

Neuere Ergebnisse der Aufschluss- und Gewinnungstätigkeit auf Erdöl und Erdgas in Süddeutschland

Autor(en): **Betz, Dieter / Wendt, Axel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure**

Band (Jahr): **49 (1983)**

Heft 117

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-207417>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Neuere Ergebnisse der Aufschluss- und Gewinnungstätigkeit auf Erdöl und Erdgas in Süddeutschland *

mit 25 Abb. und 1 Tab.

von Dieter BETZ und Axel WENDT **

Zusammenfassung

In Süddeutschland wurden bisher nur kleine bis mittlere Felder gefunden, die Phase der konventionellen Exploration scheint abgeschlossen zu sein. Das geht aus einem Überblick über den Stand der Aufschluss- und Gewinnungstätigkeit hervor, der über die Zahl der Neufunde in den vergangenen 5 Jahren, die Aufschlusseleistungen, die Fündigkeitsrate, die Fördermengen und die Reserven informiert. In einer Zeit sinkender wirtschaftlicher Erträge ist die deutsche Erdölindustrie gezwungen, die verbleibenden risikoreichen Explorationsziele mit einer hohen Technologie und neuen Konzepten anzugehen. Die raschen Fortschritte in Technik und Wissenschaft werden daher bewusst und gezielt in Süddeutschland eingesetzt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den neuen in Süddeutschland getesteten Methoden und Konzepten und stellt deren Resultate anhand von Beispielen dar: Auf dem Sektor der Tektonik/Felsmechanik hat die moderne analytische Betrachtung des Deformationsverhaltens von Gesteinen und die Einbeziehung plattentektonischer Erkenntnisse zur Aufstellung des erfolgreichen Blattverschiebungskonzepts als Leitlinie für weitere Explorationsarbeiten geführt: Horizontale Harnische, Bohrlochauskesselungen, in situ Spannungsmessungen, Satellitenbilder wurden systematisch ausgewertet und ermöglichten interessante Neufunde. In der Geophysik war es besonders die seismische Stratigraphie, die als bahnbrechende Interpretationstechnik zum Auffinden neuer Gasprovinzen führte. Sie leitete den Wechsel von der konventionellen Exploration zur neuen, vielversprechenden, aber auch risikoreichen Phase der Suche nach Faziesfallen (Turbidite, Riffe, etc.) ein. Beachtliche Fortschritte wurden darüberhinaus bei der Feldtechnik, im Processing sowie durch Versuche mit modernen Verfahren, wie Wide-Line-Profiling, 3-D Seismik, Modelling und Geoelektrik erzielt. Auf dem weiten Feld der Petrophysik, Mineralogie und Geochemie wurden ebenfalls beachtliche Fortschritte erzielt, insbesondere bei den Bohrlochmessungen, in der Tonmineralogie und der Isotopengeochemie.

Die neuen Erkenntnisse insgesamt, auf technischem Sektor und in methodischer Sicht, werden bei der Erforschung des geologischen Neulands unter den Alpen sicherlich entscheidend mithelfen. Sie dürften aber auch auf andere Explorationsgebiete übertragbar sein, wie z. B. auf Norddeutschland und auf die Schweiz.

Abstract

In South Germany, where only small to medium-sized fields were discovered in the past 30 years, exploration aiming at conventional prospects has obviously come to an end. This becomes evident from a status report which summarizes exploration activities, production volumes and hydrocarbon reserve increases. In a time of economic recession, the German oil and gas industry must therefore make a determined effort to explore the remaining higher-risk targets by using the most advanced technology and new concepts.

The present paper deals with the new techniques and concepts tested in South Germany and presents their results: in the tectonic sector, the modern analytical approach to rock deformation processes and the incorporation of plate tectonic ideas have led to the establishment of a successful transcurrent-fault concept as a guideline for future exploration: horizontal slickensides, borehole cavings, in situ stress measurements and satellite photographs have been evaluated systematically. In the field of geophysics, a breakthrough has been made with the adoption of seismic stratigraphy as a new interpretation tool. This has already led to the discovery of new gas provinces, impressively indicating the transition to the second explo-

* Vortrag, gehalten auf der 50. Jahresversammlung der Vereinigung schweizerischer Petroleum-Geologen und -Ingenieure in Bad Ragaz, Juni 1983

** Dieter BETZ und Axel WENDT, BEB Gewerkschaften Brigitta und Elwerath Betriebsführungsgesellschaft mbH, Riethorst 12, D – 3000 Hannover

ration phase directed to the search for stratigraphic traps. Considerable progress has furthermore been made with respect to seismic field work, processing and applied modern techniques such as wide line profiling, 3-D seismic, modelling and geoelectrics. Also in petrophysics, mineralogy and geochemistry, much progress has been achieved, especially in the fields of well logging, clay mineralogy and isotope geochemistry.

The newly acquired knowledge as a whole, both technical and methodological will no doubt be of major importance in further exploration of the Alpine Front. It may, however, also be transferable to other prospective and pioneer areas, for instance in North Germany and Switzerland.

Einleitung

Die Exploration auf Kohlenwasserstoffe in der Bundesrepublik Deutschland hat in den letzten Jahren einen grundlegenden Wandel erfahren: bedingt durch die Energiekrise erfolgte eine beträchtliche Beschleunigung der Explorationstätigkeit, wobei nicht nur der technische Aufwand vervielfacht, sondern auch parallel hierzu das wissenschaftliche Potential zielbewusst ausgebaut wurde. Die resultierende Fülle von Daten erforderte einen massiven Einsatz der elektronischen Datenverarbeitung und erzwang eine integrierte Betrachtungsweise des gesamten Explorations- und Produktionsbereiches durch Grossrechner. Ein weiteres Merkmal dieser für die Geowissenschaften ausserordentlich fruchtbaren Periode war der Übergang der Aufschlusstätigkeit aus Bereichen mit konventionellen Aufschlusszielen in z. T. risikoreiche Grenzgebiete, die zuvor nicht als prospektiv angesehen wurden, sei es wegen der komplizierten Geologie oder auch wegen des wirtschaftlichen Risikos.

Speziell im süddeutsch-schweizerischen Raum wurde die Erschliessung in den letzten fünf Jahren von der Erdölindustrie systematisch vorangetrieben, wobei Erfolge mit Misserfolgen abwechselten; beide trugen zu einer beträchtlichen Vermehrung des seitherigen Kenntnisstandes (siehe in LEMCKE 1977, BOIGK 1981, BACHMANN 1982) bei. Über einige neuere Ergebnisse auf wissenschaftlich-technischem Gebiet, die gemeinsam von allen beteiligten Erdölfirmer erarbeitet wurden, soll hier berichtet werden.

Den in Süddeutschland zusammen mit BEB tätigen Gesellschaften C. Deilmann AG, Deutsche Schachtbau und Tiefbohr GmbH, Deutsche Texaco AG, Mobil Oil AG in Deutschland, Preussag AG und Wintershall AG sei für die Freigabe der Daten zur Veröffentlichung gedankt. Unser Dank gilt auch den Kollegen der eigenen Firma für die freundliche Mithilfe, insbesondere Herrn Dr. G. GREINER für die kritische Durchsicht und seine Anregungen für die endgültige Fassung der Arbeit.

Zum Stand der Aufschluss- und Gewinnungstätigkeit

In den vergangenen fünf Jahren gelang es der deutschen Erdölindustrie, in Süddeutschland 26 Neufunde zu erzielen, und zwar sowohl im Alpenvorland als auch im Rheingraben (Abb. 1). Im westlichen Alpenvorland und südlichen Oberrheintal waren es vorwiegend Erdölfunde, im östlichen Alpenvorland und nördlichen Oberrheintal überwiegend Erdgasentdeckungen. Die Fundigkeiten lagen sowohl in den konventionellen Explorationsgebieten als auch erfreulicherweise ausserhalb der bekannten Feldertrends, wie z. B. südlich von Karlsruhe, rund um München, südöstlich des Inns und am oberen Lech (HEDEMANN 1982 und 1983). Das Erdgassymbol am linken unteren Bildrand weist auf den Fund Entlebuch 1 in der Schweiz hin.

Die Neufunde gab es sowohl im Mesozoikum als auch im darüberliegenden Tertiär. Ein Fazieschnitt durch das Molassebecken (Abb. 2) zeigt gleichzeitig, dass Trärgesteine verschiedenster Sedimentationsbereiche wie fluviatil, flachmarin, deltaisch und turbiditisch zur Förderung beitragen. Es wird auch verständlich, warum die Exploration in Süddeutschland so kompliziert und vielfältig ist: Gräben im Paläozoikum, Transgressionen und

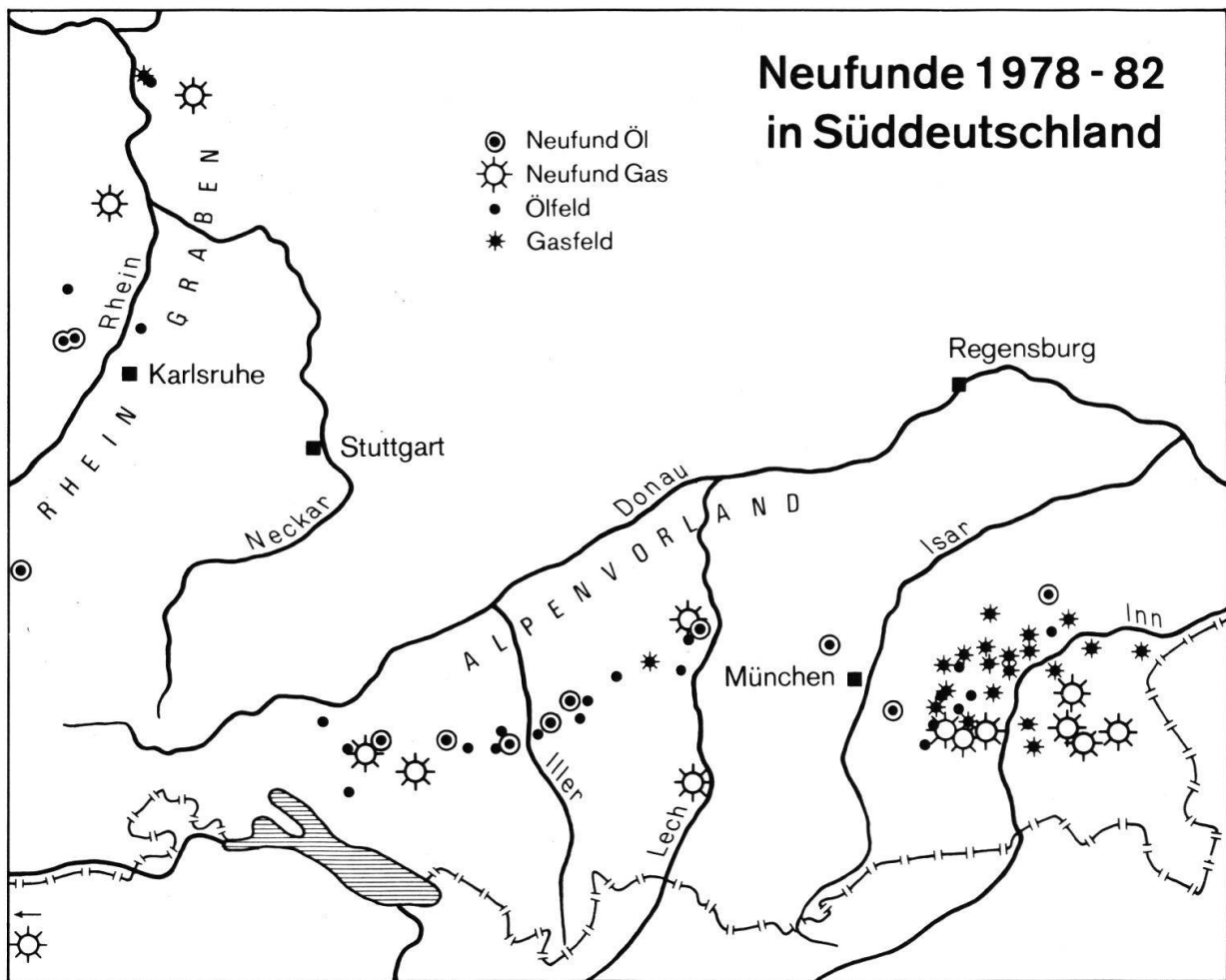


Abb. 1 Neufunde von Erdöl und Erdgas in Süddeutschland.

Nach WEG Jahresberichten, NLF Erdöl-Erdgas Jahresberichten und neuesten Bohrresultaten. Als Neufunde gelten Fündigkeiten in Explorationsbohrungen (Neue Klassifikation: SCHRÖDER 1981).

Regressionen im Mesozoikum und Tertiär, extrem unterschiedliche Paläowassertiefen sowie bedeutende Meeresspiegelschwankungen zur Zeit der Sedimentation kennzeichnen die Entwicklungsgeschichte des Ablagerungsraumes (LEMCKE 1977 und 1981). Diese geologischen Vorgänge haben eine Vielzahl von karbonatischen und klastischen Speichergesteinen sowie von Muttergesteinen für Erdöl und Erdgas hinterlassen. Für die Exploration war es daher wichtig, sich auf wesentliche Aufschlussziele zu konzentrieren.

Dennoch waren zur Erzielung der 26 Aufschlusserfolge in Süddeutschland sehr umfangreiche Explorationsarbeiten notwendig (Abb. 3): insgesamt wurden in den vergangenen fünf Jahren 85 Explorationsbohrungen mit rund 152.000 Bohrmetern niedergebracht. Ausserdem wurden über 12.000 Profilkilometer Reflexionsseismik vermessen, die zur Verdichtung des weitmaschigen Messnetzes beitrugen. Der überwiegende Teil der Aufschlussleistungen entfiel hierbei auf das Alpenvorland.

Auf dem Sektor der Gewinnung wurden 30 Produktionsbohrungen mit 58.000 Bohrmetern niedergebracht. Die Förderung betrug rund 2,8 Milliarden Kubikmeter Erdgas (inkl. Erdölgas) sowie rund 1,7 Millionen Tonnen Erdöl. Den Hauptanteil lieferte das Alpenvorland. Insgesamt trägt diese Förderung heute 2% bzw. 9% zum heimischen Erdgas-/Erdölaukommen bei. Die verbleibenden Vorräte in Süddeutschland zum Stand 1982 werden vom Wirtschaftsverband Erdölgewinnung auf 3,1 Milliarden Kubikmeter Erdgas und 3,3 Millionen Tonnen Erdöl geschätzt. Dies entspricht der gleichen Schätzung zufolge 1,1% bzw. 5,6% der Reservenerwartung an Erdgas und Erdöl in der Bundesrepublik Deutschland.

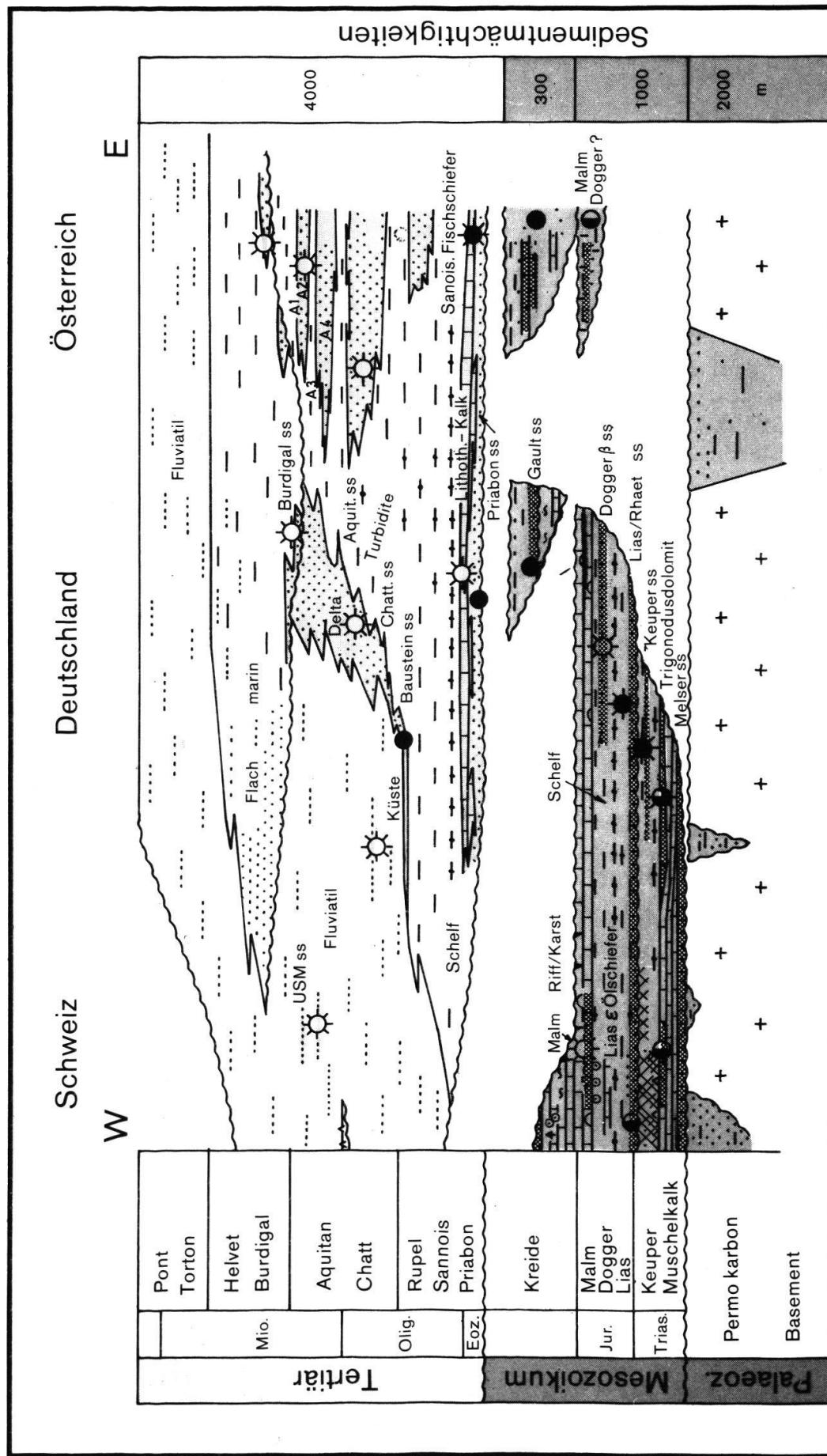


Abb. 2 Fazieschnitt durch das Molassebecken im schweizerisch-deutsch-österreichischen Alpenvorland.
Als stratigraphische Begriffe werden die heute von der deutschen Erdölindustrie überwiegend benutzten Namen verwendet.

SÜDDEUTSCHLAND 1978 - 1982

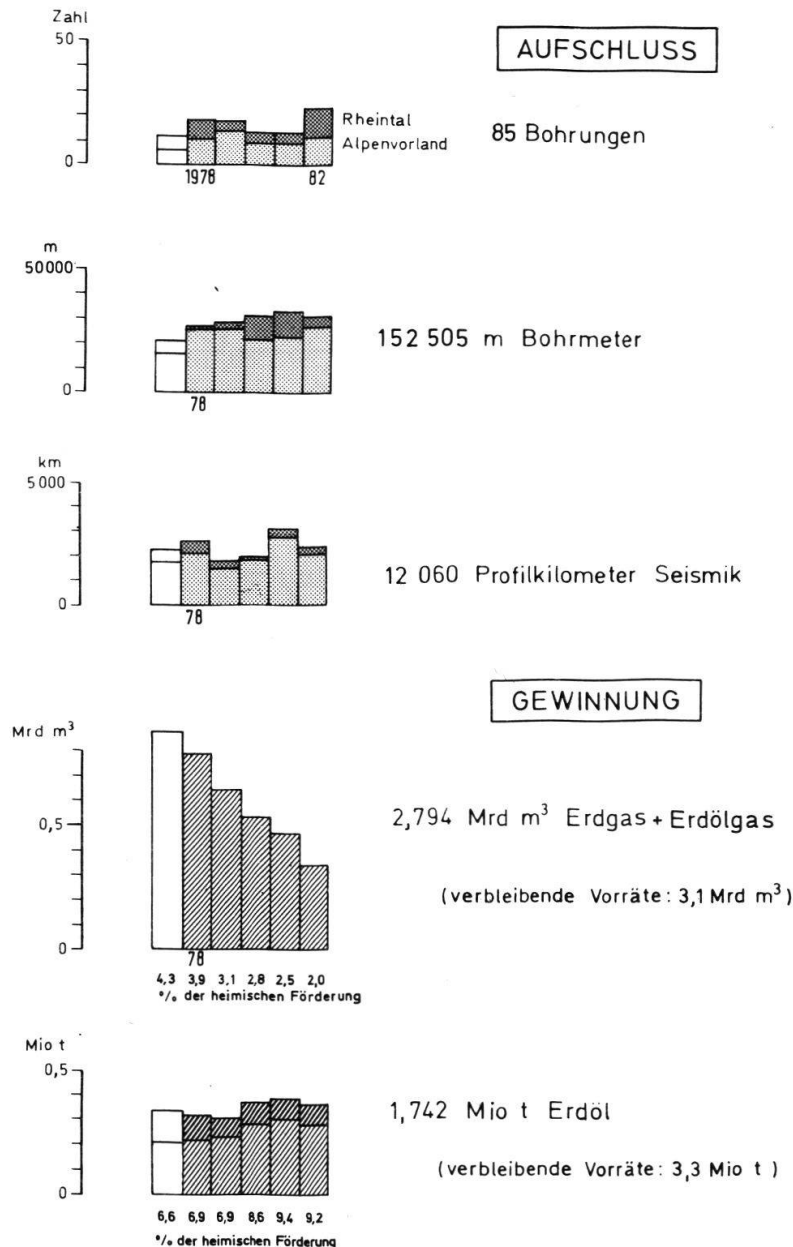


Abb. 3 Aufschluss und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen in Süddeutschland in den Jahren 1978 – 1982.
Zusammengestellt nach WEG-Statistik und Erdöl-Erdgas Jahresberichten des NLfB, Hannover.

Einen Überblick über die wirtschaftliche Grössenordnung der Kohlenwasserstoff-Funde im Alpenvorland und den Zuwachs an Reserven seit 1953 bis hin zu den heute nachgewiesenen 28 Milliarden Kubikmeter Erdgasäquivalent gibt die Abb. 4: sie zeigt, dass durch die Entdeckungen in den vergangenen 10 Jahren nur rund 5% der Reserven hinzugekommen sind. Ab 1973 vollzog sich, wie es die Zuwachskurve ausweist, ein Wechsel von der konventionellen Exploration zur komplizierten und risikoreichen Sekundärphase der Erschliessung dieser Region. Die Suche nach Störungsfallen und Antiklinalen wurde ergänzt durch die bedeutend schwierigere und kostspieligere Suche nach Faziesfallen. Erst ab 1977 macht sich dabei ein Wiederanstieg der nachgewiesenen Reserven bemerkbar, der u. E. auf den technisch-wissenschaftlichen Fortschritt bei der Bearbeitung der einzelnen Explorationsvorhaben und den massiven Einsatz moderner Technologien im Gelände zurückzuführen ist.

Deutsches Alpenvorland Nachgewiesene Kohlenwasserstoff-Reserven

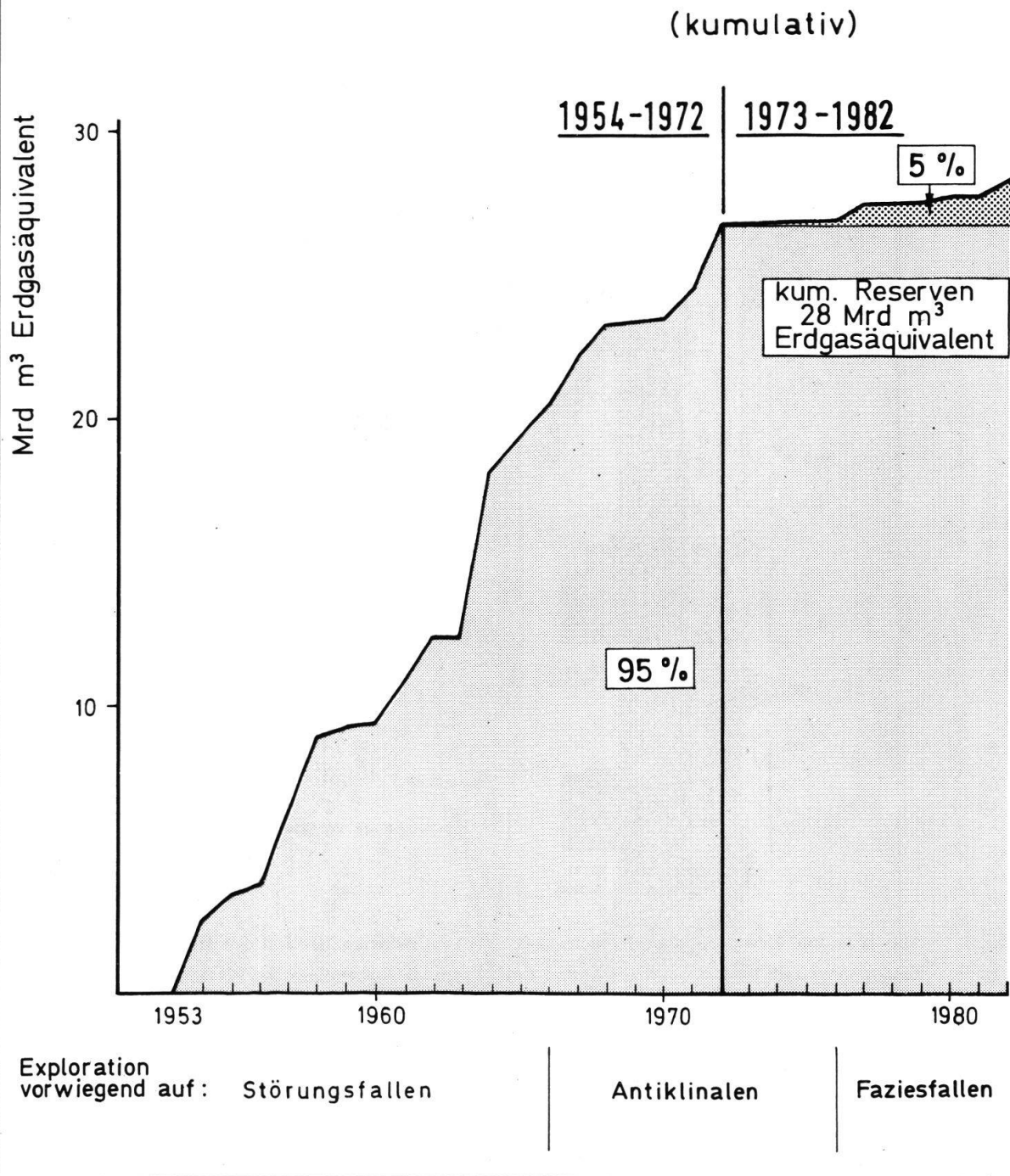


Abb. 4 Aufgefundene Kohlenwasserstoff-Reserven im deutschen Alpenvorland.
Nach Erdöl-Erdgas Jahresberichten des NLFb und internen Unterlagen der Erdölindustrie. Der Einfachheit halber wurde bei der Addition der kumulativen Reserven 1 Million t Erdöl einer Milliarde m³ Erdgas gleichgesetzt («Erdgasäquivalent»).

Die Durchschnittsreservengrösse der Erdöl- und Erdgasfelder in Süddeutschland ist, verglichen mit Norddeutschland, sehr klein, was aus der nachfolgenden Aufstellung hervorgeht:

Tabelle 1 Durchschnittsreservengrößen von Feldern in Deutschland

		Molasse	Rheingraben	Norddeutschland
Reserven	Erdöl	400.000 t	200.000 t	2.600.000 t
pro Feld:	Erdgas	600 Mio m ³	150 Mio m ³	4.600 Mio m ³

Von der Durchschnittsgrösse wesentlich nach oben abweichend sind in Süddeutschland nur die Felder Bierwang, Fronhofen-Illmensee, Ampfing, Landau und Stockstadt. Für die Industrie war es daher von vitaler Bedeutung, dass die süddeutschen Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz in ihren Förderabgabenverordnungen der speziellen Situation der kleinen Felder Rechnung getragen haben: Felder der süddeutschen Grössenordnung sind nur mit einem unverhältnismässig grossen Seismik- und Bohraufwand zu finden, zu entwickeln und mit vergleichsweise hohen Förderkosten zu operieren – Faktoren, die einen Fund sehr schnell unter die Wirtschaftlichkeitsgrenze drücken können.

Die enger werdende Schere zwischen steigenden Förderabgaben und abnehmenden Rohöl- und Erdgaserlösen bei sich gleichzeitig verringernden Erdgasverkäufen aus eigener Produktion machte es notwendig, neue Strategien auf wissenschaftlich fundierter Basis zu formulieren, um Aufschlussarbeiten im Süden auch weiterhin rechtfertigen zu können. Insofern bestand ein Zwang, stets die neueste Technik anzuwenden, moderne Methoden und neue Aufschlusskonzepte zu entwickeln.

Vergleicht man vor diesem Hintergrund der Explorationslage das Verhältnis der Anzahl der Bohrungen zur Anzahl der Neufunde in Abb. 5, so bleibt festzustellen, dass die Fündigkeitsrate in den letzten 5 Jahren beachtlich zugenommen hat. Wir meinen darin Ansätze einer erfolgreichen Überlebensstrategie zu erkennen. Einige der in dieser Zeit entwickelten neuen Konzepte und Methoden sowie deren Resultate sollen im nachfolgenden beschrieben werden:

Neuere geowissenschaftliche Methoden und Ergebnisse

Die raschen Fortschritte und Neuerkenntnisse in der Erdölindustrie während der letzten Jahre sind auf den verstärkten Einsatz von teilweise neuen Disziplinen in den Geowissenschaften zurückzuführen (BETZ 1983), wie z. B. von Tektonik/Felsmechanik, Geophysik, Petrophysik, Mineralogie, Sedimentologie und organischer Geochemie (Abb. 6). Insbesondere ihr integrierter Einsatz war seit dem Eintritt in die verstärkte Explorationsphase der Garant des Erfolgs, und er wird es unseres Erachtens auch weiterhin bleiben.

Tektonik/Felsmechanik

Eine wertvolle Hilfe bei der Lösung komplizierter tektonischer Probleme war die moderne analytische Betrachtung des Deformationsverhaltens von Gesteinen sowohl im lokalen als auch im regionalen Massstab (HARDING 1974). Durch die Ableitung eines Deformationsellipsoids (Abb. 7) wurde es überall in den Explorationsgebieten möglich, syngenetische tektonische Vorgänge auf den verursachenden Beanspruchungsplan zurückzuführen: ganz verschiedene Strukturformen und -elemente werden dabei als Auswirkung einer einheitlichen Bewegung, beispielsweise einer Blattverschiebung, erklärt. Mit grossem Erfolg wird dieses Konzept heute in bedeutenden Erdölprovinzen weltweit eingesetzt (HARDING 1979).

Deutsches Molassebecken

Explorationsbohrungen und Fündigkeiten von 1954 - 1982

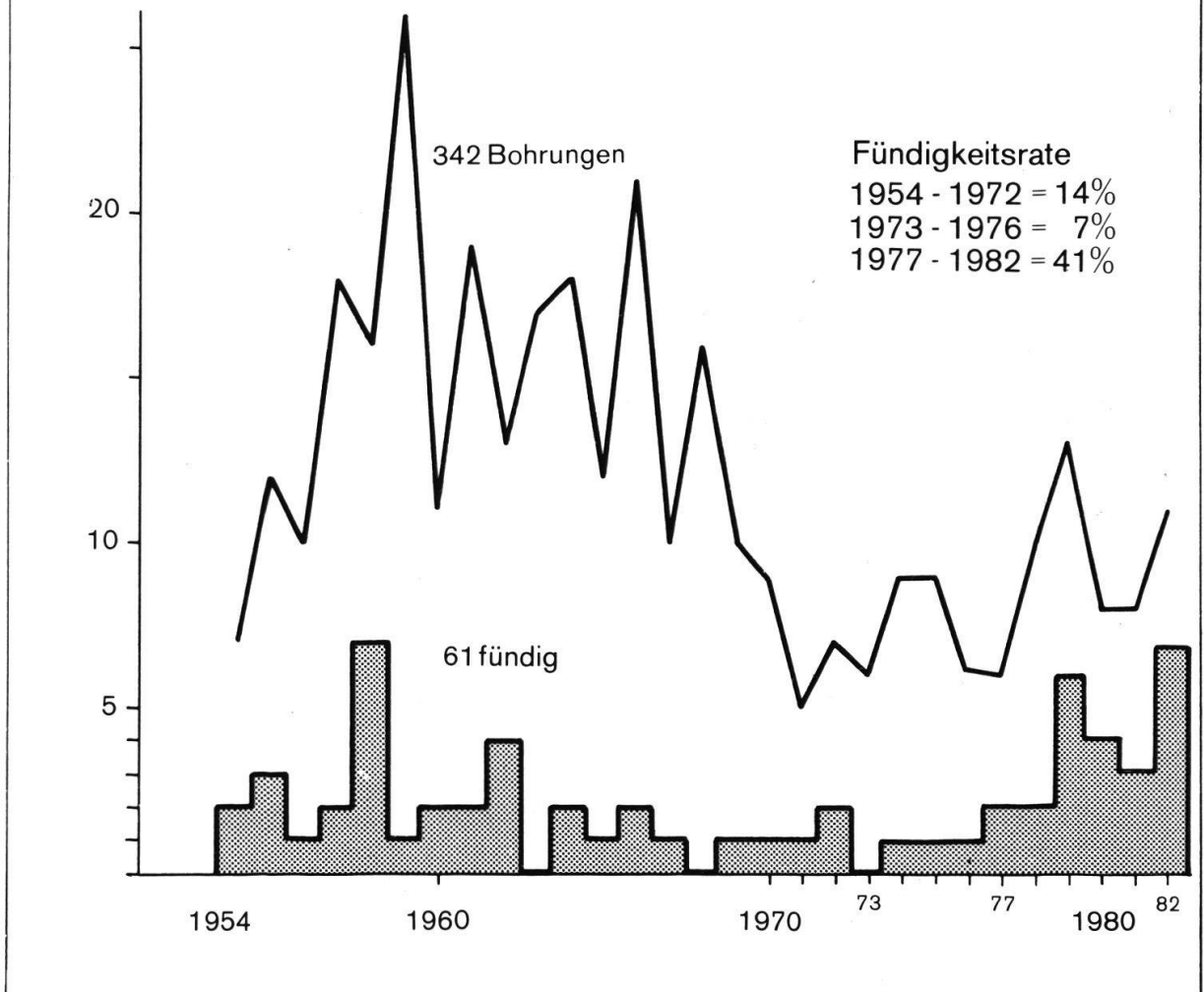


Abb. 5 Übersicht über die jährliche Zahl der Explorationsbohrungen und der Fundbohrungen im deutschen Molassebecken in der Zeit von 1954 – 1982. Die Darstellung verdeutlicht zugleich die Entwicklung der Fündigkeitsrate.

Zusammengestellt nach Erdöl-Erdgas Jahresberichten des NLfB und Unterlagen der BEB.

Die wichtige Rolle der Blattverschiebungen bei der Entstehung der Erdölfallen in Süddeutschland ist eigentlich erst in den letzten Jahren in ihrer ganzen Tragweite erkannt worden: zwar wurden bereits 1964 an Bohrkernen der Aufschlussbohrung Berlingen 1 aus dem schweizerischen Alpenvorland horizontale Harnische beschrieben (Abb. 8) – zu einer Zeit, als moderne tektonische Erkenntnisse nur spärlich Eingang in die Fachliteratur gefunden hatten – ihre regionale Einordnung unterblieb jedoch. Diese horizontalen Bewegungsflächen werden nun einem überregionalen Deformationsfeld zugeordnet und mit modernsten Mitteln systematisch erforscht.

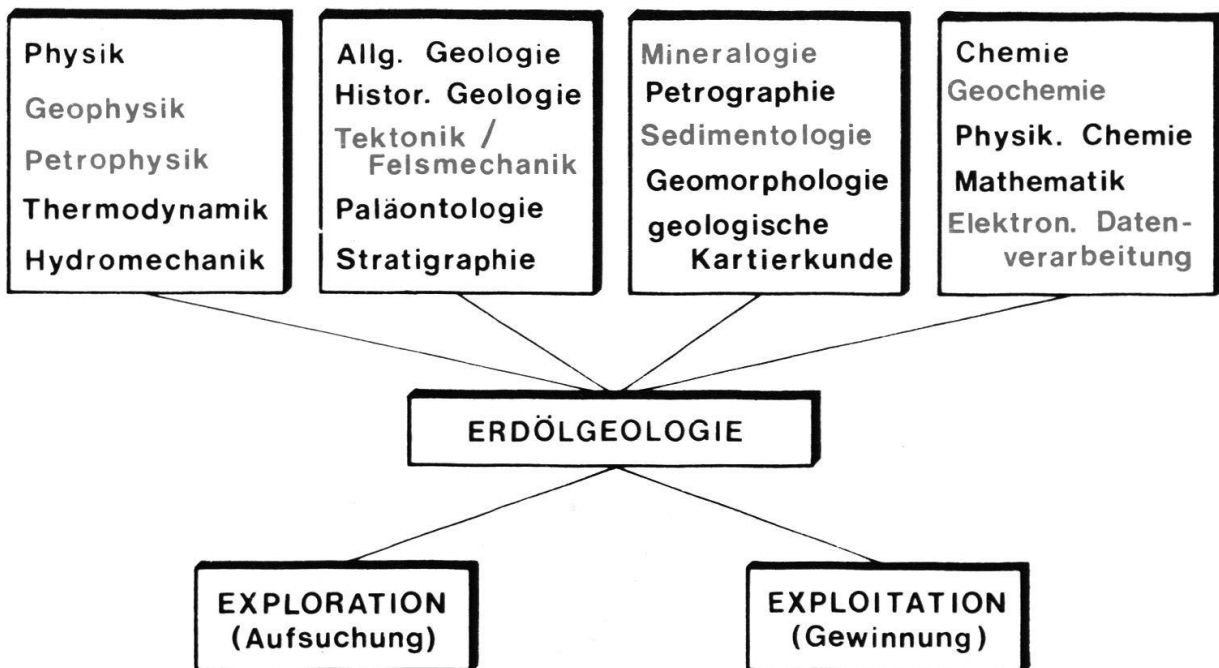


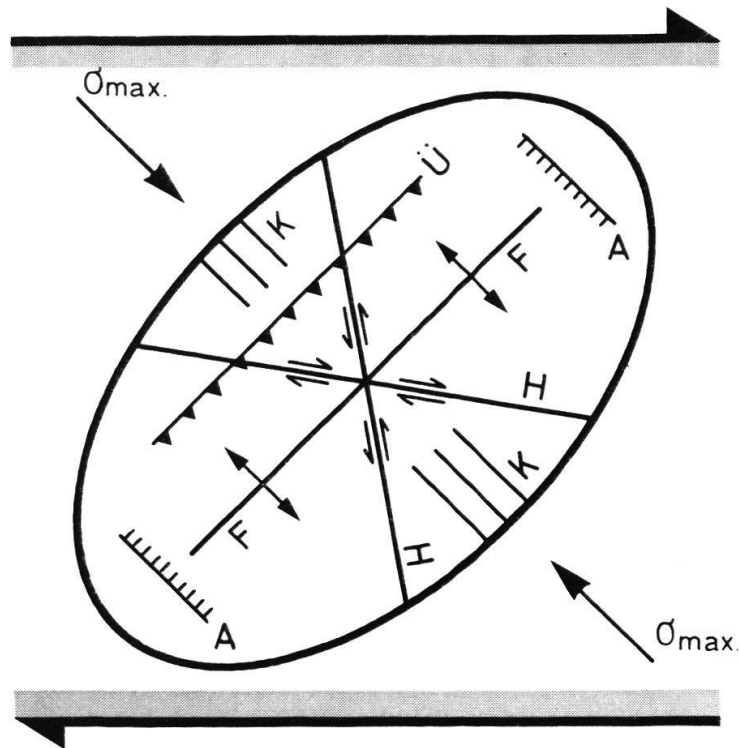
Abb. 6 Die geowissenschaftlichen Teildisziplinen in der Erdölgeologie (aus BETZ 1983).
Zunehmend wichtige Bereiche sind rot hervorgehoben.

Für die Deutung des tektonischen Beanspruchungsplans werden zunehmend Beobachtungen aus Stressmessungen, Erdbeben- und vor allem Mikrobebenaufzeichnungen verwendet. Sie geben darüber Auskunft, wo Zug- oder Druckspannungen herrschen. Ein modernes Hilfsmittel sind hierzu die Beobachtungen von Ausbrüchen an der Bohrlochwand von Tiefbohrungen («Auskesselungen»), die im Rahmen der Bohrlochvermessung mit orientierten 4-Arm-Kaliber Sonden registriert werden können. Ein Beispiel, das von der Universität Karlsruhe ausgewertet wurde (BLÜMLING 1983), stammt von der Forschungsbohrung Urach 3 (Abb. 9): Das Bild zeigt die bevorzugte WSW-ENE Anordnung von 65 Auskesselungen im Kristallin. Aufgrund einer digitalen Auswertung ergibt sich die Richtung der maximalen horizontalen Druckspannung danach als NNW-SSE. Dem Bild der Bohrlochprojektion wurde zum Vergleich eine repräsentative Herdflächenlösung aus dem Bereich des Hohenzollerngrabens (TURNOWSKY & SCHNEIDER 1982) überlagert. Die Übereinstimmung der Richtung der maximalen Kompression ist signifikant. Weiterhin haben in situ Spannungsmessungen im süddeutschen Raum (ILLIES & GREINER 1979, ILLIES, BAUMANN & HOFFERS 1981) einen ähnlichen regionalen Beanspruchungsplan ergeben. Die Beobachtungen von Auskesselungen im Bohrloch lassen also verlässliche Rückschlüsse auf großräumige Spannungs- und Deformationsverhältnisse zu.

Die Vielzahl aller tektonischen Einzelbeobachtungen kann heute in das Grobraster einer Satellitenbild- oder Radarbildinterpretation eingeordnet werden: Wesentliche Störungssysteme lassen sich durch das Studium der Satellitenaufnahmen herausarbeiten (TOLLMANN 1977). Auf dem Bild des deutschen Alpenvorlands und seiner Umgebung (Abb. 10) gibt es Hinweise auf die Rejuvenation eines alt angelegten Störungssystems an beckenparallelen Brüchen des Basements, die bei der Subduktion aufrissen. Weit deutlicher zeichnet sich aber das junge System der Blattverschiebungen quer dazu ab, das die Kompressions-tektonik an der Grenze zwischen afrikanischer und eurasischer Platte widerspiegelt. Die

Deformationen in Scherzonen (nach HARDING 1974)

Abb. 7
Spannungen und Deformationen in
einer Scherzone (nach HARDING
1974).



H = Horizontalverschieb. A = Abschiebungen
F = Falten $\sigma_{max.}$ = Maximale Druckspannung
Ü = Überschiebungen K = Klüfte

Auswertung auf Abb. 10 stellt einen vereinfachten Interpretationsversuch dar, der lediglich die Hauptlineamente wiedergibt. Selbstverständlich müssen an der Erdoberfläche beobachtete Lineamente mit den Aussagen der Reflexionsseismik für den Untergrund verglichen und überprüft werden.

Die Kombination der modernen tektonischen Methoden führte in den letzten Jahren zu der Erkenntnis einer Deformation des Alpenvorlandes nicht nur durch Dehnungsbrüche, sondern auch durch konjugierte Scherbrüche, die sich sehr deutlich im Molassebecken nachweisen lassen. Das Konzept der Blattverschiebungen, wie es auf der tektonischen Übersichtskarte in Abb. 11 dargestellt ist, erwies sich als Leitlinie für weitere Explorationsarbeiten. Die beckenparallelen antithetischen Brüche, die sich oft kilometerlang durchverfolgen lassen, wurden daraufhin durchgemustert, ob und wo an den monoklinalen Strukturzügen vor diesen absperrenden Störungen im Kreuzungsbereich mit den kartierten Blattverschiebungen Fangpositionen zu lokalisieren sein könnten. Das neue Aufschlusskonzept nach plattentektonischen Gesichtspunkten wurde systematisch eingesetzt, was zum Auffinden neuer Lagerstätten führte.

Ein Beispiel für den *erfolgreichen* Einsatz dieser modernen Methode war der erste Gasfund Entlebuch 1 in der Schweiz von 1980 – über den allerdings hier nicht berichtet werden soll. In Süddeutschland führte ihre Anwendung bereits 1978 zur Entdeckung des Erdölfelds Oberschwarzach (Abb. 12), und zwar in einem Gebiet, in dem vorher bereits fünf Fehlbohrungen niedergebracht worden waren. Der Fund in den Bausteinschichten konnte mittlerweile zu einem 1 – 2 km² grossen Feld ausgebaut werden.

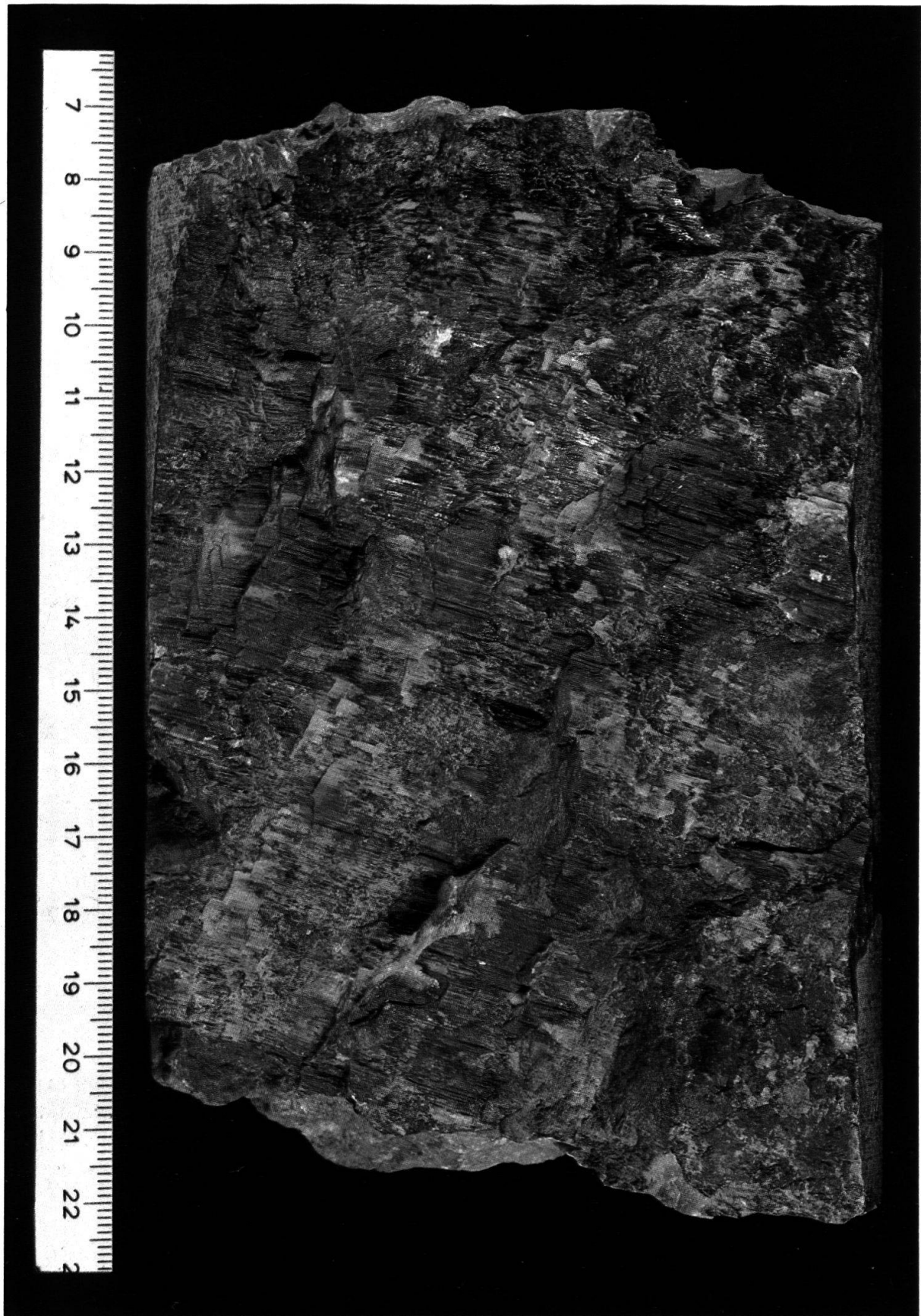


Abb. 8 Horizontale Hamische in einem Bohrkern des Malm zeta aus rund 1500 m Tiefe (Aufschlussbohrung Berlingen 1, Schweiz).

Bohrung Urach 3

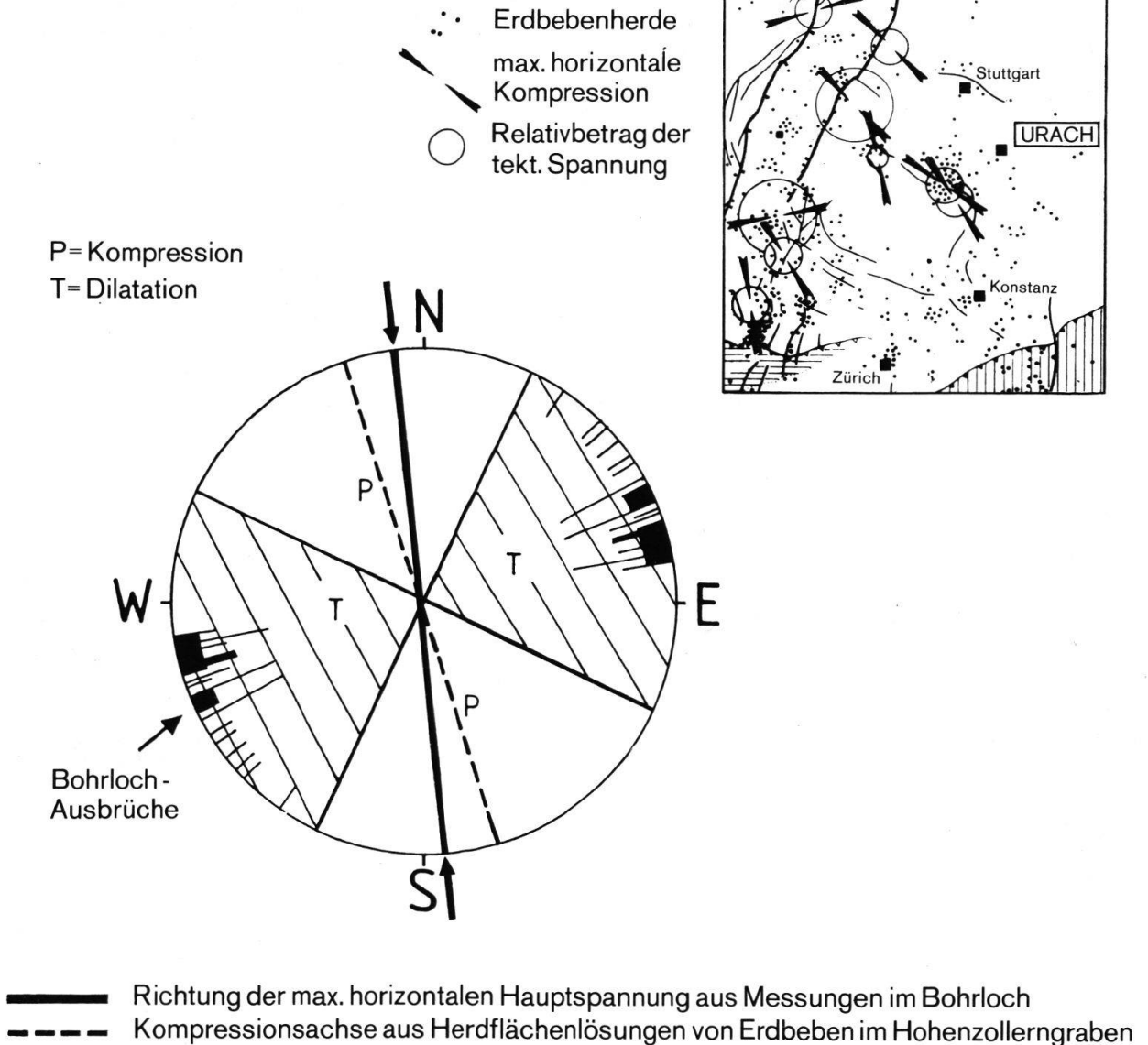


Abb. 9 Bohrlochausbrüche («Ausesselungen») in der Bohrung Urach 3 und das Bild der Hauptspannungen in Südwestdeutschland nach Erdbebenaufzeichnungen und in situ Spannungsmessungen (weitere Erläuterungen siehe Text).

Es zeigte sich, dass auch heute noch Möglichkeiten existieren, in seit langer Zeit explorierten Gebieten durch Anwendung neuer plattentektonischer Erkenntnisse bisher unbekannte Lagerstätten aufzuspüren. Weiterhin können viele der bekannten Erdöl- und Erdgasfelder unseres Erachtens heute tektonisch neu interpretiert werden, was für ihre weitere Erschliessung von Bedeutung ist.

Geophysik

Auch die Fortschritte der Geophysik, insbesondere die der Reflexionsseismik mit ihrer stürmischen Entwicklung der Aufnahme- und Interpretationstechniken, haben die Explorationsarbeiten im süddeutschen Raum, in Vorarlberg und in der Schweiz beflügelt.

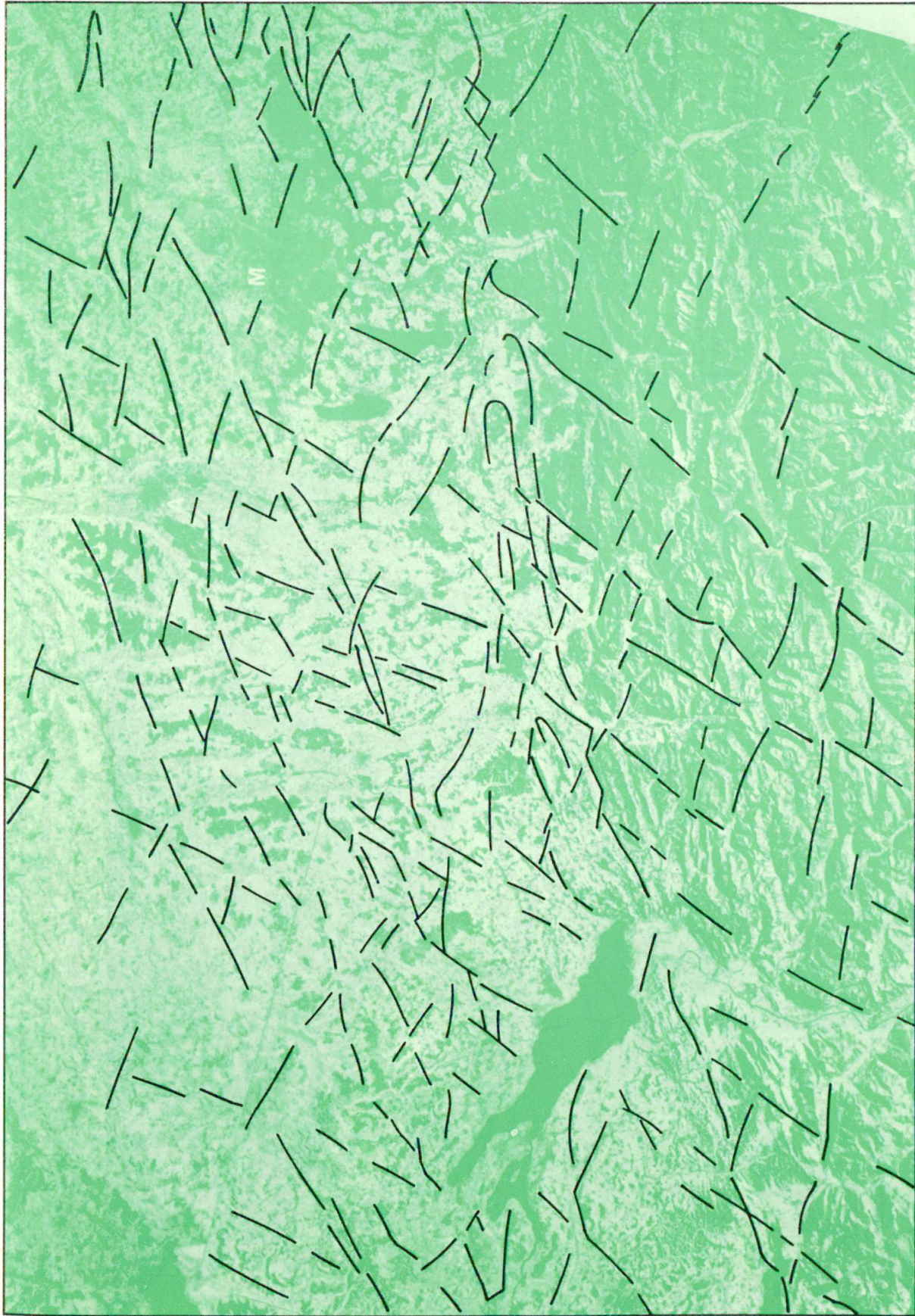


Abb. 10 Versuch der tektonischen Interpretation einer Satellitenaufnahme des deutschen Alpenvorlands und seiner Umgebung. Das Lineament-Grobraster zeigt Hinweise auf Rejuvenation beckenparalleler Brüche im Alpenvorland sowie auf konjugierte Blattverschiebungen in den Alpen und im Vorland.

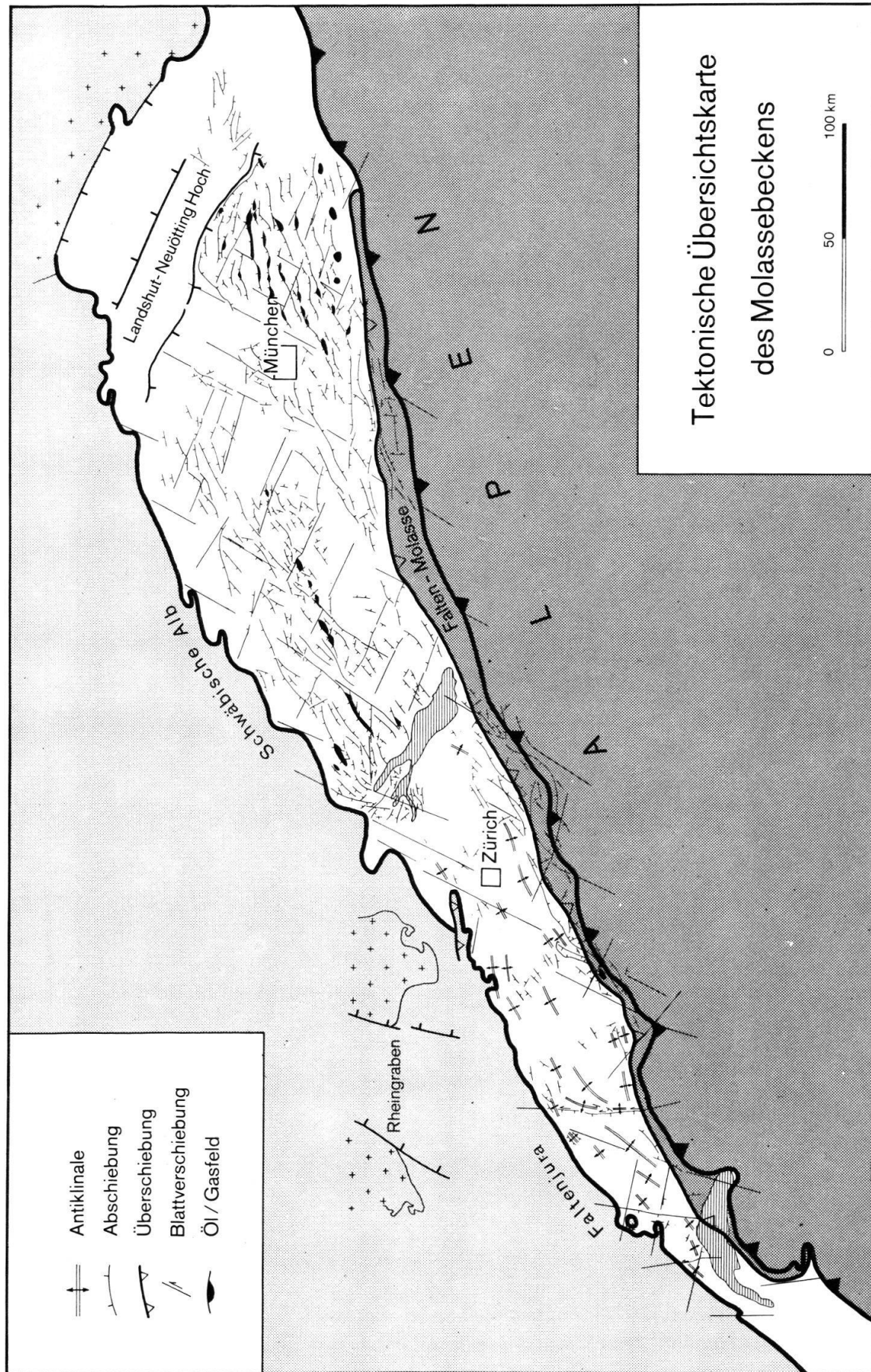


Abb. 11 Tektonische Übersichtskarte des Molassebeckens:

Deutlich ist das System der konjugierten Scherbrüche (generalisiert nach VOLLMAYR – interne Notiz) im Vorland der Alpen zu erkennen.

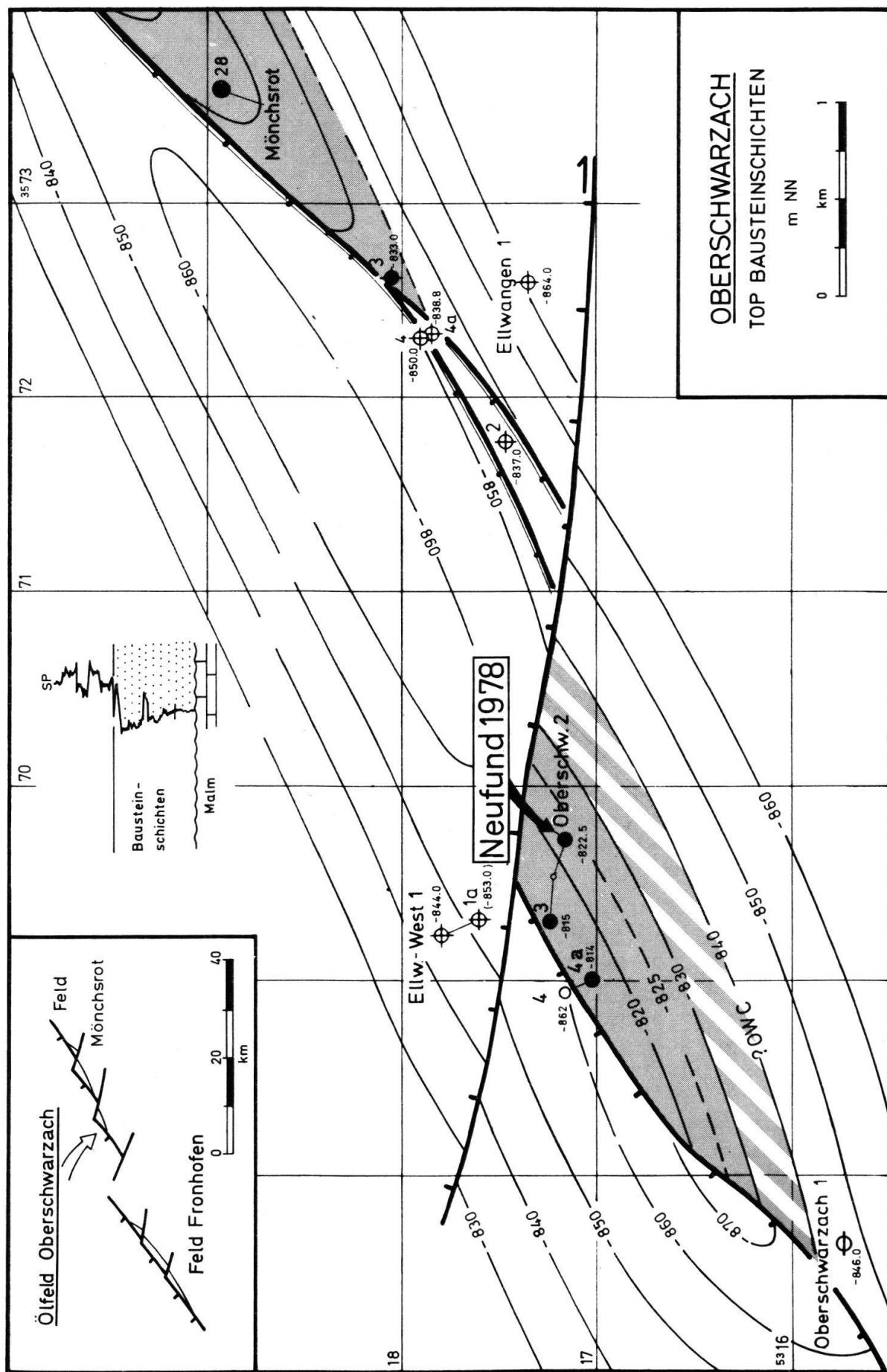


Abb. 12 Der Erdölfund Oberschwarzach im baden-württembergischen Alpenvorland:
Ein dextraler Scherbruch wirkt als Absperung für die Ölmigration nach Nordosten.

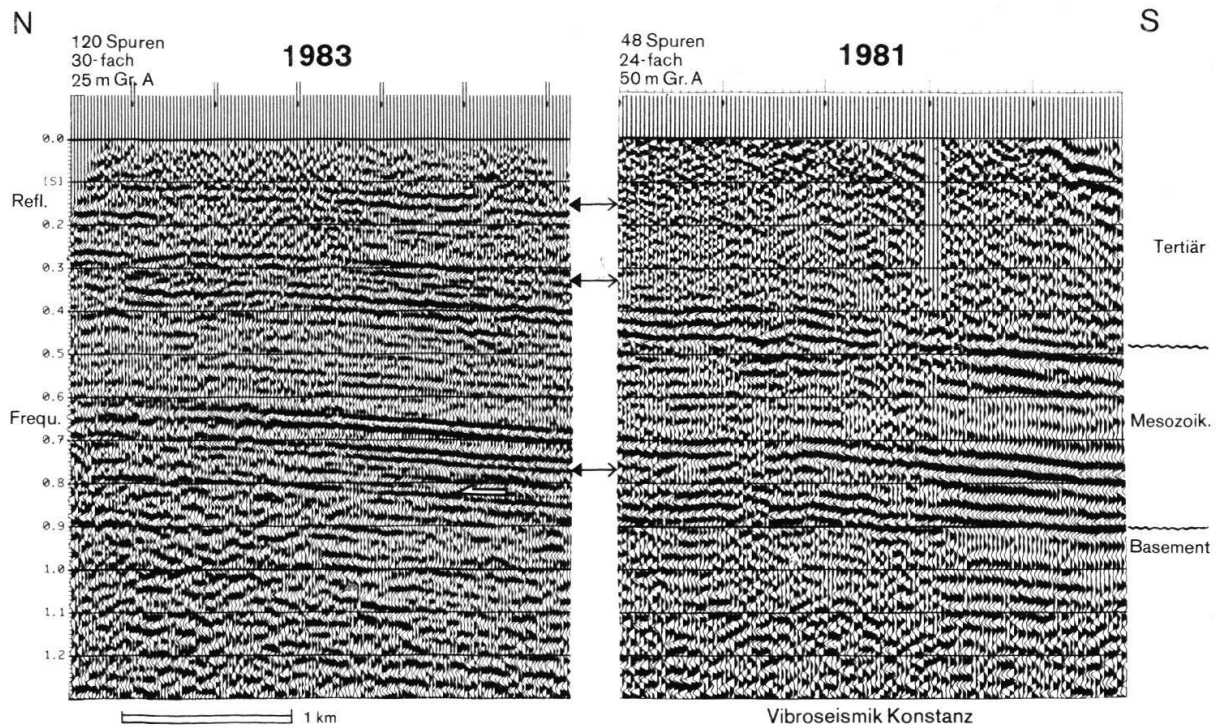


Abb. 13 Fortschritte in der Aussagekraft reflexionsseismischer Messungen.

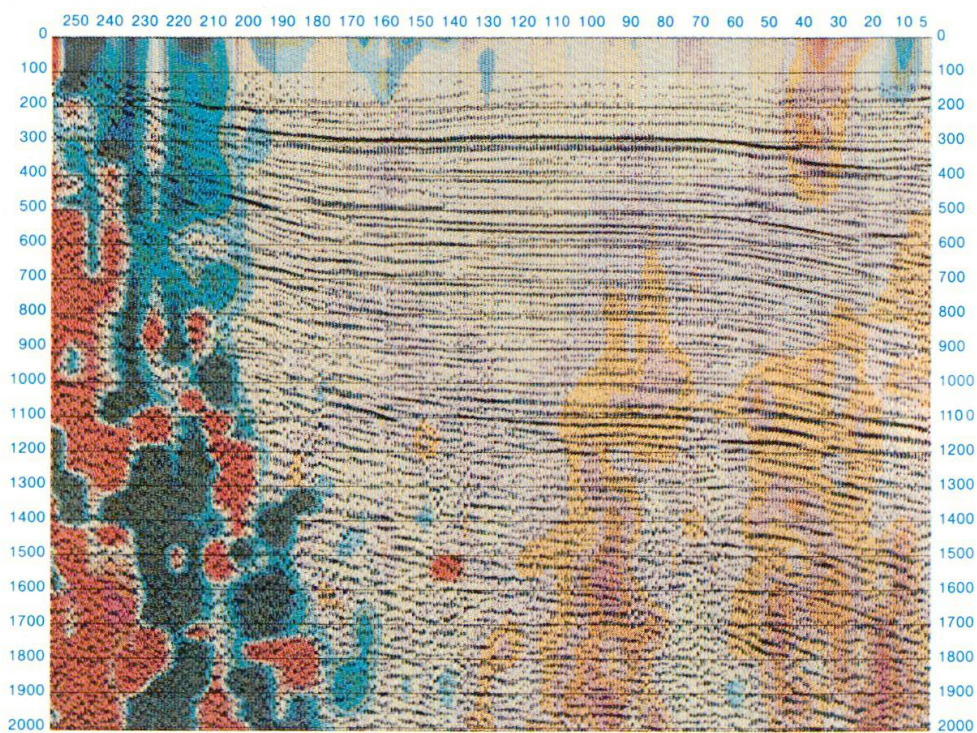
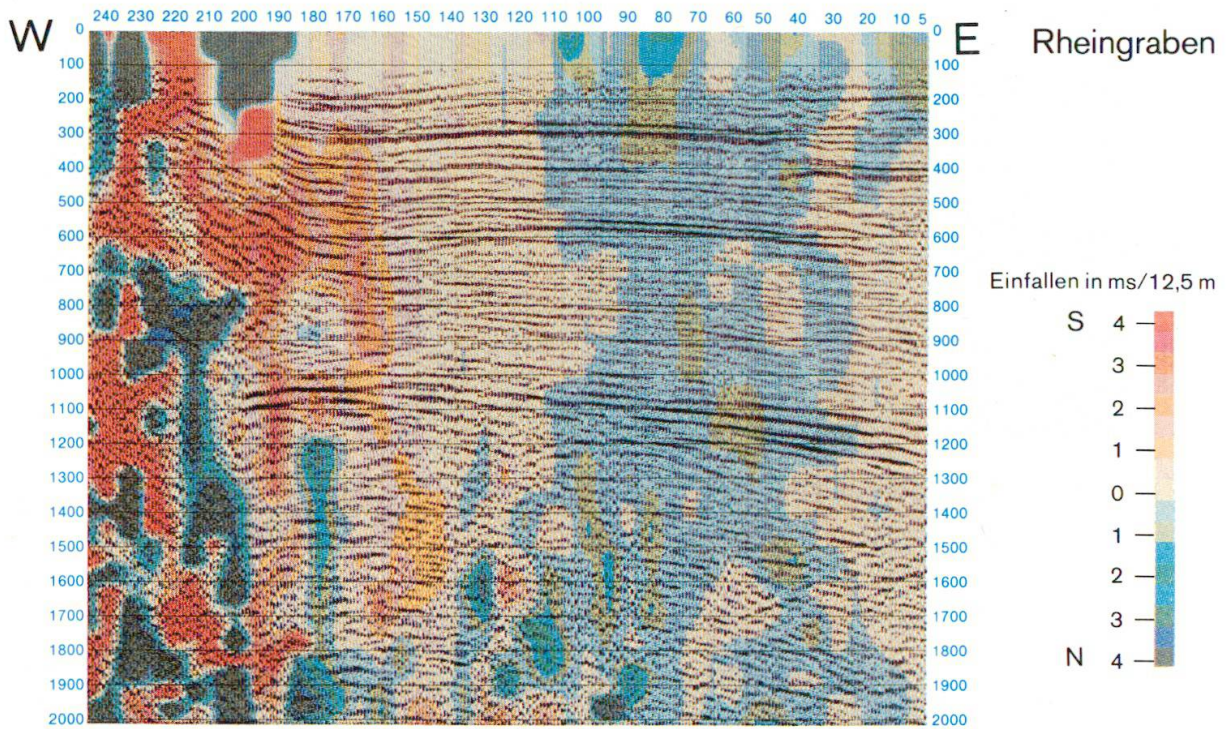
Dargestellt an zwei unmittelbar aneinandergrenzenden seismischen Profilen von 1981 und 1983 aus der deutschen Westmolasse.

Abb. 13 zeigt die beachtliche Verbesserung der Qualität zweier aneinandergrenzender Vibroseismik-Profile, die in einem zeitlichen Abstand von nur 2 Jahren gemessen wurden. Das Ergebnis des technischen Fortschritts sind mehr Informationen durch zusätzliche Reflexionen oberhalb 0,5 sec. Laufzeit sowie bessere Auflösung durch hochfrequente Einzelcharakteristik unterhalb 0,5 sec. Die Qualitätsverbesserung wurde möglich durch den Einsatz einer modernen 120spurigen Messapparatur, die es erlaubt, eine 30fache Überdeckung bei 25 m Gruppenabstand unter ökonomischen Gesichtspunkten durchzuführen.

Die Verbesserung statischer Korrekturen hat zusätzlich zur Klärung vieler Probleme beigetragen. 3-D Seismik wurde im Fall Entlebuch mit Erfolg eingesetzt; sie ist allerdings sehr zeitaufwendig, teuer und muss daher Spezialproblemen vorbehalten bleiben. Unter bestimmten Voraussetzungen kann das «Wide Line Profiling» kostengünstiger weiterhelfen. Durch den Einsatz dieser neuen Messmethode wird es möglich, aus parallel im Abstand von einigen hundert Metern geschossenen und separat prozessierten Profilen die komplizierten Neigungsverhältnisse der Horizonte quer zur Profilrichtung zu erkennen. Die Methode ist mithin eine «3-D Aufnahme im Kleinen». Abb. 14 zeigt ein eindrucksvolles Beispiel einer solchen Messung aus dem Rheingraben.

Die neue verbesserte Seismik hat im Oberrheintal nach langen Jahren der Stagnation zur Wiederaufnahme der Exploration geführt. Mit der hochauflösenden Seismik scheint es nun möglich zu sein, das Blockschollenmosaik besser zu entziffern als zuvor. Erste Erfolge haben den Wiederbeginn belohnt, wie es z. B. der bemerkenswerte Ölfund von 1982 im Dogger (Hauptrogenstein) von Offenburg 9 (Abb. 15) verdeutlicht. Hier hatte die alte Seismik eine klare Aussage über das Mesozoikum nicht gestattet.

Völlig neue Perspektiven hat die Einführung der seismischen Stratigraphie als Interpretationstechnik erbracht. Zunächst im offshore-Gebiet entwickelt (VAIL et al. 1977), ist sie heute generell fester Bestandteil bei der Suche nach Faziesfallen (Abb. 16). Das Prinzip besteht darin,



1km

wide - line profiling'82

Abb. 14 Wide Line Profiling im Rheingraben.

Mit den unterschiedlichen Farben wird Richtung und Ausmass des Schicht-Einfallens dokumentiert. Auf der linken Bildseite zeichnet sich der westliche Grabenrand als intensiv gestörte Zone ab. Im Grabenbereich selbst weist das obere Profil überwiegend Nordfallen, das untere Südfallen auf.

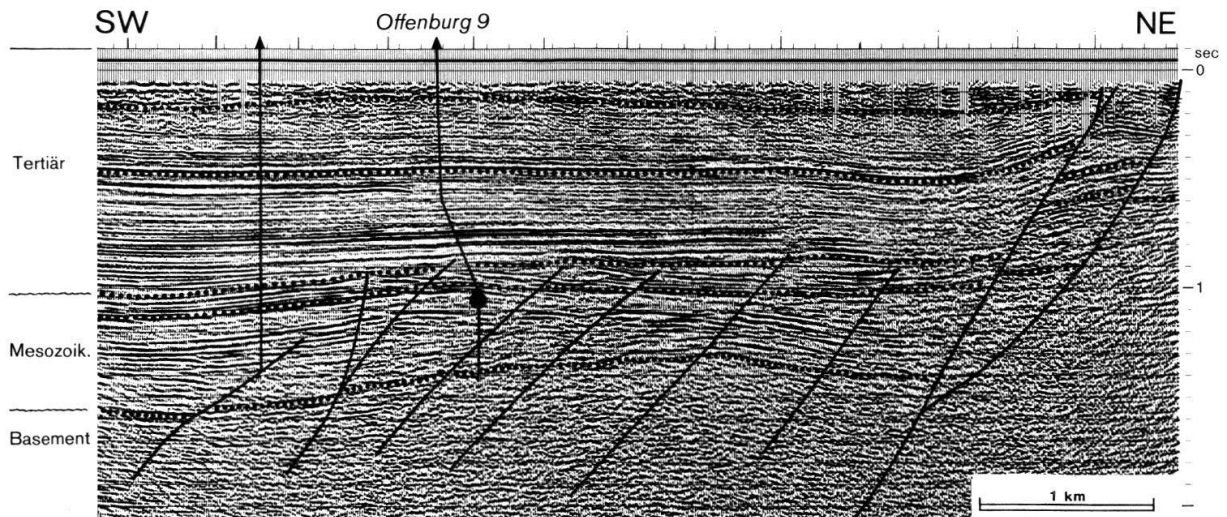


Abb. 15 Der Erdölfund Offenburg 9 (1982) im südlichen Oberrheingraben – ein Ergebnis der verbesserten modernen Seismik.

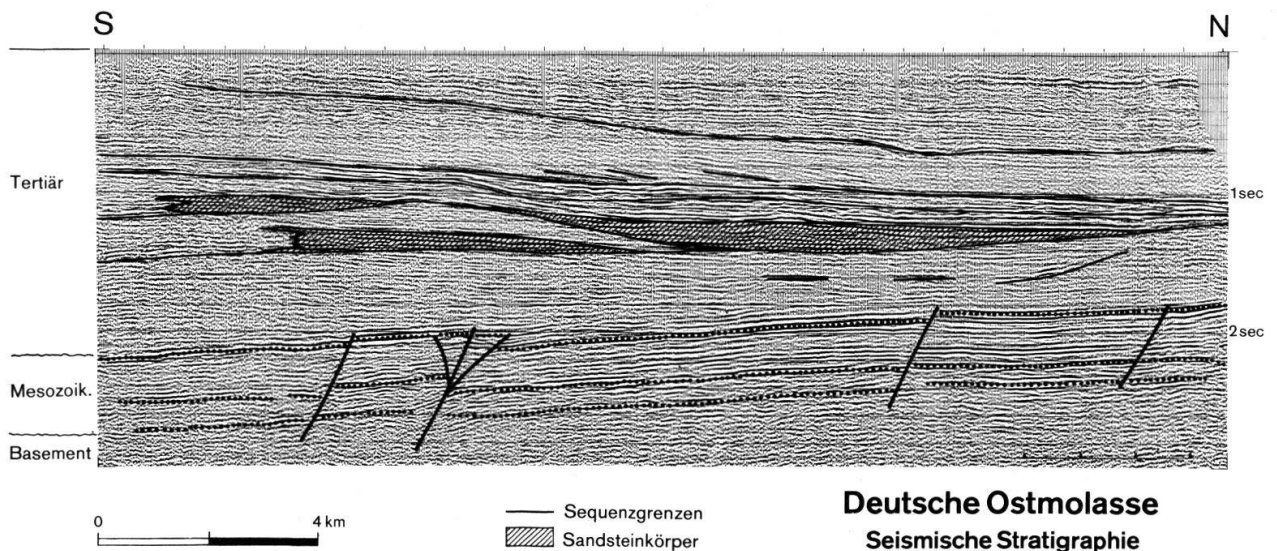


Abb. 16 Seismische Stratigraphie in der deutschen Ostmolasse.

Im Tertiär lassen sich mehrere seismische Sequenzen kartieren, die mit Hilfe synthetischer Seismogramme von Bohrungen dem Aquitan (Obere Puchkirchen Serie) und dem Burdigal zugeordnet werden können. Innerhalb der Sequenzen zeichnen sich Sandsteinkörper ab.

mit Hilfe der Terminationen von Reflexionen seismische Sequenzen abzugrenzen. Aus dem Sonic- und Dichtelog von Bohrungen werden synthetische Seismogramme hergestellt, so dass die einzelnen Reflexionen direkt angesprochen werden können. Ausserdem wird durch paläontologische Untersuchungen das Alter und die ehemalige Wassertiefe des Ablagerungsmilieus bestimmt. Auf diese Weise wird insgesamt die seismische Fazies und die Geometrie der im Profil erkennbaren Sandstein- bzw. Sedimentkörper kartiert und kann dem System der globalen Meeresspiegelschwankungen zugeordnet werden. Kurz, diese Methode stellt eine ideale Verschmelzung von Geophysik, Geologie und Sedimentologie dar. Seismische Stratigraphie und seismisches Modelling haben auch in Süddeutschland das neue Zeitalter der Suche nach Faziesfallen eingeleitet: Wie könnten wir sonst die Vielzahl unkonventioneller Ziele anders als mit diesen Methoden erkennen? Point bars, Küstensande, Deltasedimente,

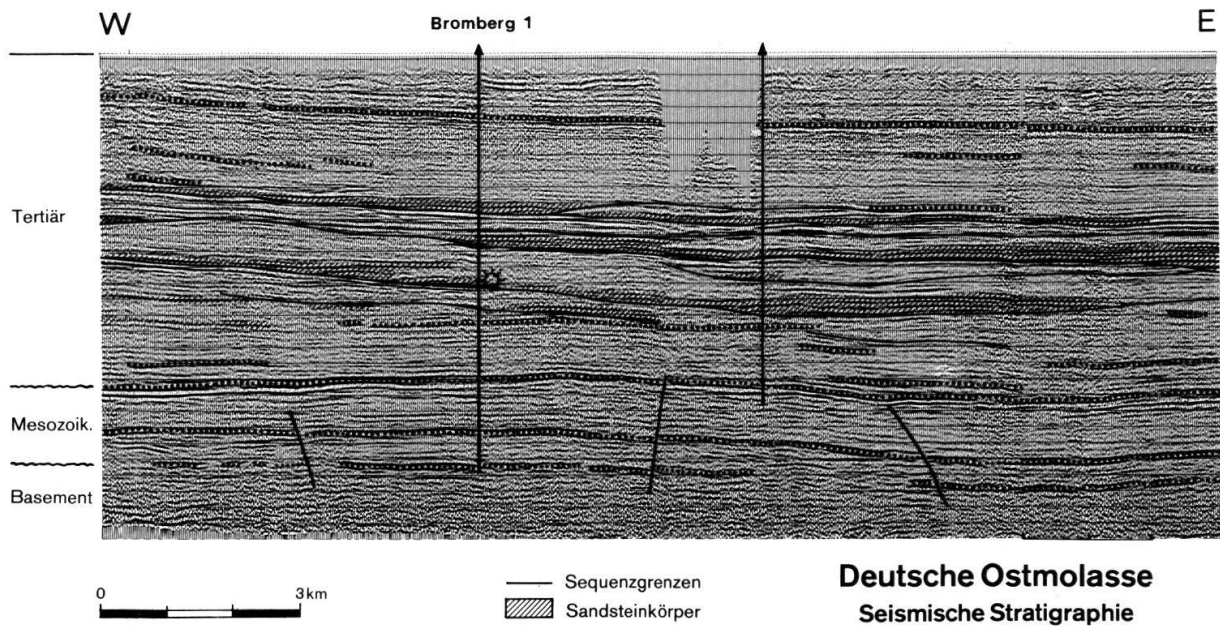


Abb. 17 Der Gasfund von Bromberg 1 in der deutschen Ostmolasse.
Die stratigraphische Falle wird durch das Auskeilen eines Sandsteins («onlapping») gegen eine Sequenzgrenze und sein Vertonen («shale-out») in Richtung E gebildet.

Turbidite, Erosionsrelikte, Sandsteinausbisse, Riffe müssen vor dem Ansetzen einer Bohrung räumlich definiert werden, was mit Hilfe einer konventionellen seismischen Interpretation kaum möglich ist. Ein regelmässiges dichtes seismisches Messnetz, angelegt nach einem sogenannten Master Plan, ist die Voraussetzung für eine systematische Kartierung.

Zwei Beispiele aus dem Gebiet der deutschen Ostmolasse sollen die Ergebnisse einer seismisch-stratigraphischen Bearbeitung aufzeigen: das Profil auf Abb. 17 über den letztjährigen Gasfund Bromberg 1 lässt mehrere Sandsteinkörper im Tertiär erkennen. Sie sind zumeist turbiditischer Natur und haben als Sandzungen submariner Fans den Tiefseeboden aufgefüllt. Man erkennt Erosionswannen, die nachfolgend zugeschüttet wurden, Querschnitte von Sandzungen, Vertonungszonen, im oberen Teil des Profils auch die Andeutung einer Pro-Deltafront, insgesamt Kennzeichen einer seismischen Fazies. Die verschiedenen Sandkörper bieten eine Vielzahl von Prospektmöglichkeiten für stratigraphische Fallen. Andererseits wird durch die Komplexität der Erscheinungsformen auch das Risiko einer falschen Faziesprognose deutlich, die dann zu Fehlschlüssen führt, wenn es nicht gelingt, im Reflexionspattern Tonsteine mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten von den Sandsteinen zu unterscheiden oder wenn Sequenzgrenzen falsch korreliert werden.

Bis zum Abschluss der konventionellen Exploration galt das von dem seismischen Profil in Abb. 17 gequerte und in Abb. 18 kartierte Gebiet östlich der Aquitan-Deltasande als exploratorisch uninteressant, da die Null-Meter-Linie der Sande «bekannt» war. Mit der seismischen Stratigraphie konnte wahrscheinlich gemacht werden, dass weiter östlich in Richtung zu den bekannten Gasfunden Oberösterreichs hin (POLESNY 1983) turbiditische Sandsteinkomplexe verbreitet sein müssten. Schon die erste Aufschlussbohrung Traunreut A 2 hatte Erfolg: mehr als 300 m Sandsteine wurden erbohrt, deren oberste Zone gasführend war. Mittlerweile wurden 8 weitere Bohrungen auf den submarinen Fankomplex abgeteuft und dabei 3 zusätzliche Gasfunde erzielt, zuletzt derjenige von Bromberg 1. Mit Hilfe der seismischen Stratigraphie wurde also eine neue Gasprovinz entdeckt. Eine vorher wenig attraktive Region konnte erdölgeologisch aufgewertet werden, wenngleich die Wirtschaftlichkeit der Neufunde bisher noch gering blieb.

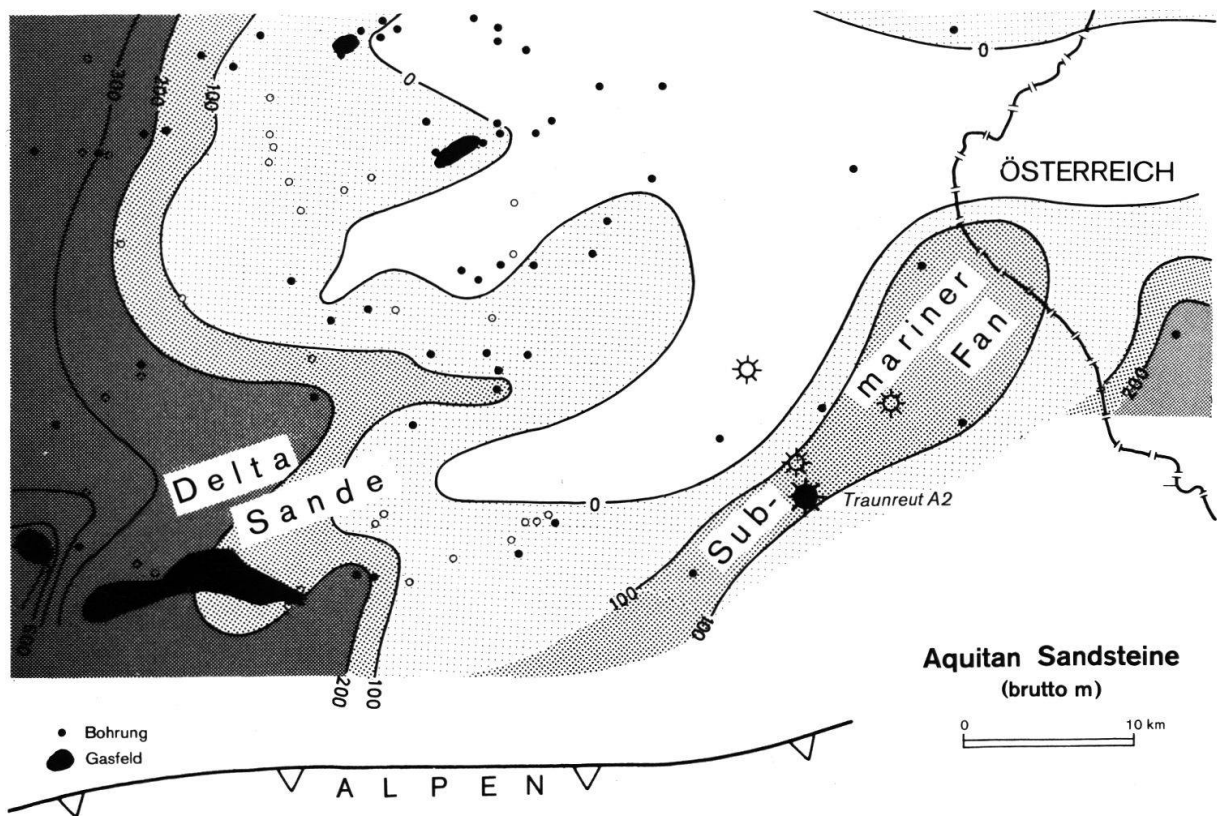


Abb. 18 Die Verbreitung der Aquitan Sandsteine im östlichen deutschen Molassebecken nach Bohrergebnissen und seismischer Stratigraphie.

Seit dem Fund von Traunreut A2 wurden weitere, hier nicht dargestellte Sandsteinzungen submariner Fans kartiert.

Dies sollte bei der Suche nach weiteren Faziesfallen jedoch nicht entmutigen, denn ein neuer Erfolg der Methode deutet sich mit dem Gasfund von Kinsau 1 am Lech an, wo wie bei Entlebuch 1 in der Schweiz nun auch erstmals in Süddeutschland der Malm prospektiv angetroffen wurde. Den Verlautbarungen zufolge handelt es sich um ein möglicherweise bedeutendes Gasvorkommen oberhalb einer Malmriffschutt-Zone. Wie sich Riffe in der modernen Seismik abbilden könnten, soll Abb. 19 verdeutlichen: man erkennt im mesozoischen Teil des Profils Sequenzgrenzen, die mehrere uhrglasförmig gewölbte Sedimentkörper mit flacher Basis und hügeliger Oberfläche umhüllen. Diese Sedimentkörper liessen sich als Riffschutt-Akkumulationen im Malm deuten. Der direkte Beweis durch eine Bohrung steht allerdings noch aus.

Ein weiterer Fortschritt der modernen Geophysik vollzieht sich auf einem ganz anderen Sektor. In jüngster Zeit besinnt man sich wieder auf die Aussagekraft der Geoelektrik: bei der Ölschieferexploration auf der Schwäbischen Alb gelang es, die interne Struktur des Lias epsilon, z. B. die der Kalkbänke, minutiös aufzulösen, weiterzuverfolgen und die Lagerungsverhältnisse nahe der Erdoberfläche im Meter-Bereich zu kartieren (Abb. 20). Dies war dadurch möglich, dass man statt der klassischen Gleichstromsondierungen solche mit Wechselstrom verschiedener Frequenzen anwandte. Dass für die Interpretation neue Computerprogramme geschaffen werden mussten, ist selbstverständlich.

Seit einiger Zeit ist weiterhin bekannt, dass über Kohlenwasserstofflagerstätten Anomalien der induzierten Polarisierung auftreten, die das direkte Erkennen von Erdölfeldern ermöglichen könnten. Erste Versuche, die auch an süddeutschen Feldern durchgeführt wurden (Prakla Seismos 1982), zeigen z. T. sehr ermutigende Ergebnisse: über der etwa 1500 m tiefen

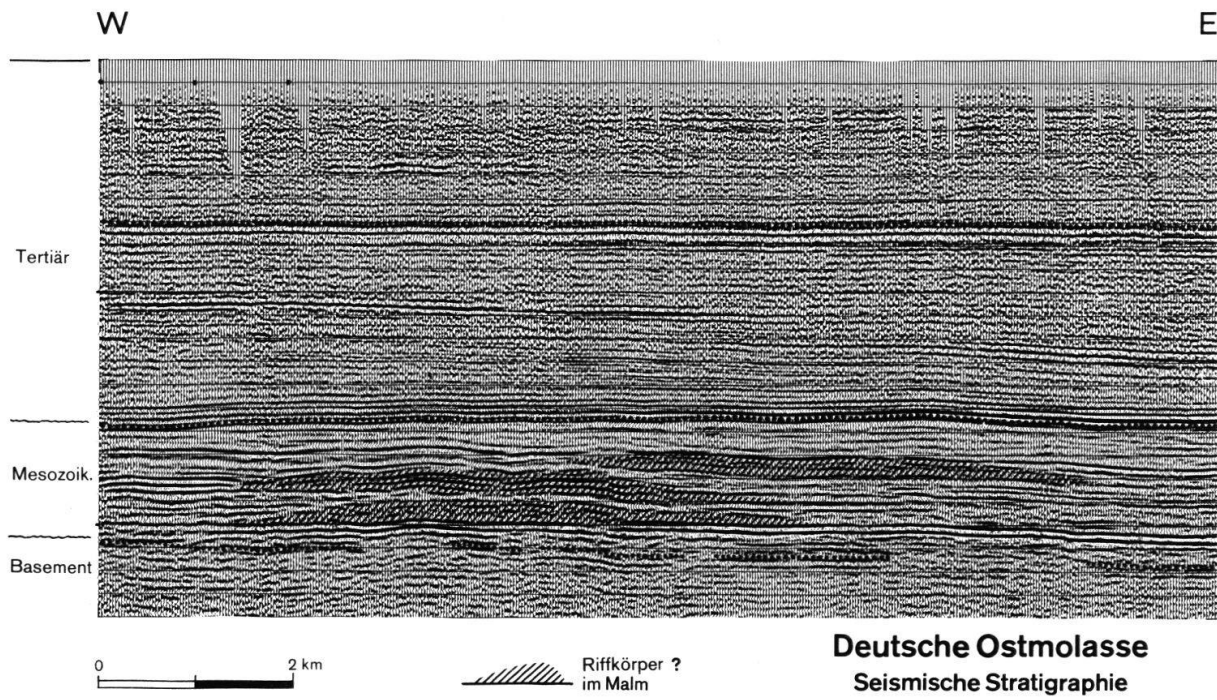


Abb. 19 Mögliche Riffkörper im Malm der deutschen Ostmolasse.

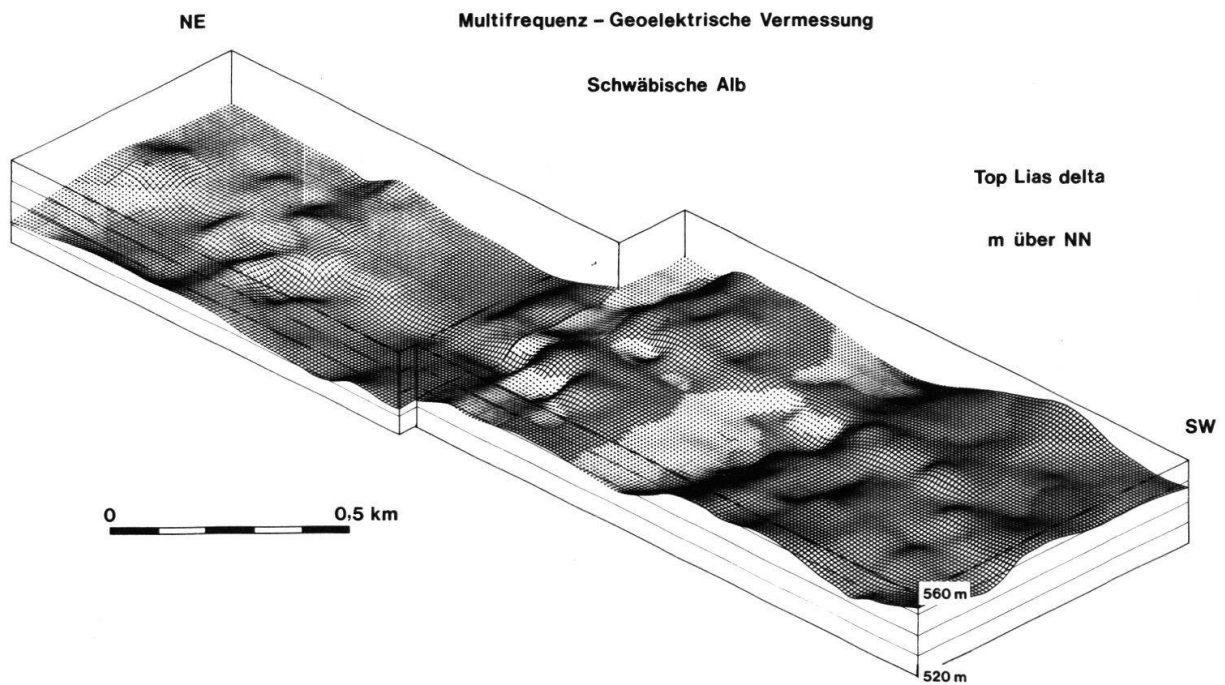


Abb. 20 Geoelektrische Messungen auf der Schwäbischen Alb zur detaillierten Erkundung der Lagerungsverhältnisse der Lias epsilon Ölschiefer (Grenze Lias delta/epsilon).

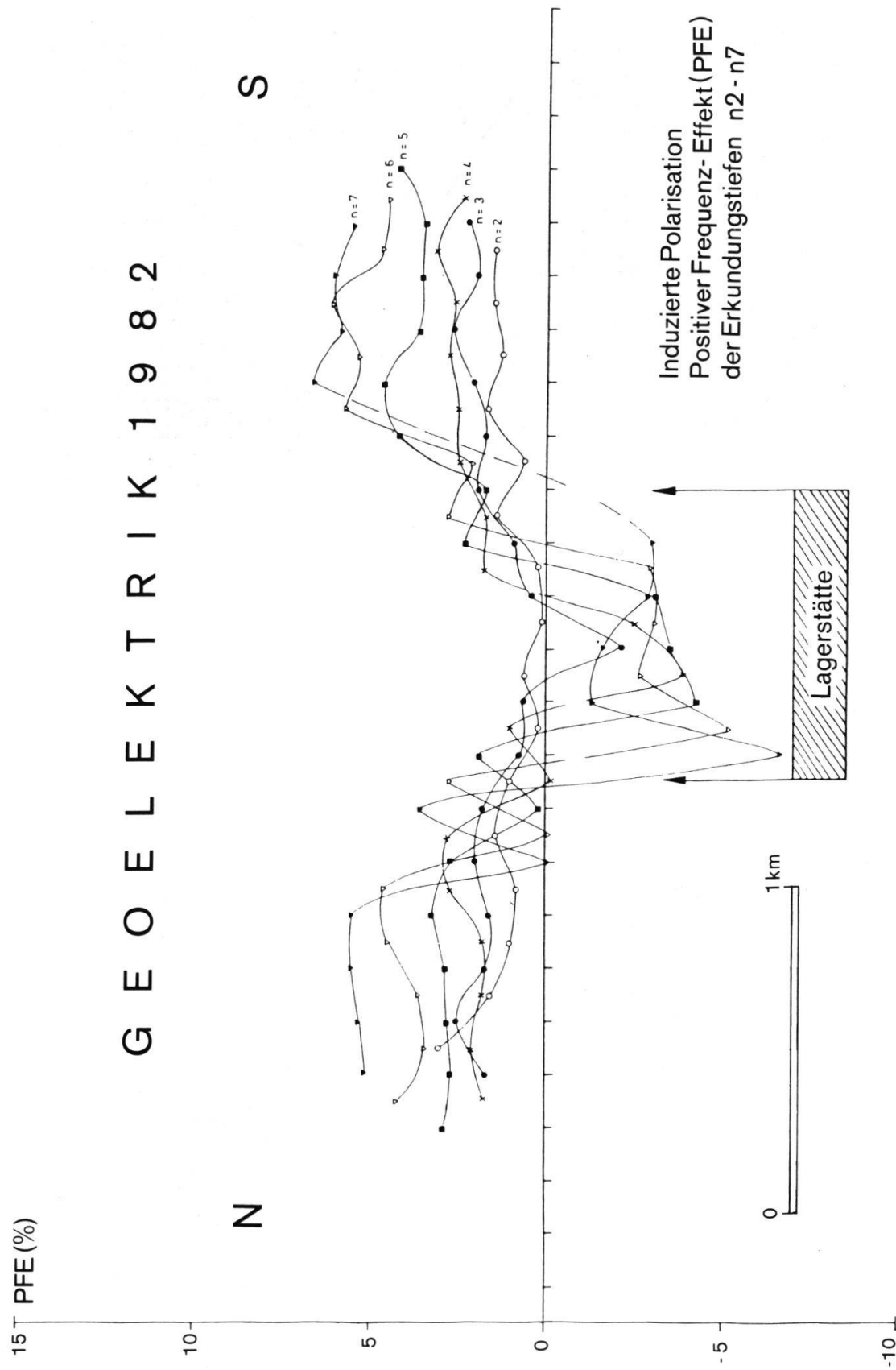


Abb. 21 Geoelektrik nach der Methode der induzierten Polarisation über einem süddeutschen Ölfeld (aus Prakla Seismos Report 4/82).

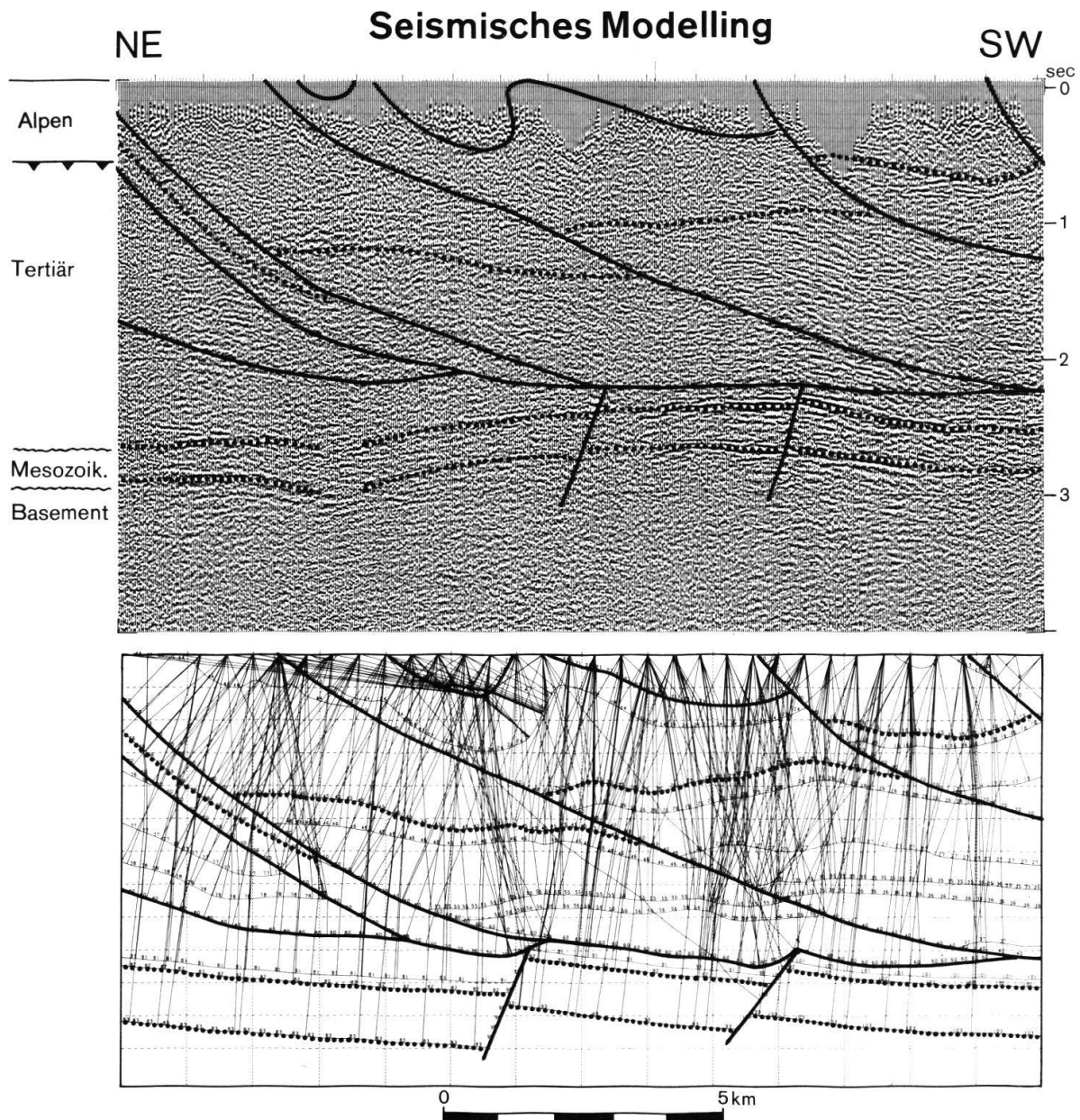


Abb. 22 Strahlengang reflexionsseismischer Wellen im seismischen Modelling für einen Alpenrandprospekt.
(nach VOLLMAYR, interne Notiz)

Lagerstätte in Abb. 21 tritt ein markanter Wechsel der PFE-Werte (Positiver Frequenz-Effekt) bei sämtlichen Erkundungstiefen auf. Die Erdölindustrie befürwortet den Einsatz dieser weiteren geophysikalischen Methode als flankierende Massnahme bei der Kohlenwasserstoffexploration, ist sich dabei aber auch der vorläufigen Aussagekraft solcher Testmessungen bewusst.

Ein ganz neuer Arbeitsbereich, der sicher eine Zukunft vor sich hat, ist das seismische Modelling. Mit den heutigen Grossrechnern ist erst die Verarbeitung grosser Datenmengen und eine interaktive Simulation beim Processing möglich geworden. Wie sich die komplexen Lagerungsverhältnisse eines «Alpenfront» Prospekts durch Modellieren besser klären lassen, ist in Abb. 22 angedeutet. Vom reflexionsseismischen Profil wird über ein geologisches Modell der seismische Strahlengang berechnet. Die Abbildung zeigt, welche Datenfülle der Computer bewältigt. Aus dem Strahlengang-Modell wird sodann ein synthetisches seismi-

1935
1. Messung in
Süddeutschland

1956

1982

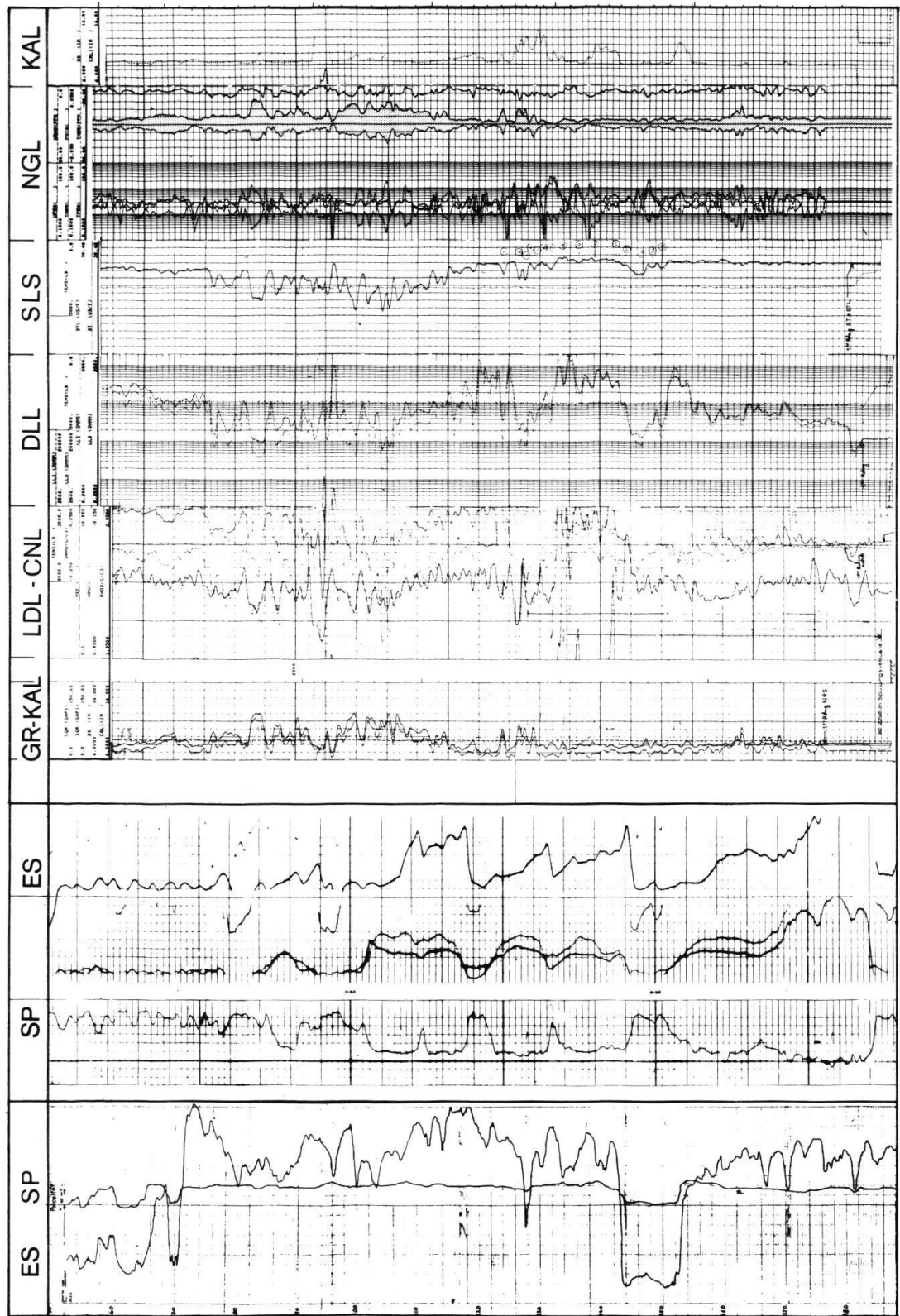


Abb. 23 Die Entwicklung und Spezialisierung der Bohrlochmessungen in Süddeutschland über 5 Jahrzehnte.

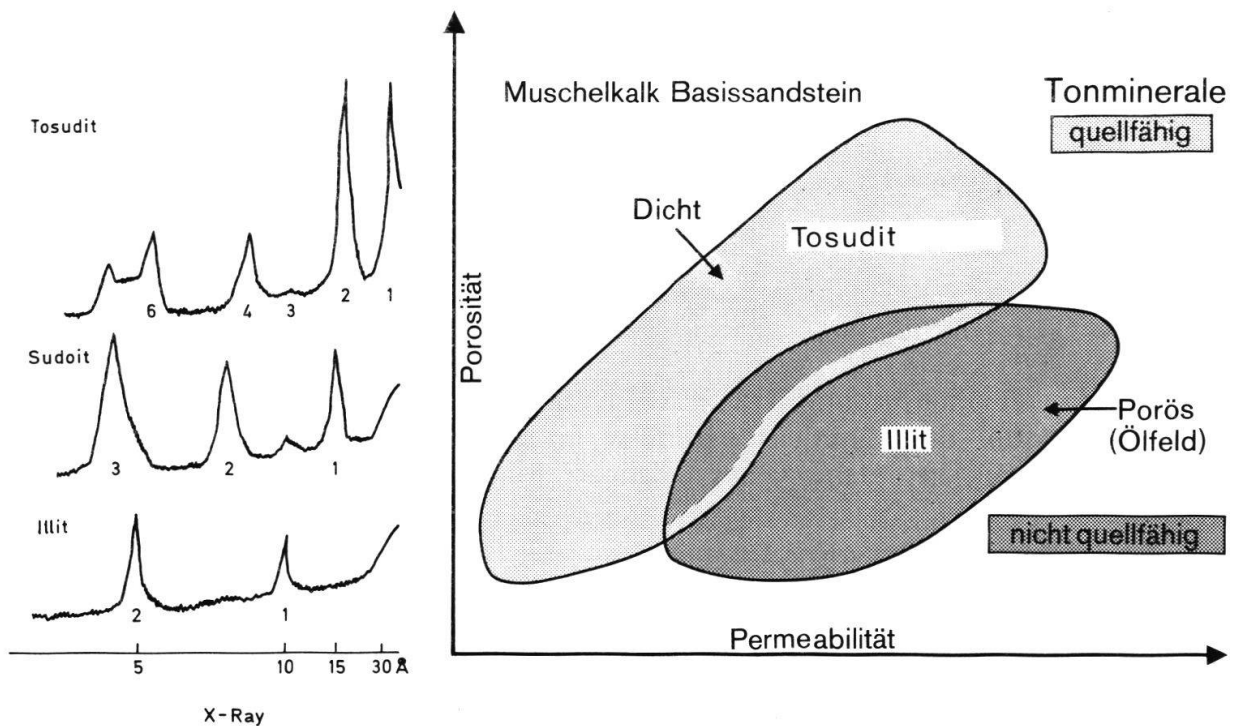


Abb. 24 Tonminerale im süddeutschen Muschelkalk-Basissandstein.

Das Tonmineral Tosudit kann im Trägergestein auf das 10fache des Ausgangsvolumens quellen und so das Trägerpotential vernichten.

sches Profil rückgeformt, das mit dem gemessenen realen Profil verglichen werden muss. Ist das Ergebnis übereinstimmend, dann waren die Prognosen richtig – wenn nicht, muss in weiteren Schritten durch Variieren der Daten innerhalb plausibler Grenzen die Lösung gesucht werden. Das zunehmende Bedürfnis nach diesem Verfahren erfordert beim Geowissenschaftler heute auch ein grosses Verständnis für mathematische Zusammenhänge.

Petrophysik, Mineralogie und Geochemie:

Auf dem weiten Feld der Petrophysik, Mineralogie und Geochemie wurden in den letzten Jahren gewaltige Fortschritte erzielt:

Die Verbesserung der Bohrlochmesstechnik machte es z. B. möglich, von der Bohrlochwandung immer tiefer ins Gebirge zu schauen. Geradezu explosionsartig kamen immer neue und verfeinerte Messmethoden auf den Markt. Genannt seien die Elektrofaziesanalyse und die Geodip-Analyse, die als wertvolle Hilfsmittel zur Erkennung feinsten Sediment-, Fazies-, Struktur- und Störungsdetails dienen. Die Kompilation von Bohrlochmessungen in Abb. 23 soll exemplarisch zeigen, in welchem Ausmass die Zahl der Messmethoden in den fünf Jahrzehnten von 1935 bis 1982 angestiegen ist. Insgesamt führte die digitale Erfassung der Daten und die dadurch mögliche Kombination zu verschiedensten «Crossplots» dazu, nicht nur z. B. Porosität und Porenfüllung, sondern auch Lithologie, Mineralogie, Struktur und Textur aus dem Log direkt zu definieren (Faciolog, GLOBAL Methoden von Schlumberger).

Auch die moderne Mineralogie liefert wertvolle Informationen für die Exploration und Produktion. In Abb. 24 wird ein Beispiel aus dem Muschelkalkbasissandstein (Melser Sandstein) aufgezeigt, das die Exploitation vor grosse Probleme gestellt hat. Es veranschaulicht, wie ohne Kenntnisse der Tonmineralzusammensetzung Speicher dicht gesäuert werden können: das Mineral Sudoit geht im sauren Bereich zunehmend in Tosudit über, dieser kann dann weitgehend irreversibel auf das ca. 10fache des Ursprungvolumens quellen und so das Trägerpotential vernichten.

Auf dem Sektor der organischen Geochemie haben die Forschungen in der Bundesrepublik Deutschland weltweite Bedeutung erlangt: (SCHÖLL 1977 und 1978 und 1983, HAHN-WEINHEIMER, HIRNER & LEMCKE 1979, WEHNER 1981). Die vielen neuen Erkenntnisse können hier nicht erschöpfend behandelt werden. Herausgegriffen seien nur der Nachweis dreier Öltypen und des biogenen Gases in der Molasse. Die Überlegungen zur Öl-Muttergesteinskorrelation und zur Frage der Herkunft und verfügbaren Menge von Erdgas in Ostbayern wurden auf eine neue Basis gestellt. Entscheidende Fortschritte wurden mit der Bestimmung der Isotopenverhältnisse von Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel erzielt. Damit konnte z. B. in der Bohrung Entlebuch 1 schon beim Bohren das zuströmende Erdgas aus dem Malm auf ein «Karbongas» zurückgeführt und die Frage seiner Herkunft vor dem Erbohren des Muttergesteins geklärt werden. Weiterhin trugen geothermische Erwägungen und Untersuchungen (KUCKELKORN & JAKOB 1978, WEHNER 1981) zur besseren Kenntnis der Maturitätsverhältnisse im Untergrund bei. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Interpretation möglicher Migrationswege und -zeiten bei einer Beckenstudie.

Ausblick – Der Schritt ins erdölgeologische Neuland unter den Alpen

Die geschilderten Fortschritte insgesamt, auf technischem Sektor und in methodischer Hinsicht, haben letzten Endes den Anstoss dazu gegeben, auch das letzte und am schwierigsten zu explorierende Stück Neuland unter dem deutschen Teil der Alpen anzupacken. Vielleicht sind hier im überfahrenen Teil des Molassebeckens unter den Alpendecken die grossen Lagerstätten verborgen, die man bislang im Alpenvorland vergeblich vermutete. Die Nähe zum tiefsten Versenkungsgebiet der Muttergesteine («cooking centre»), günstige paläogeographische Voraussetzungen, die Abdichtung möglicher Lagerstätten nach oben, die höheren Drücke sowie letzten Endes Analogbeispiele aus aller Welt geben zu dieser Hoffnung Anlass. In Abb. 25 ist dargestellt, wie Pionierbohrungen Schritt für Schritt in grössere Tiefen vorangetrieben wurden. Am Alpenrand fand die fast 5300 m tiefe Basisbohrung Entlebuch 1 Erdgas im Malm in 4400 m Teufe. Zur Zeit wird in Vorarlberg in Österreich die Basisbohrung Sulzberg 1 in einer ähnlichen Situation niedergebracht. Auf deutschem Gebiet haben die Aufschlüsse von Staffelsee 1 (MÜLLER 1970) und Miesbach 1 (JACOB & KUCKELKORN 1977, MÜLLER 1975 und 1978) wichtige Informationen über den Bau und Untergrund der Faltenmolasse gegeben. Das sehr instruktive seismische Übersichtsprofil lässt erkennen, dass der autochthone von den Alpendecken überfahrene Untergrund mehr als 40 km nach Süden reicht. Er ist von den Bohrungen Maderhalm 1 und Vorderriss 1 (BACHMANN & MÜLLER 1981, HUFNAGEL et al. 1981, BACHMANN, DOHR & MÜLLER 1982) nicht erreicht worden. Explorationsziele wie die küstennahen Sandsteine der chattischen Bausteinschichten, turbiditische Sandsteine im Rupel, mögliche Deltasandsteine im Eozän, Malmdolomite oder sogar Riffe sowie weitere mesozoische Sandsteine und Karbonate können unter den Decken erhofft werden. Es wird daher ernsthaft erwogen, ein Bohrprojekt Hindelang bis zu einer Tiefe von etwa 7000 m zu realisieren. Die Bohrkosten eines solchen Projekts wären in einer bisher unerreichten Höhe von über 50 Mio. DM zu veranschlagen. Dies zeigt, zu welchen Aufschlussleistungen die deutsche Erdölindustrie bei der Erschliessung heimischer Energie bereit ist, wenngleich wegen der besonders grossen Risiken der Exploration in diesem Neuland eine finanzielle Mithilfe des Staates unabdingbar ist.

Zieht man abschliessend Bilanz und fasst den Informationswert der in dieser Arbeit geschilderten neuen Erkenntnisse bei der Aufschluss- und Gewinnungstätigkeit zusammen, dann kann festgestellt werden, dass die in Süddeutschland erworbenen Erfahrungen auch für weitere Arbeiten in Norddeutschland und in der Schweiz von hohem Nutzen sein werden.

„Frontier Exploration“ unter den deutschen Alpen

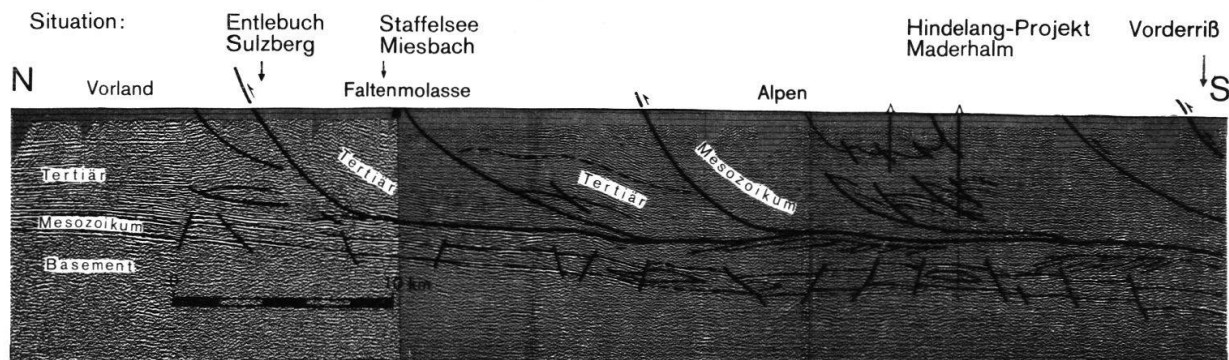


Abb. 25 Reflexionsseismisches Übersichtsprofil durch die nördlichen deutschen Alpen.

Die Reflexionen lassen erkennen, dass der autochthone Untergrund unter den Alpen mehr als 40 km nach Süden reicht. Auf der Kopfleiste ist die tektonische Position verschiedener Pionierbohrungen der Erdölindustrie angegeben, die bisher zur Erforschung des schweizerisch-deutschen Alpenkörpers und seiner Unterlage beigetragen haben.

Literatur

- BACHMANN, G. H. und MÜLLER, M. (1981): Geologie der Tiefbohrung Vorderriss 1 (Kalkalpen, Bayern) — *Geologica Bavarica*, 81, S. 17 – 53.
- BACHMANN, G. H., DOHR, G. und MÜLLER, M. (1982): Exploration in a classic thrust belt and its foreland: Bavarian Alps, Germany — *AAPG Bull.*, v. 66, p. 2529 – 2542.
- BETZ, D. (1983 im Druck): Geologie der Kohlenwasserstoffe, Kap. I.1. — In: BENDER, F., *Angewandte Geowissenschaften* Band III, Stuttgart.
- BLÜMLING, P. (1983): Bohrlochauskesselungen und ihre Beziehung zum regionalen Spannungsfeld. — Sonderforschungsbereich 108 «Spannung und Spannungsumwandlung in der Lithosphäre», Universität Karlsruhe (TH), Berichtsband für die Jahre 1981 – 1983, S. 313 – 323.
- BOIGK, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland — 330 S., Stuttgart.
- HAHN-WEINHEIMER, P., HIRNER, A. und LEMCKE, K. (1979): Zur Herkunft süddeutscher Erdöle: Geochemische Ergebnisse und Versuch einer geologischen Interpretation. — *Erdöl-Erdgas Zeitschr.* 95, S. 121 – 125.
- HARDING, T. P. (1974): Petroleum traps associated with wrench faults. — *AAPG Bull.*, v. 58, p. 1290 – 1304.
- HARDING, T. P. and LOWELL, J. D. (1979): Structural styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in Petroleum Provinces. — *AAPG Bull.*, v. 63, p. 1016 – 1058.
- HEDEMANN, H. A. (1982): Die Erdöl- und Erdgasexploration in der Bundesrepublik Deutschland 1981. — *Erdöl-Erdgas Zeitschr.* 98, S. 271 – 285.
- HEDEMANN, H. A., SCHÖNEICH, H. und SCHRÖDER, L. (1983): Die Erdöl- und Erdgasexploration 1982 in der Bundesrepublik Deutschland mit einem Vierjahresrückblick. — *Erdöl-Erdgas Zeitschr.* 99, S. 218 – 233.
- HUFNAGEL, H., HILDEBRAND, G., KUCKELKORN, K. und WEHNER, H. (1981): Interpretation des Bohrprofils Vorderriss 1 aufgrund organogeochemischer und geophysikalischer Untersuchungen. — *Geologica Bavarica*, 81, S. 123 – 143.
- ILLIES, H. and GREINER, G. (1979): Holocene movements and state of stress in the Rhinegraben rift system. — *Tectonophysics*, 52, p. 349 – 359.
- ILLIES, J. H., BAUMANN, H. and HOFFERS, B. (1981): Stress pattern and strain release in the Alpine foreland. — In: P. VYSKOCIL, R. GREEN and H. MÄLZER (Editors), *Recent Crustal Movements, 1979*. — *Tectonophysics*, 71, p. 157 – 172.
- JACOB, H. und KUCKELKORN, K. (1977): Das Inkohlungsprofil der Bohrung Miesbach 1 und seine erdölgeologische Interpretation. — *Erdöl-Erdgas Zeitschr.* 93, S. 115 – 124.
- KUCKELKORN, K. und JACOB, H. (1978): Inkohlungsgradienten im Alpenvorland. — *Erdöl und Kohle, Compendium* 77/78, S. 331 – 338.

- LEMCKE, K. (1977): Erdölgeologisch wichtige Vorgänge in der Geschichte des süddeutschen Alpenvorlandes. — Erdöl-Erdgas Zeitschr. 93 (Sonderausgabe), S. 50 – 56.
- (1981): Geologie und Stratigraphie der Thermal- und der Schwefelbohrung, 8.1 Erdgeschichtlicher Rahmen und Tektonik. — In: Die Thermal- und Schwefelwasservorkommen von Bad Gögging. — Schriftenreihe Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, H. 15, S. 55 – 63.
- MÜLLER, M. (1970): Das Ergebnis der Bohrung Staffelsee 1 als Grundlage für neue Vorstellungen über Bau und Untergrund der gefalteten Molasse. — *Geologica Bavarica*, 63, S. 86 – 106.
- (1975): Bohrung Miesbach 1: Ergebnisse der ersten im Rahmen des Erdgastiefenaufschlussprogramms der Bundesregierung mit öffentlichen Mitteln geförderten Erdgastiefenbohrung. — *Compendium*, 75/76 (Erdöl und Kohle Ergänzungsband), S. 63 – 76.
- (1978): Miesbach 1 and Staffelsee 1 — two basement tests below the Folded Molasse. — In: H. CLOSS, D. ROEDER und K. SCHMIDT: *Alps, Apennines, Hellenides*. — Stuttgart, S. 64 – 68.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG. — Erdöl-Erdgas Jahresberichte 1978 – 1981, Hannover.
- POLESNY, H. (1983): Verteilung der Öl- und Gasvorkommen in der oberösterreichischen Molasse. — Erdöl-Erdgas Zeitschr. 99, S. 90 – 102.
- PRAKLA-SEISMOS (1982): Geoelektrik über Erdöllagerstätten — ein Erfahrungsbericht — Prakla-Seismos Report No. 4 1982.
- SCHÖLL, M. (1977): Die Erdgase der süddeutschen Molasse, Anwendung von D/H und $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenanalysen zur Klärung ihrer Entstehung. — Erdöl-Erdgas Zeitschr. 93, S. 311 – 322.
- (1978): Chemismus und isotopische Zusammensetzung von Erdölen des Alpenvorlandes. — Erdöl-Erdgas Zeitschr. 94, S. 119 – 125.
- (1983): Isotope techniques for tracing migration of gases in sedimentary basins. — *Journ. of Geol. Soc.*, v. 140, part 3, p. 415 – 422.
- SCHRÖDER, L. (1981): Klassifikation der Erdöl- und Erdgasbohrungen in der Bundesrepublik Deutschland ab 1981. — Erdöl-Erdgas Zeitschr. 97, S. 234 – 235.
- TOLLMANN, A. (1977): Die Bruchtektonik Österreichs im Satellitenbild. — *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 153.
- TURNOWSKY, J. and SCHNEIDER, G. (1982): The seismotectonic character of the September 3, 1978, Swabian Jura earthquake series. — *Tectonophysics*, 83, p. 151 – 162.
- VAIL, P. R., MITCHUM, R. M. and THOMPSON III, S. (1977): Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap. — In: PAYTON, CH. (Editor), *Seismic stratigraphy — applications to hydrocarbon exploration*. — AAPG Mem. 26, p. 63 – 97.
- WEHNER, H., HUFNAGEL, H., KUCKELKORN, K., SCHÖLL, M. und TESCHNER, M. (1981): Zur Kohlenwasserstoffgenese im deutschen Alpenvorland. — Forschungsbericht ET 2008 A Geotechnik und Lagerstätten, Geochemische Explorationsmethoden der BGR, Hannover.
- WIRTSCHAFTSVERBAND ERDÖL- UND ERDGASGEWINNUNG e. V. (WEG): Jahresberichte 1978 – 1982.