

---

Heinz Kautzleben

## Die Lithosphäre in Mittel- und Osteuropa\*

### 1. Vorbemerkungen

Im Vortrag wurde über die Ergebnisse der gemeinsamen Arbeiten berichtet, die von einer großen Zahl von Geophysikern und Geologen in den ehemaligen sozialistischen Ländern in Mittel- und Osteuropa im Verlauf von über drei Jahrzehnten im Rahmen der Problem-Kommission KAPG der Akademien der Wissenschaften dieser Länder durchgeführt wurden. Anlaß des Vortrages war der Abschluß der Dokumentation der Ergebnisse dieser Arbeiten in Form einer achtbändigen Monographie mit dem gemeinsamen Titel „Die Lithosphäre in Mittel- und Osteuropa“.

Die Zusammenstellung und die Publikation in russischer Sprache erfolgten unter Verantwortung eines internationalen Redaktionskollegiums, das von A. V. Tschekunov und V. B. Sollogub geleitet wurde (und dem der Vortragende in der letzten Zeit angehörte), durch das Institut für Geophysik der Akademie der Wissenschaften der Ukraine. Dieses Institut war Initiator und über die ganze Zeit Organisator und ständige Triebkraft dieses außerordentlich umfangreichen und aufwendigen Projektes, koordinierte die Zusammenarbeit der unmittelbar am Projekt Beteiligten und sorgte für die Verbindung der gemeinsamen Arbeiten im Rahmen der KAPG mit entsprechenden Arbeiten, die im Gesamtgebiet der ehemaligen UdSSR unter Verantwortung des Ministeriums für Geologie der UdSSR durchgeführt wurden. Die Mitarbeiter des Institutes leisteten vielfältige eigene experimentelle und theoretische Beiträge.

Aus der ehemaligen DDR waren an diesem Projekt der KAPG Institute der Akademie der Wissenschaften und der Hochschulen beteiligt. Sie stützten sich auf Arbeiten in der starken geologischen Industrie der DDR,

---

\* (Vortrag in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät e. V. in Berlin am 19. Dezember 1996)

speziell im Kombinat Erdöl-Erdgas Gommern und im Zentralen Geologischen Institut. Die Abkürzung KAPG steht für den etwas umständlichen Namen „Kommission für die multilaterale Zusammenarbeit der Akademien der Wissenschaften der sozialistischen Länder in Mittel- und Osteuropa zum komplexen Problem 'Planetare geophysikalische Forschungen'“. Diese KAPG wurde 1966 in Leipzig gebildet durch Umwandlung einer international zusammengesetzten Kommission, die bereits 1955 für die Zusammenarbeit im Rahmen der europäisch-asiatischen Region im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 gegründet worden war und danach auch die Zusammenarbeit der sozialistischen Länder in Mittel- und Osteuropa in den folgenden internationalen geophysikalischen Programmen koordiniert hatte. Träger der KAPG waren die Akademien der Wissenschaften. An den von ihr koordinierten Arbeiten beteiligten sich die entsprechenden Institute der Akademien, die interessierten Institute der Universitäten und Hochschulen sowie Forschungseinrichtungen der relevanten Dienste der sozialistischen Länder; in jedem Jahr insgesamt rund 200 wissenschaftliche Einrichtungen; als Mitwirkende waren jeweils rund 2.000 Wissenschaftler namentlich benannt. Die KAPG koordinierte die Auswahl und Formulierung, Finanzierung und Durchführung von gemeinsamen Forschungsarbeiten durch Einrichtungen aus mehreren Teilnehmerländern sowie den allgemeinen wissenschaftlichen Erfahrungsaustausch. Sie konnte auch genutzt werden, um die Mitwirkung der Einrichtungen aus den sozialistischen Ländern in den weltweiten internationalen Organisationen und Programmen abzustimmen. Die KAPG hat 1992 offiziell ihre Tätigkeit eingestellt. Die DDR hatte bereits 1990 ihre Mitwirkung beendet. Eine multilaterale regionale Zusammenarbeit der geophysikalischen Forschungseinrichtungen in den Nachfolgestaaten der sozialistischen Länder gibt es seitdem praktisch nicht mehr.

Weltweite internationale Programme zu Untersuchungen der Lithosphäre gibt es seit etwa 1960. Sie werden von der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) und der Internationalen Union für Geologische Wissenschaften (IUGS) sowie der Inter-Unions-Kommission für Lithosphäre betreut. Ähnliche Projekte wie in den ehemaligen sozialistischen Ländern wurden und werden in Nordamerika und (West-)Europa bearbeitet.

Die Arbeiten am KAPG-Projekt „Lithosphäre in Mittel- und Osteuro-

pa“ betreffen die Untersuchung einer konkreten regionalen geophysikalisch-geologischen Situation mit Hilfe allgemein gültiger Begriffe, Gesetzmäßigkeiten und Methoden. Lithosphäre bedeutet Gesteinshülle der Erde. Das ist ein alter Arbeitsbegriff der Geologie. Quantitative Angaben zu ihrer Struktur liefert erst in jüngerer Zeit die Geophysik. Im Laufe der Arbeiten entwickelte sich die Synthese von Geologie und Geophysik. Das Arbeitsgebiet der KAPG umfaßte die Osteuropäische Tafel, den alten Kern des europäischen Kontinents, und ihre Umrandung im Westen und Süden. Die Dokumentation der Arbeitsergebnisse folgte dem Ablauf der Arbeiten und dem Fortschritt der Erkenntnisse. Sie umfaßt: a) Zusammenstellung der Daten und faktischen Ergebnisse für neun Geotraversen, die vor allem den Randbereich und die Teile der Tafel im Westen und Süden überdecken, b) Verallgemeinerung der Daten mit Ausarbeitung der Methodik und Zusammenstellung von Modellen für die Lithosphäre und die Tektonosphäre, speziell im Arbeitsgebiet, c) auf Grund der neuen Erkenntnisse aktualisierte Darstellung der geologisch-geophysikalischen Situation, insbesondere in der Umrandung der Osteuropäischen Tafel im Westen und Süden.

Im Vortrag wurde wegen der Fülle des Materials nur eine sehr begrenzte Auswahl aus den Ergebnissen, in gedrängter Form vorgestellt und die wissenschaftliche Bedeutung der Arbeiten angedeutet. Hohe Anerkennung verdient die große wissenschaftsorganisatorische Leistung, die bleibende Voraussetzungen für die weitere wissenschaftliche Analyse und die theoretische Verallgemeinerung und für künftige Untersuchungen geschaffen hat. Sie dürfen nicht verloren gehen und auch nicht vergessen werden.

Die nunmehr vorliegende geschlossene Übersicht über die Arbeiten zu einem derart umfangreichen Projekt im Verlaufe von über drei Jahrzehnten gab Anlaß und Gelegenheit, über einige grundsätzliche, methodologische Fragen der Geophysik und ihrer Entwicklung nachzudenken. Sie sollen hier nur angedeutet werden. Es ist nicht Übertrieben, von einem Umbruch in der Geophysik in diesem Zeitraum zu sprechen. Zum anderen haben die Arbeiten zum Projekt „Lithosphäre in Mittel- und Osteuropa“ es erfordert, sich mit den zur jeweiligen Zeit als gesichert betrachteten allgemeinen Vorstellungen über die Struktur und Dynamik des Erdinnern auseinanderzusetzen und sie teilweise neu zu fassen. Das war bei der Abfassung des Vortrages ebenfalls zu beachten.

## 2. Zum Ablauf der Arbeiten

Die Arbeiten zur Erforschung der Lithosphäre im Rahmen der KAPG verliefen in mehreren Etappen, in denen die wissenschaftliche Zielstellung mit den wachsenden methodischen Möglichkeiten und der fortschreitenden Erkenntnis allmählich erweitert wurde, wobei dafür zu sorgen war, daß die früheren, mit großen Aufwendungen gewonnenen Daten nicht wertlos wurden.

1. Etappe: Beginn mit seismischen Untersuchungen zum Tiefenbau der Erdkruste. Im September 1963 beschloß die 6. Konferenz der Karpaten-Balkan-Geologischen Assoziation (KBGA) die planmäßige Untersuchung der Erdkruste in den beteiligten Ländern mit seismischen Tiefensonierungen. Sie wurden im Sommer 1964 begonnen. Im August 1966 wurden die Erstreckung dieser Untersuchungen auf das Gebiet der an der KAPG beteiligten Länder beschlossen. Damit war die leistungsfähige Basis für die laufende Koordinierung und wissenschaftliche Leitung geschaffen. Noch 1966 beschloß die Europäische Seismologische Kommission, die Beteiligung aus weiteren europäischen Ländern zu erreichen. Hauptziel dieser Arbeiten war die Schaffung eines Netzes von miteinander verknüpften Profilen der seismischen Tiefensonierung und die Ableitung eines seismischen Modells der Erdkruste aus den Ergebnissen der Tiefensonierung. Die Dokumentation der ersten Ergebnisse erfolgte auf einer Konferenz im November 1969 in Freiberg (Sa.) und 1971 in der Monographie „Bau der Erdkruste in Mittel- und Osteuropa (nach den Ergebnissen der Explosionsseismologie)“.

2. Etappe: Erweiterung der wissenschaftlichen Zielstellung in zweifacher Hinsicht – bei den seismischen Tiefensonierungen Erreichen größerer Tiefen bis in den oberen Erdmantel hinein und bei der Interpretation der seismischen Daten Einbeziehung der Daten von weiteren geophysikalischen Methoden. Die Dokumentation der damit erreichten Ergebnisse erfolgte in den beiden Monographien „Bau der Kruste und des oberen Mantels der Erde in Mittel- und Osteuropa“ (Kiew, 1978) und „Struktur der Erdkruste in Mittel- und Osteuropa nach den Daten der geophysikalischen Untersuchungen“ (Kiew, 1980).

3. Etappe: Weitere, wesentliche Erweiterung der Zielstellung ab Ende der siebziger Jahre – Übergang von komplexen geophysikalischen Model-

len (Kruste-Mantel) auf komplexe geologisch-geophysikalische Modelle (Lithosphäre-Asthenosphäre), Umwandlung bzw. Eingliederung der tiefenseismischen Profile in Geotraversen und Neuanlage solcher Profile. Das langfristige Untersuchungsprogramm dafür wurde von der KAPG im April 1985 und von der KBGA im September 1985 beschlossen. Die ersten umfangreichen Ergebnisse lagen Ende der achtziger und zu Beginn der neunziger Jahre vor. Sie wurden auf mehreren Konferenzen vorgetragen, auch noch nach Einstellung der Tätigkeit der KAPG weiter bearbeitet und dann durch das Institut für Geophysik der AdW der Ukraine veröffentlicht.

Die Dokumentation der Gesamtergebnisse erfolgte (in russischer Sprache in Kiew) in der Monographie mit dem gemeinsamen Titel „Die Lithosphäre in Mittel- und Osteuropa“ und den 8 Teilbänden „Geotraversen I, II und V“ (186 Seiten, 1987), „Geotraversen IV, VI und VIII“ (172 Seiten, 1988), „Geodynamik“ (168 Seiten, 1988), „Osteuropäische Tafel“ (188 Seiten, 1989), „Geotraversen III, VII und IX“ (160 Seiten, 1993), „Methodik und Ergebnisse der Komplexinterpretation“ (250 Seiten, 1992), „Verallgemeinerung der Forschungsergebnisse“ (259 Seiten, 1993), „Junge Tafeln und alpidischer Faltungsgürtel“ (332 Seiten, 1994). Die Originaldaten blieben im Besitz der jeweiligen Autoren bzw. der Institutionen, die die Messungen durchgeführt hatten. Wie schon eingangs erwähnt wurde, vermittelte das Institut in Kiew die Verbindung der Arbeiten zum Projekt der KAPG mit dem entsprechenden Programm des Ministeriums für Geologie der UdSSR zur Untersuchung des Tiefenbaus der Kruste und des oberen Mantels der Erde im gesamten Territorium der UdSSR. Diese Untersuchungen wurden in den fünfziger Jahren mit seismischen Tiefensondierungen und parametrischen Bohrungen begonnen. Ab den siebziger Jahren erfolgte im Gesamtgebiet der UdSSR die zielgerichtete Entwicklung der regionalen Tiefenuntersuchungen der Kruste und zunehmend des oberen Mantels der Erde mit seismischen Tiefensondierungen auf relativ kurzen Profilen (wenige 100 km, Gesamtlänge über 25 Tausend km) und auf sehr langen Profilen (mit nuklearen Sprengungen) sowie mit tiefen und übertiefen Bohrungen (6 km und mehr). 1970 wurde die übertiefe Bohrung auf der Halbinsel Kola begonnen, die 1979 zur tiefsten Bohrung der Welt wurde und es mit 12.261 m bis heute noch ist. Ab 1980 begann die Realisierung des „Systems der regionalen Untersuchung der Kruste

und des oberen Mantels der Erde im Territorium der UdSSR“. Das System umfaßt 13 tiefe und übertiefe Bohrungen (davon 10 im Territorium der Russischen Föderation) und ein Netz von tiefenseismischen Profilen 1. Ordnung mit den Bohrpunkten als Netzknoten flächendeckend über das gesamte Gebiet der UdSSR. Das Programm war auf die Lösung fundamentaler Fragen der Geologie und Geophysik ausgelegt und mit wichtigen angewandten Problemen (Erdöl/Erdgas, Minerogenie, Erdbebengefährdung) verbunden. Die Weiterführung der Arbeiten nach dem Zerfall der UdSSR ist nicht gesichert.

### 3. Zielstellung und Methodik

Die generelle Zielstellung der Arbeiten – Erkundung des gegenwärtigen (dreidimensionalen) Baus der äußeren Schichten des Erdkörpers zur Aufklärung der Beziehungen des Baus im (tieferen) Untergrund mit der Entstehung und Entwicklung der an der Erdoberfläche anstehenden geologischen Bildungen (in Zeitmaßstäben zwischen 1 Million und 1 Milliarde Jahren) – ist letztlich ein Anliegen der Geologie. Dazu werden quantitative Daten bis zur Untergrenze der Tektonosphäre, vermutlich bis zu Tiefen von rund 500–700 km benötigt. Über geeignete Methoden und Hilfsmittel verfügt heute allein die Geophysik. Dabei darf nicht der riesige Aufwand übersehen werden, der für die Beschaffung ausreichend flächendeckender Meßdaten aufgebracht werden muß. Aus inhaltlichen Gründen, aber auch wegen der Minimierung des Aufwandes wird die Synthese von Geophysik und Geologie gefordert. Wege dahin sind: Anlage der geophysikalischen Messungen nach geologischen Aspekten (Profile, Geotraversen); Übergang von der stochastischen Korrelation der Beobachtungen zum Verständnis der Phänomene auf Grund erkannter allgemein gültiger Gesetze; Entwicklung und Nutzung geologisch-geophysikalischer Modelle. Ein wesentliches Element der Synthese ist heute die Geodynamik.

**3.1 Die Geophysik** (Physik des Erdkörpers) mißt die geophysikalischen Felder an der Erdoberfläche mit der darin enthaltenen Fernwirkung der unterirdischen Objekte/Prozesse und gewinnt daraus durch Lösung von inversen Aufgaben quantitative Werte zur (räumlichen) Verteilung der phy-

sikalischen Eigenschaften im Erdinnern. Im weiteren erhält sie (durch theoretische Betrachtungen) Aussagen zu den physikalischen Prozessen im Erdkörper. Der Vorteil der Geophysik ist, daß sie quantitative Aussagen über das Erdinnere von der Erdoberfläche bis zum Erdmittelpunkt erhält, die allerdings mit der Tiefe zunehmend pauschaler sind. Der Nachteil ist, daß ihre Aussagen rein physikalischer Natur und auf die Gegenwart beschränkt sind und geologisch interpretiert werden müssen.

Die Möglichkeiten der Geophysik sind in Etappen ausgebaut worden, woran die Geophysiker in den sozialistischen Ländern teilweise entscheidend mitgewirkt haben. Die (allgemeine, planetare) Geophysik lieferte lange Zeit keine wesentlichen Beiträge zur Geologie, während die angewandte Geophysik nur als „Hilfsdisziplin“ der Geologie bei lokalen Problemen fungierte. Etwa ab den sechziger Jahren wurden in der Geophysik wesentliche Fortschritte in technologischer und inhaltlicher Hinsicht erreicht: neue, stärkere Energiequellen; neue Sensoren; Anwendung der Informationstechnologie; Entwicklung des Paläomagnetismus; Erweiterung der „statischen“ Strukturen des Erdinnern um „dynamische“. Damit wurden regionale geophysikalische Tiefenuntersuchungen der Lithosphäre und dann auch der Asthenosphäre zur aktuellen Aufgabe.

**3.2 Die Methodik** der regionalen geophysikalischen Tiefenuntersuchungen ist im Prinzip nicht neu. Gesucht werden die regionalen Besonderheiten im Vergleich zum „normalen“ globalen Zustand. (Beides zu trennen, ist schon ein Problem für sich.) Voraussetzung ist, daß zwischen den Fortsetzungen der verschiedenen geologischen Bildungen im Untergrund meßbare Unterschiede der physikalischen Eigenschaften existieren. Von den geophysikalischen Verfahren werden gefordert: ausreichende Eindringtiefe, ausreichendes Auflösungsvermögen, Vergleichbarkeit der Meßergebnisse über das gesamte Arbeitsgebiet. Aus vielen Gründen werden die einzelnen Methoden der Geophysik in sehr unterschiedlichem Maße eingesetzt. Das war selbstverständlich auch beim hier vorgestellten KAPG-Projekt der Fall.

Man unterscheidet im Prinzip Methoden, die die Werte der physikalischen Eigenschaften des Untergrundes in vertikaler Hinsicht differenzieren können, (Seismik, Magnetotellurik) und Methoden, die über die Unterschiede in den Eigenschaften integrieren und deren Ergebnisse prinzi-

piell vieldeutig sind, (Gravimetrie, Magnetik, Geothermie). Die differenzierenden Methoden sind aussagekräftiger, dafür aber meßtechnisch sehr viel aufwendiger als die integrierenden; der Aufwand wächst mit der Tiefenreichweite. Diese Methoden arbeiten mit verschiebbaren Meßanordnungen; die Bearbeitung der Messungen erfolgt für jede Aufstellung mit dem gleichen Modell des vertikal geschichteten Aufbaus; problematisch ist die Korrelation der Grenzflächenelemente von Aufstellung zu Aufstellung.

Die verschiedenen Methoden können nicht unabhängig voneinander benutzt werden. Bearbeitung, Auswertung und Interpretation der Messungen erfolgt in mehreren Schritten, iterativ und mit zunehmender Komplexität. Die gemeinsame Verwendung der Daten aus dem Einsatz mehrerer Methoden ist ein eigenes wissenschaftliches Problem.

**3.3 Die Seismik** liefert Aussagen über die (zeitlich konstante) räumliche Verteilung der Geschwindigkeiten für die Ausbreitung der seismischen Wellen im Erdkörper. Die wichtigsten Ergebnisse sind die Aussagen über den Schichtenbau des Erdinnern. Sie umfassen Aussagen über die Existenz von im wesentlichen horizontalen (subhorizontalen) „Grenzflächen“ im Untergrund, wo sich die Geschwindigkeiten der seismischen Wellen beim Durchgang mehr oder weniger schnell ändern, über den regionalen Verlauf der Tiefenlage der „Grenzflächen“ und über die Größe der seismischen Geschwindigkeiten innerhalb der Schichten. Die Probleme dieser „Grenzflächen“ sind: Schärfe der Änderung der Geschwindigkeiten, Aufächerung in mehrere dünne Schichten, Kontinuität der Grenzfläche über große Entfernungen, Ursachen und Beziehungen mit tektonischen Struktureinheiten.

Aus den Ergebnissen der Seismologie und der bisherigen seismischen Tiefensonderungen ergibt sich das folgende allgemeine Bild (Makrostruktur): Wegen der ausgleichenden Wirkung des zunehmenden Drucks im Erdinnern dominiert die Zunahme der seismischen Geschwindigkeiten mit der Tiefe. Laterale Änderungen sind in den äußeren Teilen des Erdkörpers deutlich, können aber in größeren Tiefen immer weniger nachgewiesen werden. Die oberste Grenzfläche, die weltweit nachweisbar ist, ist die sog. „Moho“. Sie definiert vereinbarungsgemäß die Untergrenze der Erdkruste. Ihre Tiefenlage ist regional verschieden, schematisiert: unter



den Ozeanen 10 km, unter den Kontinenten 40–50 km. Innerhalb der Erdkruste ist deutlich erkennbar ein seismisches Fundament, das die Sedimentdecke vom konsolidierten Teil der Erdkruste trennt. Der konsolidierte Teil der Kruste kann durch seismische Grenzflächen in zwei bis drei Schichten unterteilt werden. Unterhalb der Moho beginnt der Erdmantel. Er zeigt eine stetige Zunahme der seismischen Geschwindigkeiten mit der Tiefe bis zur Grenze Erdmantel-Erdkern in etwa 2.900 km Tiefe, wo eine äußerst scharfe Unstetigkeit vorliegt. Innerhalb des Erdmantels zeigen die seismischen Geschwindigkeiten zunächst eine relativ langsame Zunahme bis zu rund 400 km Tiefe (oberer Erdmantel). Danach folgen eine anormale schnelle Zunahme bis zu etwa 1.000 km Tiefe (Übergangszone) und dann ein normaler Zuwachs bis zur Grenze zum Erdkern (unterer Erdmantel). Innerhalb des oberen Mantels zeigt sich zwischen etwa 100 und 200 km Tiefe eine Schicht mit anormal niedrigen seismischen Geschwindigkeiten; ihre Oberfläche wird als Trennfläche zwischen der Lithosphäre und der Asthenosphäre betrachtet. Die untere Grenze der Asthenosphäre, die zugleich als Untergrenze der Tektonosphäre angesehen wird, ist unklar. Nimmt man die Verteilung der seismischen Geschwindigkeiten, korreliert sie mit der Untergrenze des oberen Mantels. Aus der Verteilung der Erdbebenherde folgt, daß im Erdinnern, dem hydrostatischen Druck Überlagert, elastomechanische Spannungen bis in etwa 700 km Tiefe bestehen können. Die primären Ursachen für die tektonischen Erscheinungen an der Erdoberfläche können demnach bis in diese Tiefen gesucht werden.

**3.4 Gravimetrische Messungen** liefern kostengünstig und mit relativ geringem Aufwand die Verteilung des Schwerefeldes entlang der Erdoberfläche. Darin sind enthalten die Gravitationswirkungen der im Erdinnern regelmäßig verteilten Massen und der anormalen Massen, jeweils charakterisiert durch ihre Dichte. Die Dichteverteilung im Untergrund kann aus den gemessenen Schwereanomalien ohne zusätzliche strukturelle Angaben nicht eindeutig berechnet werden. Es gibt aber viele Erfahrungen zur qualitativen Interpretation im Hinblick auf die oberflächennahen geologischen Körper, auch hinsichtlich der tieferen Strukturen (Tiefe der großen Sedimentbecken, regionale Änderungen der Tiefenlage der Moho). Besondere Bedeutung für die „dynamische“ Interpretation hat die Vorstellung der Isostasie, wonach die Massenun-

regelmäßigkeiten in den oberen Schichten in einer Tiefe von ca. 100 km ausgeglichen sein sollten.

**3.5 Seismik und Gravimetrie** sind physikalisch direkt miteinander verbunden. Als wichtiges Hilfsmittel ergibt sich daraus die Korrelationsbeziehung von seismischer Geschwindigkeit und Dichte. Die Kombination gravimetrischer und seismischer Daten ermöglicht zum einen die strenge Ableitung der „normalen“ Änderung der Dichte mit der Tiefe, damit auch der elastischen Parameter, zum andern die quantitative Interpretation der Schwereanomalien. Durch Kombination der Schweredaten mit den seismischen Aussagen zu den geometrisch-physikalischen Strukturen in Kruste und Mantel können nacheinander die oberen Schichten abgedeckt und die Schwereanteile der Massenunregelmäßigkeiten in den tieferen Schichten bis in den oberen Mantel abgeschätzt werden.

**3.6 Geothermie** bedeutet Messung des Wärmestromes aus dem Erdinnern an der Erdoberfläche und Interpretation dieser Daten hinsichtlich der Ursachen (in der Kruste bzw. im unteren Mantel und Kern) und des Wärmetransportes im Erdinnern sowie Berechnung der Verteilung der Temperatur im Untergrund. Die Verteilung der geothermischen Anomalien entlang der Erdoberfläche zeigt enge Korrelationen mit der regionalen Tektonik.

Die Interpretation der Wärmestrom-Messungen im Hinblick auf die Verteilung von Wärmeerzeugung, Wärmetransport und Temperatur im Erdinnern erfordert Modelle für den Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung der Kruste und des oberen Mantels, a-priori aus der gemeinsamen Auswertung von Seismik und Gravimetrie sowie aus der Petrologie. Die resultierende Tiefenverteilung der Temperatur zeigt im Tiefenbereich von 100 bis 250 km Temperaturen um den Schmelzpunkt der dort zu erwartenden Materie, was auf partielle Aufschmelzungen hinweist, mit wesentlichen Folgerungen für Dichte und Viskosität (rheologische Parameter). Das sonst hochfeste (spröde) Material in Kruste und Mantel ist in diesem Bereich „schwächer“, in geologischen Zeitmaßstäben fließfähig. Daher rührt die Bezeichnung Asthenosphäre, Schwächezone. Die Ergebnisse der Geothermie führen zur Korrektur der geophysikalischen Modelle und zu ihrer Erweiterung zu geodynamischen Modellen. Sie fördern wesentlich

die Wechselwirkung der geophysikalischen mit den geologischen Untersuchungen der Lithosphäre und der Asthenosphäre, die man gemeinsam als Tektonosphäre bezeichnet.

**3.7 Als magnetotellurische Tiefensondierung** wird die Messung der räumlich-zeitlichen Variationen des elektromagnetischen Feldes der Erde und deren Interpretation im Hinblick auf Induktionseffekte im Erdinnern bezeichnet. Die Analyse der Frequenzabhängigkeit der Variationen liefert Aussagen über die Tiefenverteilung der elektrischen Leitfähigkeit. Es gibt deutliche Hinweise auf die Existenz eines Bereiches mit höherer elektrischer Leitfähigkeit um etwa 100 km Tiefe, allerdings mit großen regionalen Unterschieden. Er sollte mit der vermuteten Asthenosphäre korrelieren. Es gibt auch Hinweise auf Zonen erhöhter Leitfähigkeit in der Erdkruste. Zu beachten ist, daß die Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit auf große theoretische und praktische Schwierigkeiten stößt. Die Leitfähigkeit schwankt generell sehr stark je nach Stoffbestand der Gesteine, Porenfüllung mit Fluida, Temperatur. Die gemeinsame Interpretation der magnetotellurischen Messungen mit anderen geophysikalischen Messungen nutzt die physikalischen Beziehungen zwischen elektromagnetischen Materialparametern, thermodynamischen Größen und Stoffbestand. Besonders wichtig sind Wassergehalt und partielle Aufschmelzung der Gesteine.

**3.8 Die Magnetik** mißt den zeitlich permanenten Anteil am Erdmagnetfeld an der Erdoberfläche, mit Hilfe von Flugzeugen und künstlichen Erdsatelliten. Die Interpretation der Messungen im Hinblick auf das Erdinnere ist eine sehr komplexe Aufgabe. Die Ursache der globalen Strukturen im Erdmagnetfeld und seiner Säkularvariation ist der Dynamomechanismus im Erdkern. Die Ursachen der lokalen und regionalen Anomalien des permanenten Feldes sind die stark magnetisierten Gesteine der Lithosphäre oberhalb der Curie-Isotherme. Deren Tiefenlage ist regional sehr verschieden; in einigen Regionen ist sie in der Nähe der Moho zu suchen. Bei der Interpretation der magnetischen Anomalien interessieren im Projekt weniger die (beschränkten) Aussagen zur Tiefenstruktur der Erdkruste, viel mehr die Hinweise auf die Entstehung und zeitliche Entwicklung der tektono-magmatischen Einheiten der Erdkruste.

**3.9 Die komplex-geophysikalische Bearbeitung** zielt einerseits auf die Ableitung von „Normalschnitten“ für die Tiefenverteilung der Materialeigenschaften in Kruste und Mantel der Erde. Die Werte für die verschiedenen Parameter müssen dabei physikalisch konsistent sein. Zum andern wird sie zur Erkundung und Charakterisierung der regionalen Besonderheiten angewandt. Dabei sollen die rein qualitativen Vergleiche durch mathematische Verfahren ergänzt und ersetzt werden. Die resultierenden komplexen geophysikalischen Modelle für das Arbeitsgebiet müssen der regionalen geologischen Situation angepaßt sein.

**3.10 Paläomagnetische Untersuchungen** kann man im strengeren Sinne nicht zur Geophysik rechnen. Dabei wird die Magnetisierung der Gesteine gemessen. Die Ergebnisse werden zur Bestimmung des Alters der Gesteine und ihrer geographischen Position zum Zeitpunkt ihrer Magnetisierung genutzt. Im Rahmen des hier betrachteten KAPG-Projektes war die Bedeutung derartiger Arbeiten gering.

#### 4. Regionaltektonik des Arbeitsgebietes

Das Arbeitsgebiet betrifft die östliche Hälfte von Europa, die regionaltektonisch durch die Osteuropäische Tafel, den geologisch ältesten Teil und Kern des Kontinents beherrscht wird. Europa ist heute der westliche Anhang des viel größeren Kontinents Asien. Es wurde mit Nordasien vor rund 300 Mio. Jahren durch die Herzyniden des Urals, der Westsibirischen Tafel und der Platte des Turans verschweißt. Anbauten an den Kern des Kontinents Europa erfolgten im Nordwesten vor rund 500 Mio. Jahren durch die Kaledoniden (davon ging ein großer Teil durch die Öffnung des Atlantik wieder verloren), im Westen vor rund 300 Mio. Jahren durch die westeuropäischen Varisziden (die heutige Westeuropäische Tafel) und an den gesamten Großkontinent Europa-Asien im Süden vor rund 50 Mio. Jahren durch den alpidischen Faltungsgürtel infolge Kollision mit der afrikanisch-arabischen Lithosphärenplatte. Europa lag immer im geodynamischen Spannungsfeld der Entwicklungen im Atlantik (W und NW) und in der Thetys (S).

Die Osteuropäische Tafel (nachfolgend abgekürzt: OET) umfaßt als

bedeutende tektonische Elemente Russische Platte, Ukrainischen Schild, Baltischen Schild und in der Sedimentdecke mehrere tiefe Becken und Tröge (Priekaspi, Kuban, Dnjepr-Donetz, Timan-Petschora) und die Vorgebirgströge längs Ural, Kaukasus, Karpaten. Das Fundament der OET wurde nach langer Vorgeschichte vor etwa 1.750 Mio. Jahren im Rahmen des Kratons Eoeuropa konsolidiert, danach nur noch bruchtektonisch beansprucht. Der Rand der OET im Westen und Südwesten wird bestimmt durch die Teisseyre-Tornquist-Zone im Bestand des globalen Lineaments von der Nordsee zur Dobrudscha. Diese Zone wurde im Intervall vor 1.200–850 Mio. Jahren beim Zerfall des Urkontinents Protopangea seitwärts zur Achse des Protoatlantiks gebildet. Sie spielte eine große Rolle in der weiteren Entwicklung von Mitteleuropa.

Das Arbeitsgebiet im Rahmen des KAPG-Projekts umfaßt speziell die randlichen Teile der OET im Westen und Süden mit dem Ukrainischen Schild und dem Paläorift Dnjepr-Donetz als vorherrschenden Elementen sowie die angrenzenden Bereiche im Westen und Südwesten: Teisseyre-Tornquist-Zone, östliche Teile der Westeuropäischen Tafel mit dem Norddeutsch-Polnischen Sedimentbecken, alpidischer Faltenzug der Karpaten, Skythische Platte, Mittelmassive und innere Meere. Im Arbeitsgebiet wird ein sehr langer Abschnitt der Erdgeschichte überdeckt. Im Fundament der OET gibt es Bildungen mit einem Alter bis etwa 3,2 Mrd. Jahren. In der Umrandung hat man es wie in anderen Teilen Europas gewöhnlich mit wesentlich jüngeren Bildungen (0,8 Mrd. Jahre und jünger) zu tun. Hinzu kommen junge tektono-magmatische Aktivierungen (aktuell bis etwa 2 Mio. Jahre).

## 5. Die Geotraversen

Als Geotraversen werden Gebietsstreifen mit Profilen der seismischen Tiefensonierungen und weiteren geophysikalischen Messungen bezeichnet, die nach geologisch-tektonischen Gesichtspunkten ausgewählt und angelegt wurden. Sie ermöglichen, zumindest erleichtern die Ableitung von komplexen geophysikalischen Modellen zum Bau der Lithosphäre/Tektonosphäre im Gebiet. Im Rahmen des KAPG-Projektes wurden neun Geotraversen bearbeitet. Sie überdecken netzartig die randlichen

Teile der OET und die angrenzenden Regionen im Westen, Südwesten und Süden. Diese Wahl zeigt die besonders aktive Rolle der Kollegen aus der Ukraine.

Zwei Geotraversen verlaufen zum großen Teil innerhalb der Tafel (Nr. III – vom Schwarzen Meer südlich der Krim nach Nordostrußland, Nordteil von Nr. I – vom Wiener Becken zur Halbinsel Kola). Fünf Geotraversen schneiden etwa senkrecht den Rand der Tafel (Teil von Nr. V – vom Südwesten der DDR nach Daghestan am Kaspischen Meer, Südteil von Nr. I, Nr. II – von der mittleren Adria zur nördlichen Ukraine, Nr. VII – von Westbulgarien zur mittleren Ukraine und weiter Richtung St. Petersburg, Südteil von Nr. III). Drei Geotraversen verlaufen etwa parallel zum Tafelrand (Nr. IV – vom Nordwesten der DDR zum Asowschen Meer, Nr. V, Nr. IX – von Westbulgarien zur Halbinsel Apscheron in Aserbaidshan). Eine Geotraverse betrifft vor allem seismotektonische Aspekte (Nr. VIII – vom Erdbebengebiet Vrancei in Rumänien zum Zentrum des Ukrainischen Schildes).

Die in diesen Geotraversen im Detail erreichten Ergebnisse werden ausführlich in den betreffenden drei Teilbänden der Monographie „Die Lithosphäre in Mittel- und Osteuropa“ (erschieden in Kiew 1987, 1988 bzw. 1993) dargestellt. Diese Bände behalten als Materialsammlung langfristig ihren Wert.

## 6. Modelle der Lithosphäre

Der hier vorgelegte Bericht über die Ergebnisse des KAPG-Projektes wird auf die Verallgemeinerungen beschränkt, die vor allem im Teilband „Verallgemeinerung der Untersuchungsergebnisse“ (erschieden in Kiew, 1993) enthalten sind. Sie stellen ohne jeden Zweifel eine großartige wissenschaftliche Leistung dar. Verarbeitet wurde ein sehr umfangreiches Beobachtungsmaterial. Nicht zu übersehen ist aber, daß das Material noch inhomogen ist, Lücken bestehen und verschiedene Bearbeiter am Werke waren. Es gab auch methodische Schwierigkeiten bei der komplexen Interpretation. Sehr zu würdigen sind die Bemühungen der Bearbeiter, die systematischen Mängel des verfügbaren Beobachtungsmaterials, das für die Tiefe zunehmend sporadischer wird, zu überwinden.

### 6.1 Seismisches Modell

Die seismischen Daten gelten als grundlegend für die Modellierung des Schichtenbaus der Tektonosphäre und speziell der Lithosphäre. Dabei wird man als erstes mit drei Fragen konfrontiert: a) Abgrenzung der Tektonosphäre vom tieferen Erdinnern; b) Unterteilung in Lithosphäre und Asthenosphäre; c) innerer Schichtenbau der Lithosphäre. Die Frage a) wird in der Monographie nicht behandelt. Implizit wird die untere Grenze der Tektonosphäre/Asthenosphäre mit der Untergrenze des seismisch definierten oberen Erdmantels gleichgesetzt.

Bei der Frage b) folgen die Autoren der verbreiteten Auffassung, daß die Grenze zwischen Lithosphäre und Asthenosphäre nicht als seismischer Horizont, sondern durch die Unterschiede in den seismischen Geschwindigkeiten definierbar ist, schärfer durch die Querwellen als die Längswellen. Die Asthenosphäre ist die Schicht verringerter Geschwindigkeit. Eine derart definierte Schicht tritt regional verschieden auf, in Abhängigkeit vom endogenen Regime. Innerhalb der Asthenosphäre ist die Heterogenität deutlich geringer als in der Lithosphäre.

Zur Frage c): Die Lithosphäre zeigt eine ausgeprägte seismische Makrostruktur; sie wird charakterisiert durch das Auftreten der beiden klar reflektierenden und beugenden Horizonte seismisches Fundament (Untergrenze der Sedimentdecke) und „Moho“ (Untergrenze der konsolidierten Erdkruste) und die Ausbildung von drei Schichten mit Unterschieden in den seismischen Geschwindigkeiten (Sedimentdecke, konsolidierte Erdkruste, lithosphärischer Erdmantel). Innerhalb der konsolidierten Erdkruste sind durch die Daten der seismischen Tiefensondierungen nachweisbar drei Schichten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die durch schwache Grenzen getrennt sind: „Granitschicht“, „Übergangsschicht“, „Basaltschicht“. Sie sind regional verschieden ausgebildet und abhängig vom endogenen Regime. Die seismischen Schichtgrenzen innerhalb der Lithosphäre sind keine scharfen Unstetigkeiten, sondern mehr oder weniger mächtige Dünnschichtpakete.

Zur stofflich-physikalischen Interpretation der seismischen Schichten läßt sich folgendes sagen: In der Sedimentdecke werden die Schichten durch lithofazielle Differenzierung, Kollektoreigenschaften der Sedimente, Grad der Sättigung mit Flüssigkeiten und Gasen bestimmt. In der konsolidierten Kruste werden sie bestimmt durch petrologische Stratifikation,

tektonische Schichtung, Metamorphose, intrusive und effusive Aktivität. In der unteren Lithosphäre sind maßgebend rheologische Stratifikation, geothermisches Regime, Bedingungen für die Kristallisation der magmatischen Schmelzen.

Das seismische Schichtenmodell der Lithosphäre, speziell der Erdkruste, eignet sich gut zur Untersuchung der regionalen Besonderheiten des Baus der Lithosphäre und zur Aufklärung der Beziehungen zum endogenen Regime. Die Monographie enthält ausführliche Darstellungen der entsprechenden Untersuchungen für die Erdkruste: seismisches Fundament, Moho, mittlere Geschwindigkeiten in der konsolidierten Kruste. Die Fakten zur unteren Lithosphäre und zur Asthenosphäre, d. h. zum oberen Mantel, waren demgegenüber mager und mußten vielfach durch Extrapolation und Überregionale Vergleiche ersetzt werden. Für die Tiefenlage des seismischen Fundaments ergaben sich folgende allgemeine Merkmale: Auf der OET ist generell die Tiefe mit 1–2 km sehr gering, auf den Schilden gibt es keine Sedimentdecke. Auf der Westeuropäischen Tafel ist das Bild weniger einheitlich. Die Umrandung der OET zeigt einen Kranz von tiefen Sedimentbecken mit 10–15 km Tiefe. Die Vorgebirgströge besitzen Füllungen mit Sedimenten mit Tiefen von 5–15 km. Längs der Teisseyre-Tornquist-Linie verläuft ein langer schmaler Trog. Innerhalb des Kontinents treten Rift-Gräben auf. Die Sedimentbecken unterscheiden sich durch die strukturelle Lage und nach dem Charakter der Sedimentfüllung. Dichte Füllungen gibt es in den Senken von Prikaspi und Dnjepr-Donetz, weniger dichte in den Senken in Westeuropa und den inneren Meeren, anormal lockere in der Senke im Südlichen Kaspi.

Für die mittleren Geschwindigkeiten in der konsolidierten Kruste ergaben sich folgende allgemeine Merkmale: Sie betragen im östlichen Teil Europas 6,5–6,8 km/s, im westlichen Teil 6,2–6,3 km/s. Unter den Sedimentbecken werden höhere Werte festgestellt, geringere unter den alpidischen Orogenen. Die ältere Kruste zeigt eine hohe, die jüngere Kruste eine niedrigere Geschwindigkeit.

Die Moho ist regional ganz verschieden ausgebildet: scharfe Grenze, Übergangsschicht, Paket aus dünnen Schichten, Dach einer dicken Schicht relativ hoher Geschwindigkeit. Als stabiles Kennzeichen kann der Wert der Grenzgeschwindigkeit (7,8–8,2 km/s) verwendet werden. Ihre Lage ist nicht eindeutig in einigen Gebieten, wo schon in der unteren Kruste höhe-



re Geschwindigkeiten auftreten (Ural, Teisseyre-Tornquist-Zone u. a.). Das Netz der tiefenseismischen Profile in Europa reichte noch nicht aus, um eine befriedigende Tiefenkarte der Moho zu entwerfen. Zur Vervollständigung wurde die Korrelation der Moho-Tiefe mit den Schwereanomalien herangezogen. Insgesamt ergaben sich folgende allgemeine Merkmale: Die Mächtigkeit der Erdkruste schwankt zwischen 10 km unter dem Atlantik bis zu 55–60 km unter den Gebirgsbildungen. Im Ostteil Europas gibt es eine dicke Kruste mit hoher Geschwindigkeit, im Westteil eine dünne Kruste, die Grenze ist die Teisseyre-Tornquist-Zone. Gebirgsurzeln haben Alpen, Pyrenäen, Ural, Kaukasus, Balkan, keine das Skandinavische Gebirge, Karpaten, Apenninen. Im Baltischen und Ukrainischen Schild gibt es lokale Tröge mit der Moho in 55–60 km Tiefe. Die Moho liegt höher praktisch unter allen tiefen Sedimentbecken, besonders unter denjenigen in den Randmeeren Europas. Die Kruste ist mächtig unter den Strukturen des Übergangs von Kontinent zu Ozean, von alter zu junger Tafel, von Gebirgsbildung zur Tafel.

Die seismisch definierte Erdkruste ist der oberste und am besten bekannte Teil der Lithosphäre. Wenn man nach Beziehungen zwischen den geologischen Bildungen an der Erdoberfläche und den regionalen Besonderheiten der Lithosphäre sucht, wird man deshalb mit Aussicht auf Erfolg zuerst nach der Korrelation zwischen den Strukturen der Kruste und dem endogenen Regime der regionaltektonischen Einheiten suchen. In der Monographie wird über einen solchen Versuch berichtet, der von Belousov und Koautoren unternommen wurde. Das Ergebnis ist eine (qualitative) Typisierung der Erdkruste.

## 6.2 Dichtemodell

Die Grundlage für alle Untersuchungen ist die Karte der Bouger-Anomalien des Schwerefeldes. Sie bietet auf den ersten Blick ein verwirrendes Bild mit vielen anscheinend regellos verteilten Anomalien. Eine nähere Betrachtung zeigt aber markante Züge. Im Gebiet der OET ist die Verteilung weitgehend ruhig mit Werten der Anomalien um Null. Die Heterogenität des Fundaments wird durch den Einfluß der Sedimentdecke verschleiert. Die deutlich abweichenden Anomalien sind Strukturen mit stark unterschiedlicher Mächtigkeit der Sedimentdecke zuzuordnen. Im Gebiet der Westeuropäischen Tafel ist die Verteilung inhomogen. Der nördliche

Teil zeigt positive Werte. Über der Norddeutsch-Polnischen Senke gibt es ein deutliches Minimum. In Skandinavien findet man die niedrigsten Bouger-Werte; dort ist die Isostasie stark gestört. Im Gebiet der mediterranen Geosynklinale ist das Schwerefeld stark anomal. Über den Gebirgsbildungen des alpidischen Typs gibt es negative Anomalien mit starken Gradienten. Im Gebiet der inneren und der Randmeere des Mittelmeergürtels weist die Struktur der Anomalienverteilung auf die Inhomogenitäten des Meeresgrundes und des Untergrundes bis in den oberen Mantel. Ganz allgemein kann man sagen, daß die OET und die Tafel in Westeuropa isostatisch kompensiert sind und daß im mediterranen Geosynkinalgürtel die Isostasie gestört ist.

Wie schon oben gesagt wurde, ermöglicht die Kombination der Karte der Schwereanomalien mit den seismischen Modellen die Ableitung von Modellen für die räumliche Verteilung der Dichtestörungen im Untergrund. In der Monographie wird ausführlich über ein derartiges Dichtemodell für die Erdkruste im Gebiet der Ukraine und Südrußlands berichtet. Nur dort gibt es eine ausreichende Überdeckung mit tiefenseismischen Profilen. In ähnlicher Weise, wenn auch wegen des Mangels an seismischen Daten wesentlich großzügiger, erfolgte für ganz Europa die „Abdeckung“ der Erdkruste, um den Einfluß von Massen-anomalien im oberen Erdmantel auf das Schwerefeld abzuschätzen. Die resultierende Karte der „Mantelanomalien“ zeigt wieder die grundlegende Teilung in Europa: auf der OET geringe Schwankungen um den Wert Null; in Westeuropa stark negative Werte; negative Anomalien auch in der skandinavischen Umrandung und im Ural; relative Maxima in Alpen, Pyrenäen, Apenninen, Kaukasus; sie deuten auf Massen höherer Dichte in den subkrustalen Schichten.

Bemerkenswert ist die gute Korrelation der Karte der Mantelanomalien mit der Karte des Wärmestroms: Die OET ist kalt, Westeuropa warm.

### **6.3 Geoelektrisches Modell**

Das Ideal wäre, analog zum seismischen und zum Dichtemodell, ein räumliches Modell für die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit in der Lithosphäre und der Asthenosphäre im gesamten Arbeitsgebiet. Das ist noch nicht zu erreichen. Die regionale Verteilung der magnetotellurischen Tiefensondierungen ist dafür bisher noch zu sporadisch. Jedoch ist gegen-

wärtig schon in allen Gebieten gearbeitet worden, die für die Regionaltektonik Europas typisch sind, so daß ein qualitatives Bild angegeben werden kann. Das Interesse richtet sich dabei vor allem auf das Auftreten einer Schicht erhöhter Leitfähigkeit in der Erdkruste um etwa 20 km Tiefe (krustale Schicht), Ursache sind Fluida; das Auftreten einer Schicht erhöhter Leitfähigkeit im oberen Erdmantel zwischen etwa 100 und 250 km Tiefe (Asthenosphäre), Ursache sind Aufschmelzungen; den engen Zusammenhang mit den tektonischen Strukturen.

In der Monographie wird über eine große Zahl von magnetotellurischen Arbeiten in Europa berichtet. Die Zusammenschau zeigt beträchtliche regionale Unterschiede; sie läßt aber als generelle Aussagen zu: Die Asthenosphäre fehlt im Innern der OET und im Gebiet der Kaledoniden. Sie existiert in der Umrandung der Tafel, in den herzynischen und jüngeren Faltungsgebieten. Unter den alpidischen Bildungen liegt sie höher als unter den herzynischen. In der Erdkruste sind zahlreiche anormal leitende Strukturen nachweisbar, in der OET und den Kaledoniden mehr als in den herzynischen und jüngeren Bildungen. Die gut leitfähigen Strukturen im Innern der OET sind mit jüngerer bruchtektonischer Aktivierung verbunden.

#### **6.4 Geothermisches Modell**

Grundlage sind die Meßdaten zur Verteilung des Wärmestroms an der Erdoberfläche. Aus den bisher gewonnenen Daten kann man die generellen Züge bereits erkennen. Die Werte des Wärmestromes in Mittel- und Osteuropa schwanken zwischen 10 und 150 mW/m<sup>2</sup>, meist nur zwischen 20 und 100 mW/m<sup>2</sup>. Stark anormale Werte haben nur örtliche Bedeutung. Die regionale Verteilung ist eng mit Besonderheiten der Tektonik und der Entwicklungsgeschichte der Erde korreliert. Im Bereich der OET sind niedrige Werte des Wärmestroms weit verbreitet. Es gibt einige größere geothermische Provinzen und lineare Zonen. Minimale Werte sind verbunden mit Schilden, Massiven, Anteklisen, höhere Werte mit synklinoren Strukturen, relativ sehr hohe Werte mit Dislokationen und randlichen Strukturen bei tektonischen Prozessen. Längs des Ostrandes der OET im Ural werden sehr niedrige Werte gemessen; der Ural ist eine unikale kalte Struktur. Niedrige Werte werden auch in anderen angrenzenden Gebieten (Böhmisches Massiv, Vorkarpatentrog, Schwarzmeer-Senke) beobachtet.

Für den Bereich außerhalb der OET läßt sich folgendes sagen: Der Mittelwert für alle epipaläozoischen Platten (Westeuropäische Tafel, Norddeutsch-Polnische Senke, Mössische und Skythische Platte) beträgt etwa  $70 \text{ mW/m}^2$ . Erhöhte Werte gibt es längs des westlichen Randes der Teisseyre-Tornquist-Zone, mittlere Werte in den Westlichen, Östlichen und Südlichen Karpaten, hohe Werte im Pannonischen Becken, Transkarpatentrog und Kaukasus. Generell gilt: Der Wärmestrom ist in den Gebieten mit präriphäischer Konsolidierung relativ stabil, in den Gebieten mit späterer Konsolidierung differenziert je nach dem Alter der letzten tektonothermalen Ereignisse.

Intensität und Verteilung des Wärmestromes an der Erdoberfläche werden bestimmt durch die Wärmeerzeugung im Erdinnern und den Wärmetransport von den Quellen an die Oberfläche. Allen Modellen für die Wärmeerzeugung sind folgende Aussagen gemeinsam: In der alten OET liefert die Erdkruste etwa ebensoviel Wärme, wie aus dem Erdmantel kommt. In der phanerozoischen Kruste wird etwas mehr Wärme erzeugt, und aus dem Mantel kommt deutlich mehr Wärme. In den jungen aktiven Gebieten ist der Anteil aus dem Mantel wesentlich höher; das zeugt von verstärkter tektono-magmatischer Aktivität.

Die Temperaturverteilung mit der Tiefe erhält man durch Lösung der Wärmeleitungsgleichung. Das ist aber nur für die feste Lithosphäre, bis zu 100–150 km Tiefe, berechtigt. Benötigt werden dabei Annahmen für die Verteilung der Wärmequellen und der wärmephysikalischen Eigenschaften. Die Modellrechnungen zeigen: Die Temperaturen nehmen generell mit der Tiefe zu. In der präkambrischen Tafel sind die Temperaturen minimal, in den thermisch aktiven Gebieten maximal. Die Unterschiede zwischen den stabilen und den aktiven Gebieten ändern sich mit der Tiefe; in der unteren Kruste und im obersten Mantel sind sie maximal (500–700°). Der Schmelzpunkt wird in aktiven Gebieten schon in 50–60 km Tiefe erreicht. Daraus ergeben sich Hinweise zur Mächtigkeit der Lithosphäre bzw. Tiefenlage des Dachs der Asthenosphäre. Das Dach liegt unter der alten Tafel in 200–250 km Tiefe; es steigt in der Umrandung auf 100 km Tiefe auf; in Gebieten mit hohem Wärmestrom liegt es in 40–70 km Tiefe. In Gebieten mit niedrigem Wärmestrom ist es in Tiefen zwischen 60 und 200 km zu suchen, aber diffusiv und meist nicht mehr erkennbar.

Die geodynamischen Prozesse haben großen Einfluß auf das geo-

thermische Regime. Die Untersuchungen dazu sind jedoch sehr komplex.

### **6.5 Magnetisches Modell**

Die Anomalien des permanenten Anteils am Erdmagnetfeld werden durch die unterschiedliche Magnetisierung der Gesteine in der Erdkruste oberhalb der Moho (petrologische Grenze) bzw. der Curie-Isotherme (physikalische Grenze) verursacht. In der Erkundungsgeophysik werden sie in ähnlicher Weise wie die Schwereanomalien genutzt. In der Monographie über die Lithosphäre interessiert hauptsächlich die Interpretation hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Krustenteile.

### **6.6 Komplexe geophysikalische Modelle**

Die vorgestellten Modelle enthalten bereits viele Elemente der komplexen Interpretation. Bisher ist es nicht gelungen, alle gewonnenen Beobachtungen zur Übereinstimmung zu bringen. Die Ausarbeitung des Systems und der Technologie der strengen Komplexinterpretation der geophysikalischen Daten ist eine schwierige, noch nicht bis zum Ende gelöste Aufgabe. Zu einzelnen Aspekten liegen praktische Ausarbeitungen vor: automatisierte Zusammenstellung der seismischen Modelle mit gleichzeitiger Reduktion hinsichtlich des Schwerefeldes; Aufbau von geothermischen Modellen und Temperaturschnitten der Lithosphäre als Elemente der komplexen Modelle; Algorithmen und Programme zum Aufbau eines magnetischen Modells der Erdkruste auf Korrelationsbasis, das mit dem Schwerefeld und den Daten der seismischen Tiefensondierungen übereinstimmt; theoretische Grundlagen und Methodik der Berechnung der geoelektrischen Modelle, die mit den Temperaturschnitten übereinstimmen.

Auch das ideale komplexe geophysikalische Modell ist aber nur ein notwendiges, noch kein hinreichendes Glied in der Kette der geologisch-geophysikalischen Erkenntnis der Lithosphäre.

## **7. Modelle der Tektonosphäre**

Als Tektonosphäre wird der äußere Bereich des Erdkörpers bezeichnet, in dem die Prozesse ablaufen, die unmittelbar auf die an der Erdoberfläche

beobachtbaren geologischen Ereignisse einwirken. Sie umfaßt die Erdkruste und einen Teil des Erdmantels, anders gesagt: die Lithosphäre und die Asthenosphäre. Die Tiefenprozesse sind mit der Umverteilung der Materie des Mantels verbunden, was wesentlich von der Zähigkeit/Fließfähigkeit abhängt. Die natürliche untere Begrenzung der Tektonosphäre sucht man gewöhnlich im Tiefenintervall 450–650 km, wo die Zähigkeit in Verbindung mit polymorphen Umwandlungen der Materie schnell zunimmt. In jeder Region muß man die Zulässigkeit dieser Annahme überprüfen. Die wichtigste Unterteilung der Tektonosphäre ist die Untergrenze der Lithosphäre, die als identisch mit dem Dach der Asthenosphäre angenommen wird. Innerhalb der Asthenosphäre werden Anomalien der physikalischen Eigenschaften angenommen, die mit den Objekten in der Lithosphäre verbunden sind. Die Ableitung von Modellen für die Tektonosphäre in Mittel- und Osteuropa ist wesentlich mehr mit Hypothesen verbunden als die Modellbildung für die Lithosphäre. Vielfach werden Extrapolationen verwendet. Wegen der schwachen Datenbasis ist es bisher nicht möglich, ausreichend flächendeckende geophysikalische Modelle zu berechnen. Die Autoren der Monographie ziehen es deshalb vor, qualitative Vorstellungen zu entwickeln, bei denen von Beginn an geologische und geophysikalische Anzeichen miteinander verbunden und zur gegenseitigen Unterstützung verwendet werden.

### 7.1 Seismisches Modell

Im Abschnitt über die Lithosphäre ist das seismische Modell für die Erdkruste in Europa behandelt worden. Dort wurde auch schon über den Versuch zur Typisierung der Erdkruste auf Grund des seismischen Schichtenbaus und zur Korrelation mit dem endogenen Regime berichtet. Mit dem Blick auf die gesamte Tektonosphäre wurde dieser Versuch für die Erdkruste weitergeführt und um ein seismisches Modell für den oberen Mantel ergänzt. Die Autoren verwenden jetzt fünf Typen der Erdkruste (Typen I bis V) und fügen neu drei Typen des oberen Erdmantels (Typen N, A1 und A2) hinzu. Der Typ N (Normal) charakterisiert die Tiefenverteilung der seismischen Geschwindigkeiten im oberen Mantel in der alten Tafel. Die beiden Typen A1 und A2 kennzeichnen die (anormale) Verteilung, in der es im oberen Mantel eine Zone mit verringerter Geschwindigkeit und sofort darunter eine schwach ausgeprägte Zone mit

relativ erhöhter Geschwindigkeit gibt. Im Typ A1 fehlt die für den Typ A2 charakteristische höhere Geschwindigkeit unmittelbar unter der Kruste. Typ A1 wird in den Gebieten der jungen Tafeln und der Epitafel-Orogene ohne Magmatismus beobachtet. Typ A2 findet man in den Zonen der bruch-magmatischen Aktivierung und bei den tiefen Senken.

### **7.2 Geoelektrisches Modell**

Die Monographie enthält hierfür keine wesentlichen Ergänzungen zu den Ausführungen im Abschnitt zur Lithosphäre.

### **7.3 Geothermisches Modell**

Hierfür bringt die Monographie wichtige Erweiterungen. Vorgestellt werden Schemata, die für die regionale Verteilung der Temperaturen in den Tiefen 50, 100, 200 und 300 km berechnet wurden; sie zeigen auch Zonen des partiellen Aufschmelzen in der Erdkruste und in größerer Tiefe. Allgemeine Merkmale sind: In den Gebieten der nichtaktivierten Tafel sind die Temperaturen in der ganzen Tektonosphäre nahezu normal. In den aktivierten Gebieten gibt es scharfe Änderungen der Temperatur. Die Temperaturen sind maximal in den oberen Teilen der Tektonosphäre (bis 200–250 km) in den breiten alpidischen Geosynklinalen. Sie sind in relativ geringen Tiefen (bis 70 km) besonders hoch in den Strukturteilen, wo der Ablauf des Geosynkinalprozesses durch eine junge Aktivierung ergänzt wird. Mit der Tiefe werden diese Besonderheiten etwas abgeschwächt, verschwinden aber nicht vollständig. Die Struktur des geothermischen Feldes in den oberen Teilen der Tektonosphäre ist kompliziert im Gebiet Südliche Karpaten-Transsylvanische Senke-Südrand der Ostkarpaten-Mösische Platte. Die Zonen der bruch-magmatischen Aktivierung und amagmatischen Orogenese zeigen weniger intensive Schwankungen der Temperatur, besonders in den Tiefen 150–200 km. Die Strukturen auf herzynischer Grundlage können nicht in die Tiefe verfolgt werden. In den Herzyniden wird nur die relativ flache Asthenosphäre (in 150–200 km Tiefe) mobilisiert. Bei älterer Grundlage kommt Material aus unteren Teilen des oberen Mantels; das ergibt einen hohen Temperaturkontrast in der oberen Tektonosphäre. In den tiefen Senken mit subozeanischer Kruste sind die Temperaturanomalien schwach.

Im oberen Erdmantel Europas wird ein ganzes System von Aufschmel-

zungszonen festgestellt: in einigen Regionen unmittelbar unter der Moho, maximal entwickelt in Tiefen von 150–200 km, bis 200 km Tiefe vollständig verschwunden. In den alpidischen Regionen sind sie zuverlässig nachgewiesen, schwach in den Herzyniden und in den aktivierten Teilen der Tafel.

#### **7.4 Dichtemodell**

Die wesentliche Ergänzung gegenüber dem Dichtemodell für die Lithosphäre betrifft die Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur. Das damit Neuberechnete Schema der Mantelanomalien zeigt folgende allgemeine Merkmale: Auf der OET gibt es außerhalb der Zonen mit junger Aktivierung keine Mantelanomalien. Maximale Werte findet man in den breiten alpidischen Geosynklinalen, besonders bei junger bruchmagmatischer Aktivierung. Die Werte sind in den schmalen alpidischen Zonen wesentlich kleiner; die Alpen heben sich im Schwerefeld nicht heraus. In den aktivierten Herzyniden sind die Werte recht hoch, in den nichtaktivierten Herzyniden nur schwach. In den aktivierten Kaledoniden findet man mäßige Werte; in den aktivierten Zonen der alten Tafel maximale Werte. Die Ursachen für diese Verteilung der Mantelanomalien sind die Temperaturunterschiede; deren Wirkung wird verstärkt durch die dadurch ausgelöste Advektion, weiter durch die höhere Dichte des Materials beim polymorphen Übergang und durch die Änderung des Stoffbestands der Mantelgesteine bei basischem Magmatismus.

### **8. Randbereich der Osteuropäischen Tafel**

In der Monographie wird diese Problematik im Teilband „Junge Tafeln und alpidischer Faltengürtel“ (Kiew, erschienen 1994) behandelt. Vorgelegt werden die Ergebnisse der komplexen regionalen geophysikalischen und geologischen Untersuchungen zum Bau der Lithosphäre in den hauptsächlich phanerozoischen Strukturen in Mittel- und Osteuropa. Die Darstellungen beruhen zum großen Teil auf eigenen, selbständigen Arbeiten in den am KAPG-Projekt beteiligten Institutionen der Länder: ehemalige DDR, Polen, ehemalige Tschechoslowakei, Belorussland, Ukraine, Ungarn, Rumänien, Moldawien, Bulgarien, Rußland. Vor allem in



diesem Teil der Monographie wird deutlich, in welchem hohem Maße durch das KAPG-Projekt der gewaltige nationale Erkenntnisfundus über die geologisch-geophysikalische Situation in den einzelnen Ländern für die Gesamtheit aller Beteiligten erschlossen werden konnte.

Der Teilband enthält die folgenden Kapitel:

1. Die westliche Gelenkzone der OET und der angrenzenden Regionen
2. Westliche und Östliche Karpaten
3. Rumänische Karpaten
4. Südliche Karpaten
5. Tiefenbau und Geodynamik der Karpaten
6. Balkan
7. Mösische Platte
8. Nördliche Dobrudscha
9. Skythische Platte und angrenzende Regionen
10. Schwarzmeer-Senke.

Die umfangreichen Ergebnisse können selbstverständlich hier nicht ausführlich vorgestellt werden. Im Vortrag wurde nur auf einige wesentliche Fragen verwiesen; zu den Ergebnissen wurden einige Schemata gezeigt.

Folgende Fragen zum Randbereich der OET im Arbeitsgebiet sind ganz offensichtlich: a) im nördlichen Abschnitt (bis an die Karpaten heran) – Lage der westlichen Begrenzung der alten OET, Übergang zur jüngeren Westeuropäischen Tafel; b) im mittleren Abschnitt (im Bereich der Karpaten) – Bau und Dynamik des alpidischen Faltenzuges der Karpaten bis zum Balkan, einschließlich des Pannonischen Beckens, Übergang von den Karpaten zur OET, Stellung der Mösischen Platte und der Nördlichen Dobrudscha; c) im südlichen Abschnitt (nördlicher Küstenbereich des Schwarzen Meeres und Vorland des Kaukasus) – Bau und Dynamik der Skythischen Platte, Stellung, Bau und Entwicklung des Untergrundes des Schwarzen Meeres.

### **8.1 Westlicher (südwestlicher) Rand der Osteuropäischen Tafel**

Hierbei handelt es sich um ein altes Problem der Geologen, das wegen der mächtigen Überdeckung durch Sedimente sehr schwierig zu lösen ist. Im

Internationalen Geologischen Korrelationsprogramm von UNESCO und IUGS gab es dafür von 1974 bis 1986 ein spezielles Projekt (Nr. 86: Südwestrand der Osteuropäischen Tafel), in dem die Wissenschaftler aus der ehemaligen DDR eine führende Rolle gespielt haben. Früher wurde die extreme Vorstellung vertreten, daß der ganze nördliche Teil der Polnisch-Deutschen Tiefebene sich auf dem tief abgetauchten Fundament der OET befindet und die südliche Grenze der Struktur etwa ost-westwärts in der Breite Berlins verläuft.

Heute besteht folgende Auffassung: Die Grenze der alten Tafel verläuft vom tafelnahen Rand des Dobrudscha-Troges in nordwestlicher Richtung längs der Aufschiebung des Vorkarpaten-Randtroges auf die alte Tafel, längs des Westrandes des Troges von Lvov-Lublin, weiter längs der Teisseyre-Tornquist-Linie zur Ostseeküste. Entlang fast des gesamten Randes verläuft ein Gürtel kaledonischer Deformationen, der heute von nahezu ungestörten Tafeldecken überlagert ist. In der Ostsee stehen zur Beurteilung des Fundaments nur geophysikalische Daten zur Verfügung. Danach verläuft die Grenze des Kratons nördlich der Insel Rügen in west-nordwestlicher Richtung, dann entlang des Südrandes der Hebung Ringköpping-Fünen und weiter nach Norden in die Nordsee. Die Lage des Südwestrandes der OET bildete sich heraus im Verlaufe des Zerfalls von Protopangea im späten Proterozoikum, im Intervall vor 1.200–850 Mio. Jahren, als Bruchzone und langlebige Naht. Die Naht spielte eine bedeutende Rolle in der gesamten proterozoisch-phanerozoischen Entwicklung der Lithosphäre von Zentraleuropa.

Die Teisseyre-Tornquist-Zone ist eine ausgedehnte stabile Struktur der Trogbildung mit dem Charakter eines Paläorifts. Sie trennt die junge Tafel von Westeuropa von der alten OET. In diesen Tafeln liegen die Formationen der Tafeldecken auf verschieden altem gefalteten Fundament. Für die Westeuropäische Tafel sind charakteristisch eine dünne Kruste (20–35 km), hohe Werte des Wärmestromes und ein gegensätzliches Wärmefeld. Für die OET sind charakteristisch eine mächtige Kruste (40–65 km), niedrigere Werte des Wärmestroms und ein ruhiges Wärmefeld. Unterschiedlich sind: Bildungsgeschichte; Alter des Fundaments; Umfang der Tafeldecke; Zeit des Erscheinens, Intensität, Zusammensetzung des Magmatismus; gegenwärtiger Strukturplan. In der jungen Tafel sind die linearen tektonischen Elemente entwickelt, die Bruchtektonik spielt eine wesentli-

che Rolle. In der alten Tafel sind isometrische Neigungen der Strukturen ausgeprägt, Bruchstörungen sind selten (in den oberen Horizonten der Tafeldecke). Von der Zone werden nach Westen hin geringer Absenkungen der Mitteleuropäischen Platte der jungen Tafel und Intensität der Deformationen parallel zum südwestlichen Rand der alten Tafel, längs denen in nordwestlicher Richtung oft epipaläozoische Deformationen auftreten. Die hauptsächliche Ursache dieser Unterschiede zwischen den beiden Seiten der Zone sind die relative Stabilität der alten OET und die Mobilität der jungen Westeuropäischen Tafel.

Die Teisseyre-Tornquist-Zone selbst zeigt Absenkungen der Moho bis 50–55 km Tiefe, mehr als 60 km Tiefe im Zentrum ihres südlichen Teils, und hat einen komplizierten Tiefenbau. Sie gehört im tektonischen Plan zur jungen Tafel. In der Sicht der Globaltektonik bildet die Teisseyre-Tornquist-Zone im Süden der OET die Begrenzung der europäisch-asiatischen Lithosphärenplatte. Sie geht ein in den Bestand des Dobrudscha-Nordsee-Lineaments, das selbst Bestandteil des globalen tektonischen Lineaments von Grönland und Island über Faröer-Inseln, Nordteil der Nordsee zum südwestlichen Rand der alten Tafel, weiter über Schwarzes Meer zum Zagrosgebirge ist.

## 8.2 Karpaten und Balkan

Die Gebirgskette der Karpaten und die Balkaniden im südwestlichen Vorfeld der OET bilden auf der Balkanhalbinsel den nördlichen Zweig des alpidischen orogenen Gürtels. Dieser schließt im Westen an die Alpen an und setzt sich im Osten fort in Pontiden, Kleiner Kaukasus, Elbursgebirge usw. Der südliche Zweig umfaßt die Faltungsstrukturen der Dinariden und Helleniden. Er schließt im Westen an die Südlichen Alpen, Apenninen an und setzt sich im Osten fort in Tauriden, Zagrosgebirge usw. Beide Zweige verlaufen zugartig, stellenweise nähern sie sich einander an bzw. entfernen sich voneinander. Zwischen den Zweigen liegen Gebiete mit weiter Entwicklung metamorpher Gesteine, vorzugsweise präkambrischen Alters: Mittelmasive. Zum alpidischen Gürtel gehören spätalpine Senken, die auf den Fragmenten der metamorphen Blöcke und gefalteten Systeme liegen (u. a. Pannonische, Transsylvanische Senke), sowie innere Meere (Schwarzes Meer). Vom Standpunkt der sog. Plattentektonik ist der geologische Bau der Balkanhalbinsel das Ergebnis der horizontalen Ver-

schiebungen und der Prozesse der Konvergenz und Divergenz zwischen der osteuropäischen und der afrikanischen Lithosphärenplatte. Durch die Bewegungen und tektonischen Wechselwirkungen dieser beiden Platten werden erklärt: Öffnung des Ozeans Mesothetys, Bildung der ozeanischen Kruste, deren Destruktion und Assimilation, Schließung dieses Ozeans, Kollision von Fragmenten der Platten, Obduktion, Faltung und Bildung der orogenen Gürtel, Prozesse des effusiven und intrusiven Magmatismus, Sedimentanhäufung, Metamorphose, Bildung einer Reihe endogener Lagerstätten. Bei diesen Untersuchungen wurden immer mehr Abweichungen von den idealisierten Schemata der Geosynklinaltheorie wie auch der Plattentektonik offensichtlich.

### **8.3 Skythische Platte und angrenzende Regionen**

Diese Platte ist eine heterogene mehrschichtige Bildung, die längs des südlichen Randes der OET im Ergebnis einer komplizierten geologischen Entwicklung mit mehrfachen Umbauten des tektonischen Plans und der strukturellen Gestalt, Wechsel von destruktiven und konstruktiven Prozessen, vertikalen und horizontalen Bewegungen der Blöcke der Erdkruste, Falten- und Bruchbildungen, Magmatismus, Metamorphose usw. formiert wurde. Die Skythische Platte liegt im nördlichen peripheren Teil des mediterranen Falteingürtels. Sie erstreckt sich in Form eines relativ schmalen (150–180 km) Bandes längs des südlichen Randes der OET, wobei sie von dieser durch eine große tiefe Nahtzone getrennt ist. Längs dieser Zone erstreckt sich die lineare Kette der Schwarzmeernahen Nahtgräben, die stellenweise Riftcharakter haben. Die Gräben sind gefüllt mit Gesteinen des Mesozoikums-unteren Neogens. Jüngere Ablagerungen sind in den Monoklinalen und tiefen Strukturen vom Typ der Synklinalen vorhanden, die am Ort der Gräben Ende Paläogen-Anthropogen gebildet wurden. Weiter südlich liegt die Zone der Erhebungen der Skythischen Platte. Sie beginnt in der nördlichen Dobrudscha und zieht sich nach Osten über zahlreiche Wälle zu den Strukturen der Platte im zentralen und östlichen Vorkaukasus. Noch weiter östlich ist die Skythische Platte im Gebiet des Kaspis mit der ihr ähnlichen Platte von Turan verbunden. Der südliche Teil der Skythischen Platte wurde tiefgehend überarbeitet im orogenen Stadium der alpidischen Etappe. Die Gebiete im Westen der Krim innerhalb des Schelfs des Schwarzen Meeres wurden der Destruk-

tion unterworfen und in die Trogbildung der Schwarzmeersenne einbezogen.

## 9. Schlußbemerkungen

Die gemeinsamen Arbeiten der Geophysiker und Geologen in den ehemaligen sozialistischen Ländern in Mittel- und Osteuropa stellen eine großartige wissenschaftliche und organisatorische Leistung dar. Es wurde umfangreiches Beobachtungsmaterial gesammelt, das auf längere Zeit die Grundlage für tiefgründige wissenschaftliche Analysen und Verallgemeinerungen bilden kann. Bei der bisherigen Bearbeitung und der Zusammenstellung der erreichten Erkenntnisse ergaben sich grundlegende Aussagen zum Bau der Lithosphäre im Arbeitsgebiet und vielfältige Anregungen für die künftigen Arbeiten. Es liegt im Interesse des wissenschaftlichen Fortschritts, daß sie aufgegriffen werden.

Im Laufe der letzten Jahre wurde der erschließbare Tiefenbereich wesentlich erweitert. Dank der Vergrößerung von Länge und Auflösungsvermögen der seismischen Registrierungen, Anwendung der magnetotellurischen Methoden und Entwicklung der Methoden zur Nutzung der geothermischen Daten erreichten die Untersuchungen auf den mittel- und osteuropäischen Geotraversen Tiefen bis 200–250 km. Damit wurden Ansätze dafür geschaffen, nicht nur die Lithosphäre, sondern auch die Asthenosphäre, d. h. die Tektonosphäre als Ganzes, zu untersuchen.

In der Dokumentation der Ergebnisse dominieren bei den Darlegungen über die allgemeinen Probleme der Tektonik die theoretischen Vorstellungen der ukrainischen Schule um A. V. Tschekunov. Sie wurden als Konzeption der Asthenolite bekannt. Hauptfaktor der Tektogenese ist danach der Massenaustausch zwischen Erdkruste und Erdmantel. Als Hauptträger der tektonischen Aktivität werden die Asthenolite verschiedener Maßstäbe und Tiefenerstreckung angesehen. Insgesamt soll sich die Tektonosphäre als diskret-hierarchisches physikalisch offenes System entwickelt haben, das zur Selbstorganisation, zum isostatischen Ausgleich und zum energetischen Minimum strebt.

In der Monographie wird die heute moderne Hypothese der Platten-

tektonik nicht verwendet. Die Autoren sind zwar nicht gegen die Platten-tektonik. Sie verwenden sie aber nicht, da sie das Datenmaterial im Arbeitsgebiet auch mit ihren Vorstellungen erklären können. Diese haben sie aus der tiefen Kenntnis der Verhältnisse im Arbeitsgebiet abgeleitet, in dem eine Lithosphäre kontinentalen Typs vorliegt, die von Tiefenbrüchen beherrscht wird. Diese Haltung ist verständlich; sie kann nur überwunden werden durch den wissenschaftlichen Vergleich mit den Kenntnissen, die in anderen Regionen gewonnen werden.