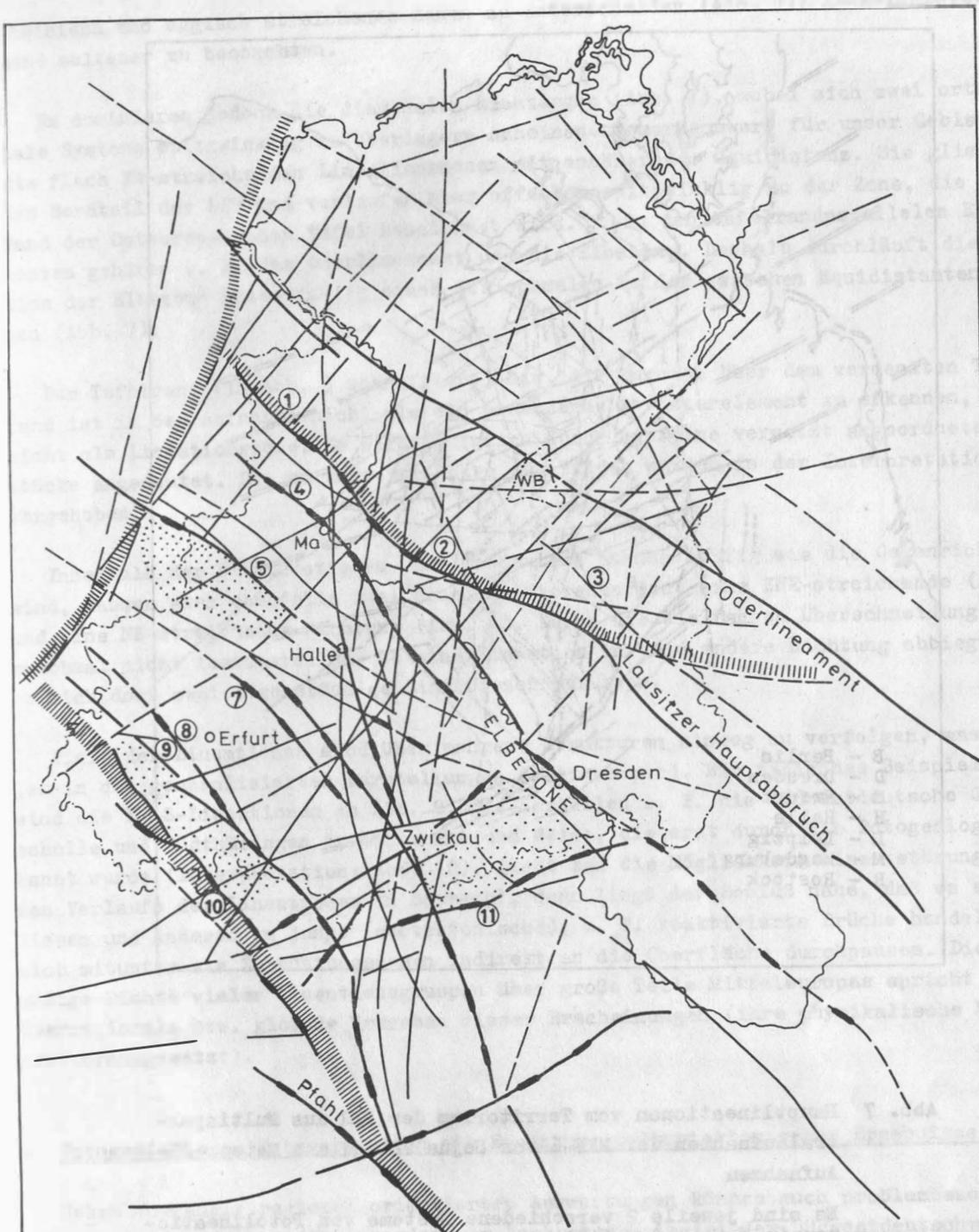


Abb. 6 Wesentliche Fotolineationen vom Territorium der DDR und in angrenzenden Gebieten nach der Interpretation einer Meteor-25-Aufnahme

Schraffierte Zonen: Schollengrenzen nach geologischen Daten; signierte Fotolineationen: geologisch bekannte Bruchstörungen; gestrichelt: weniger deutliche Fotolineationen; Ma - Magdeburg; 1 - Wünsdorf-Cottbuser Störung; 2-3 - Gardelegen-Wittenberger Abbruch; 4 - Südflechtinger St.; 5 - Harznordrand-St.; 7 - Finne-Störungszone; 8 - Gotha-Saalfelder Stz.; 9 - Kreuzburg-Ilmenauer Stz.; 10 - Fränkische Linie; 11 - Erzgebirgsabbruch. WB - Westberlin

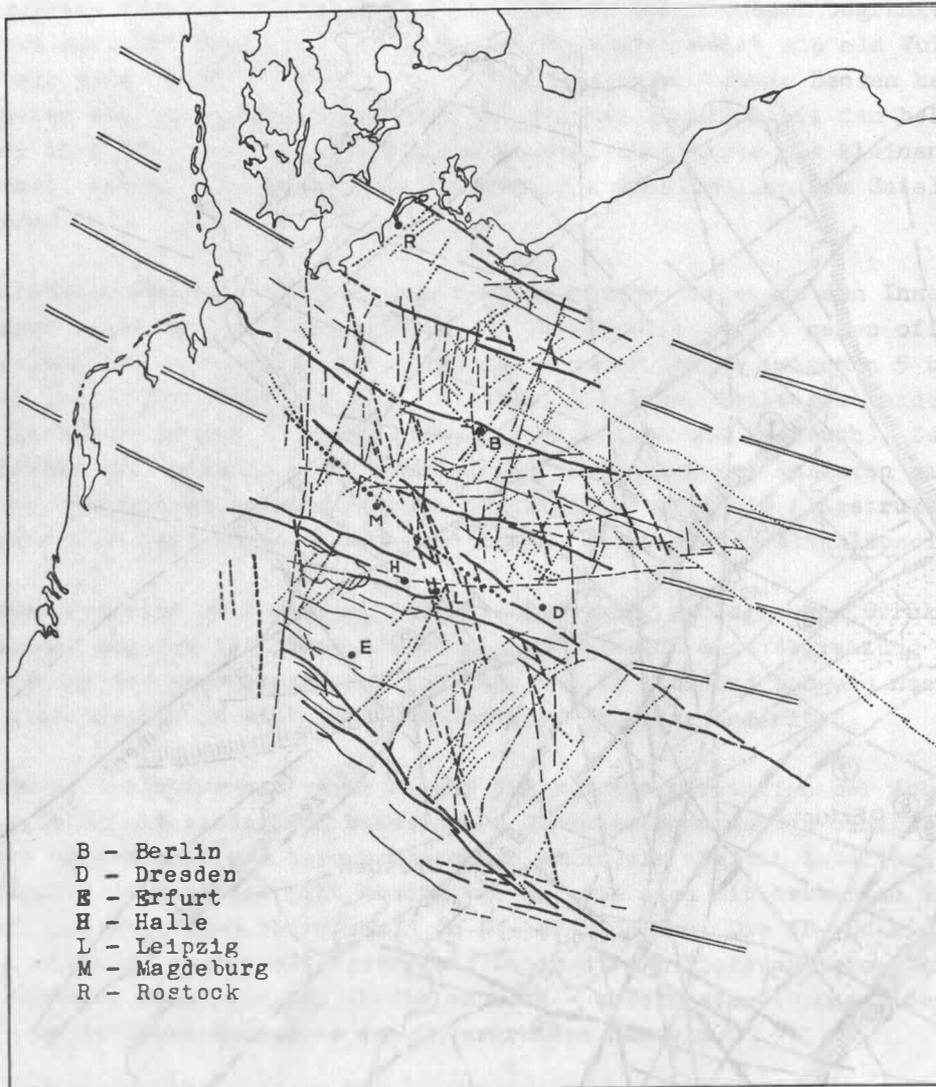


Abb. 7 Hauptlineationen vom Territorium der DDR aus Multispektralaufnahmen der MKF-6 von Sojus 22 und aus Meteor-25-Aufnahmen

Es sind jeweils 2 verschiedene Systeme von Fotolineationen in N-S- und E-W-Richtung sowie in NW-SE- und NE-SW-Richtung zu erkennen. Eine quasi-äquidistante Felderung durch NW-SE-streichende Fotolineationen charakterisiert vor allem den Nordteil

rheinisch und eggisch streichende Zonen zu unterscheiden (Abb. 7); E--W-Lineationen sind seltener zu beobachten.

Es dominieren jedoch die diagonalen Richtungen (Abb. 7), wobei sich zwei orthogonale Systeme spitzwinklig zu überlagern scheinen. Bemerkenswert für unser Gebiet sind die flach NW-streichenden Lineationszonen mit annähernder Äquidistanz. Sie gliedern den Nordteil der DDR und verlaufen hier offenbar spitzwinklig zu der Zone, die als Rand der Osteuropäischen Tafel bezeichnet wird. Zu den tafelrandparallelen Elementen gehören u. a. das Oderlineament und die Elbezone. Deshalb durchläuft die Lineation der Elbezone spitzwinklig eines der schmalen Felder zwischen äquidistanten Zonen (Abb. 7).

Der Tafelrand (in Abb. 9 schraffiert) bzw. der Bereich über dem verdeckten Tafelrand ist in der Aufnahme nicht als ein besonderes Strukturelement zu erkennen, auch nicht als Lineationszone. Es wird lediglich durch einzelne versetzt angeordnete Teilstücke angedeutet. Die markanteren Zonen des Bildes wurden in der Interpretation hervorgehoben.

Innerhalb der NE-Lineationen, die mindestens ebenso häufig wie die Gegenrichtung sind, lassen sich ebenfalls zwei Gruppen unterscheiden: eine ENE-streichende (Abb. 8) und eine NE-streichende Richtung (Abb. 9). Durch die vielfachen Überschneidungen ist manchmal nicht festzustellen, ob eine Lineation in eine andere Richtung abbiegt oder ob sich dort zwei eigenständige Lineationen berühren.

Viele der Lineationen sind über mehrere Strukturen hinweg zu verfolgen, was vor allem in den generalisierten Darstellungen deutlich wird. Ein typisches Beispiel dafür sind die N--S-Lineationen in Abb. 8. Sie zerteilen z. B. die Südwestdeutsche Großscholle und Südthüringen in einer Art und Weise, die erst durch die Fotogeologie bekannt wurde (Interpretation: Abb. 10). Zieht man die Möglichkeit eines störungsbedingten Verlaufs der Lineationen in Betracht, dann liegt der Schluß nahe, daß es sich bei diesen und anderen um junge (neotektonische), z. T. reaktivierte Brüche handelt, die sich mitunter als Zerrüttungszonen indirekt an die Oberfläche durchpausen. Die regelmäßige Dichte vieler Lineationsgruppen über große Teile Mitteleuropas spricht für überregionale bzw. globale Ursachen dieser Erscheinungen (ihre physikalische Realität vorausgesetzt).

#### 4. Fotogeologische Interpretation als Ergänzung seismotektonischer Ergebnisse

Neben vorrangig regional orientierten Auswertungen können auch problembezogene Interpretationen durchgeführt werden. Am konkreten Beispiel der Südwestdeutschen Großscholle, die durch ein Erdbeben im September 1978 erneut eine Interpretation der rezenten tektonischen Vorgänge notwendig werden ließ, wurde die Frage untersucht, wie weit die Anordnung, die Häufigkeit und die erkennbaren Fotolineationen eines bestimmten Gebietes Hinweise auf das Bewegungsverhalten bzw. Deformationsverhalten der Erdkruste enthalten. Benutzt wurden neben den genannten Materialien veröffentlichte andere Satellitenaufnahmen. Die Möglichkeit einer solchen Aussage ist in der Regel durch die regionale Position einer störungsartigen Fotolineation allein noch nicht gegeben,

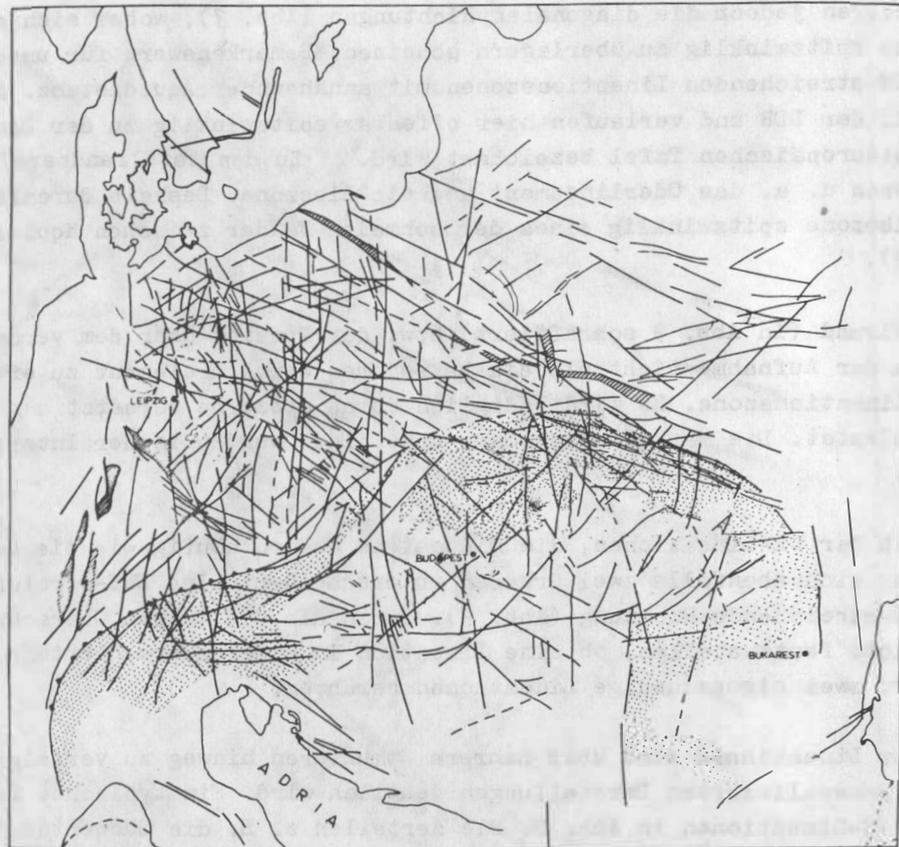


Abb. 8 Ausgewählte Fotolineationen im Vorfeld der Osteuropäischen Tafel nach Meteor-Aufnahmen

Bevorzugt dargestellt sind N-S-verlaufende Fotolineationen. Schräg schraffiert: einige geologische Strukturen, u. a. der Bereich des Tafelrandes; Punkte: Alpen, Karpaten.

sondern erst aus dem Vergleich mehrerer Faktoren als sogenannte indirekte Information ableitbar. Eine weitere Voraussetzung für eine derartige Aussage ist die komplexe Betrachtung des betreffenden Gebietes. Notwendig sind also Vergleiche nicht nur mit bekannten geologischen und geophysikalischen Daten (vor allem Seismik, Schwere, Tiefenlage der Moho, Wärmefluß usw.), sondern auch die Berücksichtigung der geologischen Entwicklungsgeschichte und der rezenten Krustenbewegungen im jeweiligen Gebiet.

Die ursächliche Beziehung direkt und indirekt zwischen Erdbeben und tektonischen Störungszonen ist seit langem bekannt (s. dazu Abschnitt 4). Man weiß seit Jahrzehnten, daß die großen Beben tektonische Beben sind. Störungszonen, in denen sich Herdflächen entwickeln, entstehen in der Regel nicht durch die Beben-tätigkeit an sich, sondern liegen bereits vor; sie werden während des Bebenvorganges reaktiviert. Diese Behauptung ergibt sich aus unseren geologischen Beobachtungen, die besagen, daß fast alle großen Störungszonen - auch solche, die eine ehemals große Bildungstiefe hatten und erst durch Hebung und Erosion an die Erdoberfläche kamen - ursprünglich bzw. zeitweilig als Weitungszonen oder, bei kleineren Dimensionen (km), als Weitungsf lächen vorlagen und erst anschließend zu Scherzonen und -flächen umgebildet wurden. Die bei dieser relativ älteren Bewegung entstandene, tektonisch bedingte Auflockerung der Gesteine dürfte dabei gleichzeitig die Extension entlang von Störungszonen mit verursachen, wobei die Erdkruste quer zur Störung einer Weitung unterliegt.

Teile des südlichen Mitteleuropa gehören zur Südwestdeutschen Großscholle. An deren Westrand ist rezent eine Erdbebenhäufung zu verzeichnen. Das behandelte Gebiet enthält eine Fülle neotektonischer Indikationen, auf die hier nicht einzugehen ist. Aus dem neotektonischen Gefügeinventar dieser Scholle (Gräben, Horste, Abschiebungen usw.) ist auf eine ungefähr E--W-gerichtete Weitung zu schließen. Herdflächenlösungen, Messungen der rezenten Spannung nach der Bohrlochentlastungs- und der Ultraschallmethode sowie Untersuchungen horizontaler rezenter Erdkrustenbewegungen (Wiederholungs-triangulation) haben gezeigt, daß in Mitteleuropa die Achse der maximalen Hauptspannung regional etwa in NW--SE-Richtung verläuft. Die Zonen der seismisch aktivierbaren bzw. aktivierten Scherflächen, die zu dieser Orientierung der maximalen Hauptspannungs-(druck)-Achse gehören, verlaufen demzufolge etwa  $20^{\circ}$  bzw.  $95^{\circ}$  -  $100^{\circ}$  (evtl. bis  $80^{\circ}$ ).

Das geologisch nachgewiesene Verteilungsbild tektonischer Störungen in Süddeutschland ist wesentlich durch den NNE-streichenden Oberrheingraben bestimmt. Auf Satellitenaufnahmen erkennt man eine Vielzahl von Lineationen, die dem Oberrheingraben, zum Teil aber auch anderen Strukturrichtungen, parallel laufen, teilweise jedoch auch keine Beziehung zu den Strukturen zeigen. Sie übertreffen die durch geologische Bodenkartierung bekannt gewordenen Bruchzonen an Zahl um ein Vielfaches. Es dominieren folgende Richtungen:

Nordost--Südwest

ca. Nord--Süd (von NNE bis NNW)

ca. Ost--West (von WNW bis WSW)

In der regionalen Verteilung ist das Erscheinungsbild (Abb. 10) inhomogen: es treten Zonen mit Häufung von Fotolineationen auf. Berücksichtigt man das gesamte Inventar der Fotolineationen, ergibt sich die Schlußfolgerung, daß sich die Orientierung der Hauptspannungsachsen gegenüber den Richtungen, die mit anderen Verfahren als mit den

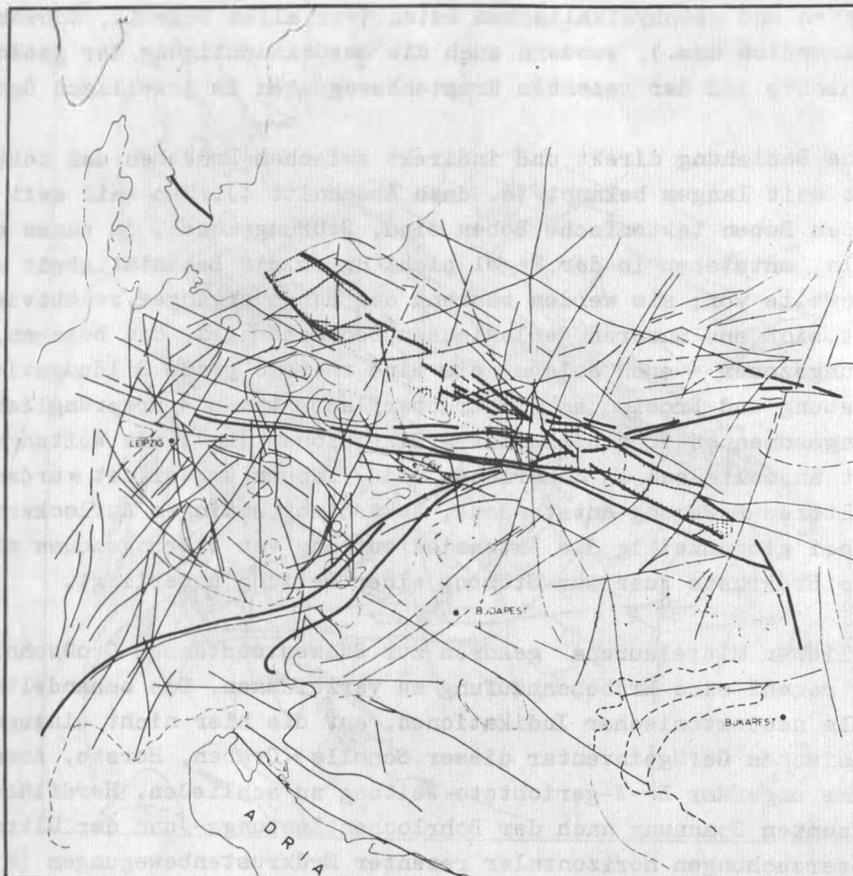


Abb. 9 Ausgewählte Fotolineationen im Vorfeld der Osteuropäischen Tafel nach Meteor-Aufnahmen

Bevorzugt sind dargestellt die steil NE-verlaufenden Fotolineationen.

Dicke Linien: Lineationszonen, deutlich; schraffiert: weniger deutlich. Streifen mit Vertikalschraffur: Gebiet des verdeckten Tafelrandes.

Mitteln der Fernerkundung gewonnen wurden, gegen den Uhrzeigersinn von NW-SE nach NNW-SSE gedreht hat. Man muß bemerken, daß die Richtung erkannter Fotolineationen wesentlich genauer als das Azimut seismischer Herdflächenlösungen bestimmt werden kann. Durch lokale tektonische Gegebenheiten wird die Orientierung der Achsen allerdings innerhalb gewisser Toleranzen variieren (von fast N--S bis fast E--W in besonderen Fällen).

Es wurde der Versuch unternommen, die zahlreichen neu beobachteten Lineationen und vor allem die dabei sich abzeichnenden Zonen größerer Dichte von  $\pm$  parallelen Elementen nach ihrer Lage im heutigen Spannungsfeld der Kruste Mitteleuropas zu untersuchen, um Aussagen über deren mögliche Funktion bei der rezenten Deformation der Erdkruste zu erhalten.

Das relativ junge Alter vieler neu erkannter Lineationen und damit ein möglicher kausaler Zusammenhang mit neotektonischen bzw. rezenten Vorgängen läßt sich z. T. schon aus der Art ihres Auftretens behaupten. Viele Lineationen queren Strukturen unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Genese ohne sichtbare Beeinflussung durch diese, ferner mit einer Streichrichtung, die keinerlei Beziehung zur tektonischen Richtung der Strukturen zeigt. Sie können also nicht im Zusammenhang mit deren Deformation entstanden sein, sondern mit einem späteren, strukturabhängigen Vorgang. Über ihr Alter ist auf diese Weise nicht zu entscheiden, es ist lediglich einzuengen; eine zumindest neotektonische bis rezente Reaktivierung möglicherweise älterer Richtungen ist jedoch daraus zu folgern, daß Lineationen mit entsprechendem Streichen - wenn auch spärlicher - in den glazigenen Sedimenten der Norddeutschen Senke bis in das Küstengebiet zu beobachten sind.

Eine Analyse der dominierenden Richtungen ergab, daß sich zwei  $\pm$  orthogonale Systeme überlagern, d. h., die zunächst unübersichtlich erscheinende Vielfalt der linearen Phänomene läßt sich zwei verschiedenen Systemen zuordnen (Abb. 11), die um  $30^{\circ}$  -  $40^{\circ}$  voneinander abweichen. Jedes System umfaßt zwei ungefähr senkrecht zueinander streichende Richtungen.

Ein Vergleich ihrer Position mit der Spannungsverteilung in Mitteleuropa macht deutlich, daß eins dieser Systeme im Druck-Zug-Quadranten und das andere im Scherquadranten der rezenten Deformation liegen dürfte:

(1) DRUCK-ZUG-QUADRANT

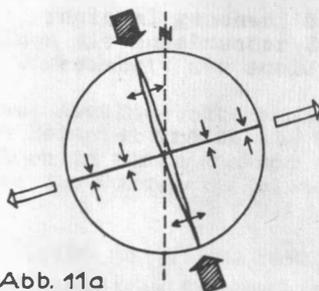


Abb. 11a

NNW--SSE-Lineationen:

Sie verlaufen parallel zur maximalen Hauptspannungsachse und sind am ehesten als Trennbrüche bzw. Weitungs-(Dehnungs-)Zonen zu verstehen. Ihre Richtung entspricht genau der aus Herdlösungen dieses Gebietes bekannten ENE--WSW-ablaufenden Weitung, die rezent als Hauptbewegung für den sich dehrenden Oberrheingraben angenommen wird.

ENE--WSW- bis NE--SW-Lineationen:

Sie verlaufen im Zugquadranten, d. h. senkrecht zur maximalen Hauptkompressionsachse. In dieser Richtung sind am ehesten Trennbrüche zu erwarten, die geschlossen sein müßten bzw. die der darauf liegende maximale Druck

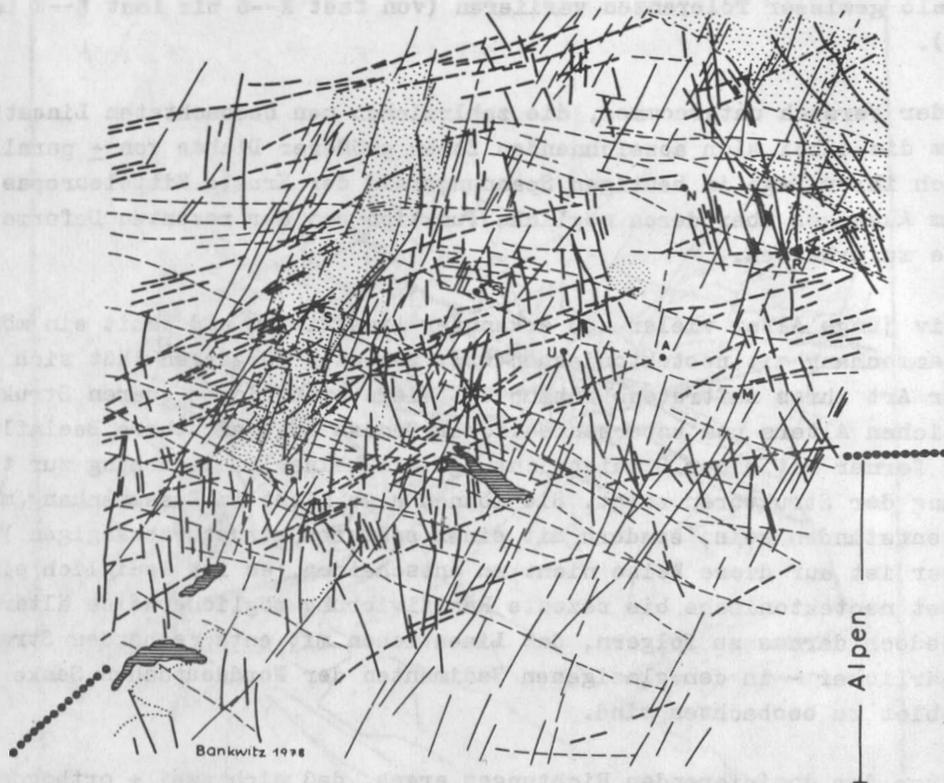


Abb. 10 Fotolineationen im südwestlichen Mitteleuropa

A - Augsburg, B - Basel, N - Nürnberg, M - München,  
 R - Regensburg, S - Strasbourg, St - Stuttgart,  
 U - Ulm. Punktiert: Oberrheingraben, Nördlinger  
 Ries, Böhmisches Massiv und Thüringer Wald.

schließen könnte. Es ist die Streichrichtung z. B. des Schwäbischen Lineaments und der Neckar-Jagst-Zone, die sich im Satellitenbild bzw. in den Erzgebirgsabbruch fortsetzt.

(2) SCHERQUADRANT

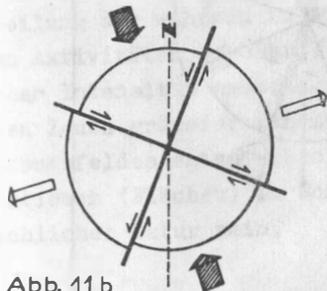


Abb. 11 b

NNE--SSW-Lineationen  
WNW--ESE-Lineationen :

Sie streichen spitzwinklig (diagonal) zur Hauptspannungsrichtung und schließen die oben theoretisch geforderten aktivierbaren Scherrichtungen von  $20^{\circ}$  bzw.  $100^{\circ}$  ein. Sie kommen bevorzugt für Herdflächenlösungen zukünftiger Beben in Betracht.

Dieser Befund weist als eine Aussagemöglichkeit auf interpretierbare Zusammenhänge zwischen der im Satellitenbild erkennbaren Verteilung und Anordnung der Bruchmuster, die z. T. unbekannt waren, und den geodätisch, seismotektonisch und geologisch nachgewiesenen rezenten Krustenaktivitäten hin.

Von Bedeutung sind dabei Zonen mit Häufung von Lineationen als Orte stärkerer Beanspruchung oder umgekehrt als Orte möglicher höherer Spannungsableitung.

Zur Verdeutlichung der mit ihnen verbundenen indirekten Information sind sie in Abb. 12 gesondert schematisch dargestellt. Es zeigt sich:

- 1) Häufungszonen größerer Dimension treten vor allem in N--S-Richtung auf.
- 2) Sie waren vermutlich außerhalb des Oberrheingrabens bisher nicht oder nur in Fotointerpretationen bekannt.
- 3) Es handelt sich um zwei sich spitzwinklig überschneidende Richtungen, von denen die NNW-Richtung Dehnungszonen analog der Weitung des Oberrheingrabens verkörpert und die NNE-Richtung entsprechend der herrschenden Spannungsverteilung Scherzonen repräsentiert.
- 4) Diese Scherzonen streichen parallel zum Oberrheingraben, was auf einen überregionalen Zusammenhang hindeutet. Die Ränder des Grabens werden ebenfalls von solchen Scherzonen flankiert.
- 5) Sie zeigen untereinander eine ungefähre Äquidistanz. Der Abstand voneinander ist mit ca. 70 km und darüber relativ groß. Daraus könnte man schließen, daß erst in dieser Entfernung die Spannungsakkumulation für die Bildung einer zweiten Zone gleicher Größe und Richtung erreicht war.
- 6) Der, regional gesehen, äquidistante Abstand der Zonen voneinander nimmt im einzelnen mit zunehmender Entfernung vom Oberrheingraben zu, was für eine abnehmende Wirksamkeit des auslösenden Faktors spricht.
- 7) Diese Abstände entsprechen der Breite von Krustenblöcken in anderen Gebieten. Zum Beispiel treten die Hauptlineationen im Norden der DDR in Meteor-25-Aufnahmen in einem Abstand von 80 km (untergeordnet 40 km) auf, d. h., sie gliedern den Norden in Leistenschollen dieser Dimension.

Es bleibt zu untersuchen, wieweit das Gesteinsverhalten der Kruste bei der Spannungsakkumulation in Abhängigkeit von der Deformation dieser Gebiete zu derartigen Abständen von rezent aktiven Blockgrenzen zwingt, d. h. wieweit diese Distanz zum

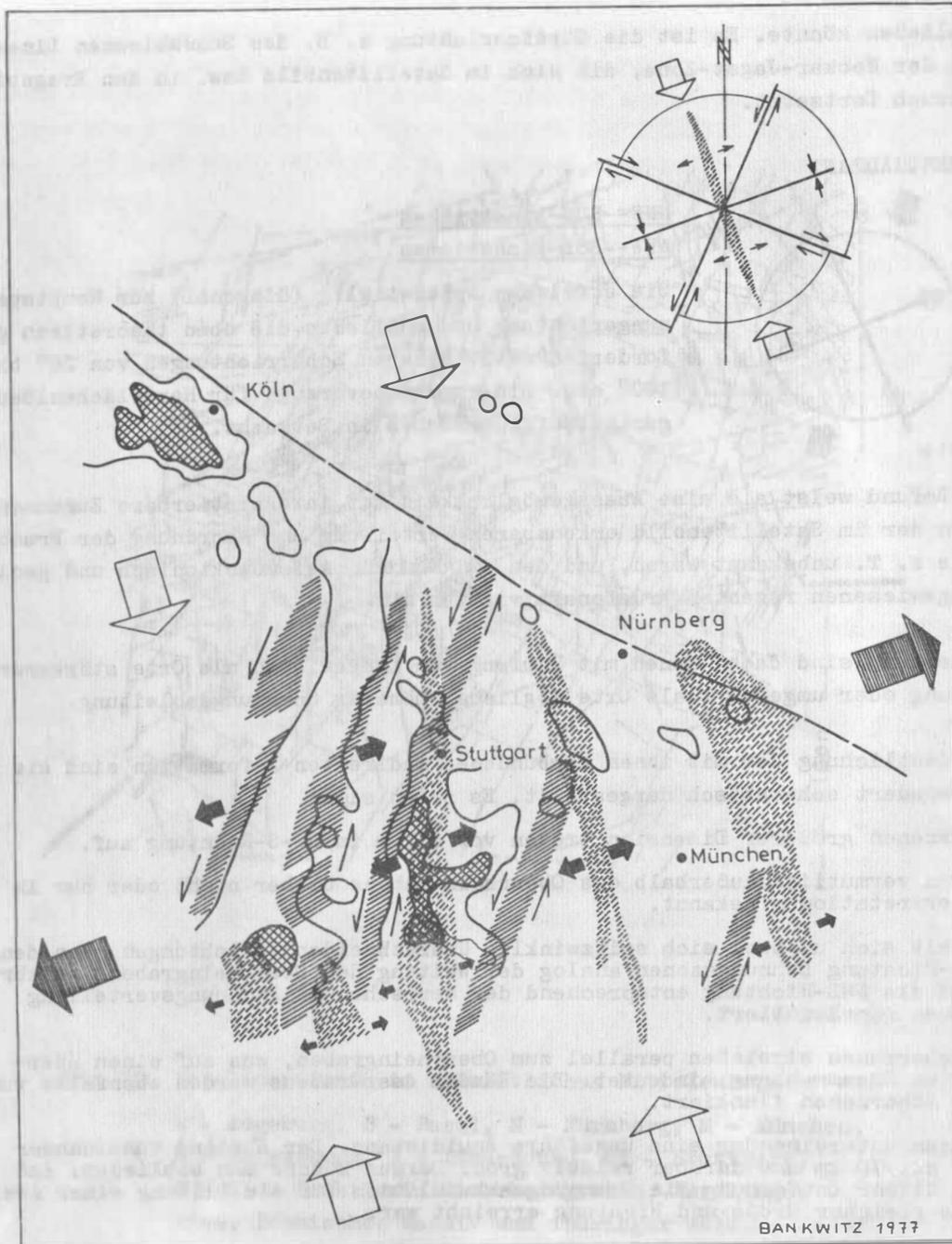


Abb. 12 Häufungszonen von Fotolineationen auf der Südwestdeutschen Großscholle

Schräg schraffiert: vermutliche Scherzonen;  
 gestrichelt schraffiert: vermutliche Weitzungszonen;  
 ausgezogene Linien: Isolinien maximaler seismischer  
 Intensität (Kreuzschraffur: größer 7) nach  
 AHORNER (1975);  
 große Pfeile: rezentes Spannungsfeld.

Ausdruck gebietsspezifischer Parameter werden kann, oder ob es sich um Zufallsgrößen handelt. Umfassendere Auswertungen dieser Art können vielleicht Aussagen zum Krustenverhalten generell ermöglichen.

Zum besseren Vergleich ist in Abb. 12 zusätzlich der Isolinienverlauf für die Verteilung der wahrscheinlichen Maximalintensität (nach AHORNER 1975) der seismischen Aktivitäten (größer 7) eingetragen. Die N--S-streichende Zone maximaler seismischer Intensität zwischen Stuttgart und Bodensee deckt sich mit einer der besprochenen Zonen größerer Lineationsdichte, welche der Weitungsrichtung des rezenten Spannungsfeldes entsprechen. Ihre Westflanke wird von einer Zone mit Häufung der Lineationen (Flächen) in Scherrichtung eingenommen. Diese Übereinstimmung könnte ursächlicher Natur sein.

Es bleibt zu untersuchen, ob die aus den Fernerkundungsdaten abgeleitete Behauptung, daß der N--S-Druck die E--W-Flächen schließen läßt und die NNW--SSE-Lineationen (bzw. Flächen) weitet, wodurch eine Anisotropie der Wellengeschwindigkeiten entstehen kann, einen wesentlichen Beitrag zu der mit anderen Mitteln gemessenen Anisotropie liefert. Die Längserstreckung der Intensitäts-Isolinien nach Norden könnte mit dem Phänomen der geschlossenen bzw. offenen Brüche in Zusammenhang stehen.

Im Bereich der Struktur des Hohenzollerngrabens muß nach unserer Fernerkundungs-Interpretation die Herdfläche des Erdbebens vom September 1978 deutlich schräg zum Streichen des Grabens verlaufen.

Die Scherung als physikalisches Phänomen bildet im Gebiet der Südwestdeutschen Großscholle, einschließlich des Hohenzollerngrabens, und in angrenzenden Gebieten vorwiegend ein Feld von NNE--SSW- bzw. WNW--ESE-verlaufenden Flächen, von denen solche, die tektonisch bereits als Makroflächen realisiert vorliegen, zu seismischen Flächen werden können. Sie können als Abschiebungen fungieren, auch dann, wenn sie in Richtung der beiden Hauptspannungsachsen liegen und eigentlich Trennbrüche von der Entstehung her sind, oder als Blattverschiebung, wenn sie in Diagonalstellung zu den Hauptachsen auftreten. Selbstverständlich sind die Scherflächen nicht permanent bereits als geologische Störungszonen vorhanden. Über die Verbreitung der realisierten Flächen unterrichtet Abb. 10; latente Flächen werden natürlich in einem aerokosmischen Bild nicht sichtbar.

Daß die generell vorhandenen, als seismische Flächen aktivierbaren Störungszonen, die sich in den aerokosmischen Aufnahmen abbilden, nicht durch schadenverursachende seismische Ereignisse auffallen, hängt eventuell damit zusammen, daß die nach unseren Erfahrungen über schwache Erdbeben nötigen Grenzwerte für die Kombination von Scherstrain und Kompression bzw. Extension nicht erreicht werden (BANKWITZ & BANKWITZ 1977). Es ist zu vermuten, daß viele der Störungen nicht den Tiefgang haben, der nötig ist, damit ein genügend großes Gesteinsvolumen für die Speicherung der Spannung zur Verfügung steht.

Zusätzlich zur Raumlage der aktivierbaren tektonischen Flächen in Beziehung zur maximalen Hauptspannungsachse ist zu bemerken, daß im Gebiet Mitteleuropas die Räume der größten Bebengefährdung südwestlich einer Linie von etwa Amsterdam - Nürnberg auftreten. Das bedeutet, daß über die Bereitstellung von aktivierbaren geologischen Bruchflächen hinaus es regionale Ursachen für das Auftreten bzw. Ausbleiben häufiger seismischer Ereignisse geben könnte. Dafür spricht ebenfalls die geringe Beben- erwartung im Pariser Becken und in der Norddeutschen Senke usw.

Selbstverständlich sind Fernerkundungsdaten nur für ganz grobe Aussagen über die Seismotektonik zu benutzen.

#### Literatur

- AHORNER, L.: Present-day stress field and seismotectonic block movements along major fault zones in Central Europe  
Tectonophysics, Amsterdam 29 (1975) 1-4 p. 233-249
- BANKWITZ, P.; BANKWITZ, E.: Geologische Interpretation der rezenten horizontalen Deformationen der Erdkruste im Südostteil der DDR  
Peterm. Geogr. Mitt., Gotha, Leipzig 121 (1977) 4, S. 288-294
- BUŠ, V.A.; GARECKIJ, R.G.; KIRJUCHIN, L.G.: K tektonike sredneevropejskoj plity i ee obramlenij po dannym dešifirovanija kosmičeskich snimkov  
Dokl. AN SSR, Moskva 239 (1978) 1, S. 146-149

Zum bruchtektonischen Bau des Territoriums der DDR  
und angrenzender Gebiete nach kosmischen Aufnahmen

von

PAUL KRULL 1)

**Z u s a m m e n f a s s u n g**

Nach einer kurzen Darstellung der Arbeitsmethode werden die Ergebnisse einer foto-geologischen Auswertung von kleinmaßstäblichen multispektralen kosmischen Aufnahmen des Territoriums der DDR und angrenzender Gebiete vorgestellt. Die Analyse ergab eine Vielzahl von Fotolineationen, die einerseits den bekannten bruchtektonischen Bauplan Mitteleuropas widerspiegeln und andererseits neue, bisher unbekannte Schwächezonen aufzeigen. Es werden tektonische Zusammenhänge überregionalen bis globalen Ausmaßes sichtbar, die sonst nur durch aufwendige geologische Synthesearbeiten zusammengefügt werden müssen oder gar nicht erkannt werden.

**S u m m a r y**

After a short presentation of the method, there are represented the results of a photogeological interpretation of small-scale multispectral cosmic photos of the GDR and adjacent areas. The analysis showed a great number of photolineations, which, on the one hand, reflect the known fracture tectonical structure of Middle Europe, on the other hand, show new zones of weakness, unknown till now. There become evident tectonical relationships of superregional to global size, which otherwise must be obtained by extensive synthetical geological working or remain undiscernible at all.

**Р е з ю м е**

Кратко излагается рабочий метод и обсуждаются результаты фотогеологического дешифрирования мелкомасштабных многозональных космических изображений территории ГДР и прилегающих районов. Анализ показывает множество фотолинеаментов, которые, с одной стороны, отражают разрывно-тектоническое строение в средней Европе и, с другой стороны, указывают на новые, до сих пор неизвестные, зоны дробления.

Видны тектонические связи сверхрегионального и глобального масштаба, которые можно было раскрыть только при помощи трудоемких геологических синтезирующих работ или которые вообще не раскрываются.

1) Zentrales Geologisches Institut, Berlin

## 1. Einleitung

Für die vorliegende fotogeologische Analyse des Territoriums der DDR und der angrenzenden Gebiete der VR Polen, der ČSSR und der BRD stand eine multispektrale kosmische Fernsehaufnahme eines sowjetischen Wettersatelliten der Meteor-Serie in vier Bandbereichen des sichtbaren und nahen infraroten Spektrums zur Verfügung. Dieses Fernsehbild umfaßt den größten Teil des europäischen Festlandes von der norwegischen Westküste, der niederländischen Nordseeküste und den Balearen im Westen bis zur Halbinsel Krim und zum Golf von Adalia (Küste der südlichen Türkei) im Osten und von Sizilien und Kreta im Süden bis zum mittleren Teil der skandinavischen Halbinsel (Höhe des Fämund-Sees) und zum Südufer des Ladoga-Sees im Norden. Der Bildmittelpunkt liegt in der Niederen Tatra. Der ausgewertete Bildausschnitt liegt westlich des Bildmittelpunktes und weist auf Grund der Erdkrümmung mit zunehmender Entfernung vom Bildmittelpunkt zu den Bildrändern erhebliche Verzerrungen auf, die die geologische Interpretation der Fotolineationen und vor allem die Überprüfung der Interpretationsergebnisse an Hand tektonischer Karten sehr erschweren.

Ziel der folgenden Bildauswertung war die Ausgliederung von Fotolineationen im überregionalen bis globalen Rahmen, die als lineare Bildelemente auf bruchtektonische Ursachen zurückzuführen sind sowie ein Vergleich mit dem bisher bekannten tektonischen Bauplan Mitteleuropas, wie er in zusammenfassenden tektonischen Karten und Einzelpublikationen dokumentiert ist.

Die Untersuchungsergebnisse besitzen auf Grund der erwähnten Einschränkungen hinsichtlich der Lagegenauigkeit und der daraus resultierenden Schwierigkeiten der geodätisch genauen Übertragung in geologische oder topographische Karten nur vorläufigen Charakter und müssen bei zukünftigen Arbeiten mit kosmischen Aufnahmen, die mit ihrem Bildzentrum das Arbeitsgebiet erfassen, präzisiert werden.

## 2. Methode der Bilddechiffrierung

Die Bilddechiffrierung, d. h. die Ausgliederung aller linearen Bildelemente nicht anthropogenen Ursprungs, die möglicherweise auf tektonische Ursachen zurückzuführen sind, erfolgte visuell ohne technische Hilfsmittel. Der Bildmaßstab betrug im Bildzentrum ungefähr 1 : 10 000 000. Die geographische Orientierung des untersuchten Bildausschnittes erfolgte nach den Oberflächengewässern wie dem Küstenverlauf an der Nord- und Ostsee, größeren Binnenseen wie dem Müritz-See, dem Plauer See, dem Steinhuder Meer, dem Bodensee u. a. sowie nach größeren Flüssen oder einzelnen Flußabschnitten wie der Donau und dem Rhein und schließlich nach größeren Ortschaften, die besonders gut im roten und nahen infraroten Spektralbereich durch dunkelgraue bis schwarze Töne abgebildet sind.

Die Dechiffrierung wurde getrennt und unabhängig voneinander in allen vier spektralen Bandbereichen durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Zusammenzeichnung aller vier Lineationspläne. Dabei zeigte sich, daß die markantesten linearen Bildelemente wie u. a. die Harznordrand-Störung, die Südwestrand-Störung des Thüringer Waldes in allen vier spektralen Bandbereichen zu erkennen sind. Bei den weniger auffälligen

Lineationen war der Informationsgehalt der einzelnen Bandbereiche unterschiedlich. Den höchsten Informationsgehalt für die Ausgliederung von Fotolineationen lieferten die Aurnahmen im Spektralbereich  $0,6 - 0,8 \mu\text{m}$ . Zu ähnlichen Aussagen kam LOWMAN (1969), zit. in GÜNTHER (1972) bei der geologischen Auswertung von multispektralen Apollo-9-Aufnahmen, allerdings in einem fast vegetationslosen Gebiet. Danach erwies sich der Spektralbereich  $0,59 - 0,72 \mu\text{m}$  vom geologischen Standpunkt am effektivsten. Ein optimaler Informationsgewinn wird jedoch nur bei einer Auswertung des gesamten zur Verfügung stehenden Spektralbereiches erzielt.

Bei der Zusammenkopie der Lineationen aus den verschiedenen Bandbereichen zeigte sich weiterhin, daß die Position einzelner Linienelemente aus unterschiedlichen Bändern voneinander abweicht. Diese Lageabweichungen sind sicher zum größten Teil auf subjektive Faktoren zurückzuführen, die aus der ausschließlich visuellen Dechiffrierungsmethode resultieren. In das zusammenfassende Schema aller ermittelten Fotolineationen (Abb. 2) wurde bei Lageabweichungen einzelner Lineationen eine mittlere Position eingetragen.

### 3. Geologische Auswertung der wesentlichsten Bildinformationen

#### 3.1. Morphostrukturelle Gliederung nach dem fotografischen Grauton

Für die morphostrukturelle Gliederung des Untersuchungsgebietes war besonders die Aufnahme im gelbroten Spektralbereich ( $0,6 - 0,7 \mu\text{m}$ ) geeignet. Nach dem fotografischen Grauton, der im wesentlichen von dem Remissionsvermögen der Aufnahmeobjekte abhängig ist, kann in dem untersuchten Bildbereich eine deutliche Abgrenzung des mitteleuropäischen Tieflandstreifens, der sich von der flandrischen Küste bis nach Osteuropa erstreckt, von der Mittelgebirgszone vorgenommen werden. Die weitere räumliche Untergliederung des Tieflandstreifens spiegelt die land- und forstwirtschaftliche Nutzung dieses Gebietes wider, die mit der pleistozänen bis holozänen Bodenbeschaffenheit korrespondiert. Besonders deutlich heben sich die ausgedehnten glazigenen Bildungen der einzelnen Kaltzeiten mit den Grundmoränen, Endmoränen und Eisrandlagen von den glazifluviatilen und glazilimnischen Ablagerungen ab. Am auffälligsten tritt die Eisrandlage des Pommerschen Stadiums in Erscheinung, die den Nordteil der DDR in NW-SE-Richtung von der Lübecker Bucht bis zum Oderknie bei Hohensaaten durchzieht und dann auf polnischem Territorium in eine generelle SW-NE-Richtung umschwenkt.

Im Mittelgebirgsraum der DDR und angrenzender Gebiete werden durch die unterschiedlichen Grautöne die Umrisse der Grundgebirgsschollen sichtbar. Das zentrale Element des Bildausschnittes bildet die Böhmisches Masse mit ihrem moldanubischen Kern und den ihn umrandenden variszischen Faltengebirgsaufbrüchen der Fichtelgebirgisch-erzgebirgischen Antiklinale und der Sudeten. Weiterhin sind deutlich erkennbar der Harz, der Thüringer Wald, das Rheinische Schiefergebirge, die Vogesen, der Schwarzwald, der Odenwald und der Spessart. Durch diese morphostrukturelle Gliederung, die durch die nachfolgend erläuterten Fotolineationen noch unterstrichen wird, offenbart sich der gesamte Großschollenbau Mitteleuropas, wie er von CARLÉ (1955) dargestellt wurde (Abb. 1).

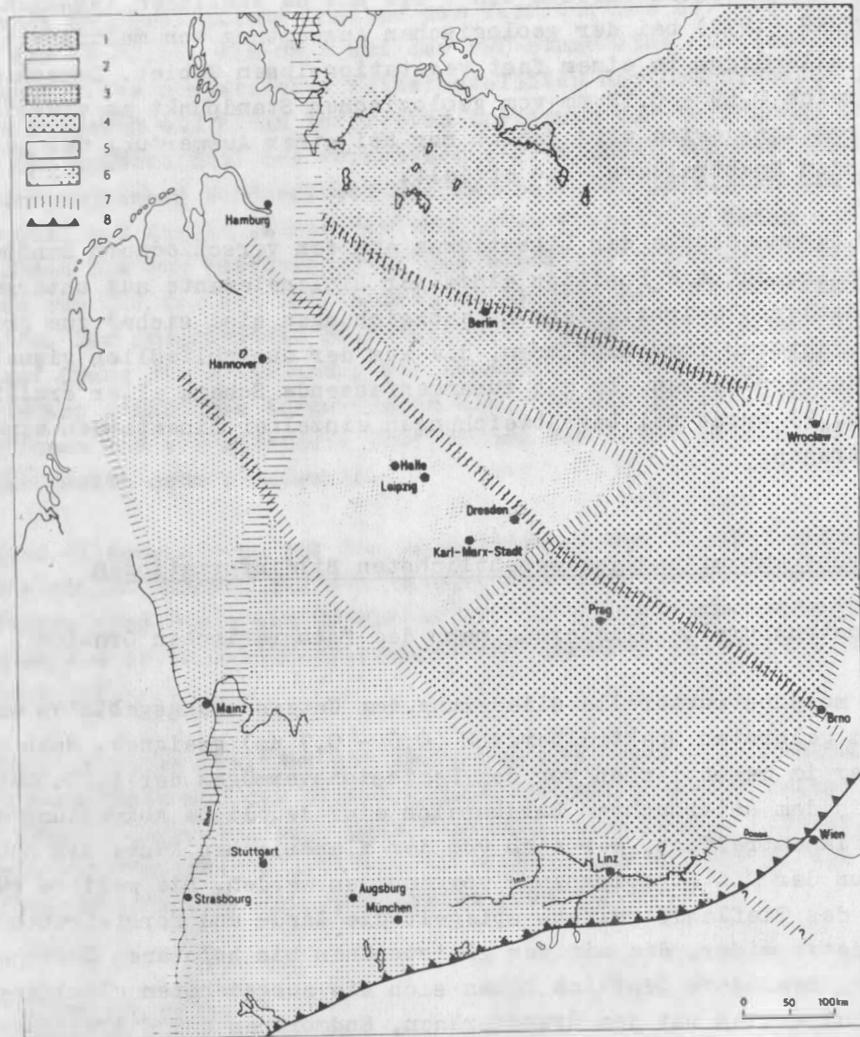


Abb. 1. Fotogeologisches Rayonierungsschema von Mitteleuropa

1 - Ostrheinisch-Niedersächsische Großscholle; 2 - Westrheinisch-Gallische Großscholle; 3 - Südwestdeutsche Großscholle; 4 - Böhmischeschlesische Großscholle; 5 - Sächsisch-Thüringische Großscholle; 6 - Norddeutsch-Polnische Großscholle; 7 - Lineamente und Tiefenbrüche; 8 - Alpenrand

### 3.2. Bruchtektonische Analyse nach Fotolineationen

Während die morphostrukturelle Gliederung nach dem fotografischen Grauton zwar die bekannte Großgliederung Mitteleuropas bestätigt, aber in diesem gut kartierten Gebiet keine neuen Ergebnisse zeigte, brachte die bruchtektonische Analyse der kosmischen Aufnahmen eine Reihe überraschender und unerwarteter Resultate. Auf dem Territorium der DDR und angrenzender Gebiete konnte eine Vielzahl von Fotolineationen ausgehalten werden, die sowohl überregionalen Störungssystemen mit Lineamentcharakter sowie verdeckten und unverdeckten regionalen bis lokalen Störungen als auch Spaltensystemen ohne erkennbaren Verwurf entsprechen können (Abb. 2). Ihr Verlauf läßt sich deutlich über weite Strecken verfolgen und überraschenderweise auch in solchen Gebieten, in denen eine nahezu geschlossene Vegetationsdecke und (oder) eine mächtige Schicht verwitterter Lockersedimente den intakten Gesteinsverband verhüllen. Von besonderer Bedeutung für die Erfassung der großräumigen tektonischen Zusammenhänge ist der Umstand, daß auf den Globalaufnahmen eine riesige Fläche mit einem Blick überschaut werden kann und Einzelheiten wie lokale Störungen, die das Gesamtbild verwirren würden, unterdrückt werden oder mit einer größeren Einheit, mit der sie in genetischem Zusammenhang stehen, verschmelzen. Ein großer Vorteil der fotogeologischen Bestandsaufnahme des tektonischen Inventars eines größeren Territoriums liegt darin, daß auch in homogenen Gesteinskomplexen durch die fotografische Erfassung morphologischer Effekte, des Vegetationsverhaltens oder anderer Fotolineationen verursachender Erscheinungen tektonische Schwächezonen erkennbar sind, die bei herkömmlichen Kartierungsmethoden häufig übersehen werden.

In den folgenden Ausführungen wird lediglich auf die Interpretation einer Auswahl von Fotolineationen eingegangen, um den Rahmen dieser Übersichtsarbeit nicht zu sprengen.

#### 3.2.1. Überregionale Bruchzonen

Die herausragendste bruchtektonische Struktur des betrachteten Bildausschnittes, die als Fotolineation auffällig in Erscheinung tritt, ist der über 300 km lange und ca. 40 km breite Oberrheintal-Graben, der zusammen mit den in den Meteaufnahmen ebenfalls gut sichtbaren hessischen Grabenstrukturen zu dem überkontinentalen rheinisch streichenden Dehnungs-Lineament der *M i t t e l m e e r - M j ö s e n - Z o n e* gehört. Ein NW streichendes Teilstück setzt sich durch das Rheinische Schiefergebirge bis in die Bruchschollen der Niederrheinischen Bucht fort, das als Fotolineation bis an den SW-Rand der Zuider See zu erkennen ist. Aus dem gleichen Gebiet wurden von SESÖREN (1976) auf den Landsat-Aufnahmen größeren Maßstabs zahlreiche ebenfalls NW-SE streichende Fotolineationen erkannt, die die Störungsbündel des nordwestlich der Niederrheinischen Bucht beginnenden Zentralgrabens der Niederlande nachzeichnen (vgl. HEYBROEK 1974). Dieses leitet schließlich in das mediane Rift-System des Nordseebeckens über, das atlantischen Driftbewegungen seine Entstehung verdankt. Die Bedeutung dieser atlantischen Driftbewegungen sowie die Auswirkungen der alpinen Subduktion auf den bruchtektonischen Bauplan des südlichen Mitteleuropa wurden von ILLIES (1972, 1974), SCHÖNENBERG (1975) u. a. hervorgehoben.

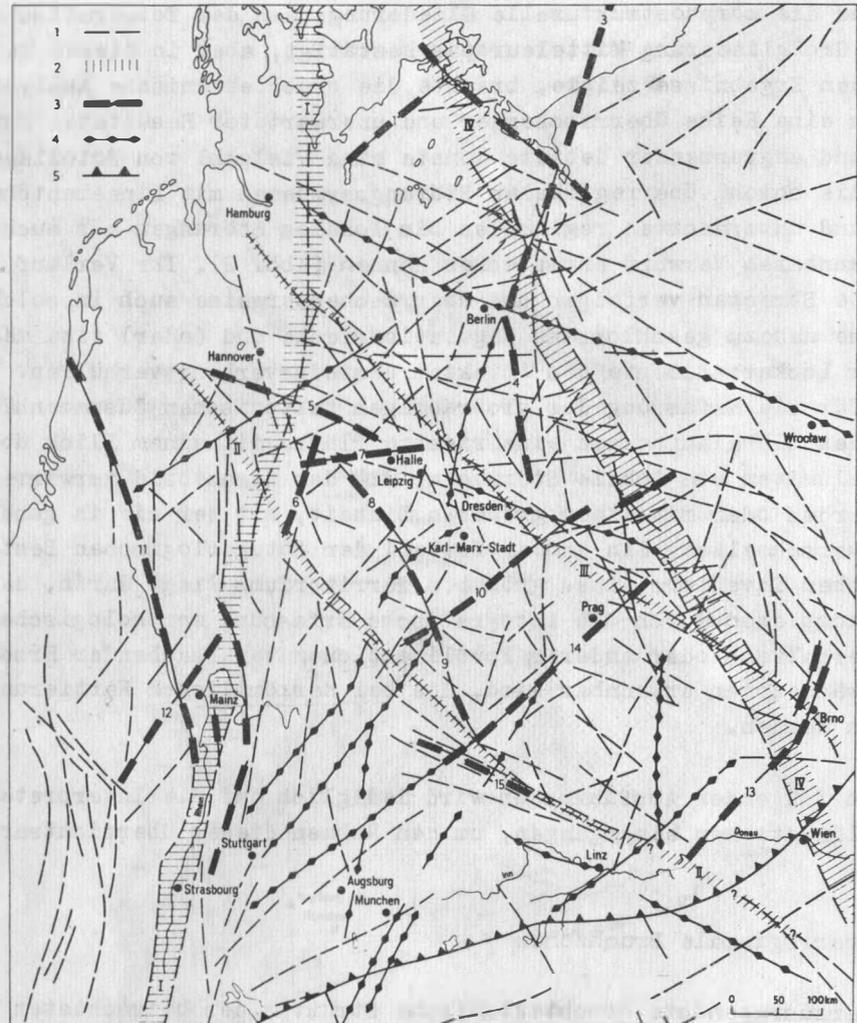


Abb. 2. Tektonisches Interpretationsschema der Fotolineationen

1 - Fotolineationen; 2 - Lineamente: I Mittelmeer-Wjösen-Zone, II Osning-Pfahl-Lineament, III Elbe-Lineament, IV Bosnien-Kattegat-Zone; 3 - geologisch-geophysikalisch nachgewiesene Störungen und Tiefenbrüche (Auswahl): 1 Schwerin-Stralsunder Störung, 2 Strelasund-Störung, 3 Oder-Kalmarsund-Störung, 4 Gubener Störung, 5 Harznordrand-Störung, 6 Ohmgebirgs-Störung, 7 Hornburger Störung, 8 Finne-Störung, 9 Böhmisches Pfahl-Störung, 10 Nordböhmisches Störung, 11 Niederrheintal-Störung, 12 Hunsrück-Taunussüdrand-Störung, 13 Diendorfer Störung, 14 Störung von Klatovy, 15 Donau-Störung; 4 - Fotolineationen, die mit großer Wahrscheinlichkeit Störungen oder Schwächezonen abbilden (Auswahl); 5 - Alpennordrand

Die Fortsetzung der hessischen Grabenzone im Bereich des norddeutschen Tieflandes und damit die Verbindung zu dem Oslo- und Mjösensee-Grabensystem ist geologisch und geophysikalisch nicht eindeutig geklärt. Wahrscheinlich gehört auch die Fotolineation zu dieser Störungszone, die von der Lübecker Bucht bis an den Rand des Oberharzes zu verfolgen ist und möglicherweise mit dem nur teilweise geologisch und geophysikalisch nachgewiesenen Gifhorn-Lübecker Tiefenbruch (GLUSCHKO u. a. 1976) identisch ist.

Eine weitere sehr auffällige 30 bis 40 km breite Zone parallel verlaufender Fotolineationen von überregionaler bis globaler Erstreckung, die durch deutliche Aufhellungszonen - besonders im gelbroten Spektralbereich - erkennbar ist, kann von NW-Jugoslawien, entlang dem unter das Pannonische Becken abtauchenden Ostalpenrand, westlich Brno, über Görlitz, Frankfurt/Oder, der Insel Rügen bis in den Ore-Sund und schließlich entlang der schwedischen Westküste bis in den Oslo-Fjord verfolgt werden (vorläufig als *B o s n i e n - K a t t e g a t - Z o n e* bezeichnet). Über die geologische Bedeutung dieser annähernd eegisch streichenden Zone können z. Z. noch keine konkreten Angaben gemacht werden. Auffällig ist jedoch, daß der nördliche Abschnitt mit der Kattegat-Störung zusammenfällt. Im Nordteil der DDR liegt in dieser Zone die südlich der Insel Rügen beginnende und über 50 km in südöstlicher Richtung sicher nachgewiesene Möckow-Dargibeller Störung (GLUSCHKO u. a. 1976). Ferner treten im Bereich dieses Lineaments die basischen bis extrem basischen Effusiva (Basalte) und Intrusiva (Diabase) der Inseln Rügen und Hiddensee auf, die nach SCHMIDT u. a. (1977) weitgehend dem olivinbasaltischen Magmentyp entsprechen und an tiefreichenden Schwächezonen aus subkrustalen Tiefen aufgestiegen sind. BENEK u. a. (1976) und SCHMIDT u. a. (1977) nehmen jedoch herzynische, d. h. tafelrandparallele und rheinische Störungszone bzw. deren Kreuzungsbereiche als Aufstiegswege an. Vermutlich liegen auch einige Förderzentren des Autun-Vulkanismus Nordostmecklenburgs und Ostbrandenburgs (KATZUNG 1972) sowie der jungoberkarbonische Iser-Riesengebirgspluton (Jizerské-Krkonoše hory) im Bereich dieser Schwächezone.

Das *E l b e l i n e a m e n t* wird in unterschiedlicher Deutlichkeit von einer Fotolineation abgebildet, die vom Erzgebirgsabbruch südöstlich von Dresden bis in das nördliche subherzyne Becken verläuft. Für eine Weiterführung dieser Bruchzone in nordwestlicher Richtung bis in den Nordseebereich bietet die Aufnahme keine Anhaltspunkte. In südöstlicher Richtung ist das Elbe-Lineament (von RÖHLICH u. ŠTOVIČKOVÁ (1968) als Tiefenstörung von Poděbrady bezeichnet) in der kosmischen Aufnahme als eine bis zu 50 km breite Zone über die SW-Randstörung des Eisengebirges (Železne hory) bis an die Moldanubische Überschiebung nordwestlich von Brno und außerhalb des hier betrachteten Bildausschnittes bis weit in die ungarische Tiefebene zu verfolgen.

Als auffällige Fotolineation ist schließlich auch das breite Störungsbündel des *O s n i n g - P f a h l - L i n e a m e n t e s* oder der *F r ä n k i s c h e n L i n i e* zwischen Südwestdeutscher und Thüringisch-sächsischer sowie Böhmischer Großscholle erkennbar. Diese Bruchzone weist nach ILLIES u. GREINER (1976) im Gegensatz zur Mittelmeer-Mjösen-Zone überwiegend Einengungsstrukturen auf. Die Fotolineationen bieten die Möglichkeit, diese lineamentäre Zone, zu der auch die Donau-Störungen zu rechnen sind, mit Unterbrechung im Bereich der Alpenrandsenke südlich von Linz unter Vorbehalt über die Ostalpen bis an den Balaton weiterzuführen.

### 3.2.2. Interpretationsmöglichkeiten im Bereich der Mittelgebirgsregion

Im Bereich der Mittelgebirgsregion kann trotz der starken Bildverzerrung eine große Zahl von Fotolineationen geringerer Längserstreckung mit ausreichender Sicherheit bekannten Störungen bzw. Störungssystemen zugeordnet werden, deren Existenz durch traditionelle geologische und geophysikalische Untersuchungsmethoden gesichert ist. Hierzu gehören z. B. die Harznordrand-Störung die Ohmgebirgs-Störung, die Nordböhmisches Störung, die Hunsrück-Taunus-Südrand-Störung u. a. In vielen Fällen bieten die Fotolineationen die Möglichkeit, Störungen oder Störungszonen über die bisher bekannte Erstreckung zu verlängern oder Teilelemente sicherer miteinander zu verbinden. So kann z. B. die Harznordrand-Störung in nordwestlicher Richtung weit in das Niedersächsische Becken und in südöstlicher Richtung über das Meißener Syenit-Massiv bis in das böhmische Kreidebecken verlängert werden. Die Nordböhmisches Störung (Tiefenstörung von Litoměřice n. RÖHLICH u. ŠTOVIČKOVÁ 1968), die zusammen mit dem Erzgebirgsabbruch den Eger- (Ohrě-) Graben mit den tertiären Basalten des Böhmisches Mittelgebirges begrenzt, wird südöstlich des Osning-Pfahl-Lineamentes durch eine Fotolineation abgelöst, die über die gesamte Süddeutsche Großscholle bis an den Rand des Schwarzwaldes zu verfolgen ist.

Eine erzgebirgisch streichende Fotolineation südöstlich von Prag ist lageidentisch mit der Tiefenstörung von Klatovy (RÖHLICH u. ŠTOVIČKOVÁ 1968), die den Tepla-Barrandium-Block vom Moldanubischen Block trennt. Als Fotolineation ist diese Schwächezone ebenfalls bis weit in die Südwestdeutsche Großscholle verfolgbar. Die Finne-Störung findet nach einer entsprechenden Fotolineation über den Westrand des Eibenstocker Plutons und dem Kristallin des Kaiserwaldes (Slavkovský les) eine Fortsetzung in der rheinisch streichenden Böhmisches Pfahl-Störung.

Obwohl ein großer Teil der in Abb. 2 dargestellten Fotolineationen z. Z. noch nicht mit ausreichender Beweisführung (z. T. auch wegen der bereits erwähnten unzureichenden Orientierungsmöglichkeiten) bruchtektonisch interpretiert werden kann, dürfte es sich auf Grund übereinstimmender Richtungstendenzen nach tektonischen Karten oder Fotolineationsplänen (z. B. TOLLMANN 1976, KRONBERG 1976, REUL u. RÉE 1976) größtenteils um tektonische Linien handeln.

### 3.2.3. Interpretationsmöglichkeiten im Bereich der Norddeutsch-Polnischen Senke

Im Nordteil der DER und den benachbarten, ebenfalls zu dem im Quartär geprägten mitteleuropäischen Tieflandstreifen zählenden Gebieten wird die geologische Interpretation des Bildmaterials durch mächtige pleistozäne Ablagerungen erschwert. Dennoch lassen aerokosmische Untersuchungen, z. B. in der VR Polen (BAŻYNSKI u. SOKOŁOWSKI 1976), den Niederlanden (SESÖREN 1976) oder aus vergleichbaren Regionen der Sowjetunion, wie z. B. der Prikaspi-Syneklise (FLOREMSKIJ u. a. 1976) vermuten, daß sich trotz der mächtigen quartären Verschüttung des Gesteinsverbandes die Spuren bruchtektonischer Bewegungen bis an die Oberfläche durchgepaust haben und z. T. auch heute noch durchpausen. Damit erhalten die in der geologischen Fachliteratur mehrfach diskutierten Vorstellungen, wonach die pleistozänen Strukturen den tektonischen Bauplan des präquartären Untergrundes teilweise nachzeichnen, durch die Informationen aus

kosmischen Aufnahmen neue Impulse. Ein vorrangiges Anliegen zukünftiger Interpretationsarbeiten, besonders in diesen Gebieten, wird deshalb in der Suche nach überzeugenden Beweisen für diese Vermutungen bestehen.

Ein Vergleich mit publizierten tektonischen Schemata des Nordteils der DDR (GLUSCHKO u. a. 1976) oder des nördlichen Mitteleuropa (SCHMIDT u. a. 1977) zeigt, daß einige Fotolineationen in ihrem Verlauf mit Störungsindikationen nach geophysikalischen Potentialmethoden zusammenfallen, deren Ursachen wahrscheinlich im Bereich des oberen Mantels zu suchen sind. Beispiele hierfür sind die Schwerin-Stralsunder Störung, die Strelasund-Störung und die Oder-Kalmarsund-Störung. Ob hier tatsächlich ein geologisch begründeter Durchpauſeeffekt vorliegt, kann z. Z. noch nicht sicher entschieden werden. Eine umfassende Interpretation des Bildmaterials erfordert deshalb eine komplexe Auswertung der vorhandenen geophysikalischen Daten, besonders der oberflächennahen Stockwerke, sowie eine stärkere Berücksichtigung quartärgeologischer und geomorphologischer Forschungsergebnisse.

Die Oder-Kalmarsund-Störung gabelt sich östlich von Berlin in einen eegisch streichenden Ast, der bis in die Oberlausitz reicht, und einen rheinisch streichenden Ast, der über Nordwestsachsen bis nahe an den Geraer Vorsprung verfolgt werden kann. Eine auffällige Fotolineation mit herzynischer Streichrichtung ist von Wrocław über Berlin bis an die Unterelbe zu erkennen. Hierbei dürfte es sich im Südosten sicherlich um Teilelemente der Sudetennordrand-Störung handeln, für deren Fortsetzung es nordwestlich von Berlin bisher jedoch keine sicheren geologisch-geophysikalischen Beweise gibt.

Vorstellungen über Interpretationsmöglichkeiten der Fotolineationen auf dem Territorium der VR Polen sind der Arbeit von BAŻYŃSKI u. MOTYLRAKOWSKA (1979) zu entnehmen.

#### 4. Schlußfolgerungen

Die hier vorgestellten Ergebnisse einer ersten Übersichtsinterpretation kleinmaßstäblicher kosmischer Aufnahmen des Territoriums der DDR und angrenzender Gebiete erlauben folgende allgemeine Einschätzung:

Kleinmaßstäbliche multispektrale kosmische Aufnahmen, die einen sehr großen Ausschnitt der Erdoberfläche erfassen, beinhalten eine Fülle von Fotolineationen sowohl in übertage anstehenden als auch durch mächtigen Verwitterungsschutt und quartäre Lockersedimente sowie dichte Vegetation verhüllten Gesteinskomplexen von regionaler bis überregionaler Erstreckung, die größtenteils als echte tektonische Schwächezonen gedeutet werden können.

Die Fotolineationen folgen teilweise den bekannten kartierten Störungen. Sie bilden darüber hinaus die Möglichkeit, den Verlauf dieser Brüche auch über solche Gebiete zu verlängern oder zu präzisieren, in denen auf Grund homogener Gesteinsausbildung geringe Versatzbeträge mit den Möglichkeiten der geologischen Geländeaufnahme nicht feststellbar sind. Es werden zusätzlich auch Dislokationszonen sichtbar, die nicht von Versetzungen an geologischen Grenzen begleitet sind, aber für die Belange der praktischen Geologie wie der Grundwassererkundung an Zerrüttungszonen oder den Nach-

weis von Klüftzonen in Kohlenwasserstofflagerstätten von großer Wichtigkeit sind.

Die größte Bedeutung dieser kosmischen Aufnahmen liegt in der Erfassung überregionaler bis globaler Schwächezonen von Lineamentcharakter, die sonst nur durch aufwendige geologische Synthesearbeiten aus vielen kleinen Einzelelementen zusammengefügt werden müssen oder gar nicht erkannt werden. Damit bietet die tektonische Interpretation der globalen kosmischen Aufnahmen zusammen mit größermaßstäblichen aerokosmischen Bildern eine wichtige zusätzliche Informationsquelle für die tektonische Bestandsaufnahme eines Untersuchungsgebietes und damit für die Ableitung von Störungs- und Lineamentkarten.

Ein optimaler Informationsgewinn für überregionale Forschungsvorhaben kann nur durch eine sinnvolle internationale Gemeinschaftsarbeit erzielt werden. So pausen sich beispielsweise altangelegte Störungen der Böhmisches Masse und ihres moldanubischen Kerns durch die jungen Decken des Alpen- und Karpatenorogens durch. Weiterhin sind aus der Untersuchung kosmischer Aufnahmen Hinweise zu erwarten zur Abgrenzung der Moldanubischen von der Saxothuringischen Zone im Bereich der Südwestdeutschen Großscholle, zur Präzisierung des Südwestrandes der Osteuropäischen Tafel oder zur Aufdeckung bruchtektonischer Beziehungen zwischen dem stabilen Schelf der präkambrisch konsolidierten Osteuropäischen Tafel und dem labilen Schelf Mitteleuropas.

#### Literatur

- BAŻYŃSKI, J.; SOKOŁOWSKI, J.: Wstępna fotointerpretacja geologiczna obrazu Landsat-1 obszaru między Wrocławiem a Poznaniem. *Przełąd geol.*, Warszawa 4 (1976), S. 196-201
- BAŻYŃSKI, J.; MOTYL-RAKOWSKA, J.: Vorläufige Interpretation des Satellitenbildes "Meteor 25" für das Gebiet Polens. *Veröff. Zentralinst. f. Phys. Erde*, Potsdam 1979 (im Druck)
- BENEK, R.; KATZUNG, G.; RÖLLIG, G.: Variszischer subsequenter Vulkanismus und tektonogene Entwicklung im Gebiet der DDR. *Jb. Geol.*, Berlin 7/8 (1976), S. 17-31
- CARLE, W.: Bau und Entwicklung der Südwestdeutschen Großscholle. *Beih. Geol. Jb.*, Hannover 16 (1955), 2725
- FLORENSKIJ, P. I.; PETRENEO, A. C.; SCHORIN-KONSTANTINOV, B. P.; VEDESCHIN, L. A.: Mesto kosmičeskogo izobraženija pri kompleksnoj obrabotke geologo-geofizičeskoj informacii dla izučenija glubinnogo stroenija Nižnego Povolžja. *Issledovanie prirodnoj sredy kosmičeskimi sredstvami*, Geologija i Geomorfologija, Tom V, Akad. Nauk SSSR, Moskva (1976), S. 42-60
- GLUSCHKO, W. W.; DICKENSCHTEIN, G. CH.; SCHMIDT, K.; GOLDBECHER, K.: Zur tektonischen Rayonierung des Nordteils der DDR nach dem Alter des gefalteten Untergrundes. *Jb. Geol.*, Berlin 7/8 (1976), S. 9-16
- HEYBROEK, P.: Explanaton to tectonic maps of the Netherlands. *Geol. an Mijnbouw*, Den Haag 53 (1974) 2, S. 43-50
- ILLIES, H.: The Rhine graben riftsystem-plate tectonics and transform faulting. *Geophys. Surv.* 1 (1972), S. 27-60
- ILLIES, H.: Intra-Plattentektonikk in Mitteleuropa und der Rheingraben. *Oberrheinische Geol. Abh.*, Karlsruhe 23 (1974), S. 1-24

- ILLIES, H.; GREINER, G.: Regionales stress-Feld und Neotektonik in Mitteleuropa.  
Oberrheinische geol. Abh., Karlsruhe 25 (1976), S. 1-40
- KATZUNG, G.: Stratigraphie und Paläogeographie des Unterperms in Mitteleuropa.  
Geologie, Berlin 21 (1972), S. 570-584
- KRONBERG, P.: Bruchstrukturen des Rheinischen Schiefergebirges, des Münsterlandes  
und des Niederrheins - kartiert in Aufnahmen des Erderkundungssatelliten ERTS-1.  
Geol. Jb., A, Hannover 33 (1976), S. 37-48
- REUL, K.; RÉE, C.: Tektonische Gefügeanalyse aus Fernerkundung und vor Ort am Bei-  
spiel der Uranlagerstätte Ellweiler.  
Jahresber. u. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., Stuttgart 58 (1976), S. 183-201
- RÖHLICH, P.; ŠTOVIČKOVÁ, N.: Tiefenstörungstektonik und deren Entwicklung im zentralen  
Teil der Böhmisches Masse.  
Geologie, Berlin 17 (1968) 6/7, S. 670-694
- SCHMIDT, K.; KATZUNG, G.; FRANKE, D.: Zur Entwicklung des präpermischen Untergrundes  
und des Magmatismus im südwestlichen Vorfeld der Osteuropäischen Tafel.  
Z. angew. Geol., Berlin 23 (1977) 9, S. 426-436
- SCHÖNENBERG, R.: Südwestdeutschland zwischen atlantischer Drift und alpiner Orogenese.  
Jahresh. Gesellsch. Naturk. Württ., 130 (1975), S. 54-67
- SESÖREN, A.: Lineament analysis from ERTS (Landsat) images of the Netherlands.  
Geol. en Mijnbouw, Den Haag 55 (1976) 1/2, S. 61-67
- TOLLMANN, A.: Die Bruchtektonik Österreichs im Satellitenbild.  
Neues Jb. Geol. u. Paläont. Abh., Stuttgart 153 (1976) 1, S. 1-27

Vorläufige Ergebnisse zur geologischen Interpretation  
der METEOR-Aufnahmen vom Territorium der DDR

von

K. FEIRER, M. VIEHWEG, M. NAUMANN <sup>1)</sup>

Z u s a m m e n f a s s u n g

Es wird die geologische Interpretation von Aufnahmen des als Wettersatelliten konzipierten Raumflugkörpers METEOR beschrieben. Für das Territorium der DDR werden die wichtigsten Photolineationen erläutert und mit bereits bekannten tektonischen Elementen verglichen.

S u m m a r y

Description of the geological interpretation of images of the space-craft METEOR conceived as a weather-satellite. For the territory of the GDR the most important photo-lineations are explained and compared with already known tectonic elements.

Р е з ю м е

Описывается геологическая интерпретация снимков метеорологического спутника типа "Метеор". Наиболее важные фотолинеации на территории ГДР рассматриваются и сравниваются с уже известными тектоническими элементами.

1. Bildmaterial und Auswertemethodik

Die zur Verfügung stehenden Kopien der METEOR-Aufnahmen besitzen einen Maßstab von etwa 1 : 5 000 000. Er ist relativ klein, bietet aber für eine überregionale geologische Auswertung gewisse Vorteile.

Zum Zeitpunkt der Aufnahme herrschten infolge Sonnenstand und Wetter optimale Ausleuchtungsbedingungen. Die Aufnahmehöhe bedingt, daß der Auflösbarkeit Grenzen gesetzt sind. Ein Teil der Aufnahmen liegt im nahen Infrarotbereich. Das ist u. a. auch deshalb von Vorteil, weil bekanntlich langwellige Lichtstrahlen wegen geringerer Ablenkung Dunstschichten in der Atmosphäre besser durchdringen. Die im infraroten Wellenbereich schlechte Durchdringung der nur vom Himmelslicht ausgeleuchteten Schatten

<sup>1)</sup>

SDAG Wismut, Zentraler Geologischer Betrieb Gröna

spielt infolge der o. a. Faktoren (Aufnahmehöhe, Aufnahmezeitpunkt, Auflösungsvermögen) keine nennenswerte Rolle. So sind z. B. Schattenbildungen in den Gebirgsregionen kaum wahrnehmbar. Infolge der starken Randverzerrung der Aufnahmen war eine topografisch exakte Übertragung der Lineationen erschwert.

Die Auswertung erfolgte ohne optische Hilfsmittel; ein Stereoeffekt ist bei diesem kleinen Maßstab ohnehin kaum vorhanden. Die Aufnahmen der verschiedenen Wellenbereiche ergänzen sich untereinander und sind im Komplex zu betrachten. Aus der zuerst bearbeiteten Aufnahme gewinnt man fast immer den Hauptanteil der Informationen, wobei es gleichgültig erscheint, welchen Wellenbereich man dafür auswählt. Diese Auswahl wird überwiegend von subjektiven Faktoren beeinflusst. Wir begannen mit der Auswertung der Aufnahmen des nahen Infrarotbereiches und gingen bei der Unterscheidung der Grautöne (es wurde ohne Densitometer gearbeitet) von folgenden Voraussetzungen aus:

Im nahen Infrarotbereich werden Grautonunterschiede wegen des unterschiedlichen Reflexionsvermögens vor allem durch Vegetations- und hydrologische Parameter bestimmt. Die morphologische Gliederung spielt nur eine untergeordnete Rolle. Vegetationsbedeckte Bereiche erscheinen hell und feuchte Bereiche dunkel bis schwarz (Wasserflächen). Bei der Vegetation ist außerdem das unterschiedliche Reflexionsvermögen zwischen Blattgrün (hell) und Nadelwald (dunkel) zu beachten. Zum Zeitpunkt der Aufnahme (1. Juli) waren im Untersuchungsgebiet mit seiner intensiven Land- und Forstwirtschaft alle Flächen begrünt. Im Juni 1976, dem der Aufnahme vorangegangenen Monat, war das Wetter in Zentraleuropa extrem niederschlagsarm, so daß zum Zeitpunkt der Aufnahme keine übermäßige allgemeine Bodendurchfeuchtung vorlag. Eine sichtbare höhere Bodenfeuchtigkeit ist deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Zonen permanent überdurchschnittlicher Wasserführung beschränkt. Die sich abzeichnenden Lineationen sind also teils vegetations-, teils hydrologisch bedingt. Sie sind unter dem Aspekt der Zusammenhänge zwischen Entwässerungsnetz bzw. Feuchtigkeitszonen oder Vegetationsverhältnissen einerseits und Tektonik und Gesteinstypus andererseits zu betrachten. Bekanntlich entscheiden ja Durchlässigkeit, Verwitterungsbeständigkeit, Härte, Lagerung und Klüftung eines Gesteins entscheidend darüber, in welchen Richtungen die Oberflächenentwässerung erfolgt, Zonen höherer Bodenfeuchtigkeit auftreten oder sich unterschiedliche Vegetationsmerkmale abzeichnen.

## 2. Interpretationsergebnisse

Den Resultaten der Interpretation der METEOR-Aufnahmen sei folgendes vorangestellt: Das Territorium der DDR läßt sich in zwei geologische Großeinheiten unterteilen: Den Bereich der Nordostdeutsch-Polnischen Senke und die varistischen Geosynklinalgebiete des Rhenoherynikums und Saxothuringikums. Am Aufbau des Südteiles der Republik sind metamorphe, magmatische und sedimentäre Gesteine vom Archaikum bis zum Quartär beteiligt, wobei deren Aufschlußgrad unterschiedlich ist. Der Nordteil der DDR wird geologisch durch Tafelbildungen des Meso-Känozoikums charakterisiert.

An tektonischen Elementen sind hauptsächlich die NE-streichenden varistischen und die NW-gerichteten saxonischen Elemente ausgebildet. Diese Richtungen bestimmen den strukturellen Bau des Gesamtgebietes. In letzter Zeit konnten mittels strukturgeophysikalischer Methoden auch Elemente des orthogonalen Systems nachgewiesen werden, vor

allem NNE- und NNW-Elemente, die auf jüngste tektonische Bewegungen hinweisen und in der starren konsolidierten Tafel durch Bruchzonen und Zonen erhöhter Durchlässigkeit und Klüftigkeit zum Ausdruck kommen. Es scheint sich dabei zu bestätigen, daß es sich hier um ein Aufleben präkambrisch angelegter Störungszonen handelt. Generell scheint uns für die geologische Interpretation der kosmischen Aufnahmen die Frage der bis in jüngster Zeit auftretende wiederholte Aktivierung bestimmter tektonischer Richtungen im Verlauf tektonischer Prozesse unterschiedlichen Alters von besonderer Wichtigkeit.

Für die Geologen der DDR gibt es eine Reihe von tektonischen Zonen, die fester Bestandteil aller Untersuchungskonzeptionen sind, z. B. das NW-streichende Elbe-Lineament, die Neudek-Crimmitschauer Zone, der Haussachsener Gangzug, die Mansfelder Störung (NE-streichend), der Rostock-Gramzower Bruch, der Barth-Grimmener Wall usw. Diese Zonen sind geophysikalisch und geologisch sicher nachgewiesen. Erstaunt waren wir jedoch, als wir bei der Betrachtung der Aufnahmen im Buch "Deutschland aus dem All" diese Zonen nicht fanden, bzw. nur unzureichende kurze Teilsegmente erkannten. Dafür traten auf diesen Aufnahmen NNW- und NNE-gerichtete Lineationen in den Vordergrund. Der Maßstab dieser Aufnahmen lag bei 1 : 1 000 000 und größer. Auf den METEOR-Aufnahmen mit weit kleinerem Maßstab dagegen zeigen sich die o. a. Tiefenbrüche deutlich. Das unterstreicht erneut die Tatsache, daß Bilder mit einem unterschiedlichen Generalisierungsgrad und Maßstab Strukturen unterschiedlicher Tiefenwirkung widerspiegeln. Auch Vergrößerungen oder Verkleinerungen einer Aufnahme verändern den Informationsgehalt nur unwesentlich; sie präzisieren bzw. gliedern bestenfalls den Aufbau der festgestellten Lineationen. Von Wichtigkeit bleibt vor allem der Generalisierungsgrad.

Wie bereits dargelegt, sind auf den METEOR-Aufnahmen die bereits bekannten varistischen und saxonischen Elemente relativ gut zu erkennen. Das trifft sowohl für überregionale als auch lokale Elemente zu. Interessant ist besonders die Feststellung, daß auf den vorliegenden Aufnahmen Elemente des orthogonalen Systems deutlich auszuhalten sind und damit vorangegangene struktur-geophysikalische Angaben bestätigt werden. Diese Strukturen dürften ihrer Ausprägung nach - obwohl prävaristisch angelegt - vielfach jüngere tektonische Bewegungen widerspiegeln. Sie sind auch in den von relativ mächtigem Känozoikum bedeckten Nordgebieten der DDR zu verfolgen. Der "Durchpau-effek" dürfte hier weniger auf geomorphologischen als vielmehr auf hydrologischen Oberflächen-Elementen (Entwässerungsnetz, Zonen ständiger überdurchschnittlicher Bodenfeuchtigkeit) basieren. Die Breite der Strukturen kann man mit mindestens 20 - 25 km annehmen.

Auf dem Gebiet der DDR zeichnen sich vor allem zwei orthogonal streichende Strukturzonen ab. Die eine verläuft auf der Linie Rostock - Leipzig weiter geradlinig nach Süden durch das östliche Vogtland bis zum Ohretalgraben (CSSR), wo sie vermutlich nur unterbrochen wird. Diese Zone kontrolliert einerseits die u. a. von LAUTERBACH (1962) ausgehaltene Zone seismischer Aktivität auf der Linie Leipzig - Regensburg im Süden und andererseits den Verlauf einer Magnetanomalie-Zone von Magdeburg nach Norden. Eine zweite parallele Strukturzone ist weiter östlich markiert. Sie verläuft annähernd auf der Linie Angermünde - Dresden und läßt sich südlich des Ohretalgrabens (CSSR), der sie unterbricht, bis an das südwestliche Barrandium verfolgen. Für diese Zone fehlen bisher Hinweise aus geophysikalischen Untersuchungen. Einige weitere gleich-

laufende orthogonale Strukturelemente sind nach unserer Meinung auch außerhalb des Gebietes der DDR, vor allem auf dem Territorium der VR Polen ausgeprägt. Die auf unserem Territorium liegenden, und bisher geophysikalisch nicht oder nur sporadisch nachgewiesenen orthogonalen Struktur-Elemente zeichnen sich im tektonischen Bild kaum durch ausgeprägte lokale Störungen ab. Ihre Spuren sind vielmehr in der Klüftung zu suchen, wobei aber Messungen auf größeren Querprofilen (20 - 25 km lang) erforderlich sind.

### 3. Ausblick

Um die Qualität der geologischen Interpretation der METEOR-Aufnahmen zu verbessern, wären weitere Aufnahmen zu verschiedenen Jahreszeiten und unterschiedlichem Sonnenstand sowie aus weiter westlich verlaufenden Flugbahnen wünschenswert. Die erreichten Ergebnisse sind jedoch ermutigend und lassen optimistische Schlußfolgerungen über die Möglichkeiten relativ kurzfristiger praktischer Maßnahmen und neuer Aspekte in der Suche von Lagerstätten zu.

О Южно-Монгольском полигоне

ПАГМЫН ХОСБАЯР I)

## Р е з ю м е

Исследования при изучении геологических явлений на больших площадях и выяснение геологических соотношений и региональной связи между различными геологическими объектами являются новым направлением при изучении природных ресурсов. Используя преимущества космической съёмки (обзорность и информативность) можно успешно решить эти задачи. Для этой цели на территории МНР был выделен Южно-Монгольский полигон с четырьмя тестовыми участками. Кратко даётся геологическое описание этого полигона. Указывается на то, что дополнительно ещё проводится высотная съёмка над этим полигоном самолётно-лабораторией АН-30.

## S u m m a r y

The application of aerocosmic methods has proved a success at the exploration of large connections between geological structure unities and at the research of deposits. There are decisive facilities by the use of different photo technics especially by the simultaneous registration of large parts of the surface of the earth and the high amount of information. In order to test the method of taking and interpreting photos there has been selected the South Mongolian Polygon with 4 test areas on the territory of the Mongolian People's Republic. Follows a short geological description of the Polygon and already carried out and still planned works.

## Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Anwendung aerokosmischer Methoden hat sich als erfolgreiches Arbeitsmittel bei der Erforschung großräumiger Zusammenhänge zwischen geologischen Struktureinheiten und bei der Lagerstättensuche bewährt. Entscheidende Vorteile ergeben sich - besonders durch die gleichzeitige Erfassung großer Teile der Erdoberfläche und den hohen Informationsgehalt bei der Nutzung unterschiedlicher Aufnahmetechniken. Zur Erprobung der Aufnahme- und Auswerteverfahren wurde auf dem Territorium der Mongolischen Volksrepublik das Südmongolische Polygon mit 4 Testgebieten ausgewählt. Es wird eine kurze geologische Beschreibung des Polygons sowie der bereits durchgeführten und der noch geplanten Arbeiten gegeben.

I) Академия Наук МНР, Институт физики и техники, Сектор космических исследований, г. Улан Батор

Для современного этапа развития геологических исследований в Монголии необходимо проведение широких обобщающих работ, охватывающих крупные структурные элементы, независимо от их доступности и степени изученности регионов.

В развитии региональных исследований важную роль имеет геологическое исследование Земли с помощью космических средств и прежде всего дешифрирование и интерпретация космических снимков. Учитывая главное преимущество космических снимков, — их обзорность и информативность — геологическое исследование космических изображений представляет собой новый путь изучения геологических явлений на больших площадях и выяснение геологических соотношений и региональных связей между различными геологическими объектами.

Существующая литература по геологическому дешифрированию космических снимков показывает большую перспективность комплексного использования аэрокосмических материалов при составлении мелкомасштабных геологических и тектонических карт, прогнозных и металлогенических карт различных видов полезных ископаемых. Для успешного практического применения космических снимков в геологических исследованиях необходима разработка комплексной геологической методики дешифрирования КС в различных климатических условиях Монголии. Для этой цели нами были выбраны несколько полигонов с включением эталонных участков, расположенных в пределах различных географических и климатических зон Монголии. Эти зоны расположены в меридиальной полосе, пересекающей всю территорию Центральной Монголии. В пределах этих полигонов выделены несколько тестовых участков, имеющих различное назначение. На этих тестовых участках должны проводиться двухсторонние, многосторонние, односторонние исследования по разработке единой методики дешифрирования и другим видам геологических исследований.

Южно-Монгольский полигон рассматривается как объект исследований по использованию аэрокосмической информации преимущественно в области геологии, геоморфологии и тектоники.

Южно-Монгольский полигон имеет следующие координаты

от  $98^{\circ}$  до  $110^{\circ}30'$

от  $43^{\circ}$  до  $47^{\circ}$ .

Складчатые сооружения территории Южно-Монгольского полигона составляют часть Центрально-Азиатского складчатого пояса. Формирование складчатых структур связано с байкальскими, каледонскими и герцинскими тектономагматическими движениями. Разновозрастные складчатые структуры разделяются между собой зонами долгоживущих глубинных разломов. Простираение этих разломов не всегда совпадает с новейшими. Взаимоотношение разнонаправленных складчато-глыбовых гор создает сложное строение рельефа. Именно на территории полигона происходит сочленение этих горных систем. В пределах Южно-Монгольского полигона выделяются три горные области: а. Южно-Хангайская, б. Гоби-Алтайская, в. Гоби-Тяньшаньская.

#### а. Южно-Хангайская область

В северной части Южно-Монгольского полигона расположены горы южного склона Хангайской горной области. Большая часть Хангайских гор плосковершинная, связанная с широким распространением поверхностей выравнивания. По характеру расположения новейших блоковых структур и глубокому эрозионному расчленению плосковершинная поверхность Хангайских гор местами имеет горно-долинную форму рельефа. Реки южного склона

(Байдрага-гол, Туйн-гол, Тацын-гол, Онгийн-гол) впадают в замкнутые котловины Центральной Азии.

С юга Южно-Хангайская горная область окружена высокосейсмической зоной. С новейшими разломами связано извержение кайнозойских базальтов, широко развитых как в межгорных впадинах и речных долинах, так и на водораздельных участках.

б. Гоби-Алтайская область

В собственно Гобийском Алтае имеется несколько высокогорных массивов - Баянцаган-ула, Ихэ-богд, Арц-богд, Бага-богд - расположенных кулисообразно с общим северо-западным простиранием. Самая высокая вершина Их-богд-ула находится над уровнем моря около 4000 м. Эти крупные массивы имеют плоские вершины, крутые склоны, разделенные новейшими разрывами на отдельные глыбовые горы. Вдоль северного фасада Гобийского Алтая сохранились следы катастрофического землетрясения 1957 года, выраженные в виде узких, линейно вытянутых, трещин, разрывов и уступов, с общей протяженностью до 300 км.

Горные массивы Гоби-Алтайской высокогорной области окружены своеобразными предгорными равнинами (Бэли), сложенными конусами выноса. Горные массивы рассечены поперечными глубокими узкими ущельями и каньонами. Долина озер отделяет Гоби-Алтайскую горную область от Южно-Хангайской. В пределах долины озер расположены крупнейшие соленые озера такие как Бон-цаган-нур, Орог-нур, Тацын-нур и другие.

в. Гоби-Тяньшанская область

Средневысотные горы характерны для собственного хребта Гурвансайхан, Атас-ула, Цаган-богда, Нэмэгту-ула, Тост-ула, имеющих субширотное простирание.

Эти горы представляют собой горсты неотектонического происхождения в условиях пустынного климата. Склоны гор скалистые, прорезаны сухими долинами. Нижние части склона опоясаны обширными бэями, сложенными аллювиально-пролювиальными отложениями. Все эти горные массивы разделены между собой межгорными котловинами различного размера. Они чаще всего наполнены мезокайнозойскими континентальными красноцветными, пестроцветными и сероцветными малосовидными отложениями. В пределах хр. Гурвансайхан-Нуруу имеются кроме следов современного землетрясения и древние сейсмические дислокации. К востоку от этих горных областей расположены средне-гобийские мелко-сопочники и Восточно-Гобийская депрессия, заполненная мезокайнозойскими континентальными отложениями.

Геологическое строение Южно-Монгольского полигона весьма разнородно. В сложном геологическом строении полигона участвуют разновозрастные палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения, сложенные различными вулканогенными и осадочными формациями, отвечающими разным тектономагматическим этапам развития Центрально-азиатского пояса.

Палеозойские породы весьма сложно дислоцированы и относятся к геосинклинальному классу формации.

Юрско-меловые континентальные молассовые образования принадлежат к классу орогенных формаций.

Кайнозойские отложения соответствуют формациям новейшего орогенного этапа. Расположение крупнейших структурных элементов в значительной мере определяется неотектонической структурой. Поэтому, необходимо проводить скоординированные работы по выяснению возможностей применения аэрокосмических снимков для изучения новейших тектонических

движений в формировании основных элементов рельефа, линеаментов и кольцевых структур различного генезиса и глубинного строения региона и восстановления динамики и кинематики тектонических движений, а также выявления связи с этими движениями других геологических явлений – вулканизма, сейсмичности, современного осадконакопления, размещения подземных вод и т.д. В целом на территории Южно-Монгольского полигона имеются различной степени детальности графических материалов; физико-географические карты и схемы, геологические, тектонические, геоморфологические, гидрогеологические карты, схемы и карты растительного покрова, почвенного покрова и сейсмичности территории.

В пределах Южно-Монгольского полигона выделены четыре тестовых участка – Баянхонгорский, Ихэ-богдийский, Гурвансайханский и Ханбогдийский. В соответствии с национальной программой по изучению природных ресурсов на территории тестовых участков и полигона проводятся высотные съемки в масштабе 1:100 000 на самолете АН-30. Также были проведены полевые исследования на тестовых участках и собраны дополнительно геологические материалы. Имеются космические снимки (многозональные и синтезированные) некоторых районов, полученных космическим кораблем "Салют-4" и американским спутником ERTS.

Einige methodische Aspekte der Interpretation aerokosmischer  
Aufnahmen für bruchtektonische Analysen

---

von

Peter BANKWITZ <sup>1)</sup>

Z u s a m m e n f a s s u n g

Lineationen in aerokosmischen Aufnahmen zeigen sich in der Regel dann deutlich, wenn sie als geomorphologische Depressionen im Relief vorliegen. Sie spiegeln häufig Grundstrukturen des Reliefs wider. Man darf das als Ausdruck ihrer endogen bedingten Entstehung werten. In analoger Weise schließt man generell bei einer geologischen Interpretation aerokosmischer Materialien vom Prozeß der Oberflächengestaltung auf den Einfluß von Vorgängen im Erdinnern.

Möglichkeiten zur Identifizierung und Klassifizierung von Lineationen werden beschrieben.

S u m m a r y

Lineations to be seen in pictures of the earth from space are distinctly in such cases where they are depressions of the earth's surface. Frequently they reflect the main structures of the relief. This may be explained as a result of their endogeneous origin. In the same manner it is to conclude during a geological interpretation of aerocosmic materials from the process of surface generation to the influence of processes in the earth's interior.

Possibilities of identifying and classifying lineations are described.

Р е з ю м е

Линеаменты на аэрокосмических снимках как правило отчетливо видны тогда, когда они проявляются в рельефе в виде геоморфологических депрессий. Они часто отражают основные структуры рельефа и это можно рассматривать как выражение их внутреннего формирования. Аналогично при геологической интерпретации аэрокосмического материала по топографическому очертанию можно судить о влиянии процессов внутри Земли.

Описываются возможности идентификации и классификации линеаментов.

---

1) Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut  
für Physik der Erde, Institutsteil Berlin, Bereich Geologie

## 1. Vorbemerkung

Fernerkundung der Erde für geologische Zwecke, ausgeführt vom Flugzeug, gibt es in Einzelaktivitäten seit ca. 45 Jahren, als international eingesetztes Verfahren zum Nutzen der regionalgeologischen Forschung seit ca. 30 Jahren. Die Erweiterung während der letzten zwei Jahrzehnte wurde unter anderem durch den Einsatz der Multispektraltechnik möglich und vor allem dadurch, daß Satelliten als Geräteträger eingesetzt werden konnten (REEVES 1975; Geol. iz. zemli iz Kosmosa 1978). Die zur Zeit international gebräuchlichen Interpretations- bzw. Bearbeitungstechniken sind, im großen gesehen, vor 10 Jahren eingeführt worden. An ihrer Weiterentwicklung wird in vielen Ländern gearbeitet. Auch die Messung der spektralen Eigenschaften silikatischer und anderer natürlicher Systeme ist vor 20 Jahren in großem Umfang erfolgt (ROMANOVA 1962, LYON & LEE 1970) -- was heute noch fehlt, sind konkrete, objektbezogene Informationen über die Spektralcharakteristiken von Böden und Gesteinen in lokalen Testgebieten.

Zukünftig wird die Fernerkundung viel stärker für die geologische Routinearbeit und für die Lösung von Spezialaufgaben herangezogen werden. Die Fernerkundungsanalyse sollte immer am Anfang einer beliebigen, geländebezogenen geologischen Aufgabe stehen und anschließend in dem Maß vertiefend weiter erfolgen, wie es die Aufgabe erfordert.

Die Skepsis gegenüber der Fernerkundung, die mitunter geäußert wird, hat ihre Wurzeln vermutlich nicht in gelegentlichen Übertreibungen bei der Interpretation, sondern darin, daß gegenwärtig bei der Fernerkundung Theorie und Praxis nicht ausgewogen vorangetrieben werden: es dominiert sehr stark die Praxis, die für sich allein zukünftig nicht ausreichen wird.

Vielleicht wird der Zeitraum von 1965 - 1980 (geo)wissenschaftsgeschichtlich einmal durch zwei Komplexe charakterisiert sein, denen gemeinsam ist, daß sie die globale Denkweise vieler Geowissenschaftler gefördert haben: die Globaltektonik (ganz unabhängig davon, was später einmal davon bleibt) und die systematisch angewendete Geofernerkundung; beide durch die Möglichkeit, objektive Kriterien der Erdkrustenentwicklung im regionalen und kontinentalen Maßstab zu erzielen. Beide sind nur durch die Einführung spezifischer Techniken geowissenschaftlich relevant geworden, beide haben neue Denkanstöße geliefert.

Einen ganz wesentlichen Impuls erhielt und erhält die Fernerkundung der Erde durch die Planetenforschung, die ebenfalls eine Fernerkundung ist. Die großen Fortschritte bezüglich der Kenntnisse über unser Sonnensystem gehen hauptsächlich auf die Fernerkundungs-Tätigkeit von Raumsonden zurück, bei welcher unter anderem die Oberfläche von Planeten und Monden kartiert worden sind (DUKE & SILVER 1979, KOZLOV u. a. 1979, SMITH u. a. 1979). Ausgehend von den sowjetischen und amerikanischen Erforschungen des Erdmondes (GUEST & GREELEY 1979) ist es dadurch heute bereits möglich geworden, mittels der Fernerkundung eine zeitlich datierbare, vergleichende Entwicklungsgeschichte (eine historische Geologie) von einigen Planeten und Monden aufzustellen. Die planetare Fernerkundung, welche diese Möglichkeit geschaffen hat, wird sich noch weiter entwickeln und letztlich auch der Fernerkundung der Erde zugute kommen.

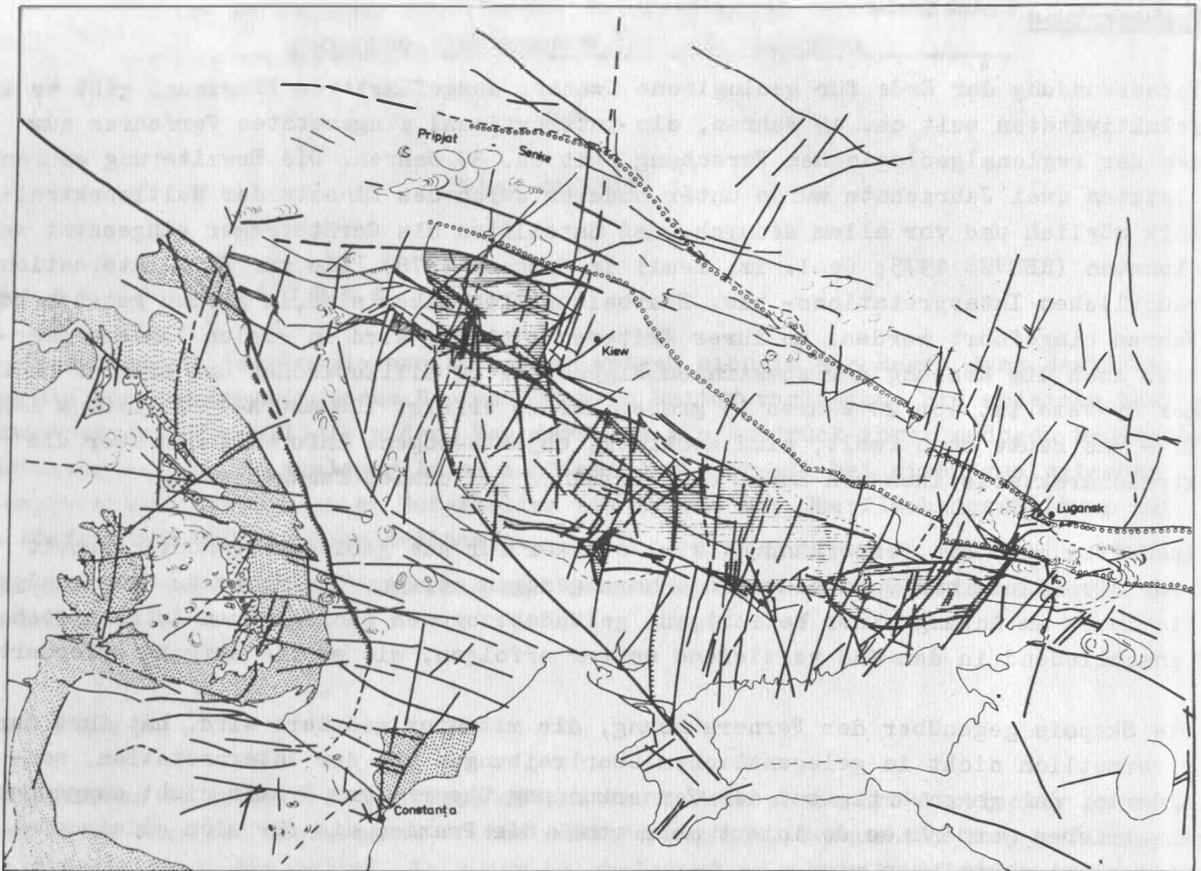


Abb. 1 Bruchtektonische Interpretation einer Aufnahme des sowjetischen Satelliten Meteor 28 von Südosteuropa aus 650 km Höhe. Ausschnitt: ca. 1 500 x 1 000 km.

Eng gepunktet wurden Flächen sich heraushebender Grauwerte dargestellt: Karpaten-Balkangebirge; nördlich des Bogens teilweise der gefaltete Karpatenflysch; südöstlich bei Constanta das Grundgebirge der Dobruška. Schräg schraffiert: Lineationszonen.

Die Interpretation wurde ergänzt durch die Kennzeichnung des Ukrainischen Massivs (horizontal schraffiert) und der Dnepr-Donetsenke (Punktreihen), deren Grenzen geologischen Karten entnommen wurden. Das Ukrainische Massiv ist in der vorliegenden Aufnahme in erster Linie an der größeren Lineationsdichte zu erkennen. Ferner wurden die aus Karten bekannten Einfallsrichtungen einiger Störungszonen, die mit Bildlineationen zusammenfallen, eingetragen.

Aufnahmen von der Erdoberfläche und von der Oberfläche einiger anderer Planeten und Monde machen das Analoge der Krustenzerteilung (bzw. der Oberflächenzerteilung verschiedener Materialien) deutlich; sie werden mit Hilfe der gleichen Methoden interpretiert. Davon sollen zwei Beispiele (Abb. 1 und Abb. 2) einen Eindruck vermitteln. Die Vergleichbarkeit beider Interpretationen ergibt sich allein schon aus der Tatsache, daß die interpretierten Oberflächen eine vergleichbare Größe haben: Abb. 1 ist die Interpretation einer Meteor-28-Aufnahme der Erde aus 650 km Höhe mit einem Bildausschnitt von ca. 1500 x 1000 km, Abb. 2 die Interpretation einer Aufnahme des Jupiter-Mondes Ganymed der Sonde Voyager 1 aus 246 000 km Höhe; sie umfaßt ein Gebiet von 1000 x 1000 km.

In zahlreichen Lehr- und Handbüchern ist die Methodik aero- und kosmogeologischer Interpretationen ausführlichst erläutert (s. Literaturverzeichnis); deshalb werden in dieser Arbeit nicht noch einmal Grundlagen der geologischen Interpretationsmethoden dargelegt, sondern nur einige Hinweise bzw. Konsequenzen behandelt, die sich aus der Identifizierung und Interpretation ruptueller Zerteilungen der Erde bei der Auswertung aerokosmischer Aufnahmen ergeben haben. Natürlich hat auch für ein so spezielles Problem, wie die ruptuelle Funktion der Erdkruste, die interdisziplinär wirkende Fernerkundung nur eine Ergänzungsfunktion.

Einige Jahre internationaler Erfolge und Erfahrung auf dem Gebiet der Fernerkundung der Erde aus dem Kosmos haben gezeigt, daß diese Methode am erfolgreichsten angewendet werden kann, wenn man sich ihrer Grenzen bewußt ist

- hinsichtlich der vom Aufnahmesystem abhängigen Bildauflösung,
- hinsichtlich der Interpretation,
- hinsichtlich der Realisierbarkeit von Korrelationen zwischen Fernerkundung und Beobachtung am Boden.

Die Informationsgewinnung im Rahmen der Fernerkundung ist am rationellsten, wenn die Interpretation mit einer Bodenerkundung gekoppelt ist. Trotzdem sind in gewissem Maß auch ohne diese Koppelung wichtige neue Erkenntnisse zu erhalten, z. B. bezüglich regionaler Informationen über das Auftreten und den inneren Zusammenhang von Störungssystemen.

Natürlich profitiert die Fernerkundung von Bodenbeobachtungen (durch den Interpreten selbst oder durch einen anderen fachorientierten Autor), doch kann sie die bodengebundene geologische Forschung nicht ersetzen. Der Nachteil der Fernerkundung, die "Kontaktarmut" mit dem geologischen Objekt, wird etwas gemildert durch die Möglichkeit, (im Extremfall) beliebig viele Aufnahmen zu interpretieren und dabei Tageszeit, Jahreszeit, Sonnenstand, Bodenfeuchtegehalt und Spektralwerte verschieden wählen und vergleichen zu können. Es ist längst keine Frage mehr, ob die Fernerkundung den Blick des Geologen erweitert hat oder nicht. Eigentlich ist bemerkenswert, daß die Blick-erweiternden Techniken der Fernerkundung, wie Multispektraltechnik, Radar, Spektrometermessungen, auch für thermisches Infrarot usw., zuerst aus dem Flugzeug bzw. Satelliten angewendet wurden und werden, wo ihr Nutzen auch für die bodengebundene Geologie doch ganz offensichtlich ist. Das geht soweit, daß bis heute noch keine Technologie des Einsatzes der Multispektralfotografie für den am Erdboden arbeitenden Geologen entwickelt worden ist.

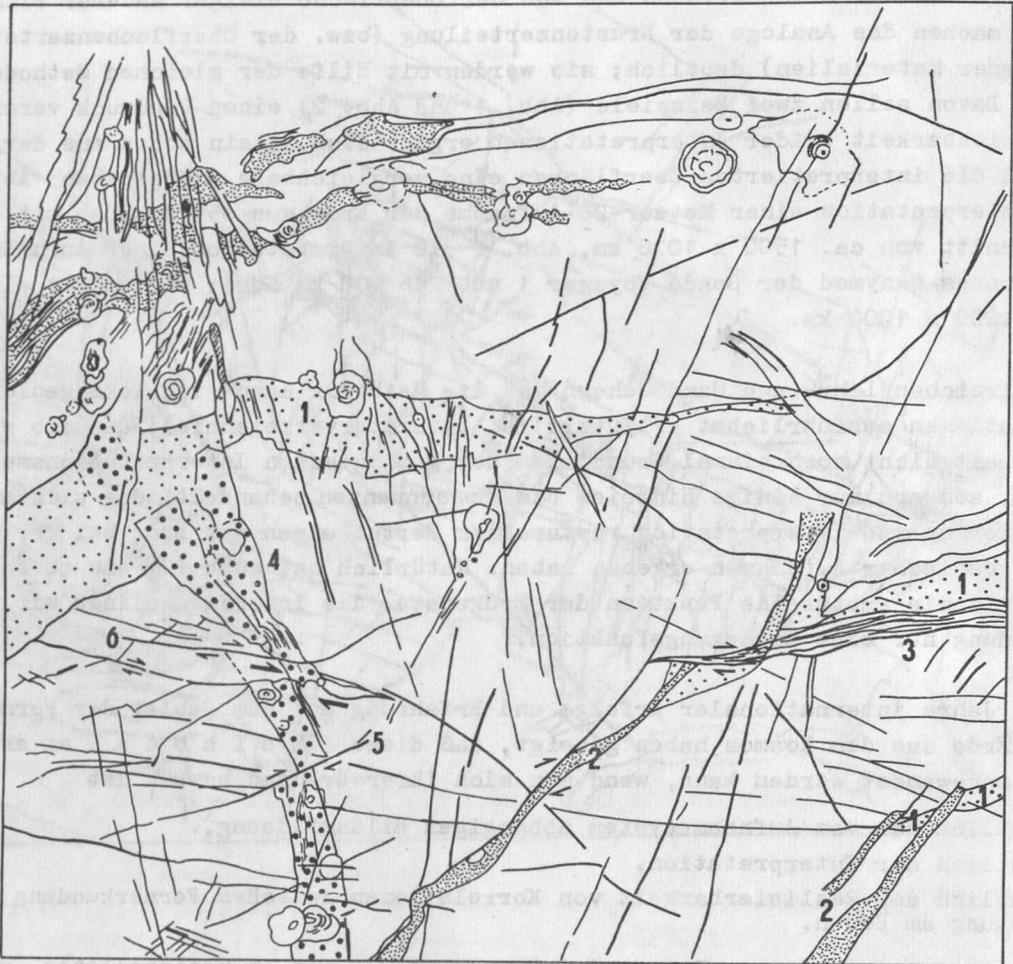


Abb. 2 Bruchtektonische Interpretation eines Teils der Oberfläche des Jupitermondes Ganymed.

Ausschnitt: 1 000 x 1 000 km.

Die verschiedenen Punktsignaturen kennzeichnen Zonen mit unterschiedlichen Grauwerten und Texturen. Ziffern: zeitliche Reihenfolge der Bruchaktivität.

Diese Interpretation wurde an einem Foto aus DUKE & SILVER (1979) vorgenommen. Es gibt eine Aufnahme des Mondes Ganymed durch die Sonde Voyager 1 aus 246 000 km Höhe wieder.

Die Umsetzung der Daten aus aerokosmischen Aufnahmen in die Geowissenschaften hängt wesentlich von der *V e g e t a t i o n* ab: die dicht besiedelten Gebiete der Erde mit der höheren seismischen Schadensgefährdung (Menschen, Material) liegen fast sämtlich in Zonen mit starker Vegetation und sind zwangsläufig schwieriger aus Fernerkundungsbildern zu interpretieren als *a r i d e* Gebiete. Gerade Aufnahmen arider Gebiete werden jedoch bisher fast ausschließlich in der Literatur abgebildet, weil von dort am ehesten optimale und schnelle Interpretationen möglich sind.

Der Unterschied zwischen Gebieten mit Biomasse bzw. ohne Biomasse hat für die Interpretation deshalb große Bedeutung, weil einmal die Remissionseigenschaften von Chlorophyll und Wasser und zum anderen die Remissionseigenschaften der Gesteine und Böden bestimmen, was auf den Bildern zu sehen ist (SIEGAL & GOETZ 1977).

In Gebieten der mittleren Breiten muß die Interpretation mit der Vegetation als größtem Störfaktor rechnen und mit diesem Problem fertig werden. Die Vegetation beeinflusst und verändert das Spektralverhalten der Erdoberfläche. Den wichtigsten Einfluß hat nach visuell-optischer Einschätzung von MKF-6-Aufnahmen die Albedo:

- schwach reflektierende Böden werden durch eine Vegetationsdecke (Grasnarbe!) stärker undeutlich als stark reflektierende,
- bei dichtem Laubwald ist bereits eine ca. 10 - 30 %ige Flächenbedeckung für eine Interpretation sehr erschwerend (Folgerung: Man benötigt Aufnahmen vom Spätherbst oder Vorfrühling),
- da ab ca. 700 nm die Remissionsintensität der Vegetation sehr stark ansteigt, sind bei Bedeckung die höheren Kanäle schlechter zu interpretieren als die niedrigen (Ausweg: Quotienten, in denen die Kanäle 1 - 4 enthalten sind; sonst zu geringer Kontrast).

Neben den erwähnten Nachteilen einer Interpretation bewachsener Gebiete kann andererseits die Vegetation durchaus geologiebezogene Information liefern: einmal ist die Vegetation ein Feuchtigkeitsanzeiger, was bei linearer Anordnung auch Strukturanzeige bedeuten kann (z. B. für Störungen), zum anderen kann sie den Verlauf von Schichten nachzeichnen durch ihre Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Bodens.

## 2. Informationsgewinnung

Das Grundprinzip jeder Fernerkundungs-Interpretation besteht zunächst in der Herausarbeitung von Basisinformationen (Gesteine, Böden, Pflanzendecke, Siedlungen, Land-Forstnutzung etc.) und der dann anschließenden Interpretation in fachspezifischer Weise. Die Dechiffrierung erfolgt also in zwei Stufen: Dabei ist das Hauptziel jeweils nur eine auf spezielle Fragestellungen orientierte Interpretation, die dann eine entsprechende Antwort zuläßt. Das heißt: bei einer auf Probleme der Seismologie und Störungsaktivität orientierten Arbeit ist die Aufgabe erst dann erfüllt, wenn die beobachteten Lineationen, die daraus aufgestellten Klassen und die räumlichen Beziehungen untereinander als Prozeß gesehen und gedeutet werden können. Die Gefahr einer Fehlinterpretation durch Über-Interpretation darf dabei nicht außer acht gelassen werden. Man muß bei der Bewertung aller Informationen immer bedenken, daß jede Bearbeitung, unabhängig vom Ziel der Arbeit, zweistufig sein muß:

1. erfolgt die Dokumentation der identifizierbaren Bildelemente und Elementgruppen (Faktenkarte) und daran schließt sich (bewußt oder unbewußt) an
2. die eigentliche geologische bzw. fachorientierte Interpretation, bei der die Fakten und die indirekten Informationen in einer bestimmten Richtung verknüpft werden, wobei das Ergebnis eine Erkenntnis ist, die man in der Regel dem Bild als Rohmaterial allein gar nicht angesehen hat.

Das Prinzip einer geologischen Interpretation von Fernerkundungsaufnahmen besteht darin, aus der S u m m e der zufallsverteilten Formen, Farben und Beziehungen, wie sie sich bei den Prozessen des exogenen Kreislaufs einstellen, diejenigen herauszufinden, welche durch bestimmte Merkmale und durch ihren Ordnungsgrad zu erkennen geben, daß sie der Ausdruck geologischer Prozesse sind, die ihre Ursachen in Erdkruste oder Erdmantel haben. Daß es sich dabei um ein lösbares Problem handelt, folgt daraus, daß die Erdoberfläche in 10 - 20 Millionen Jahren bis auf den Meeresspiegel erodiert wäre, würde nicht permanent ein Hebungsprozeß ablaufen, der einen endogenen Antrieb aufweist und die Schollen- und Detailstruktur der Erdkruste an der Erdoberfläche sichtbar werden läßt.

Jedes Bild der Erdoberfläche enthält lineare und flächige Strukturen des R e - l i e f s. Diese Strukturen sind die wesentliche Stütze der Bildinterpretation. Da aber auch die sich ä n d e r n d e n Z u s t ä n d e (Klima: früher und heute, Verfestigungsgrad: früher und heute usw.) eine Rolle spielen, kann man verstehen, warum für den letztlich in der Geologie sehr diffizilen Interpretationsablauf bisher noch keine überaus befriedigenden Interpretationsschlüssel entwickelt wurden und die bereits vorliegenden für gezielte geologische Fragen ohne großen Wert geblieben sind. Die Hauptinformation kommt aus dem Relief in Form von:

- magmatischen Körpern (z. B. Kirchberger Granit, Brockengranit);
- tektonischen Einheiten - z. B. Thüringer Wald als neotektonisches Element, Thüringer Senke;
- Sedimentations/Erosions-Formen - Moränenlandschaft Nord- und Mitteleuropa (s. z. B. LUNDEN 1977).

Gesteinskennzeichen sind entweder direkt abgebildet, wie Falten und Schichtneigung (über Resistenzunterschiede in der Verwitterung), oder als aufgeprägte Kennzeichen (Klüftung in Tafeldeckgebirgsgesteinen, Bruchzonen). Die häufigsten Lineationen erscheinen im Bild deutlich, wenn sie am Boden als Depression vorliegen (einschließlich des Drainagesystems). Eine kleinere Gruppe von Lineationen ist an Erhebungen gebunden, bei denen ein wichtiges Kriterium zur Unterscheidung zwischen tektonischem oder Reliefanteil darin besteht, daß man bei stereoskopischer Betrachtung den Reliefanteil erkennt (wobei man außerdem künstliche, durch die Aufnahmetechnik bedingte Lineationen eliminiert). Meist sind also Lineationen durch geomorphologische Formen abgebildet.

### 3. Geologische Interpretation

Die Erdoberfläche stellt ein komplexes Gebilde dar: jeder Bestandteil ist die Spur eines bestimmten Bildungsprozesses, wobei viele Prozesse sich überlagern. Man sollte also vor allem geomorphologische Prozesse und Prinzipien kennen, um die Oberflächenentwicklung zu verstehen. Daraus ergibt sich zwangsläufig die Möglichkeit, auch über Verborgenes Aussagen zu treffen.

Die Erkennung der geologischen Objekte ist möglich über die Unterschiede in Grauton, Textur, Gefüge, Verbandsverhältnisse, Konfiguration, Farbe, Spektralcharakteristik, Albedo-Eigenschaften (KAUTZLEBEN & BANKWITZ 1979).

Die geologische Problemlösung ist ein ganz anderer Prozeß. Man erkennt in der Regel nur die T e i l e einer Kausalkette, z. B. Terrassen. Daraus schließt man auf Flußläufe, auf Flußverlagerungen, daraus wiederum auf mögliche Änderungen im Entwässerungssystem seit der Glazialzeit, daraus auf überregionale Niveauänderungen. Dieses beliebige Beispiel soll nur andeuten, wie versucht wird, aus den Details des identifizierten Objekts eine Kausalkette aufzubauen - für Formen, Gesteine, Prozesse, die man aber in gewissem Umfang durch eine geologische Tätigkeit vorher generell kennen muß, sonst wird die Interpretation nicht optimal. Und es ist unvermeidlich, daß in Abhängigkeit vom Trainingszustand des interpretierenden Geologen, der eine oder andere Aspekt eines beliebigen Bildes hervorgehoben wird. Gegenwärtig dürfte kein Einzelbild eines Ausschnitts der Erde geologisch so erschöpfend interpretiert worden sein, wie es sowohl theoretisch als auch praktisch möglich wäre.

Die Basis der Wahrnehmung sind: Grauton(wechsel), Vegetation(wechsel), Gewässernetz, morphologische Elemente, technogene Formen (Verkehrsnetz, land- und forstwirtschaftliche Nutzung der Flächen usw.).

Zu Beginn einer Interpretation sollten die Genauigkeitsforderungen abgeschätzt werden, die natürlich in erster Linie vom Bildmaterial abhängen. Darüber hinaus ist zu bedenken:

- Die Genauigkeit der Interpretation ist für Linien und Flächen nicht adäquat; man kann zur Zeit nur Linien klassifizieren. Die anwendbaren Klassifikations-schemata für Flächen sind noch relativ wenig entwickelt, sie sind erst recht nicht über weite Strecken hinweg anzuwenden.
- Man muß einen sehr großen Einfluß der praktischen Erfahrungen bei der Interpretation in Rechnung stellen. Die Genauigkeitsforderung darf nicht an der einfachsten Bildanalyse orientiert sein.

Die geologische Interpretation des Reliefs z. B. ist deshalb möglich, weil - wie oben erläutert - jedes morphologische Kennzeichen durch einen Prozeß der Umgestaltung der Oberfläche entstanden ist - sei es durch Erosion, durch einen endogenen Vorgang usw. Man versteht diese Oberflächenkennzeichen nur, wenn man berücksichtigt, daß hier mehrere Prozesse stattgefunden haben oder stattfinden und daß die Interpretation versuchen muß, den Prozeßcharakter darzustellen, wenn man die Fernerkundung als naturwissenschaftliche Disziplin versteht. Das führt aber dazu, daß ein bestimmtes Kennzeichen verschiedenen Interpretationszielen dienen kann und muß.

In die Bildung eines geomorphologischen Merkmals gehen ein:

- der endogene Prozeß, der sich als Hebung und Senkung äußert durch vielfältige Ursachen,
- der Erosionsprozeß einschließlich der Verwitterung,
- Vorgänge der Sedimentation,
- physikalische Eigenschaften der Gesteine: locker, fest, Silikatgesteine, Karbonatgesteine usw.
- klimatische Faktoren.

Die geologische Fernerkundung wird durchgeführt, um Informationen zu erhalten über die Entwicklung einer Landschaft, zur Identifizierung von Störungen und anderen Lagerungsanomalien, zur Unterscheidung von Gesteinstypen, für die Erfassung der hydrologischen Situation und besonders als vorbereitenden Teilbeitrag zur Ressourcenforschung. Der Einsatz der Fernerkundung in der Lagerstättensuche und -erkundung ergab sich aus objektiven Gründen: Erschöpfung vieler Lagerstätten, permanent steigender Absolutbedarf an mineralischen Rohstoffen, Zwang der Orientierung auf nationale Bodenschätze unter anderem wegen der internationalen Preisentwicklung, erhebliche Verbesserungen der Erkundungstechnologien mit aerokosmischen Mitteln. Zur Zeit liegt allerdings der Schwerpunkt bei der Verbesserung der regionalgeologischen Analyse. Der Einsatz der Fernerkundung bei der Lagerstättensuche ergibt sich aus den oben genannten Möglichkeiten: Interpretation von Morphologie, Tektonik, Sedimentstruktur und Pflanzenbedeckung - als der Basis; daran sollte sich eine spezifische Interpretation unter Verwendung zusätzlicher Aufnahmetechniken (Infrarot, Radar) anschließen.

In der Regel beginnt die Auswertung der Interpretation mit der Aufstellung einer Legende (am besten hierarchisch gegliedert). Danach legt man die Methodologie fest. Oft muß, selbst innerhalb eines einzigen Wissenschaftsgebietes wie der Geologie, die Interpretation verschiedenen Nutzern dienen. Das macht die Durchführung spezifischer Interpretationen (Gangmineralisationen, Bruchzonen, seismische Gefährdung, Rutschungsprozesse) notwendig. Wegen der wechselseitigen Verflechtung ist es zweckmäßig, wenn in solchen Fällen die speziellen Legenden miteinander korreliert sind.

Eine Legende sollte berücksichtigen:

- die spezifischen Kriterien der abgebildeten Landoberfläche (es ist nicht nach einer "globalen" Legende zu streben);
- die Forderungen des Auftrages (Auftraggebers); es sollte zumindest die Problemorientierung deutlich werden;
- Teilkategorien sollten zusammenfaßbar sein: z. B. morphologische Lineationen ausgedrückt als Grautonlineationen;
- es muß unterschieden (und im Erläuterungstext angeführt) werden zwischen der Auflösung des Primärmaterials und der Dimension der kleinsten, in der Interpretationsskizze wirklich dargestellten Kennzeichen;
- den Sicherheitsgrad der Identifizierung der Kennzeichen (sicher, wahrscheinlich, weniger sicher); es ist ferner nützlich, wenn angegeben wird, welche Kennzeichen stärker eine Informationsergänzung nötig haben.

#### 4. Lineationen

Der Begriff Lineation wird in der Fernerkundungsliteratur in der Regel rein beschreibend benutzt - nicht genetisch. Es gibt viele Publikationen über diesen Begriff und seine Anwendung; internationale Richtlinien (Empfehlungen) dazu liegen nicht vor. Der Autor muß einräumen, daß die selbst oft benutzte Formulierung "Fotolineation" insofern nicht ganz zutreffend ist, als gegenwärtig Fotos gar nicht mehr unter den Interpretationsmaterialien dominieren. Es sollte jedoch ohne lange Diskussion zur Definition des Phänomens einfach nur eine unmißverständliche Bezeichnung verwendet werden (eine rein fernerkundliche Arbeit kann sich mit dem Wort "Lineation" durchaus begnügen, ohne ergänzende Erklärung). Zukünftig wird sich ein differenzierteres Fachvokabular ergeben.

Geologisch-tektonische Kennzeichen werden im Satellitenbild vornehmlich als Lineationen abgebildet, obwohl sie vorwiegend Flächen, streng genommen: Körper, sind. Man kann dadurch eine Interpretation entweder lineationsbezogen oder flächenbezogen durchführen, wobei es für das zweite Verfahren objektiv Schwierigkeiten gibt.

Das Alter der Lineationen ist nicht direkt abzulesen, dazu bedarf es zusätzlicher Informationen. Man sieht sehr häufig, daß Lineationen etwas mit Reliefkanten zu tun haben und darf folgern, daß die Reliefbildung der Erde ihrem Wesen nach etwas mit den Lineationen der Satellitenbilder zu tun hat. Stets sind die Lineationen in Grundgebirgsausstrichen häufiger als in solchen des Deckgebirges. In vielen Fällen lassen sich Lineationen mit Bruchstrukturen korrelieren, am häufigsten mit Klüftungszonen, regional durchhaltende Lineationen mit Bruchstörungen. In der Literatur wird oft erwähnt, daß sich Deckengrenzen, die den Ausstrich flacher Überschiebungen anzeigen, nicht erkennen lassen - vielleicht ein Hinweis darauf, daß die Lineationen meistens auf steilstehende Flächen zurückgehen. In ariden Gebieten sind die Flußläufe zu mehr als 60 % an tektonische Linien geknüpft (Klüfte, Störungen).

So wie es keine global optimale Interpretationstechnik gibt, so gibt es auch keine ideale aerokosmische Aufnahme für Lineationsinterpretationen: neben der Aufnahmetechnik spielt der Vergrößerungsmaßstab eine große Rolle, die Unterschiede im Kontrast, vor allem die Geländebeschaffenheit (arid-nichtarid, Dichte der Vegetation, Bedeckung durch Lockersedimente). Ferner darf man bei optisch-visuellen Interpretationen (leider) die Tatsache nicht vergessen, daß jeder Interpretator sich einerseits z. B. durch Wissenszuwachs und Training, andererseits z. B. durch Ermüdungserscheinungen permanent positiv und negativ während der Interpretation ändert (dieser nicht-Geologie-spezifische Faktor kann gar nicht überschätzt werden).

Übereinstimmung zwischen der Interpretation von Aufnahmen verschiedenen Maßstabs besteht fast immer hinsichtlich der Richtung von Lineationen, geringer ist die Koinzidenz hinsichtlich der Lage.

Die Bedeutung der Aufnahmehöhe: In einer Reihe von Publikationen wird aufgezeigt, daß Aufnahmen aus unterschiedlicher Höhe der Aufnahmeplattform ganz verschiedene Lineationen und Bruchsysteme zeigen. Dafür gibt es mehrere objektive Gründe. Einmal ist eine Identität sowieso nur bei gleichem Sonnenstand zu erwarten, aber diesem Effekt kommt sekundäre Bedeutung zu. Aus der Auflösengenauigkeit der Aufnahme-Systeme und der Bilder ist bekannt, daß bestimmte Linienbreiten u. a. in Abhängigkeit von einer entsprechenden Flughöhe nicht mehr abgebildet werden können und daß andererseits kilometerbreite Lineationen auf Aufnahmen aus niedrigerer Höhe nicht mehr identifiziert werden können. In Maßstäben ausgedrückt bedeutet das: regionale Lineationen sind auf Datenträgern im Maßstab 1 : 1 Million und kleiner besser zu erkennen als auf solchen im Maßstab 1 : 500 000 und in Aufnahmen mit noch kleineren Gebietsausschnitten.

#### 4.1. Methoden zur Objektivierung von Lineationsinterpretationen

Die Analyse der Lineationen erfolgt entweder durch die getrennte Darstellung vorgegebener Streichrichtungen (Streichen-Häufigkeitsanalyse), durch Klüftdichtepläne,

unterschieden entsprechend dem Verfahren von HORTON 1935 in Kluftdichte (kumulative Lineationslängen durch Flächeneinheit) oder Klüftigkeitsindex (Anzahl durch Flächeneinheit). Es werden in der Literatur viele weitere Interpretationshilfen beschrieben, die aus der Tektonik und der Bildanalyse kommen. Angestrebte Aussagen betreffen z. B. die Beziehung von Dichte zu Mineralisationsanzeichen, die Lineationsdichte zur Dichte von Epizentren usw.

#### 1) Richtungsstatistik

Sie erfolgt analog den Methoden wie sie in den Geowissenschaften seit 80 Jahren üblich sind. Die Darstellung geschieht meist in Richtungsrosen. Die Messung geschieht entweder manuell oder - und das ist sicher perspektiv - mit technischen Hilfsmitteln (Laser) bzw. rechnergestützt als Fourieranalyse.

Die Methode ist ohne geologischen Hintergrund etwas neutralistisch, denn sie homogenisiert. Es ist deshalb nötig, das Lineationsbild geologischerseits zusätzlich einzuschätzen, denn Richtungsabweichungen oder -besonderheiten haben geologische Gründe und diese dürfen nicht weggemittelt werden. Eine Richtungsanalyse müßte immer durch eine geologische Klassifikation ergänzt werden.

#### 2) Häufigkeit

Häufigkeit bedeutet: Zahl der Lineationen pro Einheitsfläche. Sie hängt vom Bildmaßstab ab. Man kann die Häufigkeit auf verschiedene Weise erfassen:

- man markiert die Mittelpunkte von Lineationen in Einheitsflächen und zählt diese aus oder
- man zählt die Zahl der Schnittpunkte von Lineationen: dieses Verfahren gilt für Lagerstättenprognosen als günstig.

Aus der Form der Felder stärkster Häufigkeit (gelängt oder nicht), der Verteilung (gleichmäßig oder nicht) und Häufigkeit von Maxima selbst kann man ermitteln, in welcher Weise die Verteilung isotrop oder anisotrop ist, welche Stellen des untersuchten Gebietes durch Lineationshäufungen generell gekennzeichnet sind, welche andererseits frei davon sind; das hat nicht nur Bedeutung für die Strukturgeologie, sondern für Fragen der angewandten Geologie.

#### 3) Dichte

Als Dichte wird der folgende Quotient bezeichnet: Länge aller Lineationen pro gewählter Einheitsfläche. Damit kann man u. a. die durchschnittliche Dichtverteilung von Lineationen in verschiedenen Gebieten erfassen.

An eine solche Auswertung läßt sich dann eine qualitative Spannungsanalyse anschließen, wenn eine entsprechende Fragestellung interessiert und die Bilder verschiedene neotektonische Entwicklungsstadien des Krustenteils zu erkennen geben (4.2.).

#### 4) Bildbearbeitung

Das Niveau der digitalen Bildbearbeitung reicht für die geologische Interpretation zur Zeit noch nicht aus, weil jede Landoberfläche die Geschichte von oft Hunderten von Millionen Jahren repräsentiert und die Algorithmen entweder über diese Grundlage der Geologie hinwegsehen (und dadurch nur von theoretischem Interesse sind) oder weil sie weder die Komplexität der Daten noch die Komplexität der gewünschten Informationen berücksichtigen können. Die nötige und international angestrebte Verbesserung der digitalen Bildbearbeitung hängt davon ab, wie gut man die Änderungen auf der Erdoberfläche klassifizieren kann, andere Informationen der Geowissenschaften mit einbezieht, vor allem den für die Nutzung verfügbaren Spektralbereich erweitert und wie weit Bodenmessungen als Vergleichsdaten zur Verfügung stehen.

- Die Korrelation mit Bodenuntersuchungen ist oft wichtiger als die Übereinstimmung der Beobachtungen von Bildinterpretatoren bzw. als die Tatsache, daß zwei Interpretatoren eventuell nicht das gleiche gesehen haben.
- Die Gliederungsversuche für Satelliten- und Flugzeugbild-Interpretationen sollten inhaltlich aufeinander abgestimmt sein, damit die "Genauigkeit" der Interpretation überhaupt getestet werden kann.

#### 5) Klassifizierungen

Man klassifiziert Lineationen - seit mindestens zwei Jahrzehnten - nicht nach einem einzigen Schema, sondern nach dem jeweils regional vernünftigen in die Klassen: Länge, Grautonkontrast, Detail-(Intern)struktur, Geradlinigkeitsgrad, struktureller Typ (fiedrig usw.), ferner nach ihrer Auswirkung auf das Relief. Metrisch haben CARTER & ROWAN (1978) folgende Dimensionen unterschieden:

submikroskopisch	( $\text{\AA}$ - nm)
mikroskopisch	(nm - 1 cm)
mesoskopisch	(1 cm - 10 m)
makroskopisch	(10 m - 10 km)
megaskopisch	(10 km - 1000 km)
gigaskopisch	(über 1000 km)

Die drei letzten Klassen sind in der Fernerkundungsarbeit von Bedeutung, d. h. die Einteilung ist "vernünftig", praktisch jedoch weniger nützlich. Auch andere Vorschläge haben Nachteile.

D i g i t a l e (maschinengestützte) Klassifizierungsverfahren sind vor allem bei flächigen Interpretationen anzustreben. Nach den bisherigen Erfahrungen muß man einschätzen, daß sich Bilder mit geringer Auflösung weniger gut zur Klassifizierung eignen und daß bei guten Aufnahmen vorher mit dem Auge klassifiziert werden muß, damit nicht Bagatell-Klassen das maschinell gewonnene Ergebnis verschlechtern. Das einfachste Merkmal der Lineationen ist die Richtung, das schwierigste die Internstruktur. Diese Internstrukturen lassen sich fast nur unter Zuhilfenahme von maschinengestützten Interpretationen identifizieren (Beispiel 2.3). Die Erfolge der optisch-visuellen Interpretation rechtfertigen zur Zeit noch, daß man eine konkrete geologische Aufgabe nur unter Zuhilfenahme der Verfahren der Bildverbesserung und anschließender einfacher Bildbearbeitung (Spreizung, Quotienten) durchführt.

#### 4.2. Fotolineationen als Ausdruck tektonischer Flächen

Aus der Interpretation von Satellitenaufnahmen der Erde weiß man, daß an der Erdoberfläche viele Lineationen zu beobachten sind, von deren Existenz man erst durch die Fernerkundung Kenntnis erhalten hat, d. h. die man bisher mit keinem anderen Verfahren aus Naturwissenschaft und Technik erkannt hat - das allein schon ist eine Art Rechtfertigung für den Einsatz der Fernerkundung in der Geologie.

Etwa 80 - 90 % der Lineationen, die man auf einem guten Satellitenbild (MKF 6) erkennt, sind - bezogen auf die geologische Kenntnis - n e u . Man kann diese Lineationen in vielen Fällen mit bekannten Bruchstörungen der Erdkruste identifizieren (s. zum Beispiel TOLLMANN 1977), viele Lineationen auf den Bildern sind jedoch bisher nicht durch Bodenbegehungen verifiziert worden. Ein wesentlicher Grund sind oft Breite und Ausdehnung der Lineationen (mehrere hundert Meter bis Kilometer breit!) sowie die Tatsache, daß geologische Störungen in der Regel Gesteinsversatz dokumentieren, während Zerrüttungszonen und andere Dislokationen, an denen kein signifikanter Gesteinsversatz

auftritt, meist nicht in die Kartierung einbezogen wurden, sich in einer aerokosmischen Aufnahme jedoch widerspiegeln.

Es ist ein seit langem diskutiertes Problem, daß man Lineationen auch in Lockersedimenten erkennt, ohne sie dort bei Bodenbegehungen identifizieren zu können. Eine mehrfach geäußerte Auffassung dazu ist die, daß Sande und Tone (sie brechen bei Kompression durch die Scherspannung) die Feuchtigkeit dort durchlassen, wo im Untergrund Auflockerungszonen existieren. Diese durch Wasser kontrollierten Lineationen können sich zu Brüchen entwickeln. Wenn solche Lineationen über 1 km breit sind, dann ist die Erkennbarkeit am Boden generell kaum möglich.

Die Lineationen entstehen vermutlich durch die Auflockerung des Gesteinsverbandes entlang bzw. über tektonischen Bewegungszonen. Diese Auflockerung kann sich offenbar nach oben durch sonst nicht deformierte Schichten durchpausen. Eine Besonderheit der Entdeckung der Fotolineation ist die Tatsache, daß sie auch in horizontal liegenden Tafelsedimenten und grundsätzlich auch in undeformierten Gebieten zu erkennen sind. Sie müssen sich also dort in jüngster geologischer Vergangenheit bzw. rezent aus dem Fundament nach oben an die Erdoberfläche durchgepaust haben. Allerdings haben sich nicht über allen Störungen des Fundaments in den jüngeren Sedimenten Zerrüttungszonen eingestellt.

Bruchstörungen-Fotolineationen äußern sich auf Satellitenbildern im wesentlichen als

- Grautonwechsel, besonders der Bodenfarbe,
- Änderungen im Gewässernetz,
- lineare Begrenzungen oder lineares Auftreten von Vegetation; Grund: Wasseraustritt an StauhORIZONTEN;
- lithologische Grenzen von Gesteinen, besonders wenn Gesteine unterschiedlicher Zusammensetzung aneinander grenzen, z. B. Sandsteine gegen Kalke; in diesem Falle ist bei Multispektralaufnahmen die Abgrenzung sehr einfach;
- Täler: besonders geradlinige Talstücke, in sonst sehr gekrümmten Flußläufen; Beispiele in Europa sieht man z. B. in den Alpen, in den Mittelgebirgen usw.

Generell verwendet man also zum Identifizieren von Lineationen mit Störungscharakter topographische Kennzeichen, solche der Vegetation und den Grauton. Konvergenzen entstehen u. a. durch Steilstufen in Schichtstufenlandschaften, durch das Schichtstreichen in gefalteten Gebieten usw.

Ein und dieselbe Aufnahme kann unterschiedlich interpretiert werden, je nachdem ob z. B. die Hauptstreichrichtungen für eine großregionale Analyse ermittelt werden sollen, oder für eine lokale Analyse die Teilstücke einer Lineation (Bruchzone) genau zu lokalisieren sind oder ob eine Interpretation vor allem an Grauton-Grenzen orientiert wird. Es ist für die richtige Einschätzung von Lineationen wichtig zu wissen, daß die Grauton-Grenzen im Sinne von Gradienten von allen interpretierenden Geologen gesehen werden, daß aber die Stellen, die dann als Lineationen gezeichnet werden, sich unterscheiden, weil es individuelle Unterschiede in der Ansprache der stärksten Grautonänderung gibt.

Die Interpretation von Lineationen muß natürlich von den Kenntnissen der Tektonik und Geomorphologie ausgehen; tektonische Lineationen sind in der Regel diskontinuierlich aufgebaut, das Auge neigt jedoch dazu, kurze Strecken zu längeren zu vereinigen und verursacht so Pseudolineamente. Man sollte vor dem Beginn von Interpretationsarbeiten bereits eine genauere Vorstellung von der Erdkrustenzerteilung haben, sonst begeht man eventuell den Fehler, einfach dann, wenn man wenige Lineationen entdeckt hat, weitere Lineationen "zu suchen", um unbewußt eine homogene Verteilung zu erreichen, die aber in der Natur nicht vorhanden ist. Über den Einfluß der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung, der Topographie, der Mächtigkeit und Art der Bodenbildungen und Vegetation auf die Lineationsanalyse ist von vielen Autoren geschrieben worden. Nach kurzer Einarbeitungszeit findet man dafür viele Hinweise in den zu interpretierenden aerokosmischen Bildern.

Als besondere Schwierigkeit bei der Identifizierung von Lineationen tektonischer Art ist zu nennen: in Gebieten mit geschlossener Pflanzendecke ist die Arbeit dann erschwert, wenn die Vegetation eine landwirtschaftliche Kultur ist, weil dann durch die Felder- und Berieselungs-Technik usw. eine Anisotropie der Grautöne und Farben entsteht, die die natürlich bedingten Grautöne des Untergrundes überlagert und nur durch bestimmte vom Rechner abhängige Bearbeitungstechniken wieder aufgehoben werden können. Das gilt zumindest für Mitteleuropa. Dagegen ist in von Urwald bedeckten Gebieten die Identifizierungsschwierigkeit für tektonische Lineationen in Satellitenfotos geringer.

Andere Faktoren, welche die Erfassung der geologischen Lineationen erschweren, sind: Wirkungen der Erosion, in ariden Gebieten der Wind, Fazieswechsel in Sedimenten, Grenzen verschiedener Böden in flachen, unreliefierten Gebieten. Es gibt noch zahlreiche weitere Möglichkeiten für Pseudolineationen.

Für den Nachweis rezent aktiver Störungen (bzw. neotektonisch aktiver) aus Fernerkundungs-Bildern sind zusätzliche Informationen seitens der Geologie/Geophysik natürlich nötig. Eine solche Aussage ist aber - auch im Hinblick auf eine vorsichtige Einschätzung der Bebengefährdung - durchaus möglich, wenn das Bildmaterial gut genug ist. Folgende Arbeitsetappen bieten sich an:

- man informiert sich anhand vorhandener Karten bzw. Literatur über die geologisch kartierten Bruchsysteme;
- Eintragung der aus geologischen Karten und aus Fernerkundungs-Bildern erkennbaren Graben- und Horststrukturen oder Steilkanten in die Interpretations-skizze;
- danach Zusammenstellung der Daten über rezente Spannungsmessungen (meist von Ingenieur-Bauten und Gruben) und Spannungsachsen-Diagnose aus Herdflächenlösungen sowie Ergebnisse der Untersuchung rezenter Krustenbewegungen;
- es empfiehlt sich, das Lineationsgefüge aus den Satellitenfotos so genau wie möglich zu dokumentieren - gewissermaßen übergenu. Das bedeutet in der Praxis: mehrere Tage ein Bild immer und immer wieder neu zeichnen;
- anschließend Beurteilung des Verlaufs der Täler und des Entwässerungssystems generell: in einem ungestört ablaufenden Entwässerungsprozeß weisen die Mündungen talabwärts in Richtung der Fließrichtung im Haupttal. Ist diese Regel durchbrochen, und ist diese Abweichung zu beiden Seiten eines Tals mehrfach zu beobachten, dann müssen sich während der Erosion die beiden Seiten eines Tals gegeneinander verschoben haben; vereinfacht sieht das so aus:

) ) ) ) ) ) ) obere Hälfte nach rechts bewegt  
 ( ( ( ( ( ( ( ( untere Hälfte nach links bewegt

Hier ist die dominierende tektonische Bewegung eine Blattverschiebung. Derartige Beispiele sind auf Fotos mittelasiatischer Gebirge und der Alpen zu identifizieren.

- Auch alle anderen Formen der Morphologie, die sich gegen die Erosion und Gravitation zu behaupten scheinen, sprechen für Horizontalverschiebungen, die rezent oder neotektonisch aktiv sind;
- das gilt auch für Gesteinsversatz in Lockersedimenten; in den Interpretations-skizzen sollte die Verschiebungsrichtung vermerkt werden,
- ferner sind die Orte mit historischer Seismizität einzutragen.

Die nächsten Schritte sind:

- Vergleich der Zonen höherer seismischer Aktivität mit Verlauf, Richtung und Häufigkeit der Hauptlineationen usw.;
- Einschätzung des aus geologischen (neotektonischen) und Fernerkundungs-Informationen abzuleitenden rezenten Spannungsfeldes im untersuchten Gebiet und anschließend Vergleich mit den Informationen der Seismologie. Auf keinen Fall darf Koinzidenz der Darstellungen erzwungen werden - das scheint gerade bei seismologischen Fragen wichtig.

Eine Unterscheidung der Störungstypen nach Kriech- und Bruchstörungen ist allein auf der Grundlage von Fernerkundungsbildern aus verschiedenen Gründen nicht möglich: 1) gehören beide als Bewegung sowieso zusammen, 2) integriert das Fernerkundungsbild, es verwischen die Unterschiede zwischen beiden und 3) kann man zwar feststellen, daß relativ glatt verlaufende Störungen mit homogener Gesteinszerteilung Scherstörungen sein können und stark verästelte Lineationen Weiteungsbrüche sind, aber das reicht bei der Bildinterpretation nicht aus zu der oben genannten Unterscheidung.

Anwendungsbeispiele für Interpretationen von Fotolineationen sind neben den Aussagen zu rezenten Krustenaktivitäten vor allem Aussagen zu Fragen der Felsmechanik, zur Hydrologie, zur Hangstabilität (Veröffentlichungen über Süditalien), zum Auftreten von Störungs- und Kluftlineationen und von Rutschungen.

#### Literatur

- CARTER, W.D.; ROWAN, L.C.: A world wide approach to remote sensing and mineral exploration  
 Proc. 12. Intern. Sympos. Remote Sensing, Ann Arbor 1 (1978), S. 387-394
- DUKE, M.B.; SILVER, L.T.: Planetary science from Apollo to Io and beyond  
 Episodes, Ottawa Jg. 1979 (1979) 2, S. 3-8
- Geologičeskoe izučenie zemli iz kosmosa  
 Trudy geol. inst. AN SSSR, Moskva 317 (1978), 227 S.
- GONIN, G.B.; STREL'NIKOV, S.J. (Hrsg.): Kosmičeskaja fotos'emka geologičeskie issledovanija  
 Leningrad: Nedra 1976, 227 S.
- GUEST, J.E.; GREELEY, R.: Geologie auf dem Mond  
 Stuttgart: Enke, 1979, 253 S.
- KAUTZLEBEN, H.; BANKWITZ, P.: Zu einigen Fragen der Interpretation aerokosmischer Aufnahmen  
 Z. geol. Wiss., Berlin 7 (1979) 1, 55-74

- KOMAROV, V.B. (Hrsg.) Primenenie novych vidov aeros emok pri geologičeskich issledovanijach  
Leningrad: VSEGEJ, 1976, 160 S.
- KRONBERG, P.: Photogeologie  
Clausth. Tekton. Hefte, Clausthal-Zellerfeld 6 (1967), 235 S.
- KOZLOV, V.V.; SULIDI-KONDRAT'EV, E.D.; KAC, Ja.G.: Tectoničeskie uslovija formirovanija sistem raslomov Marsa  
Izv. vys. učeb. zaved., geol. razvedka, Moskva Jg. 1979 (1979) 11, S. 3-12
- LYON, R.J.P.; LEE, K.: Remote sensing in exploration for mineral deposits  
Econ. Geol., Lancaster 65 (1970) 7, S. 785-800
- LUNDÉN, B.: Jordartskartering med flygbildsteknik  
Sver. Geol. Unders., Stockholm C 738 (1977), 100 S.
- MILLER, V.C.: Photogeology  
New York: McGraw Hill, 1961, 248 S.
- PETRUSEVIČ, M.N.: Vozdušnaja i nazemnaja stereofotos'emka pri geologičeskich issledovanijach  
Moskva: Izd. Moskov, univ., 1976, 263 S.
- REEVES, R.G. (Hrsg.): Manual of Remote Sensing  
Falls Church: Amer. Soc. Photogramm., 1975, 2144 S.
- ROMANOVA, M.A.: Opredelenie tipogo sostava peščanyh otloženj s vozducha po ich spektral'noj jarkosti  
Leningrad: Gostoptechizdat, 1962, 158 S.
- SABINS, F.F.: Remote Sensing  
San Francisco: Freeman, 1978, 426 S.
- SIEGAL, B.S.; GOETZ, A.F.H.: Effect of vegetation on rock and soil discrimination  
Photogramm. Eng., Menasha 43 (1977) 2, S. 191-196
- SMITH, B.A. u. a.: The Jupiter system through the eyes of Voyager 1  
Science, New York 204 (1979) 4396, S. 951-971
- TOLLMANN, A.: Die Bruchtektonik Österreichs im Satellitenbild  
N. Jb. Geol. Paläont. Abh., Stuttgart 153 (1977) 1, S. 1-27
- VERSTAPPEN, H.Th.: Remote Sensing Geomorphology  
Amsterdam: Elsevier, 1977, 214 S.

Anwendung der digitalen Bildfilterung zur Aufbereitung aerokosmischer  
Aufnahmen für die visuelle geologische Interpretation

---

von

RAINER SÖLLNER <sup>1)</sup>

Z u s a m m e n f a s s u n g

Durch die Anwendung von digitalen Bildverarbeitungstechniken ist es möglich, die visuelle Interpretation aerokosmischer Aufnahmen durch einen Fotointerpreten zu erleichtern und zu objektivieren. Eine wesentliche Aufgabe der Bildverarbeitung besteht oftmals darin, die für spezielle Interpretationsaufgaben überflüssigen Informationen aus dem Bild herauszufiltern. Z. B. ist die digitale Hochpaßfilterung bereits ein einfacher effektiver Algorithmus, um das feinstrukturierte Netz der Fotolineationen vom anderen Bildinhalt zu trennen, was insbesondere für strukturgeologische Interpretationsaufgaben von Bedeutung ist. Durch vergleichende Interpretation des hochpaßgefilterten Bildes und des Originalbildes ist in diesem Zusammenhang eine rationelle und objektive Verarbeitung des Bildinhaltes durch den menschlichen Fotointerpreten möglich.

S u m m a r y

By use of technics of digital image processing it is possible to facilitate and to objectivize visual interpretation of aerocosmic images by a photointerpreter. An essential problem of working up images in this way consists in filtering out of the image information unnecessary for special problems of interpretation. Digital high pass filtering e. g. already is a simple efficient algorithm to separate the fine-structural net of photo-lineations from the other image contents which is particularly important for structural-geological problems of interpretation. By comparing interpretation of the high pass filtered image with the original image in this connection an efficient and objective working up of the image contents by the human photo interpreter is possible.

Р е з ю м е

Применением методов цифровой обработки снимков можно существенно облегчить визуальную интерпретацию аэрокосмических снимков, а также повысить объективность полученных результатов. Важной задачей при обработке снимков является выделение ненужной информации. Фильтрация верхних частот, например, является простым эффективным алгоритмом для выделения мелкоструктурной сети фотолинементов из остального массива содержания снимка. Такой приём весьма существенный для задач интерпретаций по структурной геологии. Методом сравнения при интерпретации отфильтрованного снимка с оригиналом интерпретатор может осуществить рациональную и объективную обработку снимка.

## 1. Einleitung

Aerokosmische Aufnahmen enthalten eine Vielzahl von Informationen über den im Bild abgebildeten Teil der Erdoberfläche und stellen somit einen Informationsspeicher mit sehr hohem Integrationsgrad dar. Aus ein und derselben Aufnahme können sowohl Landwirtschaftler, Forstwirtschaftler, Bodenkundler und Geographen als auch Hydrologen und Geologen die für ihre Aufgabenstellungen interessanten Informationen entnehmen.

Ein Informationsspeicher mit derartig hohem Integrationsgrad erfordert aber zur Abfrage einer speziellen Information ein sehr kompliziertes System der Entscheidungsfindung. Das effektivste der bisher bekannten Systeme ist der Komplex Auge - Gehirn eines auf bestimmte Fragen trainierten Bildinterpreten. Es ist deshalb eine wesentliche Aufgabe der Bildverarbeitung, aerokosmische Aufnahmen so aufzubereiten, daß ein menschlicher Interpret die für eine spezielle Interpretationsaufgabe notwendige Information möglichst einfach und rationell aus dem Bild entnehmen kann. Informationstheoretisch bedeutet das, das Bild so aufzubereiten, daß es dem Menschen als Informationsempfänger optimal angepaßt ist. Eine solche Anpassung besteht z. B. darin, daß für spezielle Interpretationsaufgaben überflüssige Bildinformationen unterdrückt und wesentliche Informationen herausgehoben werden. In diesem Zusammenhang spricht man auch von Beseitigung **redundanter** Information. Der menschliche Fotointerpret kann sich somit besser auf das Wesentliche konzentrieren und den Bildinhalt leichter erfassen. Damit trägt die digitale Bildverarbeitung letztlich auch zur Objektivierung der Interpretation und zur Erhöhung des Interpretationsertrages bei.

Im folgenden wird ein Beispiel für die Informationsselektion zur interpretationsgerechten Bildaufbereitung durch digitale Bildfilterung für die thematische strukturgeologische Bildinterpretation (Lineamentkartierung) diskutiert. Als Bildbeispiel wurde eine Schwarzweiß-Aufnahme vom Gebiet des Baikalsees ausgewählt, die während einer Überfliegung mit dem Raumschiff SOJUS 22 im September 1976 erhalten wurde. Innerhalb des Bildbereichs ist ein sehr feines Netz von Fotolineationen vorhanden. Es wurde versucht, diese Lineationen durch numerische Bearbeitungsalgorithmen von der übrigen Bildinformation zu trennen und als einzelnes Bild darzustellen. Das feingliedrige Netz der Fotolineationen stellt im wesentlichen die Information des Bildes dar, die im Bereich hoher Ortsfrequenzen liegt. Je "feiner" eine Bildstruktur ist, desto höher sind die ihr zugeordneten Ortsfrequenzen. Der zugehörige Ortsfrequenzbereich kann in diesem Zusammenhang als ein formales Beschreibungskriterium der Fotolineationen benutzt werden. In der Trennung der einzelnen Ortsfrequenzanteile besteht dann offenbar eine einfache Möglichkeit, Lineationen vom anderen Bildinhalt zu isolieren. Im folgenden wird dazu ein Algorithmus zur digitalen Bildfilterung im Ortsraum beschrieben.

## 2. Bilddigitalisierung

Mit modernen Anlagen zur Bilddigitalisierung wird ein Bild Punkt für Punkt abgetastet und in Form einer Grauwertmatrix abgespeichert. Die Bildabtastung erfolgt entweder mit einem gebündelten Lichtstrahl oder einem Laserstrahl, der zeilenweise über ein transparentes Bild geführt wird. Für jeden Bildpunkt wird die Lichtintensität mit einem SEV gemessen und digitalisiert. Die Größe der Abtastpunkte beträgt im allgemeinen

10 bis 200  $\mu\text{m}$ . Das hier beschriebene Bildbeispiel wurde mit einem 200- $\mu\text{m}$ -Raster digitalisiert, wobei 256 Grauwerte aufgelöst wurden. Während der Abtastung wird das Bild zeilenweise auf einem Magnetband gespeichert und kann als Zahlenmatrix anschließend in den Rechner eingelesen werden.

### 3. Grauwertspreizung

Da im Bildbeispiel nur ein sehr kleiner Bereich der gesamten Grauwertskala enthalten ist, wurde durch digitale Grauwerttransformationen der Grauwertbereich des Bildes auf den Bereich zwischen Weiß und Schwarz gespreizt. Dadurch gelingt es, den Bildkontrast zu verbessern; einzelne geologische Strukturen heben sich deutlicher vom Bilduntergrund ab.

### 4. Bildfilterung

In einem weiteren Verarbeitungsschritt ist es möglich, die hohen Ortsfrequenzen von den niedrigen durch digitale Hochpaßfilterung zu trennen. Die Hochpaßfilterung läßt sich durch Differenzbildung zwischen Originalbild und tiefpaßgefiltertem Bild realisieren. Zur Tiefpaßfilterung wurde ein Operator mit einem Operatorfeld von 5 x 5 Bildpunkten auf jeden Punkt  $\{i, j \mid i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M\}$  der Bildmatrix im Ortsraum angewandt. Innerhalb des Operatorfeldes wurden alle Grauwerte gemittelt und der Mittelwert dem Operatoraufpunkt  $(i, j)$  zugewiesen (gleitende Mittelung):

$$G_{i,j} = \frac{1}{25}(G_{i-2,j-2} + G_{i-1,j-2} + \dots + G_{i+2,j+2}) \quad \{G_{i,j} \in (0 \dots 255) \mid i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M\}$$

Da die Digitalisierung des Originalbildes mit einem Raster von 200  $\mu\text{m}$  erfolgte, ist die höchstmögliche Ortsfrequenz mit 5 Linien/mm festgelegt. Nach der Tiefpaßfilterung beträgt der maximale Wert der Ortsfrequenz 1 Linie/mm. Im tiefpaßgefilterten Bild sind alle feinen Strukturen und Störungen eliminiert und nur noch großflächige Objekte zu erkennen, so daß sich dieses Bild insbesondere zur Bodenkartierung und zur Kartierung geologischer Formation eignet. Durch Subtraktion des tiefpaßgefilterten Bildes vom Originalbild wird eine Bandpaßfilterung im Bereich hoher Ortsfrequenzen (ca 1 ... 5 Linien/mm) realisiert. Dieser schmale Bereich entspricht bei dem hier betrachteten Bildbeispiel dem Frequenzbereich der meisten Fotolineationen. In einem weiteren Verarbeitungsschritt kann man durch digitale Graustufentransformation, z. B. durch Zusammenfassung einzelner Grauwertbereiche bzw. Bildung von Äquidensiten die erhaltenen Strukturen noch deutlicher hervorheben. Durch schrittweise Anwendung der beschriebenen Verarbeitungsprozesse erhält man schließlich ein Bild, in dem die Mehrzahl aller Lineationen vom übrigen Bildinhalt getrennt dargestellt ist.

Durch das beschriebene Verfahren der Bildfilterung wird zwar die Erkennung von Fotolineationen erleichtert und objektiviert, im Sinne der thematischen Bildinterpretation, z. B. der Kartierung der geologischen Lineamente, erfolgt jedoch die Beseitigung der redundanten Information nach sehr formalen Kriterien. Letztlich wird also nur das Erkennen bzw. Wahrnehmen einer Lineation und nicht unmittelbar deren Interpretation erleichtert. Die Bildinterpretation selbst ist ein sehr komplizierter und komplexer Prozeß und erfolgt im allgemeinen auf der Grundlage des Originalbildes und spezieller Bodenkennnisse.

Erste Arbeiten zur Bestimmung der spektralen Eigenstrahlung der  
Atmosphäre in Zenitrichtung unter Verwendung der MKF-6-Aufnahmen

von

M. WELLER,<sup>1)</sup> U. LEITERER,<sup>1)</sup> R. SÖLLNER<sup>2)</sup>

Z u s a m m e n f a s s u n g

Bei der Komplexinterpretation von Multispektralaufnahmen, die mit der Kamera MKF-6 gewonnen werden, ist die Größe der spektralen Dichte der Strahlung der Atmosphäre dann von besonderer Bedeutung, wenn die Strahlungsdichte der Erdoberfläche von vergleichbarer Größenordnung wie die Strahlung der Atmosphäre ist. Aus MKF-6-Aufnahmen kann man unmittelbar die spektrale Strahlungsdichte über den Transmissionskoeffizienten der Atmosphäre und die Reflexionseigenschaften einer Testfläche im untersuchten Testpolygon bestimmen. Am praktischen Beispiel wird die Berechnung der Daten gezeigt und ihre Genauigkeit diskutiert. Die Arbeiten zu dieser Problematik werden noch fortgesetzt.

S u m m a r y

At complex interpretation of multispectral images, got by the camera MKF-6, the magnitude of the spectral density of the atmospheric radiation is of special importance if the density of the radiation of the Earth has about the same order of magnitude like the radiation density of the atmosphere. It is possible to derive from MKF-6 images the spectral density of atmospheric self-radiation, using atmospheric transmittance coefficient and the reflection properties of a test area within an example is given for calculation of these datas and errors are discussed. The investigation in these problems are continuing.

Р е з ю м е

При комплексной интерпретации мультиспектральных снимков, полученных камерой MKF-6, величина спектральной плотности излучения атмосферы имеет тогда особое значение, когда плотность излучения поверхности Земли имеет тот же порядок значений как и само излучение атмосферы.

По этим снимкам непосредственно определяется спектральная плотность атмосферы, используя коэффициент прозрачности атмосферы и отражательные свойства тестовой площадки исследуемого полигона. На практическом примере показывается вычисление данных и их точность. Работы в этом направлении продолжаются.

1) Meteorol. Dienst der DDR, Aerologisches Observatorium, Lindenberg

2) Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam

## 1. Einleitung

Die Aufnahmen der Multispektralkamera MKF-6 lassen sich in Verbindung mit Bodenmessungen zur Ermittlung der aufwärtsgerichteten spektralen Eigenstrahlung der Atmosphäre oder einzelner ausreichend dicker Atmosphärenschichten einsetzen. Die Kenntnis dieser Größen ist für die Auswertung dieser Aufnahmen selbst von Bedeutung. Vornehmlich bei der quantitativen Interpretation dynamischer Vorgänge (z. B. Wachstums-, Reife- und Befallsstadien) kann es erforderlich sein, den jeweiligen Anteil der störenden Eigenstrahlung der zwischen Erdoberfläche und Kamera liegenden Atmosphärenschicht zu eliminieren, sobald die den Prozeß charakterisierenden, spektral begrenzten Strahlendichteänderungen der Bodenobjekte innerhalb der Schwankungsbreite der Atmosphärenstrahlung liegen.

Am 27. 7. 1976 wurden bei einem Sonnenzenit von  $Z = 44,7^\circ$  von Bord einer AN 30 ausgewählte Testpolygone mit der Kamera MKF-6 aus 2800 m und 6600 m Höhe fotografiert. Mit Hilfe dieser radiometrisch geeichten Spektralaufnahmen konnte erstmals versucht werden, die senkrecht nach oben gerichtete spektrale Strahldichte der Atmosphärenschicht zwischen Erdoberfläche und Flugniveau zu ermitteln.

## 2. Theoretische Grundlagen

Für die von der Kamera empfangene spektrale Strahldichte  $R_{K\lambda}$  des Bodenobjektes  $i$  gilt im genannten Fall

$$(1) \quad i_{R_{K\lambda}} = \alpha_\lambda (T_\lambda \cdot i_{R_{B\lambda}} + R_{A\lambda})$$

mit  $\alpha_\lambda$  spektraler Transmissionsfaktor der Flugzeugkanzel

$T_\lambda$  spektraler Transmissionsfaktor der senkrecht durchstrahlten Luftmasse

$i_{R_{B\lambda}}$  senkrecht nach oben gerichtete, reflektierte spektrale Strahldichte des fotografierten Bodenobjektes

$R_{A\lambda}$  senkrecht nach oben gerichtete, reflektierte spektrale Strahldichte der Luftmasse (Eigenstrahlung)

Unabhängig davon, ob  $\alpha_\lambda$  und die absoluten Strahldichtewerte der geeichten Graukeilstufen der Kamera hinreichend genau oder reproduzierbar sind, bleiben die relativen Energieabstände der einzelnen Graukeilstufen  $i_{R'_{K\lambda}}$  (Filmschwärzung) erhalten, so daß

$$(2) \quad \beta \cdot i_{R'_{K\lambda}} = \alpha_\lambda (T_\lambda \cdot i_{R'_{B\lambda}} + R_{A\lambda})$$

der wahren Strahldichte  $R_{K\lambda}$  entspricht, wenn  $R_{B\lambda}$  in absoluten Einheiten ( $\text{mWcm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ) vorliegt. Die Größe  $\beta$  stellt hierbei einen kamerabedingten, unbekanntem Faktor dar. Werden nun parallel zu den aerokosmischen Aufnahmen von zwei Testflächen deren senkrecht reflektierte Strahldichten am Boden gemessen und in jedem Kanal den Graukeilstufen der MKF-6-Aufnahmen zugeordnet, so wird aus (2) für die atmosphärische Strahldichte

$$(2a) \quad R_{A\lambda} = \frac{T_{\lambda} ({}^1R'_{K\lambda} {}^2R_{B\lambda} - {}^2R'_{K\lambda} {}^1R_{B\lambda})}{{}^2R'_{K\lambda} - {}^1R'_{K\lambda}}$$

erhalten.

### 3. Beschreibung der Meßapparatur und Auswertung der Meßergebnisse

Bei der Befliegung am 27. 7. 1976 wurden für die Flughöhe von 2800 m Sand und eine darin ausgelegte rote Fläche als Testobjekt benutzt. Für die Überfliegung in 6600 m Höhe mußte die rote Testfläche durch die Wasseroberfläche eines angrenzenden Sees ersetzt werden, um bei der späteren Auswertung der entwickelten MKF-6-Aufnahmen ein ausreichend großes und homogenes Bildelement zur Verfügung zu haben.

Die Strahldichten  $R_{B\lambda}$  dieser drei Testobjekte wurden aus 2 bis 7 m Höhe mit einem fahrbaren und um zwei Achsen schwenkbaren Spektrometer gemessen (Wellenlängenintervall 0,4 bis 0,85  $\mu\text{m}$ , Öffnungswinkel 0,0022 sr). Das geeichte Gerät besteht aus 11 Doppelmetallinterferenzfiltern mit aufgekitteten Farbgläsern zur Abblockung der Nebenmaxima, einem Siliziumdetektor (Solarzelle) und einem DC-Milli-Pico-Meter MV 40 als Anzeigeteil.

Die spektralen Transmissionsfaktoren in den einzelnen Kanälen ergeben sich nach dem Modell von ŠIFRIN /1/ aus Aktinometermessungen der integralen (0,3  $\mu\text{m} \leq \lambda \leq 3,0 \mu\text{m}$ ) geschwächten Sonnenstrahlung, die auf die Testflächen einfällt.

Im entwickelten Film unterscheiden sich die Testobjekte in den verschiedenen Kanälen durch ihre Schwärzungen, die zur Auswertung den gleichzeitig mit der Aufnahme aufbelichteten Graukeilstufen zugeordnet wurden, um die relativen Strahldichten  $R'_{K\lambda}$  der Objekte festlegen zu können. Die Zuordnung erfolgt über die fotometrische Messung der Transparenzen von (Test-)objekt und Graukeil am ZIPE der AdW. Nach (2a) ergaben sich die in Abb. 1 dargestellten Strahldichten  $R_{A\lambda}$  (2,8 km) und  $R_{A\lambda}$  (6,6 km). Vergleichsweise sind die Strahldichten der gesamten Atmosphäre  $R_{A\lambda}(\infty)$  nach /2/, /3/ angegeben, wenn für das entsprechende Sonnenzenit von 45° mittlere Albedo des gesamten fotografierten Gebietes  $A = 0,2$  angenommen wird. Führt man durch

$$(3) \quad K_{O\lambda} = 1 - \frac{{}^2R_{B\lambda}}{{}^1R_{B\lambda}} \quad \text{bzw.} \quad K_{H\lambda} = 1 - \frac{{}^2R_{B\lambda} T_{\lambda} + R_{A\lambda}}{{}^1R_{B\lambda} T_{\lambda} + R_{A\lambda}}$$

die spektralen Kontraste zwischen den Testobjekten am Boden und in der Höhe  $H$  ein, so ergibt sich aus deren Verhältnis  $K_{O\lambda}/K_{H\lambda}$  die z. B. bei /4/ angegebene Übertragungsfunktion  $P_{\lambda}$  der Atmosphäre für den Bodenkontrast zweier Objekte.  $P_{\lambda}$  ist für den Kontrast Wasser/Sand zusammen mit den für die Gesamtatmosphäre geltenden Modellwerten in Abb. 2 dargestellt. Man erkennt, daß sich beispielsweise der Kontrast von Sand und Wasser im Kanal 1 in 6600 m auf fast die Hälfte des Bodenkontrastes verringert hat. Ein und derselbe Wert der spektralen Übertragungsfunktion  $P_{\lambda}$  kann durch verschiedene Kombinationen der Strahldichten von Bodenobjekten und Atmosphäre erhalten werden. Da sich Veränderungen der Bodenobjekte gegenüber denjenigen der Atmosphäre nicht gleichzeitig und

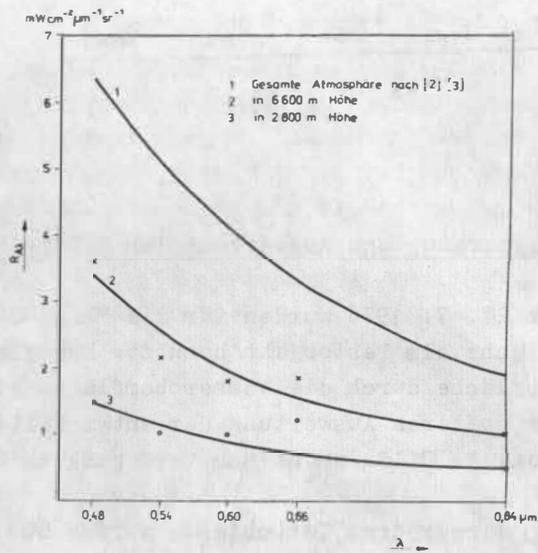


Abb. 1 Spektrale Übertragungsfunktion der Atmosphäre  $P_{A\lambda}$  in Zenitrichtung ( $Z = 45^\circ$ )

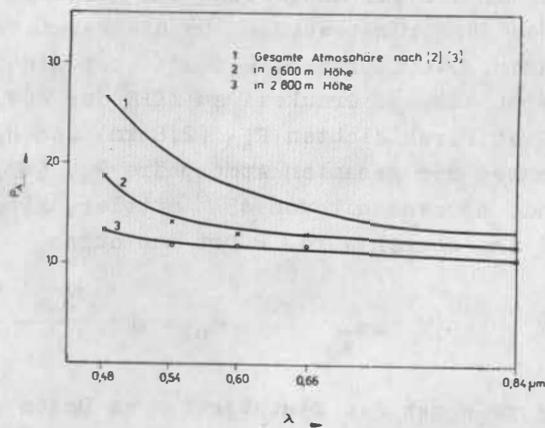


Abb. 1 Spektrale Strahldichten der Atmosphäre  $R_{A\lambda}$  in Zenitrichtung ( $Z = 45^\circ$ )

gleichsinnig in allen Spektralbereichen auswirken, kann durch die vergleichende Auswertung aller Kanäle zwischen objektbedingter und atmosphärenbedingter Kontraständerung entschieden werden (bezogen auf eine Normtestfläche, wie z. B. klares Wasser ohne Unterlicht). Als Ergebnis läge dann eine kontrastbezogene Objektklassifizierung vor.

#### 4. Fehlerbetrachtungen

Die hinreichend genaue Bestimmung der aktuellen Eigenstrahlung der Atmosphäre würde neben der prinzipiell möglichen separaten Auswertung eines jeden Kanals die Überführung von Kontraständerungen in entsprechende Strahldichtevariationen gestalten. Die Genauigkeit der aktuellen Strahldichtebestimmung der Atmosphäre hängt von den Fehlern der Aktinometer-, Spektrometer- und Fotometermessungen ab. Da nur je eine Aufnahme bei einem bestimmten Sonnenzenit zur Verfügung stand und zeitgleich zum Überflug nur eine komplette spektrometrische und aktinometrische Bodenmessung möglich war, sind die Größen  $R_{A\lambda} = f(1R_{B\lambda}; 2R_{B\lambda}; 1R'_{K\lambda}; 2R'_{K\lambda}; T_{\lambda}) = f(x_{\nu\lambda})$  als Einzelmessungen anzusehen, für die der maximale absolute Eingangsfehler

$$\Delta R_{A\lambda} \leq \sum_{\nu} \left| \frac{\partial R_{A\lambda}}{\partial x_{\nu\lambda}} \Delta x_{\nu\lambda} \right|$$

gegenwärtig hauptsächlich von der Filmentwicklung bzw. von der Objektwahl abhängt. Wählt man nämlich als Testflächen zwei Objekte, die in einem Kanal einen guten Kontrast erwarten lassen, besteht die Gefahr, daß nicht in allen Kanälen des entwickelten Films beide Objekte zugleich im linearen Teil der Schwärzungskurve abgebildet werden. Der Fehler bei der Fotometrierung kann für Objekte, die im nichtlinearen Kurventeil liegen, eine Erhöhung des Fehlers der zugeordneten Strahldichte auf das Fünffache jenes Wertes verursachen, der für Objekte gilt, die sich im linearen Teil der Schwärzungs- bzw. Transparenzkurve darstellen. Auf Grund der Probleme bei der spektralen Eichung und der Meßwertverstärkung stellt das Bodenspektrometer bei Messungen von geringen  $R_B$ -Werten die nächst größere Fehlerquelle dar. Die Fehler des Michelson-Warten-Aktinometers betragen ca. 2 % bezogen auf die Schwerpunkt-Wellenlänge 0,55  $\mu\text{m}$ . Für die extrapolierten Werte in den übrigen Kanälen werden 5 % angenommen. Die Hauptfehlerquellen, geringe spektrale Strahldichte der Testfläche und Abbildung derselben im gekrümmten Teil der Schwärzungskurve, können den maximalen Eingangsfehler bis über die Meßgröße hinaus anwachsen lassen. Die tatsächlichen Fehler sind sicher wesentlich geringer, wie die Strahldichtekurven  $R_{A\lambda}$  für 2800 und 6600 m Flughöhe (Abb. 1) zeigen.

#### Literatur

- /1/ ŠIFRIN, K.S.; MININ, J.N.: K teoriji negorizentalnoj vidivosti. Trudy glav. geof. Obs. im. A.J. Voljkova, vypusk 68
- /2/ KONDRATJEV, K.Ja.; SMOTKII, O.J.: Ob opredelenii spektralnych peredatočnych funkcii dlja jarkostej i kontrastov prirodnych obrazovanij pri spektrofotometrirovanii sistemy atmosfera-podstilažuščaja poverchnost is kosmosa. IZV Akad. Nauk. UdSSR, ser. fizika atm. i okeana, V. 12. N. 3; 1975
- /3/ THEKAĖKARA, M.P.: Solar energy monitor in space (semis). Proceedings of Symposium on Solar Radiation/Smithsonian Institution, Nov. 1973
- /4/ GONIN, G.H.; KRAVČUK, N.W.: Vlijanie atmosfery na kačestvo kosmičeskich fotosnimkov in "kosmičeskaja fotos'emka i geologičeskie issledovanija"; MEDRA Leningrad 1975

Informationen über Möglichkeiten der Nutzung von  
aerokosmischen Aufnahmen für die Herstellung von  
Kartengrundlagen der thematischen Kartographie

von

LIDIA FREY <sup>1)</sup> und JOACHIM KRAMER <sup>2)</sup>

Z u s a m m e n f a s s u n g

In der DDR stehen seit dem ersten gemeinsamen Experiment (1976) der UdSSR und der DDR zur fotografischen Fernerkundung der Erde mit dem Raumschiff Sojus 22 Multispektralaufnahmen der MKF-6 aus 265 km Höhe zur Verfügung. Mit diesen hochwertigen Aufnahmen im Bildmaßstab 1 : 2 Mio ist es möglich, Kartengrundlagen der thematischen Kartographie für die Maßstäbe 1 : 1 Mio bis 1 : 100 000 fotogrammetrisch herzustellen. Die mit Hilfe geeigneter Interpretationsmethoden und Interpretationsgeräte gewonnenen thematischen Informationen können graphisch oder digital mit dem STEREO-METROGRAPH bzw. STECOMETER des VEB Carl Zeiss JENA fotogrammetrisch kartiert werden.

S u m m a r y

MKF-6 produced multispectral images are available in GDR since first joint experiment of the USSR and GDR in 1976 for photographic remote sensing of the Earth from space laboratory "Sojus 22". The photographs are taken from an altitude of 265 km. The high-quality images on the scale of 1 : 2 000 000 allow to make on photogrammetric way basic maps on the scales of 1 : 1 000 000 to 1 : 100 000 for thematic cartography. Thematic informations gained with the aid of convenient methods and instruments of interpretation are plotted graphically or digitally with STEREO-METROGRAPH resp. STECOMETER on Carl Zeiss JENA.

Р е з ю м е

В результате выполнения первого совместного эксперимента СССР и ГДР по фотографическому дистанционному зондированию Земли при помощи космического корабля Союз 22 в ГДР имеются в распоряжении многозональные снимки, снятые камерой МКФ-6 с высоты 265 км. При помощи этих высококачественных снимков в масштабе 1:2 000 000 возможно фотogramметрическим способом изготовить картографические основы для тематического картографирования в масштабах 1:1 000 000 до 1:100 000. Тематические информации, полученные соответствующими методами и приборами для дешифрирования, возможно фотogramметрическим способом картографировать в графической или цифровой форме при помощи стереометрографа или стекометра.

1) VEB Kartographischer Dienst Potsdam

2) VEB Kombinat Geodäsie und Kartographie  
Kartier- und Auswertezentrum Leipzig

## 1. Einleitung

Im September 1976 wurde beim ersten gemeinsamen Experiment der UdSSR und der DDR zur fotografischen Fernerkundung der Erde an Bord des sowjetischen Raumschiffes SOJUS 22 von den Kosmonauten V. Bykovskij und V. Axjonov die neue Multispektralkamera MKF-6 eingesetzt und auch Gebiete der DDR aufgenommen. Zur gleichen Zeit wurden mit einer zweiten MKF-6-Kamera von Bord eines sowjetischen Flugzeuglabors vom Typ AN 30 ausgewählte Testgebiete der DDR fotografiert.

Damit stehen der DDR Multispektralaufnahmen im Bildmaßstab 1 : 2 Mio aus einer Aufnahmehöhe von ca. 265 km und im Bildmaßstab 1 : 50 000 aus einer Aufnahmehöhe von ca. 6 km zur Verfügung. Mit der von Experten der UdSSR und der DDR gemeinsam entwickelten und vom VEB Carl Zeiss JENA konstruierten und gebauten Multispektralkamera ist es möglich, 6 Schwarz-Weiß-Aufnahmen im Format 55 mm x 80 mm in 6 verschiedenen Spektralbändern zwischen 0,4 und 0,9 Mikrometer aufzunehmen. In der Regel werden von den Experten der einzelnen Wissenschaftsgebiete synthetisierte Farbmischbilder oder Schwarz-Weiß-Materialien der einzelnen Spektralbandaufnahmen ausgewertet. Im großen Umfang werden die einzelnen Spektralbandaufnahmen als Schwarz-Weiß-Bildmaterialien in Form von Maßstabsvergrößerungen und Bildmosaiken verwendet. Auf Grund des hohen Auflösungsvermögens der Multispektralkamera MKF-6 und des verwendeten hochwertigen sowjetischen Aufnahmefilms ist es möglich, von den Sojus-22-Aufnahmen im Maßstab 1 : 2 Mio Vergrößerungen in den Maßstäben 1 : 500 000, 1 : 200 000 und 1 : 100 000 herzustellen und für die Interpretation zu nutzen.

Gerade bei der geologischen Erforschung der Erde stellen die kosmischen Fotoaufnahmen in Verbindung mit den Luftbildaufnahmen und einer großen Anzahl von Kartenmaterialien unterschiedlicher Maßstäbe und Thematiken, wie topografische, allgemeingeografische, geologische, geomorphologische, geobotanische, forstwirtschaftliche Karten, eine der Hauptinformationsquellen dar.

Da die geologische Struktur des Geländes eng mit den landschaftlichen Besonderheiten verbunden ist, hat die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den geologischen Objekten und den Landschaftselementen große Bedeutung bei der Interpretation der aerokosmischen Aufnahmen. Die einzelnen Landschaftselemente, wie Relief, Hydrographie, Bodenbewachsung und deren Kombinationen lassen sich in den Fotoaufnahmen der einzelnen Spektralbereiche mit geeigneten Methoden und Hilfsmitteln interpretieren. Für die Interpretation von Luftbildern und kosmischen Aufnahmen stehen in der DDR eine ganze Reihe von Geräten des VEB Carl Zeiss JENA zur Verfügung. So kommen das Topopret, der Luftbildumzeichner, das Spiegelstereoskop, der Stereopantometer und das Interpretoskop zum Einsatz.

Die mit Hilfe geeigneter Interpretationsmethoden und Interpretationsgeräte gewonnenen Informationen werden zum größten Teil in kartografischer Form dokumentiert.

## 2. Aerokosmische Aufnahmen und thematische Karten

Um die neue Qualität der aus aerokosmischen Aufnahmen gewonnenen Informationen optimal zu nutzen, ist auch eine neue Qualität der Karten der thematischen Kartographie erforderlich. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die aerokosmischen Aufnahmen gleichzeitig als Interpretationsgrundlage und als Ausgangsmaterial für die herzustellenden thematischen Karten dienen.

Bei der Entscheidung über den topografischen Inhalt, z. B. einer Karte für die Zwecke der Geologie, sollten folgende Forderungen berücksichtigt werden:

- Die Karte muß der Ortsfestlegung der geologischen Objekte und Erscheinungen dienen.
- Sie muß eine optimale Vergleichbarkeit mit den geologischen Karten anderer Maßstäbe gewährleisten.
- Sie muß Ausgangsmaterial für die Herstellung von geologischen Karten beliebiger Projektionen sein.
- Letztlich hat die Karte die Aufgabe, dem Kartenleser zu helfen, die Zusammenhänge zwischen den landschaftlichen Besonderheiten des Geländes und den geologischen Strukturen zu erkennen.

Aus diesen Gründen muß die thematische Karte nach den Gesetzmäßigkeiten einer bestimmten kartografischen Projektion aufgebaut sein und einige spezifische topografische Elemente des aktuellen Standes im Kartenbild enthalten. Der Grad der Generalisierung und die Inhaltsdichte der einzelnen Elemente dieser Karte hängen vom Maßstab und der Thematik der geologischen Karte ab. Die geologische Karte darf durch topografische Kartenelemente nicht überlastet sein und muß eine gute Lesbarkeit durch geeignete Art der Gestaltung besitzen.

Die ersten Erfahrungen zeigen, daß sich bei der Gewinnung thematischer Informationen aus den aerokosmischen Aufnahmen die Notwendigkeit ergibt, über einen Kartenfundus zu verfügen, der eine völlige lagenmäßige Übereinstimmung des thematischen und topografischen Inhalts gewährleistet, hohe Aktualität besitzt, variable Gestaltung der Inhaltsdichte ermöglicht, geeignete Signaturen hat und auf der Grundlage einer Kartenprojektion aufgebaut ist.

In der DDR werden derzeit Überlegungen über die Wege und Möglichkeiten der Entwicklung von solchen Kartenunterlagen angestellt. Ein Lösungsweg zur effektiven Herstellung von derartig neuen thematischen Karten aus aerokosmischen Aufnahmen wird in der Nutzung der vorhandenen fotogrammetrischen Auswertetechnik gesehen.

Diese Methode hat folgende Vorteile:

- Da die topografischen Elemente und der thematische Inhalt aus dem gleichen Bildmaterial abgeleitet werden, ist die lagenmäßige Übereinstimmung der Kartenelemente gewährleistet.
- Da der interpretierte thematische und topografische Inhalt aus der gleichen Grundlage entnommen und in der gleichen Kartenprojektion dargestellt werden, sind gute Voraussetzungen für eine zukünftige automatische Interpretation gegeben.

- Von besonderer Bedeutung ist der Aktualitätsgrad des topografischen Inhalts, der durch die Verwendung von kosmischen Aufnahmen gesichert werden kann.
- Weiterhin kann in Abhängigkeit von den Anforderungen des Kartennutzers der topografische Inhalt in der geforderten Kartenprojektion, Form und Dichte dargestellt werden.

Die Herstellung einer thematischen Karte aus aerokosmischen Aufnahmen mit Hilfe der fotogrammetrischen Auswertetechnik setzt eine redaktionelle Vorbereitung voraus. Diese beinhaltet die übliche redaktionelle kartografische Vorbereitung, die Sammlung und Auswahl der Karten- und Bildmaterialien, die Interpretation der Bildmaterialien in den geeigneten Spektralbändern und die Zusammenstellung einer Vorschrift für die fotogrammetrische Auswertung.

### 3. Gerätetechnik für die Interpretation

Im Prozeß der Bildinterpretation können vom Kartografen das Interpretationsgerät INTERPRETOSKOP mit stereoskopischer Betrachtung und das PHOTOPRET mit monokularer Betrachtung verwendet werden.

Kann man mit dem Taschenstereoskop mit 2,8facher Vergrößerung und mit dem Spiegelstereoskop mit 3,5facher Vergrößerung eine maximale Auflösung von 15 bis 20 L/mm erreichen, so ist mit dem INTERPRETOSKOP mit einer 2 bis 15fachen Vergrößerung eine maximale Auflösung von 100 L/mm möglich. Das Bildmaterial kann dabei am INTERPRETOSKOP stereoskopisch im Durchlicht- oder Auflichtverfahren betrachtet werden. Zur gemeinsamen und gleichzeitigen Betrachtung des Stereomodells sowie zur Ausbildung von Luftbildinterpretationen befindet sich an der dem Einblick gegenüberliegenden Seite des INTERPRETOSKOPs das Doppelokular eines zweiten Einblicks. Dieses Gerät des VEB Carl Zeiss JENA erweist sich als sehr gut geeignet:

- für das Erkennen des Wesens von Objekten und Erscheinungen durch systematische Analyse der Bilddetails und daraus abgeleitet das Verallgemeinern der Merkmale, die zur Identifizierung eines Objektes führen
- für die logische Kombination der Fakten und Bildung neuer Erkenntnisse.

Zur berührungsfreien Markierung und Übertragung von interpretierten Bildpunkten in den Bildern kann das LASER-Punktübertragungsgerät TRANSMARK verwendet werden. Die Markierung von Punkten mit Hilfe des LASER-Strahles ist nicht nur auf Diapositiv-Platten, sondern auch auf Negativ- oder Positiv-Filmen möglich. Der Außendurchmesser der Punktmarkierung liegt wahlweise zwischen 0,045 bis 0,1 mm.

Für die Interpretation der topografischen Kartenelemente wurden bei den ersten Arbeiten vorwiegend die Materialien des Kanals 4 (640 - 680 nm), für die Uferlinien und Gewässer die des Kanals 6 (790 - 890 nm) und für Waldflächen die des Kanals 3 (580 - 620 nm) verwendet. Die Untersuchungen hinsichtlich der Verwendbarkeit der einzelnen Kanäle für spezielle Interpretationselemente werden fortgesetzt. Die Ergebnisse der topografischen und thematischen Bildinterpretation müssen nach einem speziellen Zeichenschlüssel in Bildvergrößerungen dargestellt werden.

#### 4. Graphische und digitale fotogrammetrische Auswertung

Für die fotogrammetrische Ableitung topografischer Grundlagenkarten aus aerokosmischen Aufnahmen werden 2 Wege gesehen, die grafische und die digitale Auswertung.

Die grafische fotogrammetrische Auswertung der kosmischen Aufnahmen im Maßstab 1 : 2 Mio für den Maßstab 1 : 200 000 wurde am Stereoauswertegerät STEREO-METROGRAPH vom VEB Carl Zeiss JENA erprobt. Das Präzisionsstereoauswertegerät STEREO-METROGRAPH G ermöglicht die Auswertung von Bildmaterialien mit einer Kammerkonstante von 85 mm bis 310 mm bei einer 7fachen Betrachtungsvergrößerung. Der mittlere Koordinatenfehler des Gerätes liegt bei  $\leq \pm 5$  Mikrometer, bezogen auf die Bildebene. Die Modellorientierung der kosmischen Originalaufnahmen im Format 55 mm x 80 mm (mit einer Kammerkonstante von 125 mm) machte am Stereometrographen keinerlei Schwierigkeiten. Die absolute Orientierung des Bildmodells erfolgte mit Hilfe von Kartenpaßpunkten. Die stereoskopische Auswertung der darzustellenden Kartenelemente erfolgt in partiellen Abschnitten und durch linienweise Gravur auf einer Gravurfolie. Bei dieser Technologie ist es möglich, die fotogrammetrische Auswertung direkt mit der vorhandenen Karte zu vergleichen und die verschiedensten Kartenelemente, wie Verkehrsnetz, Hydrographie, Siedlungen, Bodenbewachungen u. a. auf getrennten Gravurfolien darzustellen. Damit ergibt sich die Möglichkeit, aus einer fotogrammetrischen Auswertung topografische Grundlagenkarten für verschiedene thematische Karten herzustellen.

Für die digitale fotogrammetrische Auswertung der kosmischen Aufnahmen im Maßstab 1 : 2 Mio wurde der Präzisionsstereokomparator STECOMETER C vom VEB Carl Zeiss JENA eingesetzt. Er ermöglicht die punktweise Auswertung von Bildmaterialien bei einer 6- bis 18fachen Gesamtvergrößerung. Der mittlere Koordinatenfehler des Gerätes liegt bei  $\leq \pm 2$  Mikrometer, bezogen auf die Bildebene. Bei der punktweisen Auswertung am STECOMETER wurde ebenfalls ein kosmisches Bildpaar im Originalformat verwendet. Bei der digitalen fotogrammetrischen Auswertung wurden die Bildkoordinaten einzelner ausgemessener Punkte in maschinenlesbarer Form auf Lochstreifen registriert und anschließend an einer EDVA verarbeitet.

Der Vorteil des Prozesses der digitalen fotogrammetrischen Auswertung besteht darin, daß eine höhere Genauigkeit als bei der grafischen Auswertung erzielt wird und im Rechenprogramm zum Beispiel folgende Forderungen realisiert werden können:

- Berücksichtigung der Einflüsse von Erdkrümmung und Refraktion
- Transformation der Daten in das erforderliche Kartenprojektionssystem
- Einführung von Unterprogrammen für die Generalisierung, um Karten in verschiedenen Maßstäben abzuleiten.

Als Ergebnis entsteht ein Steuerstreifen für den Präzisionskoordinatographen CARTIMAT des VEB Carl Zeiss JENA.

Die sich an diese fotogrammetrischen Auswertungen anschließenden kartografischen Herausgearbeiten - wie repro- und kopiertechnische Bearbeitung der Gravurfolien, kartografische Bearbeitung der topografischen und thematischen Kartenelemente und Herstellung der Druckkopierunterlagen - sind identisch mit den bisher verwendeten Technologien.

Die Wahl des für die Herstellung von speziellen thematischen Karten aus kosmischen Aufnahmen anzuwendenden fotogrammetrischen Verfahrens ist von den inhaltlichen Anforderungen, den Genauigkeitsanforderungen und von der Art der Weiterverarbeitung der Informationen abhängig.

Diese Ausführungen beinhalten die ersten Ergebnisse und Überlegungen bei der Verwendung von aerokosmischen Aufnahmen für die Herstellung thematischer Karten im staatlichen Vermessungs- und Kartenwesen der DDR.

Die wissenschaftlichen Arbeiten auf diesem Gebiet werden fortgesetzt.

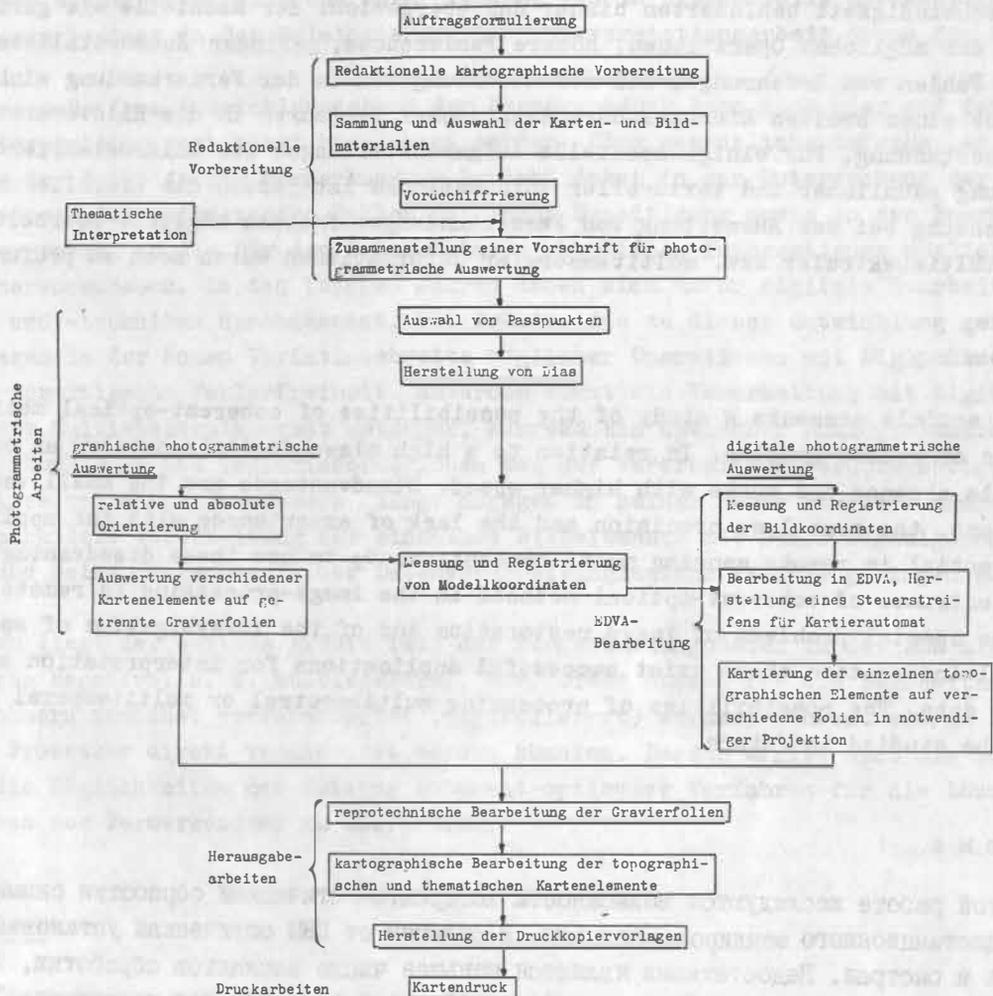


Abb. 1 Technologisches Schema zur Herstellung thematischer Karten mittels photogrammetrischer Auswertung von aerokosmischen Aufnahmen

Probleme der Bildbearbeitung mit kohärentem Licht

von

HORST WEICHELT <sup>1)</sup>

## Z u s a m m e n f a s s u n g

In der Arbeit werden die Möglichkeiten kohärent-optischer Bearbeitungsmethoden für fernerkundungsspezifische Aufgaben untersucht. Trotz der im Vergleich zu hochwertigen Digitalcomputern geringeren Kosten eines optischen Prozessors und seiner hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit behinderten bisher das Übergewicht der Nachteile wie geringe Variabilität der möglichen Operationen, höhere Fehlerquote, geringer Kommerzialisierungsgrad und das Fehlen von Erfahrungen bei der Anwendung des in der Fernerkundung wichtigen Multi-Konzeptes einen breiten Einzug kohärent-optischer Verfahren in die Bildverarbeitung bei der Fernerkundung. Für einige spezielle Aufgabenstellungen der Bildrestaurierung und Untersuchung räumlicher und textureller Informationen ist jedoch die Erschließung einer breiten Anwendung bei der Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen möglich. Bearbeitungsmöglichkeiten multispektraler bzw. multitemporaler Informationen wären noch zu prüfen.

## S u m m a r y

This article presents a study of the possibilities of coherent-optical methods for objectives of remote sensing. In relation to a high class digital computer an optical processor is cheaper and works with higher speed. Disadvantages are the small variability of operations, the more less precision and the lack of experiences with the application on the essential in remote sensing multi-conception. Up to now these disadvantages prevent a wide entrance of coherent-optical methods in the image-processing in remote sensing. For some special problems of image restoration and of the investigation of spatial and textural information there exist successful applications for interpretation of remote sensing data. The possibilities of processing multispectral or multitemporal information should be studied in future.

## Р е з ю м е

В этой работе исследуются возможности когерентно-оптической обработки снимков для задач дистанционного зондирования земли. В отличие от ЦВМ оптическая установка более дешевая и быстрая. Недостатками являются меньшее число вариантов обработки, пониженная точность, лабораторный характер установок и отсутствие опыта при применении "мульти"-подхода, который в дистанционном зондировании имеет особенное значение. Эти недостатки до сих пор задержали распространение когерентно-оптических методов в области дистанционного зондирования. Применение этих методов для интерпретации снимков возможно для таких задач, как реставрация снимков и исследования пространственных и текстурных структур. Возможности обработки мультizonальных и мультивременных информации подлежат еще проверке.

<sup>1)</sup> Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam

## 1. Einleitung

Mit der Entwicklung von Lasern als Lichtquellen mit hoher Kohärenz des emittierten Lichtes konnten die Besonderheiten, die durch die Verwendung hochkohärenten Lichtes bei Abbildungsprozessen auftreten, praktisch untersucht werden. Das führte in verstärktem Maße ab 1964 zu einer Vielzahl von Arbeiten, die sich mit der Anwendung kohärent-optischer Systeme zur Bearbeitung photographischer Aufnahmen, insbesondere zur Zeichenerkundung und zur nachträglichen "Verbesserung" der Qualität solcher Aufnahmen beschäftigen. Das Ziel bei der Verbesserung der Bildqualität durch Eliminierung von Störungen (z. B. Bewegung während der Aufnahme, atmosphärische Turbulenzen, Beugung am Kameraobjektiv) und durch Hervorheben von für die jeweilige Interpretationsaufgabe wichtigen Details und Unterdrückung von in diesem Falle unwesentlichen Informationen besteht in der Erleichterung der Interpretationsarbeit durch den Menschen.

Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand der Fernerkundung kann auch hier auf den menschlichen Interpretator noch nicht verzichtet werden. Eine wesentliche Aufgabe bei der Auswertung der Daten in der Fernerkundung besteht daher in der Untersuchung der im Primärdatenmaterial auftretenden Fehler und ihrer Beseitigung sowie in der Bearbeitung dieser Daten, um die für den Interpretator nützlichen Informationen möglichst deutlich hervorzuheben. In den letzten Jahren haben sich dafür digitale Bearbeitungsverfahren und -techniken durchgesetzt. Die Gründe, die zu dieser Entwicklung geführt haben, liegen in der hohen Variationsbreite möglicher Operationen mit Digitalrechnern und seiner praktischen Fehlerfreiheit. Außerdem kommt die Verarbeitung mit Digitalrechnern dem Multispektralkonzept entgegen, während ein optischer Analogprozessor vor allem die räumlichen und Texturinformationen bei der Verarbeitung berücksichtigt. Der Vorteil eines optischen Prozessors liegt dagegen in seiner hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit (parallele Verarbeitung der einzelnen Bildelemente mit hoher Signalgeschwindigkeit) und seinen gegenüber einer Datenverarbeitungsanlage relativ geringen Kosten.

Außerdem liegt der weitaus größte Teil der Fernerkundungsdaten in der DDR als photographische Negative, z. T. multispektral, vor. Diese müssen für die Bearbeitung in Digitalrechnern zunächst vorverarbeitet (digitalisiert) werden, während sie in einem optischen Prozessor direkt verarbeitet werden könnten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Möglichkeiten der Nutzung kohärent-optischer Verfahren für die Lösung von Aufgaben der Fernerkundung zu überprüfen.

## 2. Grundlagen

Es ist seit längerem bekannt, daß die Intensitätsverteilung unmittelbar hinter einem entwickelten Bild unter bestimmten Voraussetzungen bis auf einen von der Intensität  $I_0$  abhängigen konstanten Faktor mit der Intensitätsverteilung in der Filmebene im Moment der Aufnahme übereinstimmt. Sie unterscheidet sich deshalb von der Intensitätsverteilung unmittelbar am Originalobjekt im Moment der Belichtung des Filmes nur durch die Störungen auf dem Weg zwischen Objekt und Aufnahmesystem (atmosphärische Turbulenz, Streuung an Staub, Nebel usw., Relativbewegungen zwischen Aufnahmesystem und Objekt) und Störungen im Aufnahmesystem selbst (Beugung am Objektiv, Linsenfehler, Störungen im Aufnahmematerial, Abweichungen im Abstand Linse-Bildebene). Man faßt in

der Literatur diese Störungen durch einen Korrekturfaktor  $h$  zusammen, welcher beschreibt, wie stark sich das Signal auf dem Weg zwischen dem Objekt und dem Film durch den Einfluß der verschiedenen Störungen ändert. Damit ist  $h$  ein Maß dafür, wie stark die Intensität des gestörten Bildpunktes von der des Idealbildpunktes ohne Störungen abweicht. Im allgemeinen Fall muß man damit rechnen, daß sich  $h$  von Bildpunkt zu Bildpunkt ändert. Weiterhin muß man davon ausgehen, daß zur Intensität in einem Bildpunkt auch die dem jeweiligen Objektpunkt benachbarten Gebiete mit beitragen. Dem äquivalent ist die Aussage, daß eine punktförmige Lichtquelle nicht in einem Punkt abgebildet wird, sondern in der Bildebene über ein gewisses Gebiet "verschmiert" ist. Damit erhält man für den Abbildungsvorgang die Gleichung:

$$(1) \quad I(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x', y', x, y) O(x, y) dx dy$$

$h(x', y', x, y)$  wird in der Literatur als Punktzerstreuungsfunktion (point spread function) oder Impulsantwort (impulsnij otklik) bezeichnet.  $O(x, y)$  ist die Intensitätsverteilung in der Objektebene,  $I(x', y')$  in der Bildebene. Gleichung (1) läßt sich vereinfachen, wenn man annimmt, daß das photographische System verschiebungsinvariant ist. Dies ist dann der Fall, wenn  $h$  nicht von den Objekt- und Bildkoordinaten abhängt, sondern nur noch vom Abstand  $(x-x', y-y')$  der betrachteten Punkte voneinander. Eine Punktlichtquelle würde dann in jedem Objektpunkt die gleiche Verteilung in der Bildebene um den entsprechenden Bildpunkt erzeugen. Damit erhält Gleichung (1) den Charakter einer Faltung der Objektverteilung mit der PZF:

$$(2) \quad I(x', y') = \iint h(x-x', y-y') O(x, y) dx dy$$

(wenn keine Grenzen angegeben sind, soll sich das Integral künftig immer von  $-\infty$  bis  $+\infty$  erstrecken)

oder

$$(3) \quad I(x', y') = h(x, y) * O(x, y)$$

wobei das Zeichen  $*$  für die mathematische Operation "Faltung" verwendet wird. Derartige Systeme werden auch linear-isoplanatisch oder verschiebungsinvariant genannt. Aus der mathematischen Theorie linearer Systeme ist bekannt, daß sich die Operation der Faltung wesentlich einfacher durchführen läßt, wenn man zu den jeweiligen FOURIER-Transformierten der gegebenen Funktionen übergeht.

Sind

$$\begin{aligned} \tilde{I}(f_x, f_y) &= \mathcal{F}[I(x, y)] \\ \tilde{h}(f_x, f_y) &= \mathcal{F}[h(x, y)] \\ \tilde{O}(f_x, f_y) &= \mathcal{F}[O(x, y)] \end{aligned}$$

die nach einer noch zu diskutierenden Vorschrift gebildeten FOURIER-Transformierten der Funktion  $I(x, y)$ ,  $h(x, y)$  und  $O(x, y)$  (das Symbol  $\mathcal{F}$  ist hier und im folgenden stets die Operation "FOURIER-Transformation"), so kann man für (2) und (3) auch schreiben:

$$(4) \quad \tilde{I}(f_x, f_y) = \tilde{h}(f_x, f_y) \tilde{O}(f_x, f_y)$$

Damit könnte theoretisch aus einem gegebenen gestörten Bild  $I(x, y)$  und der entsprechenden Punktzerstreuungsfunktion genau das Idealbild, d. h. eine der Objektverteilung genau entsprechende Verteilung  $O'(x, y)$  erhalten werden, indem die FOURIER-Transformierte der bekannten Verteilung gebildet und mit einer Filterfunktion  $S(f_x, f_y)$  multipliziert wird, die sich aus der Inversion der transformierten PZF ergibt:

$$(5) \quad S(f_x, f_y) = [\tilde{h}(f_x, f_y)]^{-1}$$

Anschließende Rücktransformation ergäbe das Idealbild  $O'(x,y)$ . In der Literatur wird dies als "Entfaltung" bezeichnet. Voraussetzung zur Realisierung dieses Prozesses ist jedoch die praktische Durchführung der FOURIER-Transformation. Mathematisch ist die zwei-dimensionale FOURIER-Transformation als Spezialfall der Laplace-Transformation auf folgende Art definiert (GOODMANN 1968):

$$(6) \quad \tilde{g}(f_x, f_y) = \mathcal{F}[g(x, y)] = \iint g(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

$f_x, f_y$  werden "Frequenz" genannt,  $g(f_x, f_y)$  heißt "Frequenzspektrum" von  $g(x, y)$ . Die FOURIER-Transformation kann damit als Verknüpfung einer Funktion mit ihrem Spektrum verstanden werden. Für die Existenz der FOURIER-Transformation zu einer gegebenen Funktion gibt es eine Reihe hinreichender Bedingungen, so z. B.:  
ist  $g$  in der unendlichen  $x$ - $y$ -Ebene absolut integrierbar, so läßt sich stets eine FOURIER-Transformation durchführen.

Nach BRACEWELL (1965) ist auch die physikalische Realisierungsmöglichkeit eine ausreichend begründete Bedingung für die Existenz der FOURIER-Transformation. Aus der Beugungstheorie ist bekannt, daß sich die Verteilung der komplexen Amplitude des elektrischen Feldes im Bildpunkt  $P(x', y')$  bei Fraunhofernäherung durch folgende Gleichung bestimmen läßt:

$$U'(x', y') = \frac{1}{i\lambda z} \exp[ikz] \exp[i\frac{k}{2z}(x'^2 + y'^2)] \iint U(x, y) \exp[-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x'x + y'y)] dx dy$$

Hier sind  $x', y'$  die Koordinaten in der Bildebene,  $x, y$  die Koordinaten in der Objektebene,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $U(x, y)$  die komplexe Feldverteilung unmittelbar hinter dem Objekt. Führt man die Ortsfrequenzen

$$f_x = \frac{x'}{\lambda z} \quad ; \quad f_y = \frac{y'}{\lambda z}$$

ein ( $f_x, f_y$  ist dann nach den klassischen Beugungsgesetzen die Inversion des Abstandes zweier Strukturen in der Objektebene), so folgt

$$(7) \quad U'(x', y') = \frac{1}{i\lambda z} \exp[ikz] \exp[i\pi(f_x^2 + f_y^2)] \iint U(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

Die Fraunhofernäherung gilt jedoch nur für große Abstände zwischen der Objekt- und der Bildebene. Vergleicht man (6) und (7), so findet man, daß sich für  $z \rightarrow \infty$  die Feldverteilung in der Bildebene als mit einem komplexen Faktor multiplizierte FOURIER-Verteilung der Verteilung in der Objektebene ergibt. In der Praxis wird folgende Bedingung für den Mindestabstand bei noch brauchbarer Fraunhofernäherung angegeben:

$$z \gg \frac{k}{2} [(x^2 + y^2)_{\text{Max}}]$$

Dies ergäbe für rotes Licht ( $\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ) und einer Öffnungsbreite von 25 mm einen Abstand

$$z \gg 1600 \text{ m}$$

Jedoch kann man diese Schwierigkeiten umgehen und Fraunhofersche Beugung schon bei wesentlich kleinerem  $z$  beobachten, wenn man entweder zum Beobachtungspunkt zusammenlaufende Kugelwellen benutzt oder eine Sammellinse in den Strahlengang bringt, die praktisch das Bild aus dem Unendlichen in ihre hintere Brennebene verlegt.

Wie GOODMAN (1968) zeigte, erhält man für die Amplitudenverteilung  $U'_f$  in der hinteren Brennebene einer Sammellinse bei paraxialer Näherung und einer senkrecht auf einen im Abstand  $d_0$  vor der Linse befindlichen Gegenstand mit der Amplitudentransmission  $t_0$  auftreffenden Welle mit der Amplitude  $A$  bei Vernachlässigung des konstanten Phasenfaktors:

$$(8) \quad U'_f(x'_f, y'_f) = \frac{A}{i\lambda f} \exp\left[i\pi\left(1 - \frac{d_0}{f}\right)(f_x^2 + f_y^2)\right] \iint t_0(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

( $f$  - Brennweite der Linse,  $x'_f, y'_f$  - Koordinaten in der hinteren Brennebene der Linse) Aus dieser Gleichung kann man das praktisch sehr wichtige Resultat ableiten, daß der Phasenfaktor dann verschwindet, wenn sich der Gegenstand genau in der vorderen Brennebene der Linse befindet. In der hinteren Brennebene erhält man dann die FOURIER-Transformation der Objektverteilung, während sich eine Abbildung des Objektes bei dieser Anordnung bekanntlich nicht ergibt. Einen ähnlichen Ausdruck erhält man auch, wenn das Objekt hinter die Linse gestellt wird:

$$(9) \quad U'_f(x'_f, y'_f) = \frac{A}{i\lambda d} \exp\left[i\pi\frac{f}{d}(f_x^2 + f_y^2)\right] \iint t_0(x, y) P\left(x\frac{f}{d}, y\frac{f}{d}\right) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

Dabei ist  $d$  der Abstand zwischen Objekt und hinterer Brennebene der Linse, in der man wieder die FOURIER-Transformation erhält,  $P$  ist eine Pupillenfunktion, die die Apertur der Linse berücksichtigt.

Diese Anordnung erlangt praktische Bedeutung deshalb, weil es hier möglich ist, den Maßstab der FOURIER-Transformation in (vor allem durch die Linsenapertur bestimmten) Grenzen zu verändern. Dies ist oft nützlich bei Raumfrequenzen- oder Raumrichtungsuntersuchungen. Bei Filteranordnungen kann sich jedoch der Phasenfaktor vor dem Integral störend auswirken. Bei der Bestimmung der Feldverteilung in der Bildebene müssen die folgenden zwei Fälle unterschieden werden:

1. Bei Benutzung von Lichtquellen für kohärentes Licht (z. B. Laser) können in die Abbildungsgleichung (1) die komplexen Amplituden eingesetzt werden:

$$U_i(x_i, y_i) = \iint h(x_i, y_i, x, y) U(x, y) dx dy$$

2. Bei Verwendung von nicht kohärentem Licht ist das System linear bezüglich der Intensitäten. Das erfordert die Betragsbildung vom Integrand des Überlagerungsintegrals:

$$I_i(x_i, y_i) = \iint |h(x_i, y_i, x, y)|^2 I(x, y) dx dy$$

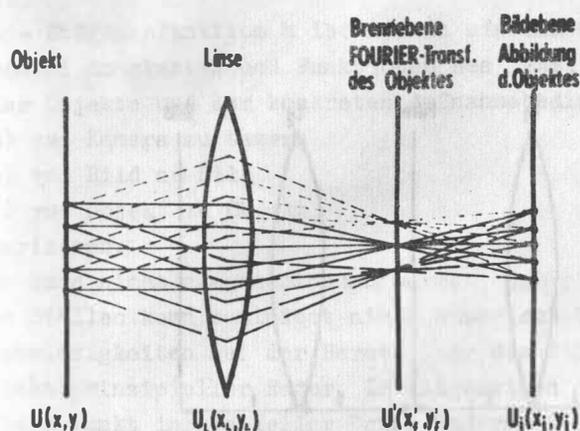


Abb. 1. Entstehung der FOURIER-Transformation und des Bildes bei einer dünnen Sammellinse

### 3. Optische Filterung (Raumfrequenzfilterung)

Unter Raumfrequenzfilterung versteht man jegliche Beeinflussung des Lichtes in der Ebene des FOURIER-Spektrums. Optische Systeme, mit denen man Raumfrequenzfilterung durchführen kann, sind in Abb. 2 dargestellt.

Nach den bisherigen Betrachtungen wäre das System (a) am besten geeignet zur Durchführung einer Raumfrequenzfilterung. Da sich Objekt- und Filterebene jeweils in der vorderen Brennebene der Linsen für die FOURIER-Transformation befinden, treten keine störenden zusätzlichen Phasenfaktoren auf. In der hinteren Brennebene der Linse  $L_2$  liegt dann folgende Intensitätsverteilung vor:

$$I_i(x_i, y_i) = k \left| \iint U(-x, -y) * \tilde{S}[-(x_i-x), -(y_i-y)] dx dy \right|^2$$

$S$  ist dabei die Funktion des komplexen Filters,  $\tilde{S}$  entsprechend die FOURIER-Transformation von  $S$ .

Zum System (b) schreibt GOODMAN (1968), daß dieses zwei für die Praxis wesentliche Nachteile besitzt: Erstens ist der Abstand vom Objekt zur Transformationslinse doppelt so groß. Das zwingt zu einer größeren Linse  $L_2$ , um Störungen durch die Einflüsse der Linsenrandgebiete zu vermeiden. Zweitens ist die Näherung bei der Herleitung, daß die Amplitude in einem bestimmten Punkt der Abbildung nur von den Beiträgen der Punkte eines sehr kleinen Gebietes des Objektes um den der geometrischen Abbildung entsprechenden Punkt herum bestimmt wird, hier nicht in allen Fällen erfüllt. In diesen Fällen müßte ein quadratischer Phasenfaktor zusätzlich berücksichtigt werden.

Das System (c) wurde nach STROKE (1966) bereits von ZERNIKE (1935) beschrieben. Es war damit der erste Raumfrequenzfilteraufbau (allerdings fehlte bei ZERNIKE die Linse  $L_1$ ).

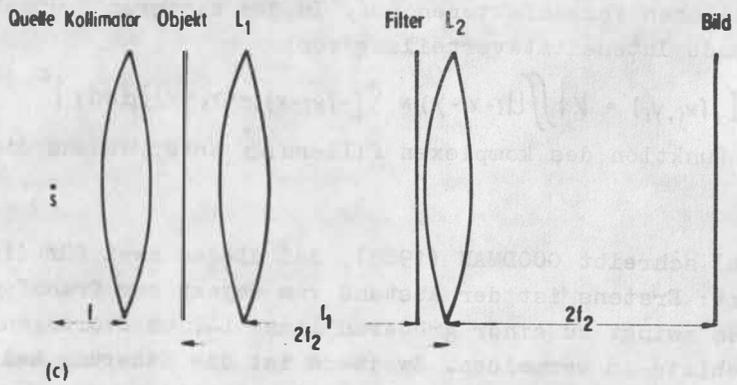
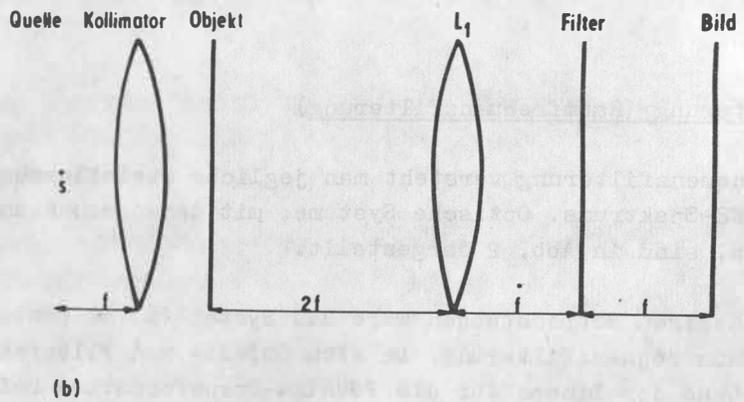
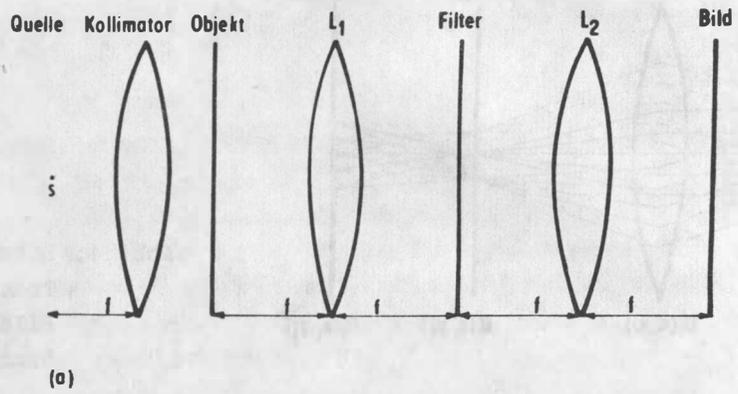


Abb. 2. Optische Systeme zur Raumfrequenzfilterung

Die Hauptschwierigkeiten, die bei optischen Raumfrequenzfilterungen aufgetreten sind:

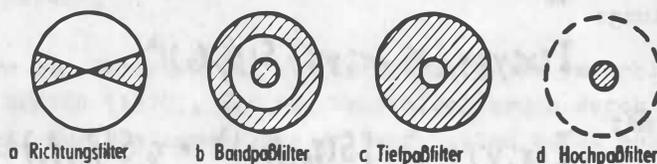
1. Die Störungsfunktion  $h$  ist nur in einfachen Fällen bekannt. Da in dieser Größe sowohl Konstanten und Funktionen des jeweiligen Aufnahmesystems und -materials, der Objekte und der konkreten Aufnahmebedingungen enthalten sind, wird  $h$  also
  - a) von Kamera zu Kamera
  - b) von Bild zu Bild
  - c) von Objekt zu Objekt
 variieren.
2. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß  $h$  an einigen Stellen Null wird. Für diese Stellen kann zumindest nicht numerisch bestimmt werden.
3. Schwierigkeiten bei der Herstellung des Filters. Diese sind jedoch in der Regel nicht prinzipieller Natur. Im allgemeinen muß  $S$  die Amplitude und die Phase in jedem Punkt in spezieller Weise ändern.  $S$  stellt also ein komplexes Filter dar.

Einige Autoren verwenden dazu zwei Filter, wobei eins die Amplitude, das andere die Phase beeinflusst. Holographisch hergestellte Filter sind ebenfalls bekannt geworden. Für einige Aufgaben werden jedoch auch reine Amplitudenfilter, d. h. Filter, die nur die Amplitude beeinflussen, z. B. in Form von Masken, verwendet. Auf diese Weise konnten bereits mit einfachen Mitteln sehr schöne Resultate bei der analogen Bildbearbeitung zur Interpretationserleichterung erzielt werden. Beispiele dafür zeigt u. a. CHEVALIER/FONTANEL, GRAU (1970). Um die Wirkung der Filtermasken besser zu verstehen, ist es günstig, sich diese zunächst mit Hilfe einfacher periodischer Objekte zu veranschaulichen. Durch die FOURIER-Transformation werden offensichtlich bestimmte Ortsfrequenzen  $f_x$  in der  $x$ -Richtung der Objektebene bestimmten Koordinaten  $x_f$  in der Ebene der FOURIER-Transformation durch die Gleichung

$$x_f = A \frac{f_x}{z}$$

zugeordnet, wobei man für das im weiteren hauptsächlich gebrauchte System nach Abb. 2 (a) für  $z$  die Brennweite  $f$  einsetzen kann. Daraus läßt sich zunächst schließen, daß die Richtung des Leistungsspektrums mit der Richtung der Ortsfrequenz des Objektes identisch und damit senkrecht zur Richtung der Strukturen des Objektes ist. Außerdem ist der Abstand der Punkte des Leistungsspektrums der Ortsfrequenz des Objektes umgekehrt proportional. Entsprechende Bilder kann man bei CHEVALIER/FONTANEL, GRAU (1970) sehen (vgl. auch ROSENBERGER 1975).

Es sind folgende einfache Masken als Filter zur Beschränkung des Raumfrequenzspektrums denkbar:



Der schraffierte Teil hat die Amplitudentransmission  $t$  mit  $0 \leq t \leq 1$ .

der weiße Teil, die Amplitudentransmission 1. ROSENBERGER (1975) schreibt dazu, daß sich Hochpaßfilter zur Erhöhung des Bildkontrastes und zur Verbesserung der Kantenschärfe eignen, Tiefpaßfilter zur Unterdrückung von äquidistanten Scan-Linien oder Rasterpunkten. Neben diesen einfachen Filtern gibt es auch Filter mit abgestuften Transmissionsverhalten. Erste Untersuchungen mit Kombinationen aus Absorptions- und Phasenplatten findet man bei MARECHAL/CROCE (1953). Dabei war selbst bei Trennung von Amplituden- und Phasenfilter deren Herstellung noch außerordentlich kompliziert und warf viele technologische Probleme auf. Einen Ausweg zeigte hier erst die Holographie. VANDER LUGT (1964) schlug als erster vor, die Hologrammaufzeichnungsmethoden zur Herstellung komplexer Filter zu nutzen. Damit erhält man Filter, die in der FOURIER-Transformationsebene sowohl die Phase als auch die Amplitude steuern.

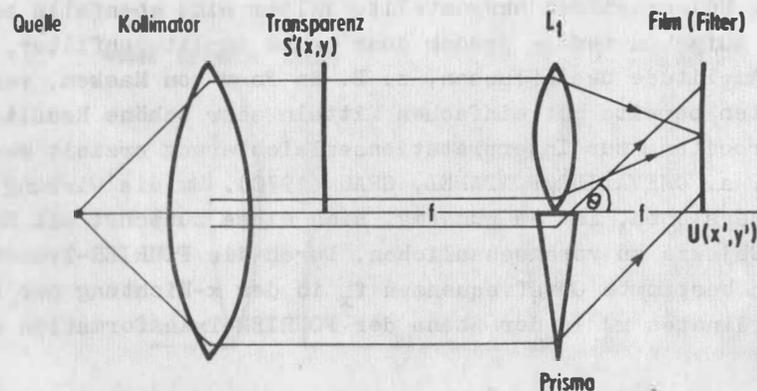


Abb. 3. Aufzeichnung eines Filters nach Vander Lugt

Die Linse  $L_1$  führt eine FOURIER-Transformation der Amplitudenverteilung  $S'(x,y)$  durch und ergibt auf dem Film die Verteilung  $S(f_x, f_y) = \frac{1}{\lambda f} \mathcal{F}[S'(x,y)]$ . Ein Teil des kollimierten Lichtes wird vom Prisma unter dem Winkel  $\theta$  auf Film gelenkt. Die resultierende Intensität ergibt sich aus der Interferenz beider Teilstrahlen. Kann die auf dem Film durch die Referenzwelle hervorgerufene Verteilung des Feldes durch

$$U_r(x'; y') = r_0 \exp[-i 2\pi \alpha y']$$

mit der Raumfrequenz  $\alpha = \frac{1}{\lambda} \sin \theta$  beschrieben werden, so folgt für die resultierende Intensitätsverteilung:

$$I(x'; y') = |U_r(x'; y') + S(f_x, f_y)|^2$$

Das ist identisch mit

$$I(x'; y') = r_0^2 + |S(f_x, f_y)|^2 + r_0 S(f_x, f_y) \exp[i 2\pi \alpha y'] + r_0 S^*(f_x, f_y) \exp[-i 2\pi \alpha y']$$

Der Transmissionskoeffizient des erhaltenen Filters ist der Intensität proportional, wenn die schon im ersten Abschnitt diskutierten Voraussetzungen gelten. Setzt man ein auf diese Weise erhaltenes Filter in einen Versuchsaufbau zur kohärenten Bildbearbeitung ein, und in der Objektebene befindet sich eine Transparenz, deren Transmission durch die Funktion  $I(x,y)$  beschrieben wird, dann fällt auf das Filter eine Amplitudenverteilung gemäß

$$\frac{1}{\lambda f} \tilde{I}(f_x, f_y)$$

Nach anschließender Rücktransformation ist die Amplitudenverteilung in der Bildebene proportional zu folgendem Ausdruck:

$$U_i(x_i, y_i) \sim \tau_0^2 I(x, y) + \frac{1}{\lambda^2 f^2} [\tilde{S}(x', y') * \tilde{S}^*(-x', -y') * I(x, y)] \\ + \frac{\tau_0}{\lambda f} [\tilde{S}(x', y') * I(x, y) * \tilde{d}(x, y + \alpha \lambda f)] \\ + \frac{\tau_0}{\lambda f} [\tilde{S}^*(-x', -y') * I(x, y) * \tilde{d}(x, y - \alpha \lambda f)]$$

Interessant sind hier der dritte und vierte Term. Es gilt:

$$\tilde{S}(x', y') * I(x, y) * \tilde{d}(x, y + \alpha \lambda f) = \\ = \iint \tilde{S}(x - x', y - y' + \alpha \lambda f) I(x, y) dx dy$$

Dieser Term stellt die Faltung von  $\tilde{S}$  und  $I$  dar, die auf der  $y$ -Achse um  $-\alpha \lambda f$  verschoben wurde. Vergleicht man diese Resultate mit Gleichung (4) und (5), so erkennt man, daß unter der Bedingung  $S = [\tilde{h}]^{-1}$  die Entfaltung von  $I$  und  $h$  realisiert wurde. Für den 4. Term findet man, daß dieser die um  $+\alpha \lambda f$  verschobene Kreuzkorrelation darstellt. Vander-Lugt-Filter sind vor allem bei der Korrelationsfilterung und Zeichen-erkennung angewendet worden (z. B. LESSING 1977). Diese Methode kann jedoch auch zur Herstellung von Filtern für Bildverbesserungsaufgaben genutzt werden. Eine andere Möglichkeit zur Herstellung eines Filters, welches die Bedingung der Gleichung (5) realisiert, geht auf STROKE, FURRER, LAMBERTY (1969) zurück:

$$S(f_x, f_y) = \frac{\tilde{h}^*(f_x, f_y)}{|\tilde{h}(f_x, f_y)|^2}$$

Dieses Filter soll in zwei Teilen hergestellt werden. Der  $\tilde{h}^*(f_x, f_y)$ -Teil wird ähnlich wie ein Vander-Lugt-Filter durch ein holographisches Verfahren hergestellt, für die Herstellung des  $|\tilde{h}|^2$ -Teiles gibt STROKE in seinem Artikel ein Verfahren an (vor allem bezüglich der photochemischen Parameter). Mit einem Filter von solchem Typ ist es ebenfalls möglich, sowohl den Realteil als auch den Imaginärteil der für die Fehler verantwortlichen PZF zu korrigieren. STROKE (1969) verwendet solche Filter mit Erfolg zur Entzerrung von "verwackelten" (motion-blurred) Bildern, die im Laboratorium künstlich hergestellt werden.

Versuche mit Filtern zur Verbesserung von im Laboratorium verschlechterten Bildern beschreibt auch J. L. HORNER (1970), der die Verschlechterung durch künstlich erzeugte Turbulenz realisiert. Zur Bestimmung der Filterfunktion kommt es wieder auf die möglichst genaue Kenntnis der PZF an. HORNER versucht dies experimentell zu lösen. Er mißt dazu den Betrag der Übertragungsfunktion, d. h. den Betrag der FOURIER-Transformierten der PZF für verschiedene Heizstufen (entsprechend verschiedenen Turbulenzstärken) aus. Damit beschränkt sich HORNER von vornherein auf den Realteil.

Es wird dann natürlich auch kein komplexes Filter benötigt, sondern ein reines Amplitudenfilter, dessen Herstellung wesentlich einfacher zu beherrschen ist. Im Hinblick auf die Anwendung der Filterung bei Luftaufnahmen der Erdoberfläche scheint dies eine vertretbare Vereinfachung, da solche Aufnahmen mit inkohärentem Licht aufgenommen werden und somit keine Beeinflussung durch Phasenverzerrung möglich ist. Die von HORNER gemessene Übertragungsfunktion fällt mit steigenden Ortsfrequenzen exponentiell ab. Bei vielen Störungen wird ein ähnliches Verhalten feststellbar sein, hohe Ortsfrequenzen werden weniger gut übertragen. (Diese Aussagen gelten somit nicht nur für die Filterung von Turbulenzen, sondern beziehen sich allgemein auf Filterungen zur Bildverbesserung). Damit stellen die Filter von HORNER ihrem Wesen nach Hochpässe dar. Durch solche Hochpässe wird aber besonders auch das Rauschen im Bild mit verstärkt. HORNER sucht deshalb nach einer Methode, um gleichzeitig mit der Bildverbesserung auch das Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) zu erhöhen oder wenigstens zu erhalten. Dazu schlägt er unter Bezug auf DAVENPORT, ROOT (1958) und SLEPIAN (1967) als optimale Filter einen durch Verwendung des Kriteriums des kleinsten quadratischen Fehlers erhaltenen Ausdruck folgender Art vor:

$$S(f_x, f_y) = \frac{1}{\tilde{h}(f_x, f_y)} \cdot \frac{\phi_o(f_x, f_y)/\phi_n(f_x, f_y)}{[\phi_o(f_x, f_y)/\phi_n(f_x, f_y)] + |\tilde{h}(f_x, f_y)|^{-2}}$$

Dabei ist  $\phi_o(f_x, f_y)/\phi_n(f_x, f_y)$  das SRV. Dieses Filter stellt eine Kombination aus einem Filter zur Kompensation der PZF und einem modifizierten rauschabhängigen Tiefpaß dar. HORNER versuchte, außerdem noch ein frequenzabhängiges SRV zu berücksichtigen; die sich daraus ergebenden Unterschiede waren jedoch relativ unbedeutend.

Mit der Wiederherstellung von durch Turbulenz gestörten Bildern beschäftigt sich auch B. J. McGLAMERY (1967). Die Turbulenz wird von ihm ebenfalls künstlich im Labor erzeugt. Im Unterschied zu einem Artikel von J. L. HARRIS (1966), der durch lange Belichtungszeiten eine gewisse zeitliche Mittelung der Turbulenz erreicht und diese dann mit Hilfe eines einfachen Modells durch eine analytische Funktion und empirisch ermittelte Konstanten ausdrücken kann, untersucht McGLAMERY sowohl lange Belichtungszeiten (1 min) als auch kurze Belichtungszeiten (5 msec). Die Voraussetzung für die Bearbeitung solcher Bilder, bei denen die PZF stark zeitabhängig ist (bei 5 msec Belichtungszeit), besteht in der Bestimmung der im Aufnahmement aktuellen PZF. McGLAMERY löst dieses Problem, indem er zusätzlich zum eigentlichen (unbekannten) Objekt noch ein bekanntes Objekt mitphotographiert, von dem das Idealbild bekannt ist. Die momentane PZF erhält er dann durch Division des aufgenommenen gestörten Bildes des bekannten Objektes durch das bereits vorher bestimmte Idealbild ohne Turbulenz. Bei McGLAMERY ist das "unbekannte" Objekt die Ziffer 5, das bekannte ist ein Punkt. McGLAMERY verzichtet auf einen optischen Aufbau zur Bildverbesserung völlig und führt alle auftretenden Transformationen digital in einem Computer durch. Auch andere Autoren (z. B. CARTER 1973) umgehen die Schwierigkeiten bei der Filterherstellung und modellieren den gesamten Prozeß auf einem Digitalrechner. McGLAMERY geht in seiner Arbeit auch auf die Anwendbarkeit der im Laborversuch erhaltenen Resultate auf natürliche Turbulenzen der Atmosphäre ein und stellt dazu fest, daß einige notwendige Voraussetzungen (z. B. Verschiebungsinvarianz) bei natürlicher Turbulenz nicht in jedem Falle erfüllt sind. Aus diesem Grunde können die Ergebnisse der Versuche mit unter Laborbedingungen erzeugten Turbulenzen auch nicht unmittelbar auf natürliche Turbulenzen

übertragen werden. Dazu wären gründliche Untersuchungen über natürliche Turbulenzen nötig. Mit der physikalischen Realisierbarkeit von Bildverbesserungen, speziell der dazu nötigen Filter, beschäftigte sich auch F. T. S. Yu (1969). Er geht von zwei grundsätzlichen Möglichkeiten aus:

1. Bildverbesserung durch Eliminierung der Störsignale
2. Bildverbesserung durch Überlagerung mit verlorengegangenen Signalen

Vom Standpunkt der Informationstheorie aus unterscheiden sich beide nur durch das Rauschverhalten, Unterschiede bestehen jedoch auch in energetischer Hinsicht. Yu zeigt in seinem Artikel, daß die zweite Möglichkeit physikalisch unrealisierbar ist. Mit der ersten Methode ist eine Bildverbesserung prinzipiell möglich. Yu weist vom Standpunkt der Informationstheorie darauf hin, daß es durch eine Bildbearbeitung nicht möglich ist, den Informationsgehalt insgesamt zu erhöhen. Alle Informationen waren entweder schon im Originalbild enthalten oder sind in Form von Kenntnis der Übertragungsfunktion (und damit im Raumfilter) vorher einzubringen. Zur Realisierbarkeit der Filter schreibt Yu, daß bei theoretisch gewonnenen Filterfunktionen singuläre Punkte auftreten können. In diesen Fällen kann das Filter nur hergestellt werden, wenn eine sinnvolle Näherung gefunden wird. Einen neuen Weg zur Realisierung eines Raumfilters gingen LOHMANN, PARIS (1968). Sie benutzten die Möglichkeit der Herstellung digitaler Hologramme mit einem computergesteuerten Plotter. Nach der Bestimmung der Raumfilterfunktion  $S(f_x, f_y)$  wird daraus  $S(n\sigma f_x, m\sigma f_y)$  auf einem Netz von Stützpunkten berechnet. Daraufhin wird  $S(n\sigma f_x, m\sigma f_y)$  so umgeformt, daß jedem Stützpunkt entweder der Wert 0 oder 1 zukommt. Dieses Filter wird dann photographisch verkleinert. Daß ein solches Filter auch die Phase steuern kann, zeigt LOHMANN an Hand folgender Überlegung:

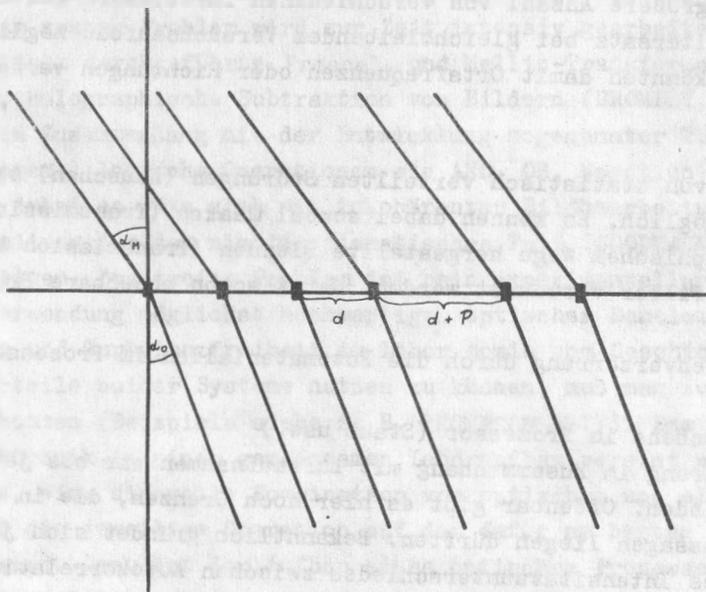


Abb. 4. Zur Phasensteuerung binärer Hologramme

Die m-te Beugungsordnung wird durch einen Wegunterschied von  $M\lambda$  zwischen benachbarten Strahlen charakterisiert (Abb. 4). Für das fehlerfrei Gitter (linke Seite) folgt also

$$S = (\sin \alpha_m - \sin \alpha_0) d$$

Die Wegdifferenz der Strahlen, die an der Störungsstelle die benachbarte Spalte passieren, ist folglich

$$S' = (\sin \alpha_m - \sin \alpha_0) (d + P)$$

Damit wird die ebene Welle auf der rechten (gestörten) Gitterseite um  $\Delta S$  mit  $\Delta S = S' - S$

und somit

$$\Delta S = \frac{P \cdot S}{d} = \frac{P \cdot M \cdot \lambda}{d}$$

verzögert. Daraus erhält man den Phasenunterschied, welcher unabhängig vom Einfallswinkel  $\alpha_0$  ist, mit

$$\varphi = 2\pi \frac{P \cdot M}{d}$$

Die Amplitude des Lichtes kann durch die Wahl der Breite der Gitterspalte oder durch Aufteilung in einzelne Punkte mit einer der jeweils gewünschten Amplitude proportionalen Punkthäufung erfolgen. LOHMANN gibt in seinem Artikel einige Beispiele für Bildbearbeitungen mit solcherweise hergestellten Filtern an. Verfahren zur Ausschaltung von Störungen durch holografische Subtraktion beschreiben BROMLEY, BYANT, TOMPSON u. a. (1971). Diese Verfahren sind dann anwendbar, wenn es gelingt, von der zu eliminierenden Störung ein Hologramm anzufertigen. Bei Luftaufnahmen ist das in der Regel nicht der Fall. Eine breite Anwendung haben optische Verfahren auch bei der Bildbearbeitung von elektronenmikroskopischen Aufnahmen gefunden. Beispiele hierfür findet man bei KUBLER, HAHN, SEREDINSKY (1978).

#### 4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Raumrichtungs-, Hochpaß-, Tiefpaß- und Bandpaßfilterungen sind mit relativ einfachen Mitteln für eine größere Anzahl von verschiedenen Luftbildern (etwa gleichen Maßstabs) mit einem Filtersatz bei gleichbleibendem Versuchsaufbau möglich. In Verbindung mit dem MSP-4 könnten damit Ortsfrequenzen oder Richtungen verschiedenfarbig hervorgehoben werden.

Eine Unterdrückung von statistisch verteilten Störungen (Rauschen) scheint bis zu einem gewissen Grade möglich. Es können dabei sowohl Masken (Transmission 0 oder 1) oder auch auf photographischem Wege hergestellte Blenden (Transmission kontinuierlich zwischen 0 und 1) als Filter verwendet werden. Jetzt schon absehbare Probleme werden dabei sein:

- Reduzierung der Phasenverzerrung durch die Fotomaterialien im Prozessor (Objekte und Filter)
- Reduzierung des Rauschens im Prozessor (Staub usw.)

Über Korrelationsfilterung im Zusammenhang mit Luftaufnahmen war bis jetzt in der Literatur nichts zu finden. Offenbar gibt es hier noch Grenzen, die in der Sicherheit der gewonnenen Aussagen liegen dürften. Bekanntlich gründet sich ja das Verfahren auf der Messung des Intensitätsunterschiedes zwischen Autokorrelation und Kreuzkorrelation. Damit sind hier prinzipiell nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich, da die Größe des Intensitätsunterschiedes vom Grad der Unterschiedlichkeit der Objekte abhängt. Nach LOHMANN, BROWN (1966) beträgt z. B. die Intensität der B - E Kreuz-

korrelation 81 % der E - E Autokorrelation. Da gerade auf Luftbildern die Unterschiedlichkeit der Objekte oft nur sehr gering ist, erscheint die Arbeit hier wenig erfolgversprechend. Bildverbesserung durch Herausfiltern von Störungen, die durch systematische Fehler (z. B. Beugung am Kameraobjektiv) entstanden sind, ist für eine große Anzahl von Luftaufnahmen, die diesen Fehler enthalten (d. h. für den Fall aller Aufnahmen, die mit diesem speziellen Kameraobjektiv gemacht wurden) möglich.

Eine Entstörung von Bildern durch spezielle komplexe Filter ist möglich. Das jeweilige Filter eignet sich dann nur für das entsprechende Bild oder den Bildteil. Damit wird der Aufwand hierfür hoch, da für jedes Bild ein neues Filter hergestellt werden muß. Die hierbei zu erwartenden Hauptprobleme sind neben dem schon genannten Rauschen:

- die möglichst genaue Bestimmung der Störungsfunktion. Diese wird von sehr vielen Faktoren abhängen. Es kommt darauf an, den jeweils bestimmenden herauszufinden und mathematisch zu formulieren bzw. photographisch darzustellen,
- die Bestimmung der Filterfunktion. Es kommt hier darauf an, die singulären Punkte zu eliminieren bzw. geeignete Näherungen zu finden,
- die Herstellung des Filters.

Es gibt eine Reihe von Eigenschaften optischer Systeme, die von elektronischen Geräten - trotz der stürmischen Entwicklung der Mikroelektronik - nicht erreicht werden können. Dazu gehört in erster Linie die Eigenschaft, parallel zu arbeiten, was mit den heute zur Verfügung stehenden Optiken prinzipiell die Verarbeitung von  $10^6$  -  $10^7$  bit pro Sekunde ermöglicht. Weiterhin die Möglichkeit, relativ komplizierte Operationen (FOURIER-Transformation, Faltung, Korrelation) ohne nennenswerte Erhöhung des Aufwandes an Rechenzeit und des Schwierigkeitsgrades der Eingaben durchzuführen, die Möglichkeit der analogen Bearbeitung sowie die Möglichkeit der Echtzeitarbeit. Nachteile sind die geringe Variationsbreite der möglichen Operationen und die etwas höhere Fehlerquote. Am ersten Problem wird zur Zeit intensiv gearbeitet, so sind z. B. Artikel über optisch durchgeführte Fresnel- und Mellin-Transformationen (CASASENT, PSALTIS 1977), holographische Subtraktion von Bildern (BROMLEY, BYANT, TOMPSON u. a. 1971), sowie im Zusammenhang mit der Entwicklung sogenannter TSE -Computer (optoelektronischer Systeme) logische Operationen wie AND, OR, Negation u. ä. erschienen. Daneben gibt es Arbeiten, die sich mit inkohärenter Bildbearbeitung (LOHMANN 1977) sowie Bildbearbeitung für den nichtisoplanatischen Fall (GOODMANN 1977; MENZEL, PIETZSCH 1976) beschäftigen. Das zweite Problem ist rein experimenteller Natur, hier hängt alles von der Verwendung möglichst hochwertiger optischer Bauelemente, der Beachtung von Sauberkeit und Turbulenzfreiheit im Labor sowie vom Geschick des Experimentators ab. Um die Vorteile beider Systeme nutzen zu können, muß man zur Einführung von Hybridsystemen kommen (Beispiele siehe z. B. THOMPSON 1977). Das muß nicht bedeuten, daß Optik und Elektronik in einem gemeinsamen Laboraufbau vereint werden sollen. Es kommt aber darauf an, eine sinnvolle Kombination von optischen und elektronischen Methoden zu finden, so daß die jeweilige Operation auf dem dafür am besten geeigneten Prozessor durchgeführt wird. Dazu ist der Aufbau eines optischen Prozessors als Standardgerät für die routinemäßige Bildbearbeitung nötig. Ein Beispiel eines realisierten optischen Prozessors findet man bei BOSECK, GUTJAHR, LESSING (1979). Daneben müssen grundlegende experimentelle Untersuchungen über die Anwendbarkeit der diskutierten Methoden als Hilfsmittel bei der Vorverarbeitung von Luftbildern, beispielsweise für geologische oder

maritime Fragestellungen, zur Störungseliminierung oder photometrischen Korrektur vorgenommen werden, insbesondere auch die Auswahl bzw. Entwicklung spezieller Methoden, die sich für Multispektralaufnahmen eignen.

### Literatur

- ANDREWS, H. C.: Verarbeitung von Bildinformationen mit Digitalrechnern.  
Endeavour, Band XXXI, Nr. 113 (1972), S. 88
- BOSECK, S.; GUTJAHR, H. H.; LESSING, R.: Bildstrukturanalyse mit Hilfe der lichtoptischen Diffraktion (LOD) - eine Einführung.  
Feinwerktechnik Meßtechnik 87 (1979) 2, S. 69
- BRACEWELL, R. N.: The Fourier Transform and its Applications.  
New York, McGraw-Hill. 1965
- BROMLEY, BYANT, TOMPSON u. a.: Holographic Subtraction.  
Appl. Opt. 10 (1971) 1, S. 174
- CARTER, W. H.: Partial Restoration of Images from Aerial Photographs Using Experimentally Derived Fourier Filters.  
Photographic Science and Engineering, 17 (1973) 1, S. 50
- CASASENT, D.: New Optical Transforms for Pattern Recognition.  
Proc IEEE 65 (1977) 1, S. 77
- CHEVALIER, R.; FONTANEL, A.; GRAU, G. u. a.: Application of Optical Filtering to the Study of Aerial Photographs.  
Photogrammetria 26 (1970) S. 17
- DAVENPORT, W. B.; ROOT, W. L.: Introduction to the Theory of Random Signals and Noise.  
New York: McGraw-Hill 1958
- McGLAKERY, B. L.: Restoration of Turbulence-Degradet Images.  
JOSA 57 (1967) 3, S. 293
- GOODMANN, J. W.: Introduction to Fourier-Optics.  
New York: McGraw-Hill. 1968
- GOODMANN, J. W.: Operations Achievable with coherent optical Information Processing Systems.  
Proc. IEEE 65 (1977) 1, S. 29
- HARRIS, J. L.: Image Evaluation and Restoration.  
JOSA 56 (1966) 5, S. 569
- HORNER, J. H.: Optical Restoration of Images Blurred by Atmospheric Turbulence Using Optimum Filter Theory.  
Appl. Opt. 2 (1970) 1, S. 167
- KÜBLER, O.; HAHN, M.; SEREDYNSKI, J.: Optical and Digital Spatial Frequency Filtering of Electron Micrographs I, II.  
Optik 51 (1978) 2, S. 171; 3, S. 235
- LESSING, R.: Anwendung holografischer Filter und Zeichenerkennung.  
Feinwerktechnik und Meßtechnik 85 (1977) 7, S. 326
- LOHMANN, A. W.; BROWN, B. R.: Complex Spatial Filtering with Binary Masks.  
Appl. Opt. 5 (1966), S. 967
- LOHMANN, A. W.; PARIS, D. P.: Computer Generated Spatial Filters for Optical Data Processing.  
Appl. Opt. 7 (1968) 4, S. 651
- LOHMANN, A. W.: Incoherent Optical Processing of Complex Data.  
Appl. Opt. 16 (1977) 2, S. 261

- MARECHAL, A.; CROCE, P.: Un filtre de frequences spatiales pour l'amelioration du contraste des images optiques.  
Compt. Rend. Acad. Su. Paris 237 (1953) S. 607
- MENZEL, E.; PIETZSCH, K.: Space Variant Optical Transfer with a Fourier Filter in Extrapupilar Position.  
Optik 46 (1976) 4, S. 451
- ROSENBERGER, D.: Technische Anwendung des Lasers.  
Berlin, New York Springer-Verl. 1975
- SLEPIAN, D. W.: Linear-Least-Squares Filtering of Distorted Images.  
JOSA 57 (1977), 7, S. 918
- STROKE, G. W.: An Introduction to Coherent Optics and Holography.  
New York, London: Academic Press 1966
- STROKE, G. W.; FURRER, F.; LAMBERTY, D. R.: Deblurring of Motion-Blurred Photographs Using Extended-Range Holographic Fourier-Transform Division.  
Opt. Comm. 1 (1969) 3, S. 141
- THOMPSON, B. J.: Hybrid Processing System - An Assessment.  
Proc. IEEE 65 (1977) 1, S. 62
- VANDER LUGT, A.: Signal Detection by Complex Spatial Filtering.  
IEEE Trans. Inf. Theory, IT-10 (1964) S. 139
- YU, F. T. S.: Image Restoration, Uncertainty and Information.  
Appl. Opt. 8 (1969) 1, S. 53
- ZERNIKE, F.: Eine Methode des Phasenkontrastes in der Mikroskopie.  
Zs. Techn. Phys. 16 (1935), S. 454