

## **1 FACHBEREICH GEOWISSENSCHAFTEN**

### **1.1 BEHR, H.J.: KTB und kontinentale Krustenforschung - warum ein wissenschaftliches Tiefbohrprogramm?**

Das KTB ist für die deutsche Geowissenschaft und Geotechnik eine ungewöhnliche Herausforderung. Ungewöhnlich in der Dimension einer Grundlagenforschung in dieser Fachrichtung, ungewöhnlich in den dafür notwendigen Strukturen der Zusammenarbeit zwischen den in Deutschland traditionell stärker spezialisierten geowissenschaftlichen Disziplinen, ungewöhnlich im Zusammenspiel und den Abhängigkeiten zwischen Instituten, Ämtern, Ministerien, DFG und Behörden, zwischen Wissenschaft und Technik und ungewöhnlich im Management. Obwohl es nicht das Ziel ist, einen Bohrrekord aufzustellen, werden als wissenschaftliche Vorgaben eine Tiefe zwischen 10 - 15 km und Temperaturen zwischen +250° - 300 °C angestrebt. Das vom BMFT geförderte und bewilligte Projekt soll möglichst 14 km erreichen. Die Tiefe ist allein wissenschaftlich begründet, da sie aber neben den bereits erzielten 12 066 m der Bohrung Kola SG-3 und den vorgesehenen 15 km des Appalachen-Projektes in den USA steht, übt sie natürlich auch einen starken Anreiz auf die beteiligten Ingenieurwissenschaften und die Geoindustrie aus.

Das KTB ist Teil eines langjährigen internationalen Großprogrammes zur Erforschung der kontinentalen Erdkruste, an dem sich viele Länder beteiligen. Die gemeinsame wissenschaftsorganisatorische Basis und das Forum für die Formulierung entscheidender Schlüsselexperimente in den Geowissenschaften ist das internationale Lithosphärenprogramm der Inter-Union Commission on the Lithosphere mit dem derzeitigen Präsidenten Prof. Dr. K. FUCHS (Karlsruhe), einer Kommission des International Council of Scientific Unions.

Dieses erste Heft einer KTB-Publikationsreihe enthält technische Beiträge, die den Stand der Planung und Überlegungen von 1986 präsentieren. Es richtet sich in erster Linie an den technischen Partner aus Industrie und Forschungseinrichtungen. Der einleitende Beitrag soll vor allem diesem Kreis den Hintergrund des Projektes, die Ziele und Zusammenhänge näherbringen und darstellen, warum sich das KTB im Gegensatz zu vielen anderen internationalen Programmen zunächst auf ein einziges, besonders tiefes Experiment konzentriert. Der Beitrag soll andererseits die Tatsache vermitteln, daß das Projekt nicht nur Teil eines globalen Programmes ist, sondern daß es auch in ein integriertes System nationaler Projekte eingebunden wurde mit dem Ziel, ein Fenster durch die kontinentale Kruste zu schaffen.

Zwischen den ersten Überlegungen für ein solches Unternehmen 1977, angeregt und gefördert durch die Geokommission der DFG, der Reduzierung von 40 Lokationen auf 4 im Jahre 1980 (Hohenzollerngraben, Hohes Venn, Schwarzwald, Oberpfalz) auf 2 im Jahre 1984 (Schwarzwald, Oberpfalz) und der abschließenden Bewilligung des Projektes durch das Bundesministerium

für Forschung und Technologie mit einer Bohrung in der Oberpfalz im Jahre 1986 und dem Beginn der Vorbohrung im September 1987, liegen 10 Jahre mit einem bedeutenden Kenntniszuwachs über die mitteleuropäische paläozoisch geformte Kruste. Bereits vor dem ersten Bohrmeter wurde nicht nur eine große Datenfülle angehäuft, sondern auch neue Denkansätze gefunden, und es können erste Modellvorstellungen zur Diskussion gebracht werden. Diese Ergebnisse sind zum Teil in den bereits erschienenen zwei Bänden der Buchreihe "Observation of the Continental Crust through Drilling" (I, II) veröffentlicht (siehe Referenzliste) bzw. werden in den künftigen Heften dieser Reihe publiziert. Der Autor will mit diesem Beitrag keine umfassende geowissenschaftliche Darstellung und Diskussion des in vielen Projekten erarbeiteten Kenntnisstandes und der daraus formulierten Zielvorstellungen der beteiligten Fachgruppen und der in einem DFG-Schwerpunktprogramm zusammengefaßten Wissenschaftler geben. Es soll vielmehr eine allgemeine Orientierung über die Ziele des KTB vor dem Hintergrund der internationalen Krustenforschung, einiger bereits erkennbarer Zwischenergebnisse und der sich mit dem Wissenszuwachs kontinuierlich wandelnden Arbeitshypothesen gegeben werden.

#### **1.1.2 Die ozeanische Kruste, der Schlüssel zur Plattentektonik - vom DSDP/ODP zum KTB**

Die geowissenschaftliche Erforschung der Erde hat mit der kartierenden, systematisch-analytischen Beschreibung der kontinentalen Geologie begonnen. Notwendigkeiten der Rohstoffprospektion und des mittelalterlichen Bergbaus standen dabei Pate. Trotz einer außerordentlichen Fülle an erdgeschichtlichen, strukturellen, mineralogisch/geochemisch/petrologischen und geophysikalischen Daten, die in etwa 200 Jahren aufgezeichnet wurden, gelang es nicht, das geodynamische Prinzip zu finden, das der Erdkrustenentwicklung zugrunde liegt. Mit einer Flut an widersprüchlichen geotektonischen Hypothesen und Theorien endete dieser erste Abschnitt der kontinentalen Geologie schließlich vor etwa 30 Jahren. Die nur schwer auflösbare Entwicklung der komplex gebauten, aus einem Mosaik polystrukturell und polymetamorph überprägter, z.T. aus bis über 3 Milliarden Jahre alten Bausteinen zusammengefügt Kontinente, die Begrenzung der Kenntnisse auf die an der Erdoberfläche angeschnittenen Niveaus bei fehlendem Einblick in die Tiefendimension, vor allem aber der bis dahin unbekannte und nur spekulative Zusammenhang mit der ozeanischen Kruste verschleierte die Zusammenhänge und machten es unmöglich, ein umfassendes Modell zu entwickeln. Mehrere Zwischenschritte waren erforderlich, bevor mit völlig neuen Arbeitsansätzen und Methoden begonnen werden konnte, die kontinentale Evolution und Dynamik aufzulösen.

Begünstigt durch die off-shore-Aktivitäten der Erdölindustrie kamen marine Bohrtechniken zur Entwicklung, die den Weg zur wissenschaftlichen Erforschung der ozeanischen Kruste öffneten und schließlich zum Deep Sea Drilling Project (DSDP) mit dem Bohrschiff "Glomar Challenger" und dem anschließenden Ocean Drilling Project (ODP) mit der "Joides Resolution" führten. Wieder hatten die praktischen Belange der Rohstoffsuche für die

Erschließung des zweiten, flächenmäßig größeren, aber bis dahin unbekanntem Krustentypen der Erde den Geburtshelfer gespielt und die marine Geologie begründet. Seit 1968 konnten 1 400 Bohrungen mit etwa 160 km Kern aus der ozeanischen Kruste gewonnen werden. Die größten erreichten Bohrtiefen liegen mit 1 740 m auf der Galicia-Bank und mit 1 500 m im Panama-Becken, alle anderen sind meist auf wenige Dutzend oder Hunderte Meter begrenzt. Besondere technische Schwierigkeiten bereitet das Bohren in Festgestein, das bisher nur in Verbindung mit einer sedimentären Bedeckung gelang, die dem Bohrwerkzeug den nötigen Halt bot. Im ODP wird mit der Technologie eines "hard rock guide base" versucht, auch junge ozeanische Krustensituationen ohne Sedimentdecke zu erbohren. Als eines der wichtigsten Ergebnisse des DSDP war, in Ergänzung zu den Ergebnissen der marinen Geophysik durch die direkte Beprobung der Ozeankruste, das "missing link" für das Verständnis der irdischen Geodynamik gefunden und das plattentektonische Prinzip mit all seinen Konsequenzen bestätigt worden. In wenigen Jahren war der Durchbruch zu einem geschlossenen Modell der Dynamik der Erde gelungen.

Die Kontinentalränder sind die Klammer zwischen kontinentaler und mariner Geologie, da hier die Beziehungen zwischen beiden Krustentypen am klarsten zu studieren sind. Während sich das DSDP vor allem auf eine möglichst flächendeckende Probennahme in den Ozeanen konzentrierte, soll das ODP die Einbeziehung subsedimentärer Kruste, der ozeanischen Rücken, Fracture Zonen, ozeanischer Terrains u.a. Strukturen gewährleisten sowie den Bau passiver Kontinentalränder und die sedimentär-tektonischen Akkretionskeile an den aktiven Kontinentalrändern weiter aufklären. Gleichzeitig wuchs das Interesse der ozeanischen Krustenforschung an fossilen Kontinentalrändern, die in den Kontinenten konserviert sind. Deshalb ist eine zukünftige Verflechtung beider Programme bereits vorgezeichnet. Das kontinentale Bohrprogramm Kanadas prüft z.Zt. ein Tiefbohrexperiment bei Vancouver mit dem Ziel, eine aktive Subduktionszone anzustechen.

Die relativ einfach gebaute, geringmächtige und nur bis 250 Millionen Jahre alte ozeanische Kruste erlaubt wegen ihrer Herkunft aus dem Erdmantel außerdem den unmittelbaren Zugriff zur Analyse der geochemischen Mantelevolution. Die direkt beobachtbaren, sehr aktiven aktuogeologischen Vorgänge in und auf der Ozeankruste, die mit dem hohen Wärmefluß, magmatischen Prozessen, der Kruste-Meerwasser-Interaktion, hoher tektonischer Mobilität und jungen Sedimentationsprozessen zusammenhängen, eröffneten neue methodische Wege zum Studium dynamischer Abläufe.

### 1.1.3 Von der Krusten- und Lithosphärenforschung

Nachdem die globale Gültigkeit der Plattentektonik erkannt war, wurde die entscheidende Rolle der Lithosphäre deutlich, die als ca. 100-120 km dicke, rigide Schale auf der duktilen Asthenosphäre gleitet. Aktive geologische Krustenprozesse setzen eine aktive Mantelkonvektion voraus und eine Lithosphäre, die beweglich darauf reagieren kann, die mit dem Mantel und den Sphären außerhalb der festen Erde durch Austausch- und Kreislaufprozesse verbunden ist. Obwohl der Begriff "Lithosphäre" bereits von SUESS (1875)

eingeführt wurde und von BARELL (1914) zwischen einer "rigiden" Lithosphäre und "weichen" Asthenosphäre unterschieden wurde, war die Geologie bis vor kurzem im wesentlichen Oberflächenforschung und bezog höchstens den Raum bis zur 30-60 km tiefen "Moho" als der Krusten/Mantel-Grenze in die dynamische Analyse ein. Heute ist Geologie stets auch Lithosphärenforschung, da alle endogenen Prozesse in den Lithosphäre/Mantel-Beziehungen ihre Ursachen haben. Das bis dahin bereits dreidimensional orientierte Gedankengebäude der Geologie, das neben den zweidimensional kartierbaren paläogeographischen Prozeßabläufen auf der Erdoberfläche stets die zeitorientierten Prozeßüberlappungen von bis zu 3 Milliarden Jahren schräg durch die stratigraphische Ereignisfolge zu berücksichtigen hatte, war nun um eine vierte Dimension quer durch die Lithosphäre zu erweitern.

Diese "vierdimensionale" Rekonstruktion ist in der polystrukturellen kontinentalen Kruste besonders kompliziert und bedurfte weiterer Werkzeuge zur zeitlichen Ereignisordnung, da die Lithosphäre etwa zu 90 % aus "stratigraphisch" schwer zu gliedernden kristallinen Gesteinen besteht. Entscheidende methodische Schritte dafür sind in den letzten Jahren durch die Isotopengeochemie geleistet worden, die neue Methoden und Wege zur Altersdatierung und zum Nachweis der stofflichen Differenzierungsprozesse in Mantel und Kruste entwickelte.

Die Übertragung der für die letzten 250 Millionen Jahre gut rekonstruierbaren plattentektonischen Ereignisse auf 3 Milliarden Jahre Erdgeschichte fällt allein der kontinentalen Geologie zu. Nur in den Kontinenten sind davon Zeugnisse bewahrt. Dies erforderte ein rasches Umdenken von vorzugsweise statischen, fixistischen Modellen klassischer Kontinentalgeologie in ungewohnte mobilistische Konzeptionen. Alfred Wegeners Kontinentalverschiebung war zwar der Plattentektonik in manchen Elementen weit voraus, berührte die Lithosphärendynamik und die intrakontinentale Krustenforschung aber kaum. Als "fünfte Dimension" ist zu berücksichtigen, daß die plattentektonische Dynamik ebenfalls einer Entwicklung unterlegen war, z.B. beeinflusst durch die Abnahme der Wärmeproduktion, Änderungen der Lithosphärendicke und einer Evolution des Erdmantels.

Das Inventar der kontinentalen tektonischen Bautypen mußte revidiert, neu interpretiert und wesentlich erweitert werden. Zwischen kontinental eingeschweißten ehemaligen Plattenrand- und echten Intraplattenereignissen war zu unterscheiden. Das vorher gültige Bild von Krustendehnung und -einengung, Geosynklinalen und Orogenen war völlig neu zu definieren und durch bis dahin wenig bis unbekannte Grundprinzipien aus der Tensions-, Konvergenz- und Transpress-Tektonik mit Graben-, Rift- und Wrench-Elementen zu ergänzen. Mehr und mehr löst sich die kontinentale Kruste in weite Felder mit Puzzlestruktur und einem Netzwerk von Suturen auf, an denen Platten kontinentaler Größe, aber auch kleine Mikrokontinente, schollenartige Terrains und Inselbögen aneinandergeschnitten und an größere kontinentale Einheiten im Verlaufe von Subduktionsvorgängen angedockt wurden.

#### 1.1.4 Satellitengeologie, der Weg zur vergleichenden Geodynamik

Einen weiteren wesentlichen Schritt in der Erkenntnis über die Dynamik der Erde brachte die Weltraumforschung mit den Satellitenmissionen zu den Planeten und Monden des Sonnensystems bis hin zu den Uranusmonden. Jetzt war es möglich, die Geologie der anderen Himmelskörper und deren Lithosphäre/Mantel-Relationen vergleichend zu analysieren. Die einzigartige Stellung der Erde als dem geologisch aktivsten planetaren Körper mit dem mobilsten Lithosphäre/Mantel-System wurde anerkannt. Da die Häufigkeit radioaktiver Elemente als Wärmequelle proportional zum Volumen planetarer Körper ist, die Wärmeabstrahlung aber proportional zur Oberfläche, besitzt die Erde das günstigste Verhältnis für eine lange geologische Aktivität.

#### 1.1.5 Wasser, das Blut der Lithosphäre

Ein entscheidender Faktor für die Reaktion der irdischen Lithosphäre auf den Antrieb durch die Mantelkonvektion ist die Existenz großer Mengen an flüssigem  $H_2O$ . Die riesigen Zirkulationssysteme von Wasser in der ozeanischen Kruste, besonders an den Flanken der mittelozeanischen Rücken, wurden eindrucksvoll durch die "black smokers" sichtbar. Etwa  $1\ 000\ km^3$  Wasser werden jährlich durch die mittelozeanischen Rückensysteme gepumpt, wobei die ozeanischen Krustengesteine abgekühlt, hydratisiert und gelaugt werden. Die gelösten, transportierten und an Meerwasser wieder ausgefallenen Stoffe lagern sich in verschiedener Form, z.B. auch als Manganknollen und Erzschlämme, und oft angereichert auf dem Meeresboden wieder ab. Im Verlauf der Erdgeschichte ist der Inhalt der Weltmeere mehrfach durch das ozeanische Krustensystem gepumpt worden.

Für den "reibunglosen" Ablauf der Subduktionsprozesse und für den Vulkanismus an den kontinentalen Rändern spielt das aus der hydratisierten Kruste im Verlauf der Subduktion wieder freigesetzte Wasser durch den Aufbau von Porenüberdrücken als Schmiermittel und für die Anatexis und Magmenbildung durch Schmelzpunkterniedrigung eine entscheidende Rolle. Aber auch in den subduzierten Sedimenten am Kontinentalrand, den Akkretionskeilen, werden riesige Mengen an  $H_2O$ -,  $CH_4$ -, höhere Kohlenwasserstoffe,  $CO_2$ -, S- und N-Verbindungen flüssig, gasförmig oder als Hydrate gespeichert oder durch Kompaktion freigesetzt. Als "tektonische Brines" übernehmen sie eine entscheidende dynamische Funktion für den Stapelmechanismus und die Strukturentwicklung in den mächtigsten Sedimenttrögen der Erde. Vergleichbares hat sich auch im Netzwerk der Paläosuturen in Paläosubduktionszonen an den Rändern der kontinentalen Terrainakkretion abgespielt. Wassergesättigte Sedimente werden versenkt, Porenraum durch Kompaktion reduziert, die gesteinsbildenden Minerale bei Diagenese und Metamorphose dehydratisiert, die Gesteine stufenweise abgetrocknet von  $> 20\ Gew. \%$   $H_2O$  in der Oberkruste bis auf weniger als  $0,5\ Gew. \%$  in der Unterkruste. Aus einer  $30\ km$  akkumulierten Sedimentmächtigkeit, der durchschnittlichen Krustenmächtigkeit, wird so rein rechnerisch eine etwa  $5\ km$  mächtige Wassersäule wieder freigesetzt. Deshalb steht nicht nur die ozeanische, sondern auch die kontinentale Kruste der

Erde, im Gegensatz zu anderen planetaren Körpern, in ständigem Austausch mit flüssigen und gasförmigen Phasen, vor allem mit  $H_2O$ . Dies ist für die mechanische Scherentfestigung von Mineralen bei duktiler Deformation, für die Bildung von Riß- und Spaltenpermeabilität, Überschiebungs- und Deckentektonik, hydraulische Bruchprozesse, für den Wärmefluß der Kruste, den Abbau von Spannungsspeicherung und Begrenzung der Erdbebenaktivität, für die Wechselbeziehung Gestein-Fluidsysteme mit Alternations-Laugungs-Transport- und Mineralisationsprozessen, aber auch für die Schmelzbildungen und die magmatische Aktivität von entscheidender Bedeutung. Das Wasser als wichtigste fluide Komponente spielt deshalb als "Blut der Lithosphäre" für den Stoffwechselprozeß mit Hydro-, Atmo- und Biosphäre auf der einen und dem Erdmantel auf der anderen Seite und für die Mechanik der Lithosphäre eine noch vor kurzem nicht erkannte große Rolle.

In diesen Kreislaufprozeß ist aber auch die kontinuierliche Entgasung der Erde einzubeziehen, die vom Mantel durch die Kruste erfolgt und sich besonders auf  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , He und andere Edelgase bezieht. Spekulativ und kontrovers diskutiert sind dabei eine postulierte  $CO_2$ -Metamorphose in den Gesteinen der Unterkruste, die Synthese von anorganischen Kohlenwasserstoffen an der Mantel/Kruste-Grenze, von  $CO_2$  aus dem Mantel, die krytovulkanische Ereignisse auslösen und eventuell Impaktstrukturen vortäuschen konnten. Krustenfluide und ihre geologische Aktivität stellen sich immer mehr als eine neue Forschungsthematik dar, zwingen zum Überdenken der Krustenpermeabilität und sind ein Steuerungsfaktor der Lithosphärendynamik.

#### **1.1.6 Tiefenseismik, elektrische Leiter, 3-D-Seismik - der Weg zur Tomographie von Lithosphäre und Erdmantel, zum Verständnis und zur Rekonstruktion von 3 Milliarden Jahren Krustenentwicklung**

Unmittelbarer Auslöser für eine explosive Neubelebung der kontinentalen Krustenforschung, die rasch zur Formulierung zahlreicher internationaler Großprojekte führte, waren die ersten tiefenreflexionsseismischen Profile durch die Appalachen. Der Nachweis in Profil und Fläche unerwartet ausgedehnter flacher Reflektoren und deren Interpretation als tektonische Detachments mit Überschiebungsweiten der Externzone des Orogens einschließlich Kristallin und Granitintrusionen bis mehr als 200 km über Vorlandsedimente führte zur Erkenntnis der "thin-skinned tectonics".

In der östlichen Verlängerung der Appalachenfront wurden im Bereich der nördlichen Front des Variscikums in Südengland, Nordfrankreich, Belgien und 1987 in einem Profil durch den Stavelot-Venn-Sattel flache Reflektoren entdeckt, die als Anzeichen großer Deckenüberschiebungen von 30 - 50 km gewertet wurden (MEISSNER et al. 1980; MEISSNER, WEVER & DÜRBAUM 1986). Die daraufhin geforderte Überprüfung der interpretierten thin-skinned-Tektonik mit Bohrungen war ein wesentlicher Stimulator für das US- und das deutsche Tiefbohrprogramm. In Belgien wurde daraufhin versucht, mit der Bohrung Havelange die Faille du Midi zu durchbohren (BOUCKAERT 1985). Die Überschiebungssituation wurde mit diesem Projekt grundsätzlich bewiesen. Die Elemente und Mechanismen der Thrust-Tektonik waren durch die Erdölgeologie in

den Externzonen-Strukturen von Orogenfronten bereits bekannt, aus der Moine-Thrust-Zone Schottlands, aus den Alpen und anderen Regionen (MCCLAY & PRICE 1981; BOYER & ELLIOTT 1982). Für die Vorbereitung des KTB wurde auf die Situation im Stavelot-Venn-Massiv vorerkundet und die 400 m-Bohrung Konzen abgeteuft (WALTER & WOHLBERG 1985). Von der deutschen Erdölindustrie wurde 1985/86 am Nordrand der Alpen eine ähnliche Situation mit Überschiebungen des Molassetroges durch die Bohrung Hindelang erkundet. Sie fand das komplizierte Thrust-tektonische Inventar der Externzone vor und mußte aufgrund der daran gekoppelten Überdruckverhältnisse des Fluidregimes aufgegeben werden.

Aus den ersten Ansätzen der Tiefenseismik in den Externzonen entwickelte sich in den USA das COCORP-Programm, dem sich in Deutschland DEKORP, in England BIRPS, in Frankreich ECORS, in Kanada LITHOPROBE sowie weitere Projekte in anderen Ländern anschlossen. Ein weltweites Profilnetz für wissenschaftliche Tiefenreflexionsseismik wurde konzipiert. Dabei zeigt sich immer deutlicher eine reiche Strukturierung auch der kristallinen kontinentalen Kruste, die vorher nicht erwartet worden war.

Die zunächst auf sedimentäre Strukturen fixierten seismischen Verfahren hatten wegen des mangelnden Interesses am Basement, wegen der Filtereigenschaft bestimmter Sedimentkörper und vor Entwicklung der hochauflösenden Datenerhebung sowie vor Einsatz der neuen Processing-Verfahren die Feinstruktur des kristallinen Untergrundes nicht erkennen können.

Für die Vorentscheidung des KTB mit Einengung der Lokationen auf Schwarzwald und Oberpfalz spielte eine entscheidende Rolle, daß inzwischen über den Bau der Externzonen wesentliche Erkenntnisse gewonnen worden waren, die kristallinen Interzonen dagegen bisher nicht erkundet wurden. Deshalb sollten die nach petrologischen Befunden tief eingeschnittenen Regionen des Schwarzwaldes und der Oberpfalz auf ihre mögliche Eignung für eine Bohrung näher untersucht werden.

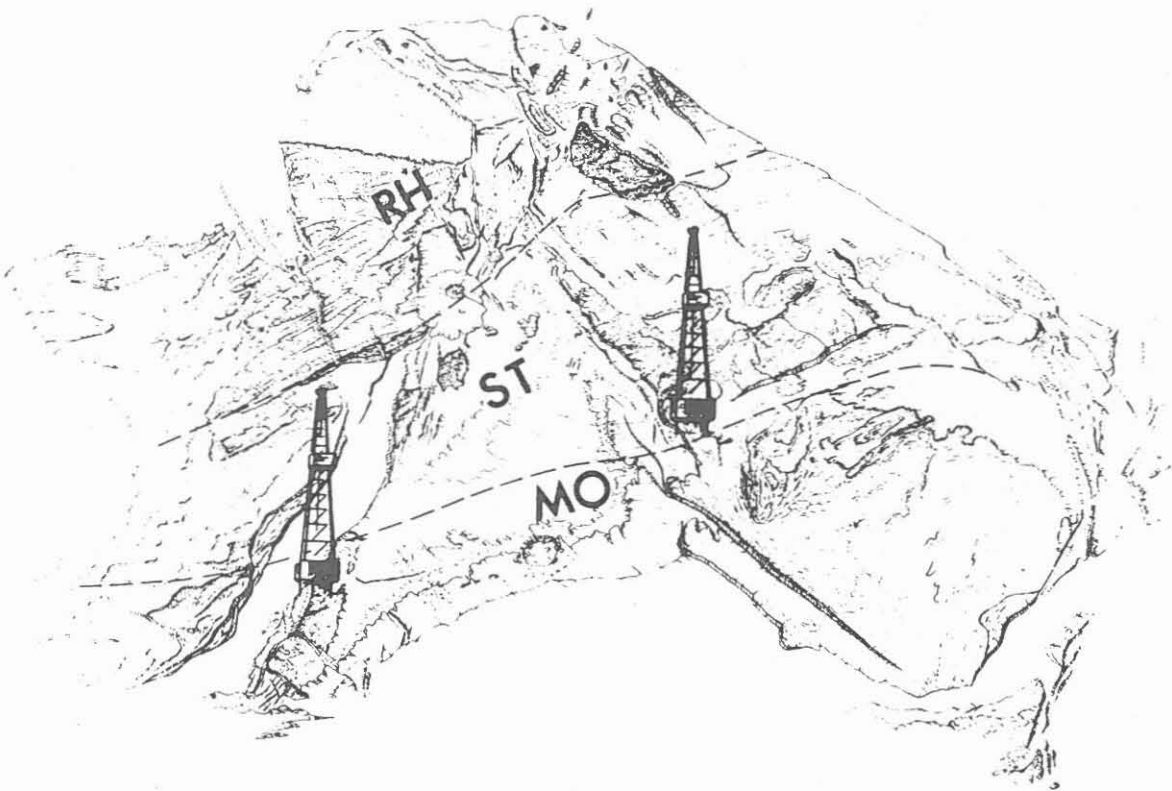


Abb. 1: Lage der Bohrlokation Oberpfalz (rechts) und Schwarzwald (links) im Blockbild nach H. CLOOS

MO - Moldanubikum  
ST - Saxothuringikum  
RH - Renohercynikum

Im Rahmen des DEKORP wurde deshalb ein erstes Profil zwischen den beiden Lokationen vom Nördlinger Ries bis Friedberg aufgenommen, um die beiden wichtigsten Strukturlinien der Internzone, die Grenzen zwischen Moldanubikum und Saxothuringikum sowie zwischen Saxothuringikum und Renohercynikum auf ihre Tiefenstruktur zu prüfen (DEKORP Research Group 1985). Beide Strukturlinien erwiesen sich als tektonische Leitelemente von regionaler Bedeutung, die sich im Profil als südfallende Elemente mit erhöhter Reflektivität zu erkennen geben. Die Strukturlinien sind gleichzeitig Positionen mit ungewöhnlicher Anreicherung von Diffraktionen, und sie stellen Grenzen zwischen Krustenblöcken mit unterschiedlichem Reflektionsverhalten und -dichte dar. Als die bedeutendere Linie erwies sich in diesem Profil die Grenze Renohercynikum-Saxothuringikum mit größeren Strukturelementen, die nach Süden unter den Spessart abtauchen. Nach Norden bildet sich ein flaches Detachment im Paläozoikum heraus, das in dem 1986 aufgenommenen Fortsetzungsprofil von Friedberg zur Bohrung Münsterland und einem Abzweig zur Bohrung Vermoldt noch deutlicher in Erscheinung tritt. Obwohl bei diesem ersten Profil die in der Folgezeit stark weiterentwickelten Verfahren der



Datenerhebung und des Processing noch nicht voll zur Anwendung kamen, war damit bereits bewiesen, daß der kristalline Unterbau nicht transparent ist, keine einfache Großgliederung in Ober- und Unterkruste mit einer flachen Conrad-Diskontinuität vorliegt, sondern komplizierte tektonische Strukturen abgebildet werden, die eine Fortsetzung der Vorerkundung im KTB und der seismischen Profile im Kristallin rechtfertigen.

In einem ersten Interpretationsversuch wurden bei strenger Berücksichtigung aller Kenntnisse aus der Oberflächengeologie und unter Anwendung Thrust-tektonischer Konzeptionen die seismischen Strukturen im Sinne spätvariskischer Kompressionstektonik dargestellt und vergleichend zu Alpen und Himalaya diskutiert (BEHR & HEINRICHS 1987). Für eine stärkere Einbeziehung von Elementen der spät- und postherzynen Transpress-Tektonik in die Interpretation fehlen noch weitergehende Zusatzexperimente, an denen z.Zt. gearbeitet wird. Das Grundprinzip einer Ramp-Tektonik mit Elementen oberkrustaler und mittelkrustaler Detachments, mit Duplex-Strukturen, antiformal stacks, Kulminationszonen etc. dürfte danach auch für die kristalline Kruste prinzipiell anwendbar sein.

Nach diesem positiv verlaufenen Eingangsexperiment wurden mit wesentlich höherem Aufwand für Reflexions- und Refraktionsseismik der Schwarzwald und die Oberpfalz untersucht. In beiden Regionen bestätigte sich die reiche seismische Strukturierung der Gesamtkruste, gleichzeitig wurden aber zwei sehr unterschiedliche Strukturmuster gefunden, die verschiedene dynamische Situationen abbilden (BEHR & EMMERMANN 1987).

Im Schwarzwald (Abb. 2) zeigt sich im Unterschied zu allen anderen bisher aufgenommenen Profilen eine seismisch sehr stark lamellierte Unterkruste unter einer relativ reflexionsarmen, aber nicht reflexionsfreien Oberkruste (LÜSCHEN et al. 1985). Die Ursache der seismischen Unterkrustenlamellierung ist von größtem Interesse. Diskutiert werden dafür u. a.: die Intrusion magmatischer Lagergänge aus der Unterkruste, Aufschmelzung und Differentiation von Unterkrustenmaterial, subduzierte Komplexe mit unterschiedlicher Lithologie, Scherprozesse in der Unterkruste, durch die z. B. magmatische Dykes rotiert werden.

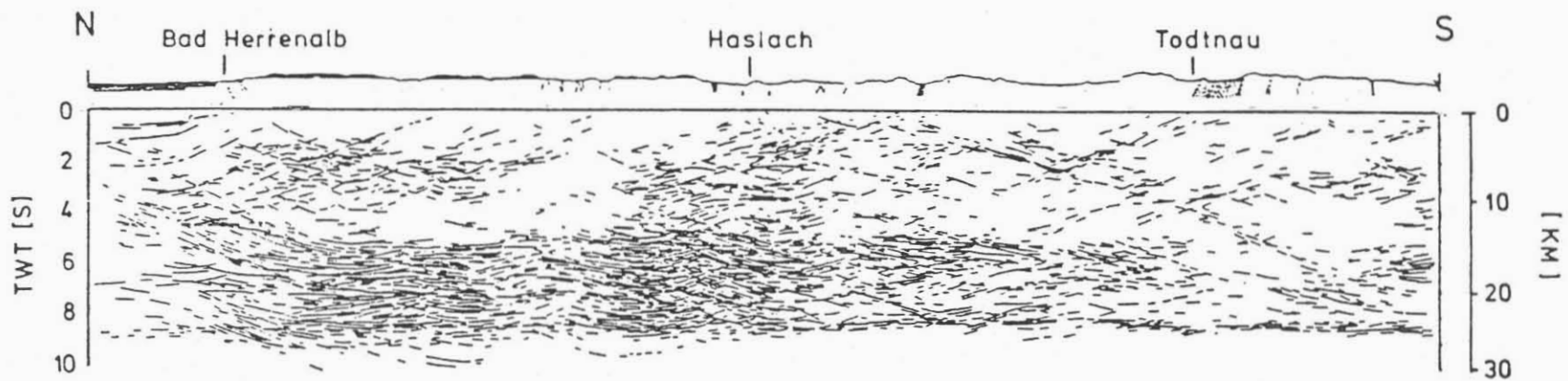


Abb. 2: Reflexionsseismische Daten im N-S-Profil des Schwarzwaldes.  
 (Aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB.  
 Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald 1986)

Aus der geologischen Situation geht jedoch hervor, daß ein genetischer Zusammenhang der Lamellierung mit dem Oberrheintalgraben bestehen sollte. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die lamellierte Kruste von den Rheingrabenstörungen noch versetzt wurde. Die Unterkrustenlamination tritt auch noch an anderen Stellen mit herzynischer Krustenbildung auf und wird z. T. sogar als spezifisch dafür angesehen. Sie ist m. E. aber an postherzyne Krustendehnung gebunden und nicht ursächlich mit den herzynen Orogenprozessen verknüpft.

In der Oberkruste des Schwarzwaldes sind zwei gegenfallende Reflexionsrichtungen zu unterscheiden.

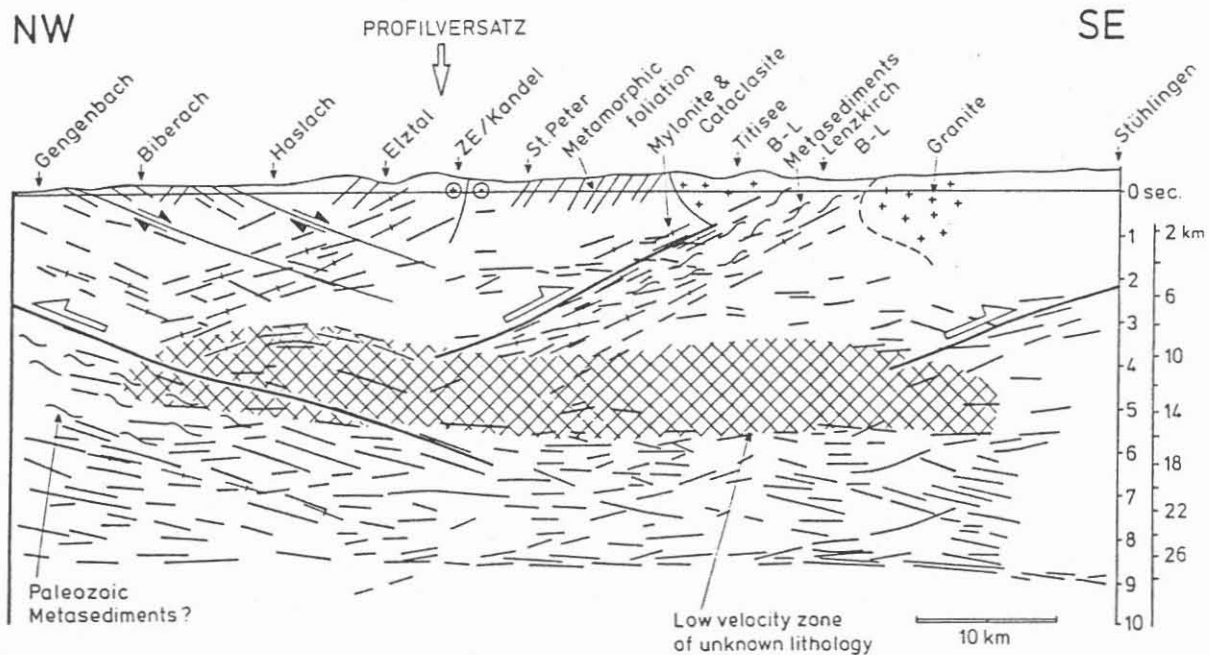


Abb. 3: Tektonische Interpretation der seismischen Tiefensondierung im Schwarzwald; das Profil liegt quer zum variskischen Streichen und setzt sich aus den Reflexionsprofilen 8402 und 8514 (Strichzeichnungen) zusammen (Versatz im Elztal). An zwei Großstrukturen, der Baden-Baden-Zone im NW und der Badenweiler-Lenzkirch-Zone im SE, scheint der Zentralschwarzwälder Gneiskomplex über paläozoische Gesteine überschoben zu sein. In der Umgebung von Haslach deuten zahlreiche Kataklasten auf flache Abschiebungen. In der Nähe des Elztals und der Zinken-Elme-Zone deuten Mylonite bzw. Kataklasten auf schräge dextrale Überschiebungen nach SE. Die Lithologie der Zone erniedrigter seismischer Wellengeschwindigkeit ist aus geologisch-tektonischen Daten nicht erschließbar. (Aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald 1986)

Nach Süden fallen Strukturen von der Grenze Saxothuringikum-Moldanubikum am Nordschwarzwald (Zone von Baden-Baden) ein, in nördliche Richtungen setzt sich dagegen die Zone von Badenweiler-Lenzkirch in die Tiefe fort. Unter Berücksichtigung der Oberflächengeologie, Petrologie und der Altersdaten lassen sich mehrere Entwicklungsschritte für den Schwarzwald unterscheiden, die gegenwärtig etwa folgende Aussagen erlauben:

- Im mittleren Schwarzwald ist durch eine konvergente Thrust-Tektonik präkambrische Unterkruste mit Hochdruck- und Mitteldruckmetamorphiten (Eklogiten und Granuliten) in höhere Niveaus geschoben werden.
- Dieser Prozeß endete mit einer kaledonischen Anatexis, die von weiterem Thrusting und von Mylonitisierung begleitet wird und mit einer Fibrolitisierung endet. Nach den vorliegenden Altersdaten müßte dies bei etwa 410 Mio. Jahren abgeschlossen sein.
- Spätherzynisch erfolgt an der Badenweiler-Lenzkirch-Zone eine starke Konvergenz in Verbindung mit Subduktion. Möglicherweise erfolgt ein gleiches Ereignis auch in entgegengesetzter Richtung im Nordschwarzwald. Die zugehörigen seismischen Strukturen lassen sich trotz der Unterkrustenlamellierung noch bis in die Unterkruste verfolgen. Diese Konvergenzzonen wurden von EISBACHER & KROHE (1986) herausgearbeitet.
- Durch die Konvergenz wird eine kräftige Krustenhebung verursacht, die durch Abschiebung gravitativ ausgeglichen wird. Diese Abschiebungstektonik ist besonders nördlich der Badenweiler-Lenzkirch-Zone zu beobachten, die Abschiebungen selbst sollen in listrische Flächen einmünden, die in der Mittelkruste verebnet (KROHE 1985).
- Permisch bis postvariskisch wird besonders der mittlere und nördliche Schwarzwald von Transpress-Tektonik betroffen mit steilstehenden strike-slip-Zonen in Ost-West- und Nord-Süd-Richtung bei vorwiegend flachfallenden Bewegungsrichtungen. Die dabei erzeugte Mylonitisierung ist besonders gut in den postvariskischen Graniten und permischen Porphyrgängen zu erkennen. Diese jungen Strukturen gehören zu dem Wrench-System, das auch in den Vogesen und im Basement des mittel- und norddeutschen Raumes kräftig entwickelt ist und in der mesozoischen Sedimentbedeckung immer wieder durchgepaust wird.

Besonders eindrucksvoll ist das refraktionsseismische Profil durch den Schwarzwald (Abb. 4), das über der lamellierten Unterkruste zwischen etwa 8 - 15 km eine durchgängige low-velocity-Zone (LVZ) mit  $V_p$ -Erniedrigungen bis auf  $5,4 \text{ km s}^{-1}$  zeigt. Der an der Oberfläche gemessene höchste Wärmefluß liegt über dem zentralen Bereich mit den niedrigsten  $V_p$ -Werten. Ein guter elektrischer Leiter in 11-14 km fällt mit dem unteren Teil der LVZ zusammen (Abb. 5). Alles weist deshalb darauf hin, daß es sich auch hierbei wie bei der lamellierten Unterkruste um ein junges Element in Zusammenhang mit dem Rheingraben-Rifting handelt, das nicht mit paläozoischen Ereignissen in Zusammenhang steht.

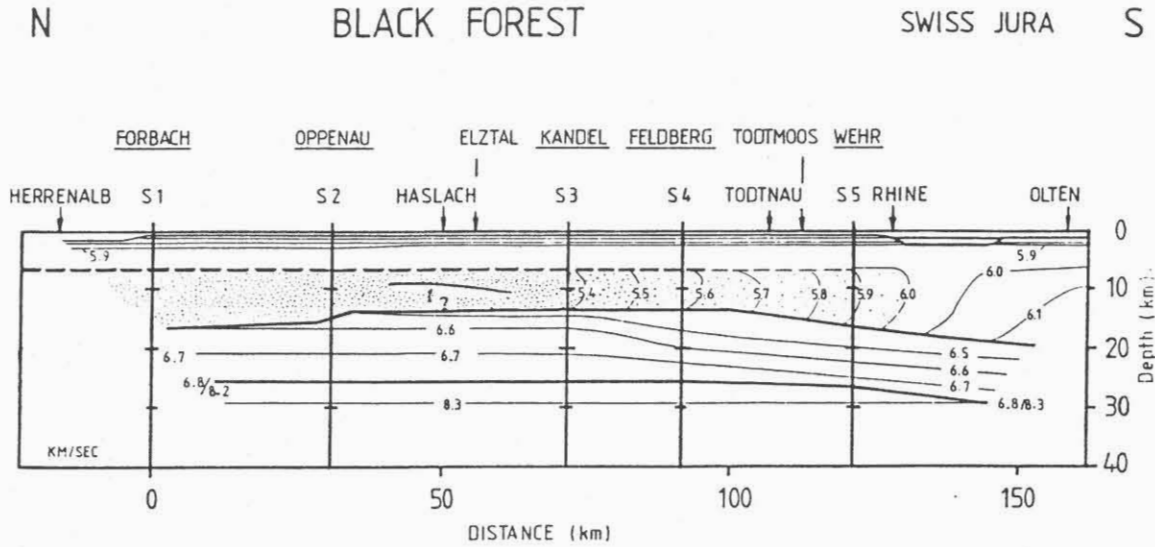


Abb. 4: Refraktionsseismisches Modell des Schwarzwaldes parallel dem reflexionsseismischen Profil. (Aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald 1986)

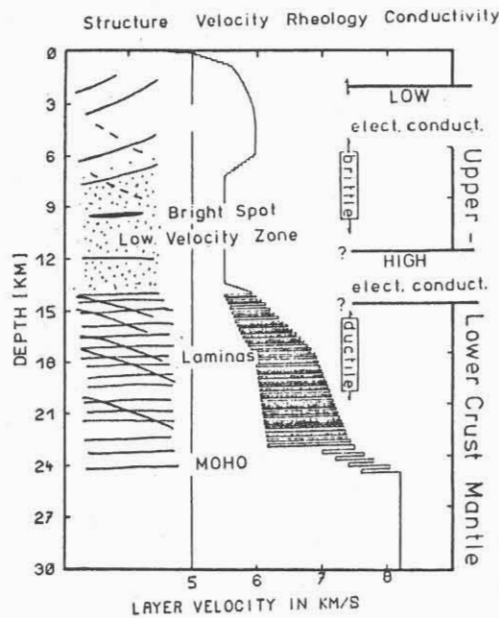


Abb. 5: Geophysikalische Eigenschaften der Schwarzwald-Kruste im Lokationsgebiet; zusammengestellt aus Ergebnissen der Vorerkundungen (LÜSCHEN, pers. Mitteilung).

Die Situation in der Oberpfalz stellt sich dagegen wesentlich anders dar. Hier ist die Oberkruste ungewöhnlich reich an seismischen Signalen mit mehreren sehr deutlichen Reflektoren und reflexionsreichen Bändern, die von der Oberkruste bis an die Moho nach Süden absteigen (Abb. 6). Die Unterkruste besitzt keine mit dem Schwarzwald vergleichbare Lamination, sie ist wesentlich transparenter, obwohl auch hier einzelne Bereiche stärker strukturiert sind.

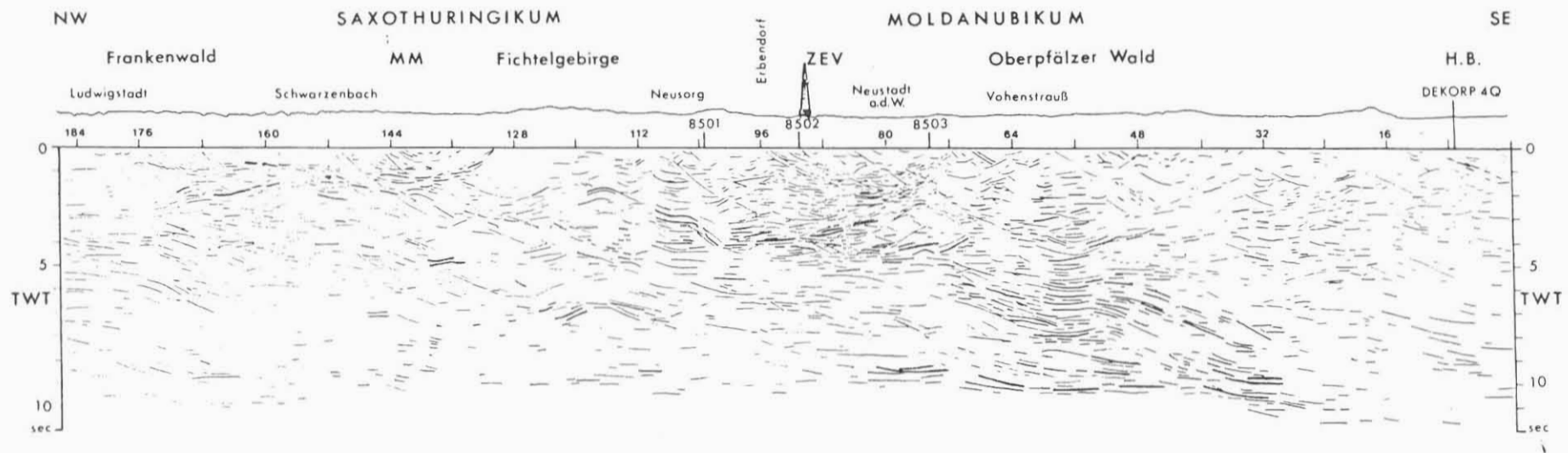


Abb. 6: Reflexionsseismisches Profil DEKORP 4, 1 sec doppelter Laufzeit (TWT) ~ 3 km.  
 Strichzeichnung (SCHMOLL, unveröff.; aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB.  
 Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz 1986)

Die Oberflächengeologie läßt sich sehr gut mit den seismischen Strukturen korrelieren. Die kristallinen Deckenkomplexe der Münchberger Masse, der Zone von Erbdorf-Vohenstrauß und des Hohen Bogens sind als schüsselförmige Gebilde zu erkennen, während das Fichtelgebirge als "antiformal stack" in Erscheinung tritt. Unter dem Paläozoikum der saxothuringischen Zone ist ein Reflektor entwickelt, der als Detachment zwischen paläozoischem Deckgebirge und Kristallin anzusprechen ist, das sich nach Süden bis an die Kruste-Mantel-Grenze absenkt. Die Geschwindigkeit-Tiefen-Struktur zeigt als prominenteste Heterogenität Hochgeschwindigkeitskörper in Tiefen ab 8 km, die ebenfalls nach Süden einfallen. Der größte dieser Körper wird als "Erbdorf-Körper" bezeichnet mit  $V_p$  bis etwa  $7 - 8 \text{ kms}^{-1}$ . Als Interpretation können sowohl obduziertes Mantelmaterial als auch gut texturierte Unterkrustengesteine, z. B. mit hohen Sillimanitgehalten, in Frage kommen. Im Hangenden und Liegenden des Hochgeschwindigkeitskörpers befinden sich Bereiche mit  $V_p$ -Geschwindigkeitserniedrigungen bis  $5,8 \text{ kms}^{-1}$  (neben Zonen erhöhter integrierter elektrischer Leitfähigkeit in Oberflächennähe wurde eine derartige Zone auch in einer Tiefe von 10 km nachgewiesen). In der Oberkruste sind im Bereich des Moldanubikums auch einige antivergente, nach Norden fallende Elemente enthalten. Die geologischen Modellvorstellungen sind daher leicht differenziert. Das zentrale südfallende Strukturelement markiert wohl ohne Zweifel die Grenze zwischen Moldanubikum und Saxothuringikum und läßt sie als eine bedeutende Verschweißung zweier Krustenblöcke erkennen. Beide Krusteneinheiten wurden durch eine Niederdruck-Hochtemperatur-Metamorphose im Oberkarbon mit einem Höhepunkt vor etwa 320 Mio. Jahren verschweißt (Abb. 7).

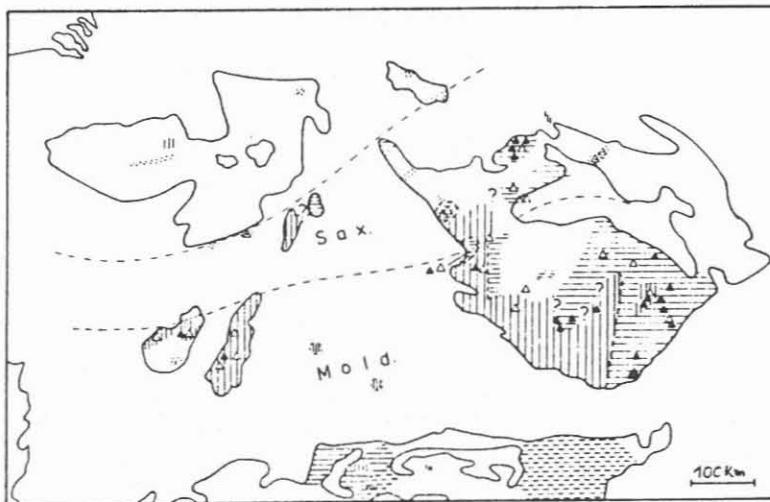


Abb. 7: Verteilung der Niederdruckeinheit (vertikale Striche) und der Mitteldruckeinheit (horizontale Striche; wenn mit alpiner Überprägung: gestrichelte horizontale Linien) in den mitteleuropäischen Varisziden. Bereiche mit polymetamorphen Gesteinsverbänden (schwarze Dreiecke; Granulit, weiße Dreiecke: Eklogit), isolierte HP-Gesteine (Dreieck mit Punkt), niedrig- oder sehr niedriggradige Zonen (gepunktete Flächen) und einige Bohrlöcher in das LP-Basement (Kreise) sind außerdem dargestellt. Die Kontakte zwischen den beiden metamorphen Einheiten sind entweder tektonisch (gestrichelte Linien) oder unbekannter Natur (?). (Aus: BLÜMEL 1986)

Während das Saxothuringikum monometamorph ist, werden die moldanubischen Einheiten vor allem von einer vor etwa 380 Mio. Jahren stattgefundenen Mittel- bis Hochdruck-Metamorphose betroffen. Relikte älterer Metamorphosen bis etwa 560 Mio. Jahren sind zu erkennen (BLÜMEL 1986).

Der deutliche Unterschied zum Schwarzwald besteht darin,

- daß in der Oberpfalz die herzynischen Strukturen auch in der Oberkruste sehr klar erkennbar erhalten geblieben sind,
- daß die Metamorphoseereignisse gut gliederbar sind und mit den herzynischen tektonischen Ereignissen in Zusammenhang stehen,
- daß spätvariskische Abschiebungen und postvariskische Transpress-Tektonik nicht dominierend in den Vordergrund treten und
- daß postvariskische thermische Ereignisse mit Löschung der alten Strukturen in Unter- und Mittelkruste durch neu angelegte Lamination und Aufbau einer LVZ nicht stattgefunden haben.

Zusammenfassend kann man zur Tiefenreflexionsseismik sagen, daß in vielen Krustenprofilen auch außerhalb des DEKORP, z. B. bei ECORS und BIRPS, flach einfallende Reflektoren oder breite Bänder erhöhter Reflektivität gefunden wurden, die z. T. bis in die mittlere Kruste, nicht selten bis an die Moho und vereinzelt sogar bis in den Mantel abtauchen.

Insgesamt ergibt sich damit ein Strukturmuster, das, tektonisch interpretiert, der plattentektonischen Dynamik gut entspricht. Man kann die Entdeckungen des Inventars der Tiefenreflexionen in der kontinentalen Kruste mit der Entdeckung des Magnetstreifenmusters in der ozeanischen Kruste vergleichen, das mit dem sea-floor spreading die Plattentektonik einleitete. Die Auswirkungen und Anregungen für ein sehr rasches Umdenken in ozeanischer bzw. kontinentaler Geodynamik sind gleich.

Die neuen seismischen Strukturmuster von Kruste und Lithosphäre gaben endlich den Weg frei, Oberflächengeologie in die Tiefe bis hin zum auslösenden Motor der Mantelkonvektion zu verfolgen und zu rekonstruieren. Magnetstreifenmuster und seismische Tiefenstrukturen zwangen zum Umdenken von statischen auf mobilistische Konzeptionen.

Vor dieser Erkenntnis waren die geophysikalischen/geologischen Vorstellungen zur Gliederung der kontinentalen Kruste von relativ einfachen statischen Schichtmodellen beherrscht, die den Schalenbau der Erde bis in die Kruste fortsetzten. Eine Oberkruste wird in etwa 12 - 20 km Tiefe durch eine mehr oder weniger deutliche Conrad-Diskontinuität von einer Unterkruste abgelöst. Die Natur der Unterkruste wurde zunächst als basaltisch interpretiert, später mit getrockneten, granulitartigen Gesteinen erklärt. Noch am Beginn des



russischen Tiefbohrprojektes Ende der sechziger Jahre war eines der formulierten Ziele, die basaltische Unterkruste zu erreichen. Relativ häufig in der Oberkruste auftretende Niedergeschwindigkeitskanäle wurden meist als quarzreiche Granithorizonte der Bereiche der Anatexis angesehen.

Aber auch die neuen seismischen Strukturen und Daten bringen allein zunächst noch keine Information über die stofflichen oder mechanischen Krusteneigenschaften, die ihnen zugrunde liegen. Refraktionsseismik und Scherwellenanalyse mit Ermittlung der Poisson'schen Verhältnisse sowie Laborexperimente an natürlichen Gesteinen unter den P/T-Bedingungen der tiefen Kruste sind erforderlich, um die indirekt gemessenen physikalischen Eigenschaften interpretierbar zu machen und auf definierte geologische Körper schließen zu können (HOLBROOK et al. 1987; KERN 1982). Es ist daher offensichtlich, daß eine der Hauptaufgaben wissenschaftlichen Tiefbohrens in der Schaffung von Musterprofilen durch geophysikalische Leitstrukturen der kontinentalen Kruste bestehen muß, um diese in ihren Eigenschaften zu testen und damit interpretationsfähig zu machen.

Die genaue Analyse von Geschwindigkeitsanomalien verschiedener seismischer Wellengruppen hat es bereits möglich gemacht, Großstrukturen im tiefgelegenen Erdmantel zu erkennen und über tomographische Schnitte räumliche Vorstellungen über die konvektiven Massenverlagerungen zu gewinnen. Die tomographische Auflösung der Feinstruktur in der Kruste bedarf neben der Weiterentwicklung des Daten-Processing vor allem der Ausschaltung von oberflächennahen Störeffekten durch Sedimentbedeckung und die strukturelle Auflockerung in den oberen Kilometern. Deshalb bieten tiefe Bohrlöcher mit den Möglichkeiten des VSP (Vertical Seismic Profiling) durch Empfang von Signalen unterhalb dieser Filter verbesserte Chancen zur strukturellen Erforschung von Kruste und Mantel unterhalb der Bohrlochsohle.

Neben den elastischen Eigenschaften des Krustenmaterials hat sich die elektrische Leitfähigkeit der Kruste als ein Parameter erwiesen, von dem neue Aussagen zur Krustenstruktur erwartet werden. Elektrische Leiter treten häufiger und flächenhaft ausgedehnter in der Kruste auf als bisher angenommen, und sie liegen nicht selten schrägeinfallenden seismischen Strukturen parallel. In einem N-S-Schnitt durch Deutschland kommt die Koinzidenz der Leitfähigkeitsstrukturen mit den seismischen Großstrukturen bereits gut zum Ausdruck (Abb. 8, HAAK et al. 1986). Stellen sie Bereiche mit größerer Permeabilität dar, in denen Krustenfluide erhöhter Salinität gespeichert sind? Wenn ja, hat diese offene Porosität intrakrustale tektonische Ursachen oder sind es hydraulische Mikrobrüche, von Schmelz- und Fluidaktivität erzeugt, die durch subkrustale Wärmequellen angeregt wurden? Sind starke lineare Textureffekte entscheidend und welche Rollen spielen feste Phasen wie Sulfide oder Kohlenstoffverbindungen für die Leitfähigkeit? Breite Zonen erhöhter Leitfähigkeit über aktiven Kontinentalrändern verweisen auf subduzierte Fluide. Was aber ist die Ursache für die zahlreichen intrakontinentalen Heterogenitäten, die sich an der Oberkante der Unterkruste häufen? Durch eine Kombination von seismischen und elektrischen Methoden und durch die Anordnung geeigneter Profilnetze wird eine räumliche Auflösung der Krustenstrukturen zu erzielen sein (3-D-Geophysik), und die Konstruktion beliebiger Schnitte durch diese Strukturen wird möglich.

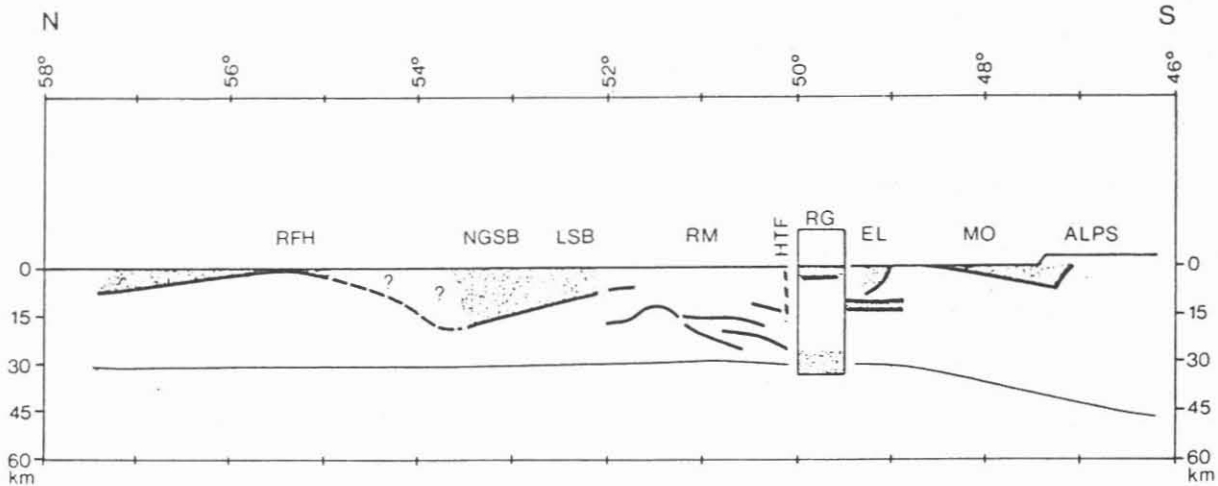


Abb. 8: Zusammenfassende Darstellung der Strukturen hoher Leitfähigkeit entlang dem mittleren Teil der EGT mit den Abkürzungen: RFH = Ringkøping-Fynen-Schwelle, NGSB = Norddeutsches Sedimentbecken, LSB = Niedersächsisches Becken, RM = Rheinisches Schiefergebirge, HTF = Hunsrück-Taunus-Störung, RG = Rheingraben, EL = Erben-dorf-Linie, MO = Molasse. Die dünne Linie in ca. 30 km Tiefe soll die Tiefe der Moho markieren. (Aus: HAAK et al. 1986)

### 1.1.7 Extensionsorogen und Transpress-Tektonik versus Konvergenzorogen

Die geologische Deutung der Strichzeichnungen seismischer Sektionen aus dem Grundgebirge lassen z. Zt. sehr viel Spielraum, da noch jede Erfahrung fehlt. Im Gegensatz zum kontrastreichen, durch Schichtung gut gegliederten sedimentären Deckgebirge sind die Reflektoren aus dem gefalteten, unregelmäßig zerscherten, von Graniten und Magmatiten durchsetzten, duktil verformten, stark durch Metamorphose homogenisierten Schiefergebirge und Kristallin von geringer Intensität, durch kurze Ausdehnung, Ausfall durch fehlende Energieübertragung bei ungünstigen Deckgebirgsverhältnissen und langen Diffraktoren charakterisiert. Erfahrungen aus den wenigen laufenden Bohrprojekten in das Grundgebirge (Basement), die z. Zt. in Schweden und Frankreich durchgeführt werden, zeigen, daß jüngste postkristalline Kataklassen-, Alterations- und Scherzonen, magmatische Sills und "brittle deformation" unterschiedlicher Genese meist größere Signale erzeugen und dabei den duktilen Großbau überlagern und verschleiern. Die Interpretation muß daher von Modellvorstellungen ausgehen und möglichst alternative Lösungen prüfen. Die abgeleiteten Krustenprofile sind dementsprechend modellhaft zu bewerten. Deshalb ist es dringend erforderlich, über Tiefbohrungen Erfahrungen mit seismischen Strukturen im Kristallin zu sammeln.

Flaches, "low-angle faulting" mit länger aushaltenden listrischen Reflektoren bei "ductile brittle deformation" tritt häufiger in Krustensituationen mit Extension auf, z. B. an passiven Kontinentalrändern, an Riftzonen oder verbunden mit anderen Ereignissen der Krustendünnung. Da Extensionsprozesse jüngere Ereignisse nach der Krustenkonsolidierung darstellen, können sie auch in Kompressionsorogenen während des isostatischen Uplifts auftreten. In diesem Fall dehnen sie das Orogen und erzeugen weite Abschiebungen des Hangenden, so daß die tiefkrustalen Metamorphite aus dem Orogenkern relativ rasch in das Erosionsniveau gebracht werden (metamorphic core complex tectonics). Man ist daher leicht geneigt, größere seismische Strukturen im Basement späten Extensionsereignissen zuzuschreiben. Die Bedeutung der Extension und Krustendünnung und die Definition von "Extensionsorogenen" (KLIGFIELD et al. 1984) versus den lang bekannten Kompressionsorogenen ist in jüngster Zeit erst voll erkannt worden. Verschiedene Grundmodelle dazu zeigt die Abb. 9 aus einer Arbeit von R. W. ALLMENDINGER et al. (1987) am Beispiel der Basin and Range-Provinz in Deutung von COCORP-Profilen (Abb. 9). Neben low-angle-Scherzonen, die zur Moho abtauchen und asymmetrische Halbgräben bilden, ist mittelkrustale Delamination mit flachen Detachments im Verlaufe einer Entkoppelung von Ober- und Unterkruste ein wahrscheinlicher Fall.

Wendet man diese Modelle auf Schwarzwald und Oberpfalz an, so können die Strukturen des Schwarzwaldes im Sinne eines metamorphic core-Komplexes gedeutet werden, zumal dafür Hinweise aus den Gesteinsstrukturen gegeben sind. Das DEKORP-Profil Nördlingen-Friedberg wird von BEHR & HEINRICHS (1987) als Kompressionsorogen interpretiert (Abb. 10, 11), und das genetische Prinzip wird auch auf das benachbarte Oberpfalzprofil übertragen (Abb. 12). Als Argumente dafür werden u. a. suprakrustale Decken von MP-Metamorphiten, linsenartige Einschaltungen von Hochgeschwindigkeitskörpern in den low-angle-Reflektoren und fehlende Hinweise auf Tensionsstrukturen an der Oberfläche gewertet.

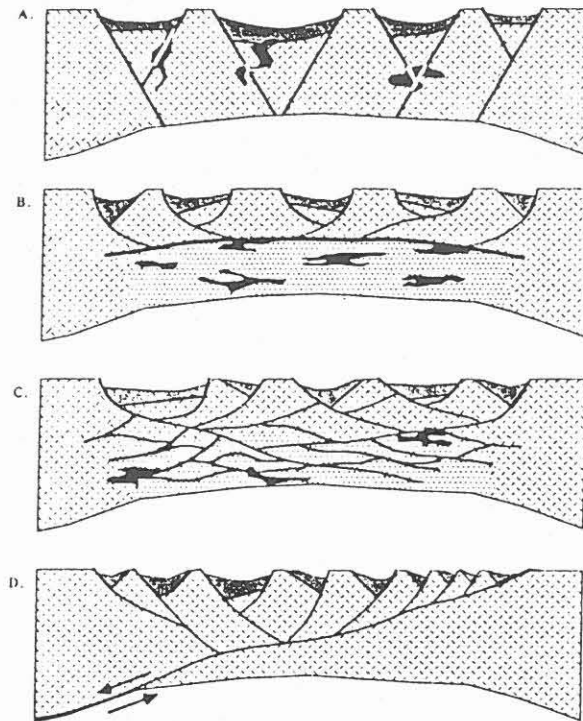
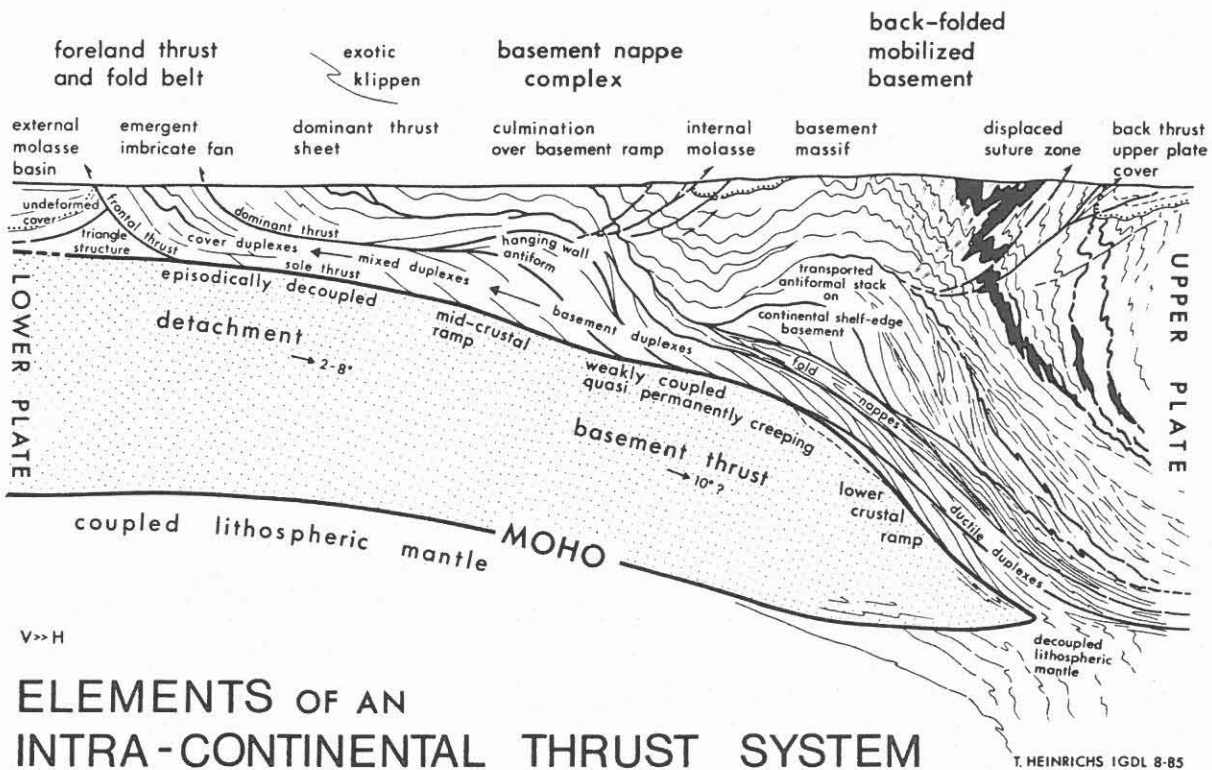


Abb. 9: Simplified models of intracontinental extension. (A) Classic horst and graben model, (B) subhorizontal-decoupling-zone model. (C) anastomosing shear-zone or lenses model, and (D) crustal-penetrating shear-zone model. (Aus: ALLMENDINGER et al. 1987)



ELEMENTS OF AN  
INTRA - CONTINENTAL THRUST SYSTEM

Abb 10: Strukturelemente eines intrakontinentalen Überschiebungssystems, nicht maßstäblich. (Aus: BEHR & HEINRICHS 1987)

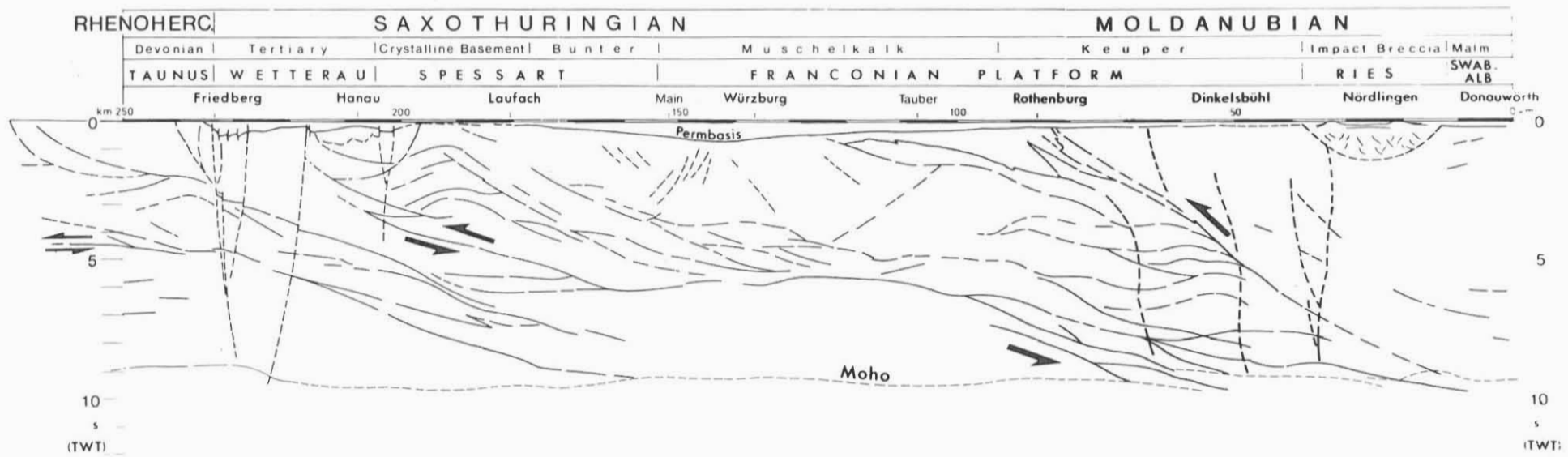


Abb. 11: Strukturelle Interpretation des reflexionsseismischen Profils DEKORP 2-Süd.  
(Aus: BEHR & HEINRICHS 1987)

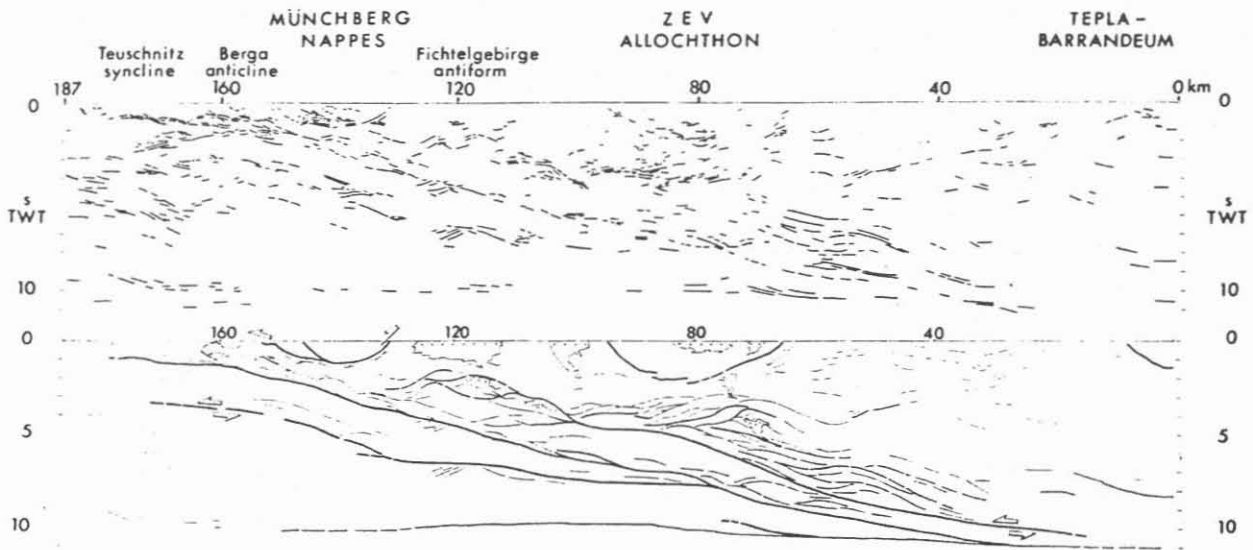


Abb. 12: Strichzeichnung und strukturelle Interpretation des reflexionsseismischen Profils DEKORP 4 (Interpretation: T. HEINRICHS, aus: BEHR & EMMERMANN 1987).

Das von WEBER et al. (1986) dargestellte Modell bezieht "Wedge-Tektonik" ein (Abb. 13). Dabei soll eine moldanubische Gesteinseinheit als Wedge die saxothuringische Kruste im mittleren Bereich delaminieren haben. Andererseits sind in diesem Profil auch Elemente anastomisierender Extensionstektonik und ein mittelkrustales Detachment mit spatorogener Dehnungstektonik eingebaut. Beide Modelle sind nur grobe Vorstellungen, um eine Diskussionsbasis zu haben.

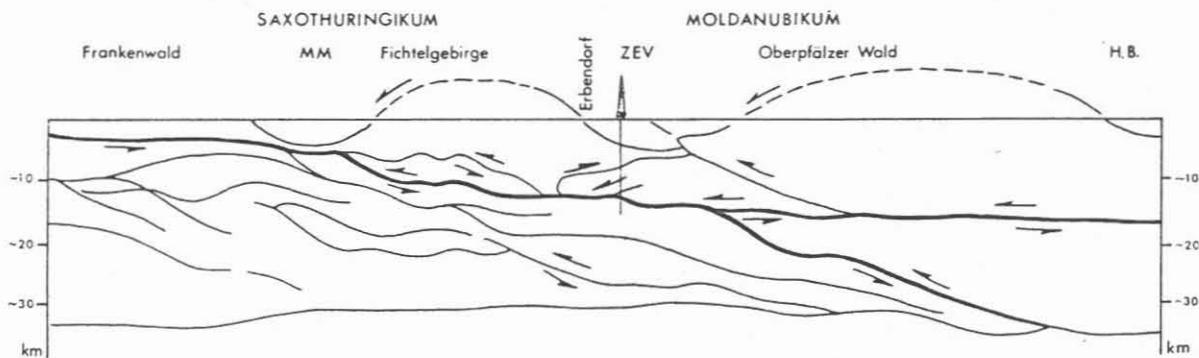


Abb. 13: Vereinfachtes Strukturmodell (Weber, unveröff.: aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz 1986)

Das Problem der Krustendünnung hat jedoch vor der herzynischen Kompression eine große, bisher nicht verstandene Rolle im mitteleuropäischen Raum gespielt. Vereinzelt Altersdaten verweisen auch über 2 Milliarden Jahre alte, stark ausgedehnte präkambrische Kontinentalkruste, auf der sich die oberproterozoisch/paläozoischen Ereignisse abgespielt haben. Vielleicht gelingt es, Relikte dieser Kruste und ihrer Dynamik im Bohrprofil anzutreffen.

Die Lokation Oberpfalz liegt nahe dem W-Rand der Böhmisches Masse, der im Zuge von Transpress-Tektonik von Wrench-Faults gebildet wird. Teil dieses Systems ist auch die Linie des Bayerischen Pfahls mit breiten Mylonitzonen in einem mehr als 150 km langen Quarzgang. Es ist damit zu rechnen, daß Mylonit- und Kataklastitbahnen sich durch das Lokationsgebiet ziehen.

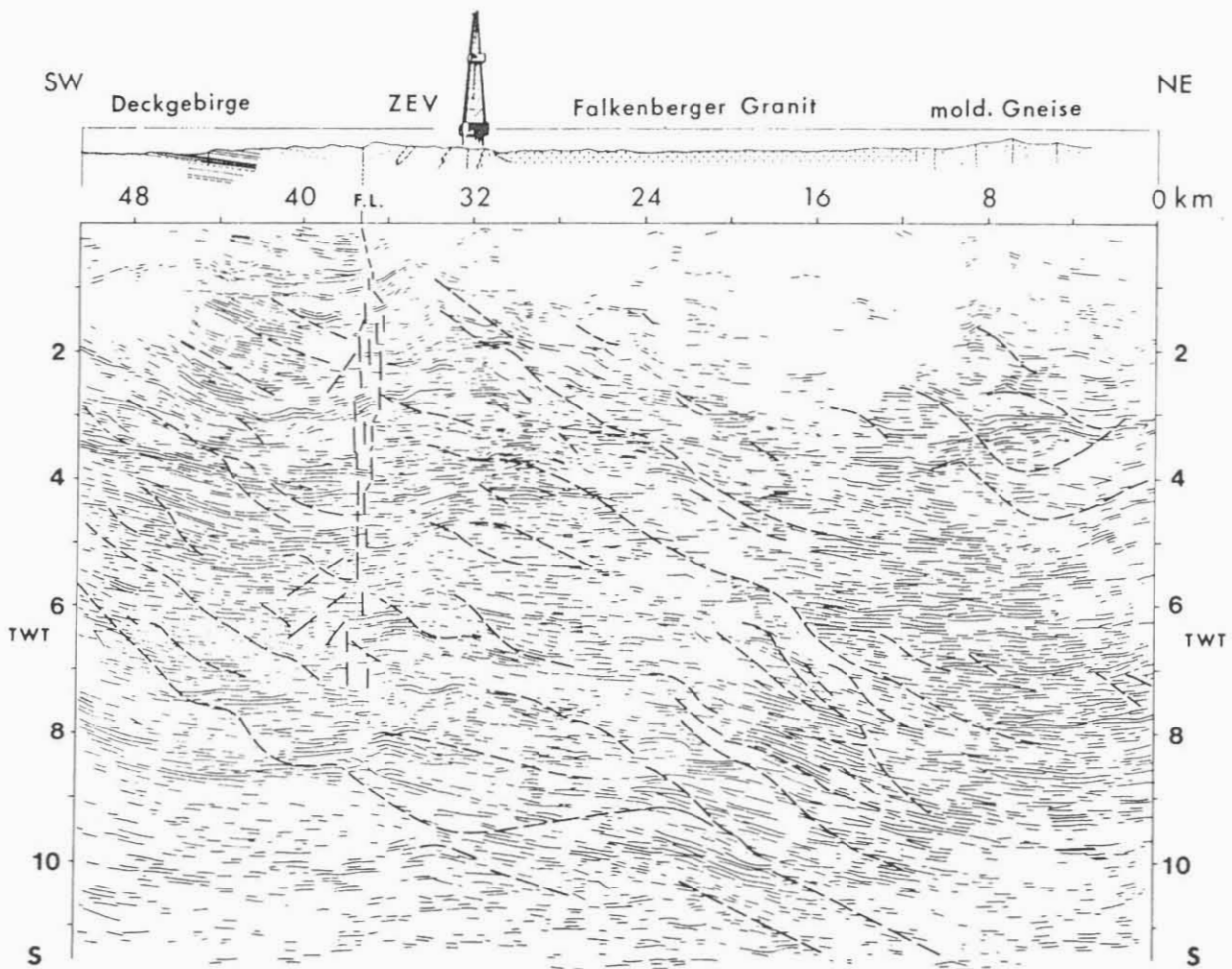


Abb. 14: Mögliche Anordnung von Kataklastitzonen. FL = Fränkische Linie. Strichzeichnung nach K. WEBER (unveröff., aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz 1986)

### 1.1.8 Haben low-velocity-Zonen die Funktion einer intrakrustalen Asthenosphäre?

Low-velocity-Zonen wie im Schwarzwald und z. T. in der Oberpfalz sind im mittleren Teil junger, gedehnter Krustenbereiche mit erhöhtem Wärmefluß häufiger zu beobachten. Gleichzeitig können sie auch Zonen erhöhter elektrischer Leitfähigkeit sein.

Von der Kola SG-3 Bohrung wurde eine solche LVZ zwischen 4 500 - 7 500 m in einer basischen Gesteinsserie durchbohrt, wobei die Abnahme von  $V_p$  mit einer Zunahme der Porosität gekoppelt war, ohne daß eine Wechsel in der Gesteinszusammensetzung stattgefunden hat (KREMENETSKY & OVCHINNIKOV 1986, KOZLOVSKY 1984). In dieser Zone hat eine Dehydration des Gesteins zu einer Absenkung des gebundenen  $H_2O$  von 4,0 auf 2,1 Gew. % stattgefunden. Das Gesamtvolumen des freigesetzten Wassers plus dem dehydratisierten Festkörper ist größer als das Ausgangsvolumen und hat Porenüberdruck und mikrohydraulische Bruchprozesse im Gesteinsgefüge zur Folge. Eine starke Erhöhung der Permeabilität mit Fluidmigration, Absenkung der Dichte und der  $V_p$  - Geschwindigkeit haben sich eingestellt.

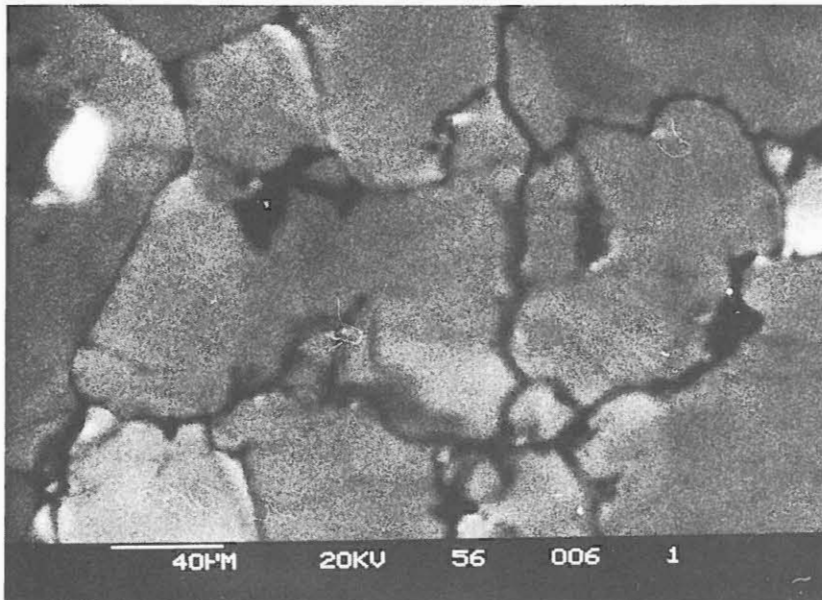


Abb. 15: REM - Kathodolumineszenz Orthogneis Schwarzwald. Mit Quarz (schwarz) verheilte pervasive Paläopermeabilität entlang Korngrenzen von Quarz. Postanatektische Fluidmigration. (Foto FRENITZEL-BEYME)



Von ETHERIDGE et al. (1983, 1984) ist das Problem der Krustenpermeabilität bei prograder und retrograder Metamorphose mit dem Ergebnis dramatischer pervasiver oder channelway-Fluidmigration beantwortet worden. Er gibt Beispiele für rechnerische Verhältnisse Fluid-/Gesteinsvolumen von  $10^2$  bis  $10^3$ .

Transmissions-Elektronenmikroskop-Studien an Korngrenzgefügen zum Nachweis der Wanderwege von Fluiden brachten bisher aber noch keine überzeugenden Beweise für einen solchen pervasiven Migrationsmechanismus (z. B. WHITE & WHITE 1981). Die Laborbestimmungen der Permeabilitäten in kristallinen Gesteinen liegen meist im Bereich  $10^{-16}$  -  $10^{-21}$  m<sup>2</sup> ( $10^{-4}$  -  $10^{-9}$  Darcy) (BRACE 1980). Über die wahren Permeabilitäten unter tiefkrustalen Deformationsverhältnissen und Temperaturbedingungen gibt es auch nur Spekulationen, z. B.  $10^{-15}$  -  $10^{-18}$  m<sup>2</sup> ( $10^{-3}$  -  $10^{-6}$  Darcy nach ETHERIDGE et al. 1983).

An den Gesteinen der Schwarzwaldbohrungen, die während der Lokationserkundungen für geothermische Messungen niedergebracht wurden, ist es mit der Kathodolumineszenztechnik gelungen, die durch SiO<sub>2</sub> verheilten Paläopermeabilitäten und Paläoporositäten sichtbar zu machen und systematisch zu studieren. Derartige Strukturen sind bisher mit keinem anderen methodischen Mittel zu erkennen. Dabei zeigt es sich, daß alle im Mittelschwarzwald an der Oberfläche angeschnittenen Gneise eine extrem hohe Gesamtpermeabilität haben (Abb. 15) mit z. T. noch heute geschlossener Restporosität von 1 - 3 Vol %. Diese Permeabilität wurde beim Durchwandern der Kruste zwischen 12 - 8 km erworben. Diese Untersuchungen bestätigen die Annahme von ETHERIDGE et al. über eine pervasiv Fluiddurchtränkung der Kruste mit sealing-Prozessen durch SiO<sub>2</sub> bei Temperaturabnahme bzw. Druckentlastung in eindrucksvoller Weise. Bei der Fluiddurchflutung ist der gesamte Altbestand an Gesteinsfluiden ausgewaschen worden. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> und andere Gase sind fast quantitativ aus dem Gestein ausgetragen. Aus der Untersuchung von Flüssigkeitseinschlüssen in diesen Permeabilitätsgefügen läßt sich zeigen, daß dieser Prozeß zwischen 12 - 8 km im Anschluß an die Anatexis stattgefunden hat. Beim weiteren Uplift haben diese Gesteine in Verbindung mit retrograder Metamorphose channelway-Strukturen (Abb. 16) erworben mit erneuter Fluiddurchtränkung und bei niedrigen Temperaturen gekoppelt mit kräftigen hydrothermalen Alterationsreaktionen im Gestein.

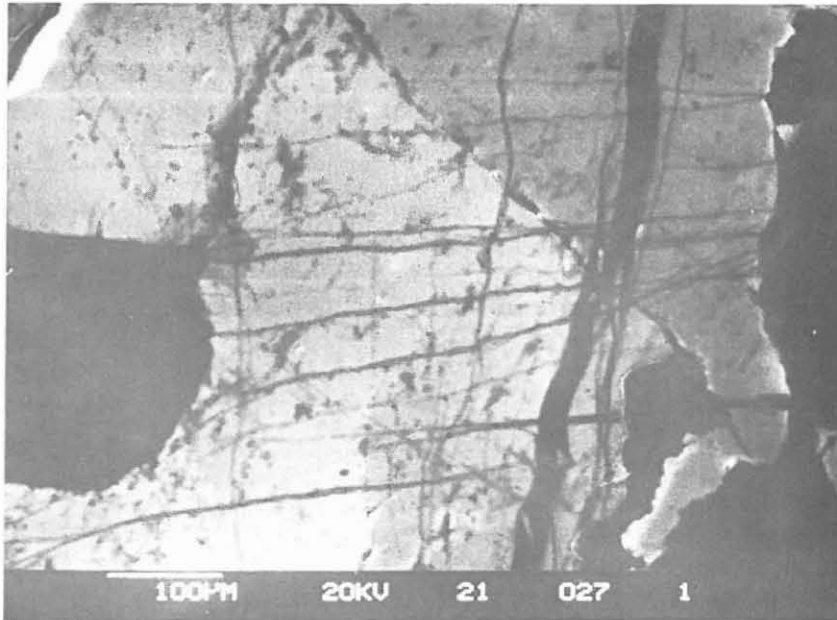


Abb. 16: REM-Kathodolumineszenz Orthogneis Schwarzwald. Mit Feldspat verheilte channelway-Paläopermeabilität durch Feldspat (Uplift-Phase mit retrograder Alteration). (Foto FRENTZEL-BEYME)

In der Oberpfalz fehlt das pervasive Fluidereignis. Die Paläopermeabilitäten haben nicht den Grad des Schwarzwaldes erreicht, alte Fluidsysteme mit unterschiedlichen Gaszusammensetzungen sind erhalten geblieben und weisen PT-Bedingungen verschiedener Metamorphosestadien nach. In der Oberpfalz sind jedoch genau wie im Schwarzwald channelway-Fluiddurchtränkungen während des Upliftes, mit hydrothermalen Alteration gekoppelt, reichlich entwickelt.

Diese Ergebnisse führen zur Annahme, daß heute im Schwarzwald eine kaledonische LVZ an der Oberfläche angeschnitten vorliegt, ähnlich wie sie von der Kola SG-3 durchbohrt wurde. In einer aktiven LVZ mit hydraulischem Microfracturing, Massentransport von  $\text{SiO}_2$  im Fluid, kontinuierlicher Neuschaffung von Porosität und Permeabilität ist auch die Krustenrheologie betroffen und völlig verschieden vom Normalfall. Sollte sich diese Theorie der LVZ, die sich als ein vorläufiges Zwischenergebnis der KTB-Vorerkundungsarbeiten abzeichnet, durch weitere Beobachtungen beweisen lassen, können viele Erscheinungen eine bessere Erklärung finden. LVZ spielen dann als mittelkrustale "Astenosphäre" eine wichtige Rolle bei der Steuerung struktureller Prozesse. Porenüberdruck und Volumenzunahme in der LVZ und in deren Fluidkissen wirken destabilisierend auf die Rheologie der Kruste. Bei Vorhandensein einer aktiven Extension können sich die bereits erwähnten listrischen Abschiebungsbahnen entwickeln. Kippt das Tensionsregime in Kompression um, z. B. in back-arc-Situationen, könnte die LVZ die Funktion des "mid-crustal-flat" übernehmen, an dessen Enden die Ober- und Unterkrustenrampen auf- bzw. absteigen.

Wenn die kontinentale Kruste ein derart lebendiger geologischer Körper ist, kann die Untersuchung "toter Krustenprofile", wie sie gelegentlich an der Erdoberfläche angeschnitten sind und die aus der Reaktionszone entfernt wurden, nur einen unvollkommenen Einblick in die in-situ-Verhältnisse unter in-vivo-Bedingungen geben. Das Studium physikalisch-chemischer Prozesse der "lebendigen Kruste" unter aktiv einwirkenden Temperaturen bis +300 °C unter den spezifischen Spannungs-Deformations-Bedingungen, Porendrücken und Fluid-Gestein-Interaktionen muß grundlegende Daten liefern, mit denen dann wiederum auch laborativ und experimentell weitergearbeitet werden kann. Die Beobachtung zusammenhängender langer Gradientenprofile mindestens bis 10 - 15 km in der Mittelkruste ist daher erforderlich und kann nur über die Bohrung gewonnen werden.

#### **1.1.9 Transects - Großprofile durch die Kontinente**

Global Geoscience Transects projects (GGT) nennt sich ein weiteres Großprojekt des Lithosphärenprogrammes. In Profilschnitten bis zur Moho mit Anschluß über die Kontinentalränder an die ozeanische Kruste sollen alle erreichbaren geophysikalischen und geologischen Informationen zusammengeführt, dargestellt und interpretiert werden. Die Transect-Vorschläge beziehen alle Kontinente ein. Bis zum nächsten internationalen Geologenkongreß in Washington 1989 erhofft man sich bereits erste vergleichende globale Ergebnisse über die Grundstrukturen der Kontinente nach dem heutigen Kenntnisstand der Geodynamik. Die Europäische Geotraverse (EGT), administrativ betreut durch die European Science Foundation (ESF), ist ein solches 4 000 km langes Transect, das vom nördlichen Teil Skandinaviens bis zur Sahara-Plattform Nordafrikas reicht. Das zentrale Segment quert in N-S-Richtung Deutschland. Ein erstes Zwischenergebnis wurde bereits 1986 veröffentlicht (FREEMAN, MUELLER & GIESE 1986).

#### **1.1.10 Tiefbohrprojekte - Sonden der inneren Raumfahrt**

Tiefbohrungen in die Kruste sind die konsequente Fortsetzung der Krustenforschung, nachdem auf indirektem Wege so zahlreiche neue Aspekte gefunden wurden, die weitergehenden Modellen, Berechnungen und globalen Interpretationen zugrunde gelegt werden. Die Philosophie der nationalen Programme ist jedoch verschieden. Drei Wege werden dabei beschritten:

- Untersuchung von aktiven Krustenprozessen durch Bohrungen geringer oder mittlerer Tiefe. Dieser Weg wird z. B. im US-Programm von DOSECC verfolgt, die bisher die Geothermalbohrung Salton Sea und die Bohrung am Cajon-Paß zur Überprüfung von Spannungsaufbau, Seismizität und Wärmefluß in der St. Andreas Fault betreut hat. Weitere Vorhaben beschäftigen sich mit Problemen des Vulkanismus (Katmai-Nationalpark) und mit epithermaler Lagerstättenbildung in Verbindung mit Hydrothermalsystemen (Creed mining district). Diese Pro-

jekte bewegen sich in Tiefenbereichen um 5 km. Mit dem Projekt CICSCO (Continental Interior Crustal Studies Consortium) soll mit mehreren Bohrungen geringerer Tiefe die obere Kruste an verschiedenen Stellen, insbesondere proterozoischer Gebiete, untersucht werden, von der Plattformsedimentation bis in das Basement.

Das schwedische Deep Gas Project Siljan Ring mit der Bohrung Gravberg untersucht eine Impaktstruktur mit dem Ziel, anorganisch gebildetes Methan nachzuweisen. Dieses Projekt steht kurz vor dem Abschluß.

- Überprüfung und Studium sehr unterschiedlicher geologischer Strukturen durch flache und mitteltiefe Bohrungen, zusammengefaßt zu großen geologischen Studienprogrammen. Dieser Weg wird von den Franzosen mit dem Programm Géologie Profonde de la France beschritten. Elf Projekte stehen auf dem Programm, von Sedimentbecken bis zu Kristallineinheiten. Bisher wurden die Bohrungen Cezallier zum Studium eines Geothermalsystems, die Bohrung Echassières zum Studium der Geochemie und der Metallogenese eines Granitkörpers sowie z. Zt. die Bohrung Sancerre zum Studium des kristallinen Sockels und der Magnetanomalie im Pariser Becken niedergebracht.

Das Canadian Continental Drilling Program und das englische Bohrprogramm sind z. Zt. in Vorbereitung.

- Tiefstbohrungen über 10 km zum Studium von grundsätzlichen geophysikalischen und geochemischen Gradientenprofilen und zur Überprüfung tiefkrustaler geophysikalischer Strukturen. Dieser Weg wurde von dem russischen Projekt Kola SG-3 beschritten, es ist Ziel des KTB und des Appalachen-Projektes der USA.

#### 1.1.11 "Unternehmen Krustenfenster" - das KTB und seine Begleitprogramme

Das KTB bildet das zentrale Experiment eines konzertierten Programmes für ein Fenster durch die kontinentale Kruste. In der Abb. 17 ist das Gesamtvorhaben mit seinen Teilprojekten schematisch dargestellt.

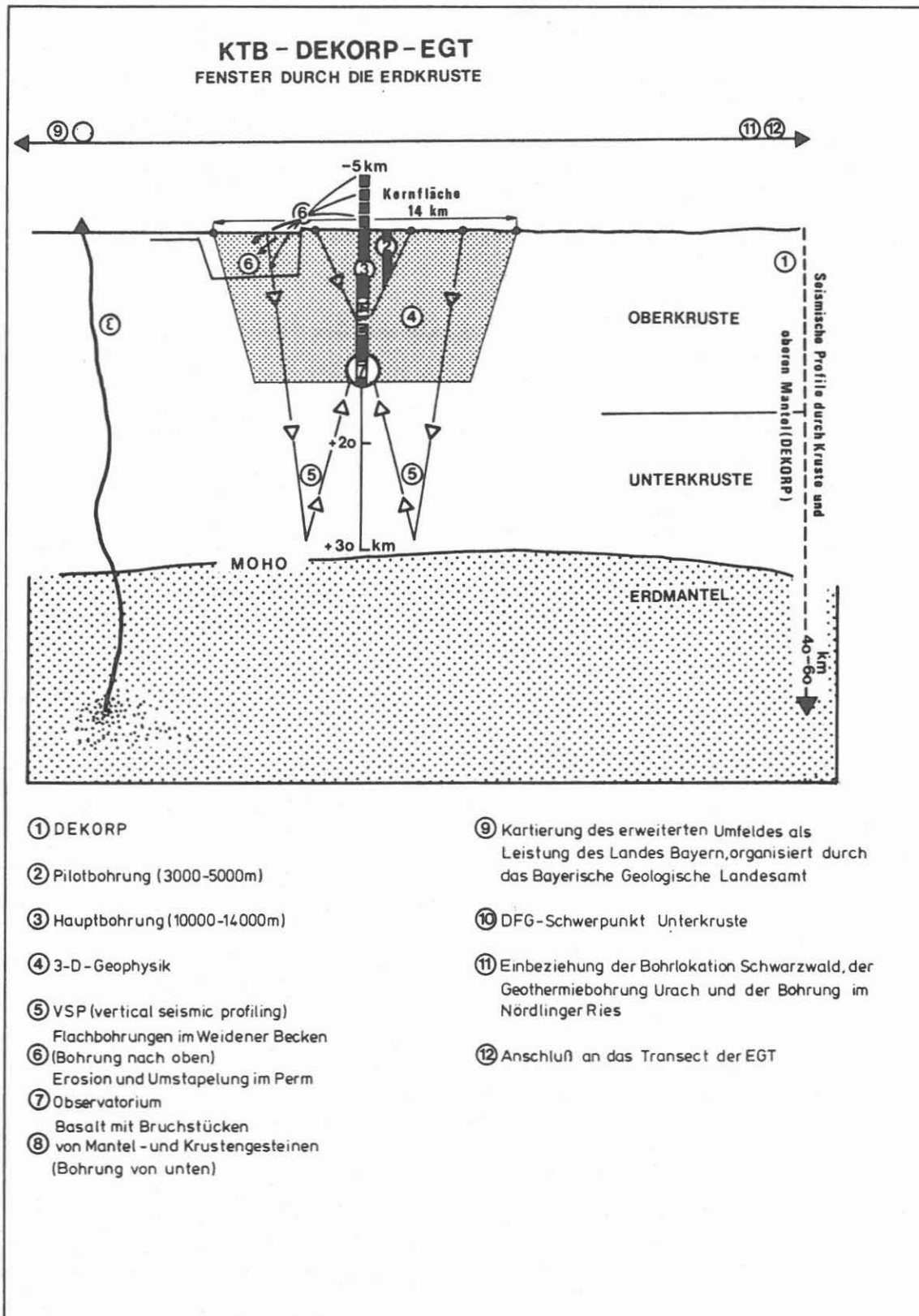


Abb. 17: KTB-DEKORP-EGT: Fenster durch die Erdkruste.

1. Das Projekt begann mit seismischen Messungen innerhalb des DEKORP-Programmes. Schlüsselprofil ist die DEKORP-4-Linie, die vom Hohen Bogen im Südosten über Vohenstrauß, Erbendorf, Fichtelgebirge und Frankenwald verläuft. Im engeren Zielgebiet wurde zusätzlich ein Netz von 6 Profilen vermessen mit insgesamt 303 Profilkilometern. Hauptexperiment war Steilwinkelreflexionsseismik mit Vibroseisanregung, ausgeführt von der Prakla Seismos AG. Weitwinkelmessungen und Geschwindigkeitsbestimmungen mit expanding-spread-Methodik wurden zusätzlich durch Hochschulgruppen vorgenommen. Die Datenverarbeitung erfolgte im wesentlichen im DEKORP-Rechenzentrum der Universität Clausthal.
2. Durchführung einer 3 000 - 5 000 m tiefen Vorbohrung mit Vollkernung für geophysikalische Begleitexperimente in Korrespondenz zur Hauptbohrung.
3. Hauptbohrung von 10 - 14 km mit 30 % Kernstrecke, Möglichkeiten zur Seitenkernentnahme, umfangreiches geophysikalisches Meßprogramm.

Hauptziele:

- Aufnahme eines geschlossenen Vertikalprofils, Vermessung grundsätzlicher geophysikalischer und geochemischer Parameter, z. B. Wärmefluß und Wärmeproduktion, stress-strain-Entwicklung zwischen Oberkruste und Unterkruste, Mikroseismizität, Krustenpermeabilität, An- bzw. Abreicherung von Elementen, Metamorphoseprofile etc. (s. hierzu die Lokationsberichte Schwarzwald und Oberpfalz 1986 sowie BEHR und EMMERMANN 1987, BERCKHEMER et al., Geophysikalische Schlüsselexperimente im KTB, 1986, FUCHS & GIESE 1987).
  - Prüfung der Natur geophysikalischer Heterogenitäten, wie seismische Reflektoren, Hoch- und Niedergeschwindigkeitskanäle, elektrische Leiter, magnetische Anomalien
  - Rekonstruktion der Krustenevolution in der Internzone des variskischen Orogens, Anteile von Kompression, Tension, Transpress-Strukturen
  - Durchführung allgemeiner physikalischer Experimente, z. B. der Überprüfung der Gravitationskonstante
4. Durchführung eines geophysikalischen 3-D-Programmes (Seismik, Magnetotellurik, Gravimetrie, Magnetik) in einem Raum mit der Tiefe und dem Durchmesser der Hauptbohrung. Dieses Projekt muß die dreidimensionale Auflösung der gewonnenen geophysikalischen, geologischen, petrologischen, tektonischen und geochemischen Strukturen gewährleisten, da ein eindimensionales Profil für eine Aussage zu begrenzt ist. Die Oberfläche des 3-D-Raumes wird als "Kernfläche" bezeichnet. Diese Fläche wird besonders genau aufgenommen, um eine Korrelation aller Daten der Tiefensondierung mit der Oberflächengeologie zu gewährleisten.

5. Vertical seismic profiling (VSP) mit verschiedenen Verfahren der Bohrlochseismik, um die Struktur unterhalb der Bohrlochsohle mit hoher Auflösung analysieren zu können. Dies bedeutet eine indirekte Vertiefung des Bohrloches mit einer deutlichen Fokussierung auf die rezente Unterkruste, da der Filtereffekt der aufgelockerten Oberkruste entfällt.
6. Wenige Kilometer westlich des Bohrplatzes befindet sich neben der Fränkischen Linie der Randtrog von Weiden mit wahrscheinlich 5 km-mächtiger Füllung von Perm und Mesozoikum. In Sedimentbohrungen der Industrie sind u. a. Anreicherungen von Disthen gefunden worden. Durch eine genaue Analyse der Leicht- und Schwermineralfraktionen ist die Bohrung um etwa 5 km (permisch-mesozoische Erosionen) "nach oben" zu verlängern. Die Schüttung von Disthen deutet an, daß im Abtragungskomplex MP-Metamorphite enthalten waren, die auf eine stärkere Verbreitung der Thrust-Tektonik mit overstacking von tiefkrustalen Komplexen hinweist. Es wird erhofft, daß im Verlauf des Unternehmens Krustenfenster, auch zusätzliche wissenschaftliche Bohrungen in diesem Sedimentbecken niedergebracht werden können.
7. Nach Beendigung der Hauptbohrung wird angestrebt, an der Bohrlochsohle ein Observatorium einzurichten für Langzeitmessungen zur Beobachtung von zeitabhängigen magnetischen, gravimetrischen, elektrischen Feldänderungen, Überwachung der Mikroseismizität, Detektierung von Entgasungsprozessen, etc. Für dieses Observatorium sind z. Zt. kombinierte Bohrlochmeßsonden in Planung. Auch dies ist ein Zusatzprojekt, dessen Durchführung noch nicht sichergestellt ist.
8. Im Umfeld der Bohrung tritt ein tertiärer Basaltvulkanismus auf mit Krusten- und Mantelxenolithen. Die Analyse der Xenolithe wird weiteren Aufschluß über die Beschaffenheit des Erdmantels geben. Die Bohrlokation wird von der Verlängerung des Egerrifts in Nordost-Südwest-Richtung gestreift, deshalb tritt auch eine schwache Mantelaufwölbung auf, und eine stärkere Schüttung von Quellen mit erhöhten CO<sub>2</sub>- und Radongehalten, erhöhten <sup>3</sup>He/ <sup>4</sup>He - Verhältnissen und basaltischer Vulkanismus sind zu beobachten. Die Ergebnisse der Xenolithforschung in Kombination mit hydrochemischen Untersuchungen sowie der Isotopengeochemie von Edelgasen und CO<sub>2</sub> sollen Hinweise auf junge Riftprozesse liefern.
- 9./ Das weitere Umfeld der Bohrung entlang der Böhmisches Masse zwischen
10. schen Frankenwald und Hohem Bogen wird mit Unterstützung der Bayerischen Landesregierung im Maßstab 1:25 000 neu kartiert sowie tektonisch, petrologisch, stratigraphisch neu bearbeitet. Unterkrustengesteine, die in diesem Raum an der Erdoberfläche angetroffen werden, werden neben anderen europäischen und außereuropäischen Beispielen zusätzlich im Rahmen eines DFG-Schwerpunktes "Unterkruste" bearbeitet und im Kontext mit allgemeinen geochemisch-geophysikalischen Problemen der Unterkruste diskutiert.

11. Die Vorerkundung der Lokation im Schwarzwald hat - wie oben dargestellt - erstaunliche Unterschiede zur Oberpfalz gezeigt. Dieses Ergebnis besitzt erhebliches Gewicht für die Interpretation der paläozoischen Krustendynamik in Mitteleuropa. Die weitere Untersuchung der ca. 1 600 m Bohrkerne, die im Rahmen der geothermischen Untersuchungen gewonnen wurden, verspricht im Gegensatz zur herzynischen Kompressionstektonik die Analyse eines metamorphic core complex und durch die Einbeziehung in DEKORP und EUROLITH weitere Zusammenhänge des Rheingraben-Rifting. Durch die Einbeziehung des Materials der Geothermiebohrung Urach und des Kristallins der Bohrung Nördlicher Ries, beide zwischen der Schwarzwald- und der Oberpfalzlokation gelegen, haben sich zusätzliche Aspekte zur Krustenentwicklung, insbesondere der low-velocity-Zonen und postvariskischen Dynamik, ergeben.
12. Das Transect der EGT bindet alle diese Daten in ein breites Profil zwischen Nordkap und Marokko ein.

Alle diese Aktivitäten beginnen, sich zu einem umfassenden Programm mitteleuropäischer Geodynamik zu entwickeln mit Anschluß an die französischen Projekte im Rheintalgraben, den Vogesen und des Zentralmassivs im Westen, der CSSR im Osten, der Schweiz im Süden und gemeinsamer deutsch-österreichischer Projekte im Südosten.

#### 1.1.12 **Ausblick**

Der Entschluß des BMFT, die feste Erde mit dem KTB in seine kritische Förderung aufzunehmen, hat den deutschen Geowissenschaften eine einmalige Chance gegeben, verlorenes Terrain in der Krustenforschung aufzuholen, mit neuen Methoden wissenschaftlicher Kooperation die vorhandenen Ressourcen an geistiger Kapazität zu erschließen und mit neuen experimentellen Möglichkeiten zu versehen. Mit den beiden Instrumenten DFG-Schwerpunkt, in dem sich z. Zt. über 200 Wissenschaftler mit Projekten oder als Diskussionspartner zusammengefunden haben, und mit der KTB-Projektleitung am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung ist es gelungen, die ungewohnten und z. T. schwierigen Probleme eines solchen Vorhabens zu strukturieren, Geowissenschaft, Geotechnologie, Geoindustrie erstmals auf breiter Basis in einem gemeinsamen Forschungsunternehmen zusammenzuführen. Die von manchem Kritiker zunächst als bedenklich angesehene Konzentration auf ein einziges tiefes Loch beginnt sich zu einem breiten "Unternehmen Krustenfenster" zu entwickeln, als deutschem Beitrag zur internationalen Lithosphärenforschung.



### 1.1.13 Referenzliste

- ALLMENDINGER, R.W., HAUGE, T.A., HAUSER, E.C., POTTER, C.J., KLEMBERER, S.L., NELSON, K.D., KNUEPFER, P. & OLIVER J. (1987): Overview of the COCORP 40°N Transect, Western United States: The Fabric of an Orogenic Belt. - Geological Society of America Bulletin, Bd. 98, 308-319.
- BARELL, J. (1914): The Strength of the Earth's Crust, pts. 4, 5. - Jour. Geology. Bd. 22, 289-314, 441-468, 655-683.
- BEHR, H.J. & EMMERMANN R. (1987): Scientific Objectives and Site-Selection Studies of the Continental Deep Drilling Program of the Federal Republic of Germany (KTB). - BEHR, H.J. & VIDAL, H. (1987) (Hrsg.). Observation of the Deep Continental Crust II. Exploration of the Deep Continental Crust, Springer-Verlag, Berlin.
- BEHR, H.J. & HEINRICHS, T. (1987): Geological Interpretation of DEKORP 2-S: A Deep Seismic Reflection Profile Across the Saxothuringian and Possible Implications for the Late-Variscan Structural Evolution of Central Europe. - Tectonophysics, 142.
- BLÜMEL, P. (1986): Metamorphic Processes in the Variscan Crust of the Central Segment. - FREEMAN, R., MÜLLER, St. & GIESE, P. (Hrsg.) (1986). Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986, 149-155.
- BOUCKAERT, J. (1985): Deep Drilling Programs in Belgium. - RALEIGH, C.B. (Hrsg.) (1985). Observation of the Continental Crust through Drilling I. Proceedings of the International Symposium held in Tarrytown, May 20-25, 1984. Exploration of the Deep Continental Crust. - Springer-Verlag, Berlin, 28-38.
- BOYER, St. E. & ELLIOTT, D. (1982): Thrust Systems. - The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V, 66, No. 9, 1196-1230.
- BRACE, W.F. (1980): Permeability of Crystalline and Argillaceous Rocks. - Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 17, 241-251.
- DEKORP Research Group (1985): First Results and Preliminary Interpretation of Deep-Reflection Seismic Recordings Along Profile DEKORP 2-South. - J. Geophys., 57, 137-163.
- EISBACHER, G. & KROHE, A. (1985): The Tectonic Setting of the Variscan Schwarzwald - A Brief synopsis. Introduction to the Schwarzwald Excursion of the "2nd International Symposium on Observation of the Continental Crust Through Drilling", Seeheim, 32-38.
- ETHERIDGE, M.A., WALL, V.J. & VERNON, R.H. (1983): The Role of the Fluid Phase During Regional Metamorphism and Deformation. - J. Metamorphic Geol., 1, 205-226.

- ETHERIDGE, M.A., WALL, V.J. & COX, S.F. (1984): High Fluid Pressures During Regional Metamorphism and Deformation: Implications for Mass Transport and Deformation Mechanism. - *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B6, 4344-4358.
- FORSCHUNGSKOLLEGIUM PHYSIK DES ERDKÖRPERS e. V. (1986): Geophysikalische Schlüsselexperimente in der Kontinentalen Tiefbohrung der Bundesrepublik Deutschland. Bochum.
- FREEMANN, R., MUELLER, St. & GIESE, P. (1986): Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986.
- FUCHS, K. & GIESE P. (1987): Geophysical Targets of the Continental Deep Drilling Program of the Federal Republic of Germany. Tomography of the Crust and its Permeability. A Window into the Lower Crust and an In-Vivo Deep Laboratory. - BEHR, H.J. & VIDAL, H. (Hrsg.) (1987). Observation of the Continental Crust through Drilling II. Exploration of the Deep Continental Crust. - Springer-Verlag Berlin.
- HAAK, V., BERKTOLD, A., JÖDICKE, H., KNÖDEL, K. & LOSECKE, W. (1986): The Distribution of Electrical Conductivity Along the Central Segment of the EGT. - FREEMAN, R., MÜLLER, St. & GIESE, P. (Hrsg.) (1986). Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986, 117-126.
- HÄNEL, R. (Hrsg.) (1982): The Urach Geothermal Project (Swabian Alp, Germany). - E. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1982.
- HEINRICH, T. (1986): Structure and Development of the Saxothuringian Zone. - FREEMAN, R., MÜLLER, St. & GIESE, P. (Hrsg.) (1986). Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986, 135-140.
- HOLBROOK, W. St., GAJEWSKI, D. & PRODEHL, C. (1987): Shear-Wave Velocity and Poisson's Ration Structure of the Upper Lithosphere in Southwest Germany. - *Geophysical Research Letters*, Vol. 14, No. 3, 321-234.
- KERN, H. (1982): Elastic-wave Velocity in Crustal and Mantle Rocks at High Pressure and Temperature: The role of the High-Low Quartz Transition and of Dehydration Reactions. - *Phys. Earth Planet. Interiors*, 29, 12-23.
- KLIGFIELD, R., CRESPI, J., NARUK, S. & DAVIS, G.H., (1984): Displacement and Strain Patterns of Extensional Orogens. - *Tectonics*, Vol 3, No. 5, 577-609.

- KONTINENTALES TIEFBOHRPROGRAMM DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (KTB): Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz. 2. KTB-Kolloquium Seeheim/Odenwald, 19.09.-21.09.1986. Zusammengestellt von K. WEBER und A. VOLLBRECHT.
- KONTINENTALES TIEFBOHRPROGRAMM DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (KTB): Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald. 2. KTB-Kolloquium Seeheim/Odenwald, 19.09.-21.09.1986. Zusammengestellt von K. VON GEHLEN, G. KLEINSCHMIDT, R. STENGER, H. WILHELM und W. WIMMENAUER.
- KOZLOVSKY, Y.A. (Hrsg.) (1984): The Superdeep Well of the Kola Peninsula. Exploration of the Deep Continental Crust. - Springer-Verlag, Berlin.
- KREMENETSKY, A.A. & OVCHINNIKOV, L.N. (1986): The Precambrian Continental Crust: Its Structure, Composition and Evolution as Revealed by Deep Drilling in the USSR. - Precambrian Research, 33, 11-43.
- KROHE, A. (1985): The Tectogenesis of Variscan Schwarzwald. - 2nd International Symposium on Observation of the Continental Crust through Drilling. Abstracts. October 4-6, 1985, Seeheim/Odenwald. - Alfred-Wegener-Stiftung, Bonn, 64.
- LÜSCHEN, E., MENGES, D., RUEHL, Th., SANDMEIER, K.-J., GOWIN, J., JANOTH, W., KELLER, F., STILLER, A., SÖLLNER, R. and TRAPPE, H. (1985): Presite Seismic Reflection Survey. - 2nd International Symposium on Observation of the Continental Crust Through Drilling. Abstracts. October 4-6, 1985, Seeheim/Odenwald. - Alfred-Wegener-Stiftung, Bonn, 64.
- MCCLAY, K.R. & PRICE, N.J. (Hrsg.) (1981): Thrust and Nappe Tectonics. - Geological Society Special Publication No 9. Blackwell Scientific Publications Oxford.
- MEISSNER, R., BARTELTSEN, H. & MURAWSKI, H. (1980): Seismic Reflection and Refraction Studies for Investigating Fault Zones Along the Geotraverse Rhenohertynikum. - Tectonophysics, 64, 59-84.
- MEISSNER, R., WEVER, Th. & DÜRBAUM, H.J. (1986): The Variscan Crust From a Geophysical Point of View: Reflection Seismics. - FREEMAN, R., MÜLLER, St. & GIESE, P. (Hrsg.) (1986). Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986, 93-98.
- SUESS, E. (1875): Die Entstehung der Alpen. - Braumüller, Wien, 168.
- WALTER, R. & WOHLLENBERG, J. (1985): Proposal for an Ultra-Deep Research Borehole in the Hohes Venn Area (West Germany). N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 171, 1-16.
- WHITE, J.C. & WHITE, S.H. (1981): On the Structure of Grain Boundaries in Tectonites. - Tectonophysics, 78, 613-628.