# GEOPHYSIKALISCHE EXPLORATION IM ALPENRAUM – ERGEBNISSE UND PROBLEME

VON

# G. DOHR\*)

### 1. ERSTE SEISMISCHE ARBEITEN IN DER ALPENRANDZONE

Nachdem sich in den ersten Nachkriegsjahren die Exploration auf Kohlenwasserstoffe im süddeutschen Raum in erster Linie auf das Gebiet der ungefalteten Molasse konzentriert hatte und hier auch sehr bald zu sehr schönen Erfolgen gekommen war, richtete sich seit Beginn der 50er Jahre das Interesse auch auf die Alpenrandzone. So sind erstmalig im Jahre 1952 reflexionsseismische Messungen im Bereich der gefalteten Molasse Oberbayerns durchgeführt worden. Es zeigte sich sehr bald, daß eine Übertragung der bekannten Auswertemethodiken, wie sie zu dieser Zeit vielfach üblich waren – z. B. die Anwendung des Tangentenverfahrens und die Annahme vereinfachter Geschwindigkeitsfunktionen –, auf dieses Gebiet nicht möglich war. Man wußte zwar, daß die Faltenmolasse ganz besondere Probleme hinsichtlich der Geschwindigkeitsverhältnisse wie auch in den Laufwegen der seismischen Wellen bieten würde, es bestanden aber kaum konkrete Vorstellungen, welche Ergebnisse hier zu erwarten waren. Bei diesen Arbeiten ging man von der Erwartung aus, geologisch ähnliche Bilder wie in den sog. "Foot Hills" Canadas zu finden, in welchen man in diesen Jahren erste Fündigkeiten erzielt hatte.

Die Messungen 1952 bis 1954 enttäuschten insofern, als zwar die aufgenommenen Seismogramme eine Vielzahl von Reflexionen zeigten, man jedoch bei der Auswertung nicht in der Lage war, aus der Konstruktion der Reflexionselemente zu einem sinnvollen Bild zu kommen. Außerdem wurde ein Großteil der sehr stark geneigten Reflexionen kurzer Hand als reflektierte Refraktion oder als Störwellen abgetan. Erst die Fortsetzung der Arbeiten in den Jahren 1955 bis 1960 brachte dann deutbare Ergebnisse. Hier war es vor allem der Einfluß der Auswertemethodik, wie sie von Krey eingeführt wurde, nämlich die Anwendung des X-Wertverfahrens für jede einzelne Reflexion, die eine sehr minuziöse Auswertung der seismischen Aufnahmen gestattete. Dazu kam, daß erstmalig von Krey unter Einbeziehung des sich abzeichnenden geologischen Bildes die Anwendung von Brechungs- und Neigungskorrekturen in der Auswertepraxis der Feldmessungen versucht wurde. Es zeigte sich, daß gerade diese Ideen den entscheidenden Durchbruch lieferten, und unter Anwendung aller Rechengänge, wie sie aufgeführt wurden, gelang es, in relativ umständlicher Arbeit Profil für Profil in einer angenähert teufenrichtigen Darstellung wiederzugeben. Die Abbildung 1 zeigt ein solches seismisches Profil aus der gefalteten Molasse aus dem Jahre 1956. Man erkennt hier bereits sehr deutlich den geologischen Bau, ein Bild, welches zu der damaligen Zeit eine wesentlich neue Erkenntnis über die Geologie der Alpenrandzone bedeutete.

<sup>\*)</sup> PREUSSAG AKTIENGESELLSCHAFT, ERDÖL UND ERDGAS, ARNDTSTR, 1, D-3000 HANNOVER

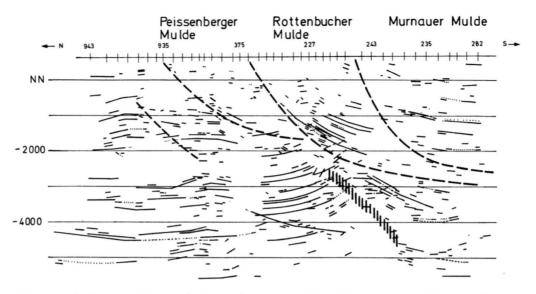


Abb. 1: Reflexionsseismisches Profil der Meßkampagne 1955-1960 aus dem Bereich der gefalteten Molasse im Raum Murnau

Aus den Profilen war es auch möglich, Tiefenlinienpläne zu erstellen. Auch hierbei bewährte sich die von Krey eingeführte Methodik, nicht einen durchgehenden Reflexionshorizont oder einen Phantomhorizont darzustellen, sondern sich auf Teilhorizonte zu beschränken. Dies war in diesem geologisch-tektonisch komplizierten Gebiet unbedingt erforderlich, da eine stratigraphische Zuordnung der einzelnen Teilhorizonte kaum möglich war. Dennoch zeigte die Kartierung, daß sich aus den vielen Einzelbausteinen ein sehr gutes Bild der Mulden der gefalteten Molasse abzeichnete, eine Darstellung, die von den später im Murnauer Raum niedergebrachten Bohrungen recht gut bestätigt wurde. Es war bemerkenswert, daß beispielsweise bereits die erste Bohrung, welche die Hauptüberschiebung der deckenartig auf die Vorlandmolasse aufgeschobenen gefalteten Molasse durchteuft hatte, diese Überschiebung erwartungsgemäß und teufenrichtig angetroffen hat.

Der exploratorische Erfolg blieb diesen Arbeiten leider versagt. Der Grund lag im wesentlichen darin, daß einmal die fazielle Entwicklung der aus Oberflächenaufschlüssen bekannten Speichergesteine (insbesondere der Bausteinschichten) in den Bohrungen recht ungünstig war, zum anderen zeigt es sich, daß nach dem geologischtektonischen Bild mit keinen größeren Lagerstätten im Bereich der gefalteten Molasse gerechnet werden konnte. Hier war es insbesondere das Problem der Abdeckung, welches eine Begrenzung der Explorationsaussichten aufzeigte. Dennoch richtete sich schon zur damaligen Zeit der Blick nach Süden, und die seismischen Arbeiten der 50er Jahre führten erstmals zu der Vorstellung, daß die ungefaltete Molasse und die Prämolasse sehr weit nach Süden unter den Raum des Helvetikums und des Flysches, ja vielleicht bis ins Kalkalpin reichen könnten. Hier seien besonders Messungen im Allgäu hervorgehoben, welche bereits damals das Band der sog. A- und B-Horizonte (etwa Kopf- und Basis Malm) bis in den Raum von Fischen/Oberstorf erkennen ließen.

# 2. NEUERE UNTERSUCHUNGEN AM ALPENRAND UND IM KALKALPIN

In den Jahren 1964/66 wurden von der in die Zusammenarbeit mit der Gew. Florentine I neu eingeführten Gewerkschaft Brigitta sprengseismische Arbeiten im Bereich des Kalkalpins, und zwar im Raum des sog. "Wamberger Sattels" durchgeführt.

Nach einer längeren Zeit der Ruhe wurde dann im Jahr 1975 die geophysikalische Exploration mit einem neuen Konzept im Bereich des Wamberger Sattels wieder aufgenommen. Zum ersten Mal kam das Vibrosels-Verfahren zur Anwendung, welches die Durchführung seismischer Messungen auch in der Nähe schutzbedürftiger Anlagen gestattete. Die Messungen dienten der großräumigen Untersuchung des kalkalpinen Raumes zwischen dem Gebiet Mittenwald-Garmisch im Westen und dem Sylvenstein-Stausee und Lenggries im Osten. Dabei sollte die aus oberflächengeologischen Kartierungen bekannte Aufwölbung des Wamberger Sattels im Untergrund untersucht werden.

Wegen der topographischen Probleme, d.h. der Notwendigkeit, in relativ engen Tälern mit starker Bebauung zu arbeiten, kam - im Gegensatz zu den Messungen der 50er Jahre – ab 1975 durchweg das Vibroseisverfahren zum Einsatz. Bei hohem Überdeckungsgrad (24fach), 32facher Bündelung der Geophone und Geophonauslagen von meist 2400 m zeigte die Qualität der Ergebnisse bereits im ersten Jahr sehr große Unterschiede. Ergaben sich auf einigen Profilstücken recht gute korrelierende und deutlich hervorgehobene Reflexionshorizonte, so waren andere Profilstücke über lange Strekken fast reflexionsleer. Bei den Messungen des Jahres 1975 gelang es, einen Reflexionshorizont mittlerer Tiefe zu kartieren, der im Gebiet des Wamberg-Sattels bei etwa 3000-3500 m Teufe lag. Aufgrund der früheren Arbeiten des geophysikalischen Institutes der Universität München, welche in der gleichen Teufe eine Geschwindigkeitsinversion aus Refraktionsmessungen postuliert und diese als Basis der Decken angesprochen hatten, lag es nahe, auch den jetzt kartierten Horizont der Basis der kalkalpinen Decken zuzuordnen. Hinzu kam, daß auch bei den neuen Messungen unter Anwendung neuartiger Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung (Migration Velocity Determination - MVD) aus der Aufsummierung und Mittelung verschiedener Messungen im Bereich dieses Horizontes eine Geschwindigkeitsinversion nachgewiesen werden konnte. Die Abbildung 2 zeigt die Darstellung von 3 Geschwindigkeitsanalysen, welche ihrerseits aus mehreren Einzelanalysen als gemittelte Kurven zusammengefaßt sind. Man erkennt bei etwa 3000 m eine deutliche Geschwindigkeitsinversion.

Die aufgrund dieser Messungen abgeteufte Bohrung Vorderriß war als "wildcat" dazu bestimmt, die geologischen Verhältnisse im Kalkalpin zu testen. Sie basierte zwar auf einer Hochlage im Bereich des o. g. Horizontes, welche sich in etwa mit der Hochposition des Wamberg-Sattels aus oberflächennahen Aufschlüssen deckte, das eigentliche Ziel war jedoch die Untersuchung der unter der Basis der Decken zu erwartenden Schichtfolgen. Die von der Geophysik vorausgesagte Geschwindigkeitsinversion in dem sog. D-Horizont bei ca. 3300 m bestätigte sich. Es handelte sich jedoch nicht um die Basis der kalkalpinen Decken, sondern um eine Geschwindigkeitsinversion beim Übergang aus der chemischen in die klastische Serie der Raibler Schichten innerhalb der Lechtal-Decke. Die hohen Geschwindigkeiten des oberen Kalkalpins in der Lechtaldecke, die bei ca. 6500–6600 m/s lagen, wurden hier abgelöst durch Geschwindigkeiten, die bis auf ca. 4600–4800 m/s zurückgingen. Im unteren

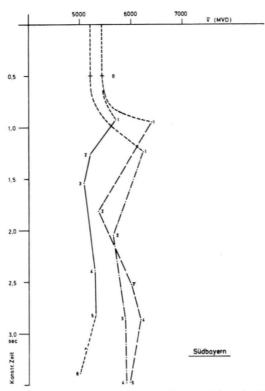


Abb. 2: Geschwindigkeitsanalysen nach dem Verfahren "Migration Velocity Determination". Die drei aus jeweils mehreren Analysen durch Mittelung gewonnenen Kurven zeigen deutlich eine Geschwindigkeitsinversion bei ca. 0.9–1.3 sec (D-Horizont).

Teil, d.h. in der tiefer gelegenen Allgäudecke, wurden dann wieder Geschwindigkeiten von über 6000 m/s, ja fast 7000 m/s erreicht. Die Bohrung Vorderriß durchteufte die Basis der kalkalpinen Decken bei ca. 6400 m. Ein Vergleich mit den seismischen Ergebnissen in einem benachbarten Profil zeigte, daß unterhalb dieser Bohrung in guten Reflexionsandeutungen die Basis der Molasse (?) etwa 1500–1800 m unterhalb der Erdteufe der Bohrung erwartet werden kann. Nicht sicher ist, in welcher Mächtigkeit sich darunter noch weitere Schichten der Prämolasse finden.

Die Abbildung 3 zeigt die geologische Deutung eines nahe der Tiefbohrung Vorderriß gemessenen seismischen Profils relativ guter Qualität aufgrund der Ergebnisse dieser Bohrung.

Das bemerkenswerte Ergebnis aus der Verknüpfung des Bohrergebnisses mit der vorliegenden Seismik ist, daß autochthone Molasse und Mesozoikum sowie evtl. Flysch weit nach Süden unter das Kalkalpin reichen und hier in dieser sehr südlichen Position noch in überraschend großer Mächtigkeit vorhanden sein müssen. Diese Tatsache, zusammen mit der wichtigen geologischen Erkenntnis, daß sowohl die Frage der Maturität der angetroffenen Schichten als auch die Möglichkeit, Speicherhorizonte in diesem südlichen Raum zu finden, positiv beantwortet werden muß, wertet den gesamten Alpenraum aus der Sicht der Exploration ganz wesentlich auf.

Der Nachweis, daß die autochthone Molasse plus Mesozoikum ihre Fortsetzung weit nach Süden bis unter den Bereich des Kalkalpins finden, hat sich auch bei weiteren

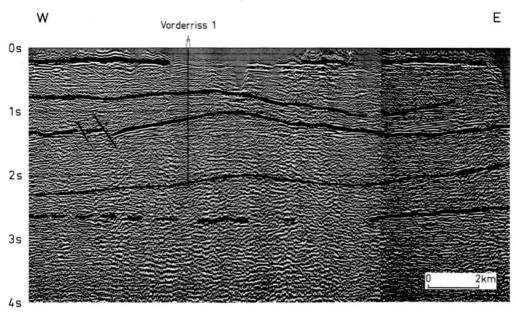


Abb. 3: Deutung eines reflexionsseismischen Profiles im Anschluß an die Tiefbohrung Vorderriß (West-Ost-Profil).

Der an der Bohrung Vorderriß 1 bei etwa 0,7 sec Reflexionszeit liegende Horizont dürfte etwa der Basis des Hauptdolomites in der Lechtaldecke zuzuordnen sein. Bei etwa 1,15 sec Reflexionszeit beginnt das als D-Horizont angesprochene Reflexionsband. Kartiert wurde eine spätere, unter der Bohrung Vorderriß bei ca. 1,25 sec Reflexionszeit liegende Phase. Der unmittelbar oberhalb der Endteufe der Bohrung durch schwache Reflexionen belegte Horizont ist in den Bereich der Basis der kalkalpinen Decken zu stellen. Bei ca. 2,6–2,7 sec Reflexionszeit wird die Basis der Molasse erwartet. Auch unterhalb dieser – vor allem im rechten Teil des Profiles gut belegten Reflexionsgruppe – treten Reflexionen am Prätertiär auf. Sie lassen indessen keine Aussage über die Tiefenlage des Kristallins zu.

Messungen der folgenden Jahre bestätigt. Die Qualität der in den folgenden Jahren durchgeführten Arbeiten war überraschend gut, und so war es möglich, erstmals einen relativ großen Raum vom Bodensee bis zum Lech in Form von Isochronenplänen zu kartieren. Wenn auch die Details aufgrund der topographischen Probleme und der Gangbarkeit des Geländes nicht in der Genauigkeit wiedergegeben werden können wie in der ungefalteten Molasse, so zeichnet sich doch großräumig ein erster umfassender Blick in die Tiefe, d.h. in die Reflexionshorizonte unterhalb der Decken der gefalteten Molasse, des Helvetikums, des Flysches und Kalkalpins ab. Ein Profilbeispiel der neueren Meßkampagne ist in der Abbildung 4 dargestellt.

In gleicher Weise sind seismische Arbeiten in Österreich und in der Schweiz bis in den Raum des Kalkalpins ausgeführt worden. Die hier erzielten Ergebnisse entsprachen prinzipiell den oben diskutierten Resultaten der Arbeiten auf deutschem Gebiet.

## 3. PROBLEME DER EXPLORATIONSGEOPHYSIK IM ALPENRAUM

Die Tatsache, daß es gelungen ist, im Alpenraum durchweg relativ gute kartierbare Reflexionen auch aus dem tieferen Bereich zu erhalten, darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß damit das Problem der Exploration vom geophysikalischen Standpunkt aus noch nicht gelöst ist. Vereinfacht kann man heute sagen: es ist weniger ein Pro-

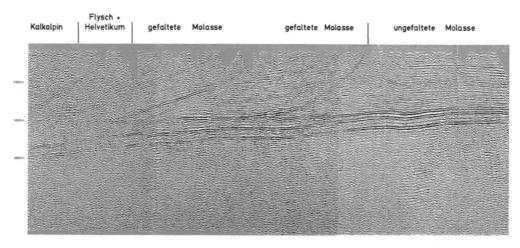


Abb. 4: Reflexionsseismisches Profil der Meßkampagne 1975–1980. Das Profil führt aus dem Bereich der ungefalteten Molasse bis in den Raum des Kalkalpins. Sehr klar sind die Reflexionsbänder aus dem prätertiären Untergrund bis an das Südende des Profils zu verfolgen.

blem, brauchbare Reflexionen zu erhalten, als diese auch teufen- und neigungsrichtig darzustellen. Diese banale Aussage erinnert an das Problem der 50er Jahre bei den Messungen in der gefalteten Molasse.

Bei den mit großem Aufwand und hohem Überdeckungsgrad (24fach) aufgenommenen Messungen der letzten Jahre treten eine Reihe von Problemen auf, von denen einige hier kurz wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung angesprochen seien. Zunächst ist das Problem der statischen Korrekturen in dem genannten Gebiet besonders schwer lösbar. Hier sind es weniger die kurzwelligen statischen Korrekturen, d.h. die von Schußpunkt zu Schußpunkt bzw. von Geophonlokation zu Geophonlokation wechselnden Korrektureinflüsse der oberflächennahen Schichten als vielmehr die sog. langwelligen Statiks. Es ist derzeit kein zufriedenstellend arbeitendes Programm zur Lösung des Problems langwelliger statischer Korrekturen auf dem Markte. Alle Versuche, dieses Problem zu lösen, beschränken sich auf einfachere Fälle und versagen in solchen Gebieten wie der Alpenrandzone oder in den Alpen selbst. Andererseits täuschen diese langwelligen Statiks oft Strukturenverzerrungen vor, die nur mit großer Mühe und meist auf dem Wege der Modellverfahren iterativ wieder beseitigt oder geklärt werden können. Es sind Fälle bekannt, in welchen kräftige antithetische Störungen durch die Einflüsse langwelliger statischer Korrekturen vorgetäuscht wurden. Gerade am Rand der Muldenstrukturen der gefalteten Molasse besteht die Gefahr solcher Effekte. Es wird daher gegenwärtig sehr intensiv an der Lösung des Problems gearbeitet und es scheint, als ob sich die Weiterentwicklung der modellmäßigen iterativen Verfahren hier am ehesten durchsetzen werden.

Das Problem statischer Restkorrekturen und insbesondere langwelliger statischer Korrekturen ist besonders bei den üblicherweise angewandten langen Geophonauslagen in diesen Arbeitsgebieten sehr gravierend. Zum Teil ist man daher auch auf die Kombination langer und kurzer Auslagen übergegangen. Die kürzeren Auslagen haben

zu einer Verbesserung des Reflexionsbildes im höheren Teil der Muldenstrukturen geführt. Andererseits kann auf lange Aufbauten wegen der zu lösenden Geschwindigkeitsprobleme nicht verzichtet werden.

Zur Erfassung der obersten Schichten – bis ca. 1000 m – und ihrer Anbindung an die geologischen Aufschlüsse ist neuerdings das Mini-Sosie-Verfahren mit gutem Erfolg angewendet worden. Hier wird die seismische Energie durch einen konventionellen, im Straßenbau verwendeten Hammer – den sog. Wacker-Hammer – erzeugt. Die Aufsummierung von bis zu 2000 Pops liefert hinreichende Energie.

Der zweite Problemkreis umfaßt die Bestimmungen der Geschwindigkeiten. Einmal aus der Sicht der optimalen Geschwindigkeiten für den Gang des Processings, zum anderen aber auch der Geschwindigkeiten – und zwar wahrer, geologischer Geschwindigkeiten – zur exakten teufenmäßigen Darstellung der Reflexionen. Hier kann man in verschiedenen Schritten vorgehen, um sich langsam an die wahren Verhältnisse heranzutasten. Der erste Schritt bietet sich zweifellos darin an, daß man das Geschwindigkeitsfeld aus der Vorlandmolasse, welches man verhältnismäßig gut kennt, nach Süden extrapoliert. Es ist klar, daß bei einer solchen Darstellung die Zeitstrukturelemente im wesentlichen erhalten bleiben, daß sie lediglich in der Tiefe und Verkippung beeinflußt werden. Ein nächster Schritt wäre die Verwendung der Stapelgeschwindigkeiten. Auch dieser Versuch zeigt eine zufriedenstellende großregionale Geschwindigkeitsverteilung, die sich in die tiefen vermessenen Bohrungen (Opfenbach, Schongau, Staffelsee, Miesbach, Oberhof und andere mehr) verhältnismäßig gut einfügt. Auch dieses Geschwindigkeitsfeld lehnt sich im wesentlichen an die Regionalgeschwindigkeiten, wie sie im ersten Schritt beschrieben wurden, an.

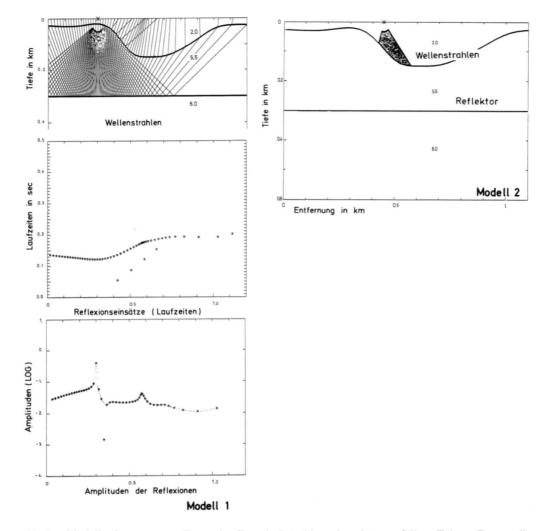
In den letzten Monaten ist versucht worden, mit neuen Verfahren zu verbesserten Regionalfeldern zu kommen. Dabei bediente man sich der Verfahren des inversen Modelling und berechnete zunächst mit einem Programm ANAKON (kontinuierliche Analyse von Reflexionshorizonten) für jeden CDP die RMS-Geschwindigkeiten. Die Ergebnisse der ANAKON-Analysen, welche zunächst weiträumig versuchsweise durchgeführt wurden, zeigten ein verbessertes Regionalfeld. Die Tatsache, daß sie sich die kontinuierlich ermittelten Geschwindigkeiten zu einem sinnvollen Feld anordnen ließen, zeigt, daß den Analysen ein gewisses Vertrauen entgegengebracht werden kann. Da es sich hier aber ebenfalls um RMS-Geschwindigkeiten handelt, reicht diese Darstellung für eine sinnvolle und exakte Teufenberechnung, insbesondere bei der Darstellung kleinräumiger Strukturelemente, noch nicht aus. Die Möglichkeit, aus den ANAKON-Werten für verschiedene Horizonte mittels der Dix-Krevschen-Formel Intervallgeschwindigkeiten zu bestimmen und daraus die Teufen abzuleiten, führt auf relativ große Fehler, da die Intervallgeschwindigkeiten außerordentlich empfindlich gegen Einflüsse von Fehlern in den Geschwindigkeitsanalysen sind. Ein Ausweg bietet sich an, indem man in dem von Sattlegger entwickelten Programm INMOD (Inverses Modellverfahren) die Teufen- und Intervallgeschwindigkeiten über iterative Modellrechnungen bestimmt. Dieses, in anderen Gebieten mit Erfolg angewendete Verfahren, stößt indessen bei den sehr starken und unterschiedlichen Neigungen im Hangenden (Faltenmolasse, Decken des Flysches und des Kalkalpins) z.Z. noch auf große Schwierigkeiten. Eine verbesserte Version des Programms läßt jedoch hoffen, für grö-Bere Schichtpakete aus den Messungen über das inverse Modellverfahren unter spezieller Berücksichtigung der Neigungen im Hangenden brauchbare Geschwindigkeitsinformationen zu bekommen und diese zur Stützung der Regionalfelder zu verwenden.

Generell kann man sagen, daß die Darstellung regionaler Geschwindigkeitsfelder auch im südlichen Raum bis in das Kalkalpin möglich ist. Die Schwierigkeiten treten bei detaillierten Untersuchungen auf – etwa bei der Auskartierung von Strukturelementen, da hier relativ kleinräumige Geschwindigkeitsanomalien eingehen.

Feldseitig bietet es sich natürlich an, auf die Methode der "expanding spreads" zurückzugreifen. Meßtechnisch dürfte dieses Verfahren auch heute noch die zuverlässigsten Ergebnisse liefern. Das darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, daß in dem hier diskutierten Raum der Alpenrandzone und des Kalkalpins ganz besondere und sehr schwer zu erfassende Probleme der Korrekturerfassung vorliegen. Es handelt sich dabei nicht nur um die Korrekturen in oberflächennahen Schichten, sondern auch um die Berücksichtigung des wahren Wellenweges beim Durchgang durch die geschwindigkeitsmäßig sehr heterogenen Deckenschichten. Die z.Z. in Arbeit befindlichen expanding spread Messungen in der Westmolasse werden eine Antwort auf die Frage nach der Brauchbarkeit dieses Verfahrens geben.

Es wurde bereits eingangs darauf hingewiesen, daß die Qualität der Messungen bereits bei den Arbeiten des Jahres 1975 im Bereich des Wamberg-Sattels außerordentlich schwankten. Neben Profilstücken mit recht guten Ergebnissen lagen Profile mit fast negativen Resultaten. Bei der Frage nach der Ursache solch unterschiedlicher Ergebnisse ist zu bedenken, daß in vielen Fällen größere Störungssysteme in der Alpenzone mit Tälern identisch sind (z. B. Loisachtal). Schlechte seismische Resultate sind in solchen Zonen von vornherein zu erwarten.

Ein anderer wesentlicher Grund für die sehr unterschiedlichen Ergebnisse könnte die unterschiedliche Energieabstrahlung in den Alpentälern sein. Vergegenwärtigt man sich, daß wir es bei sehr vielen Alpentälern - so z.B. in dem Isartal zwischen Krün-Wallgau und dem Sylvenstein-Stausee, in welchem auch die o.g. Bohrung Vorderriß steht – mit einem sehr stark eingekerbten Tal mit Schotterfüllungen zwischen 150 und 350 m zu tun haben, so ist der Verdacht naheliegend, daß diese Verhältnisse ganz wesentlich die Energieabstrahlung beeinflussen. Wir müssen uns dabei klarmachen, daß wir in der Talfüllung mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten - ca. 2000 m/s - und in dem anstehenden Gebirge mit ungewöhnlich hohen Werten, d.h. 6000 m/s und mehr zu tun haben. Die Brechungs- und Reflexionseffekte beim Durchgang der Welle durch diese Grenzschicht sind beträchtlich. Es ist daher der Versuch gemacht worden, durch Modellrechnungen einmal abzuschätzen, welche energetischen Verhältnisse beim Schießen in derartigen schottergefüllten Tälern auftreten. Die Abbildung 5 zeigt das Ergebnis einiger dieser Modellrechnungen. Man sieht, daß bei verschiedenen Aufstellungspunkten die Strahlen derart divergieren, daß kaum mit einer Energierückstrahlung an die Erdoberfläche zu rechnen ist. In anderen Fällen werden die Strahlen völlig weggebrochen, oftmals divergieren sie so stark, daß die reflektierte Energie völlig unregelmäßig auf den Aufstellungen der Erdoberfläche verteilt ist. Diese Arbeiten sollen in Kürze ergänzt werden durch zusätzliche modellseismische Aufnahmen im Geophysikalischen Institut der TU Berlin. Offensichtlich spielt die Frage der Energiequelle, d. h. der Lage der energieabstrahlenden Quelle in solchen Tälern auf die Qualität der Ergebnisse eine ganz entscheidende Rolle. Bestätigt sich diese Vermutung, so



Ab. 5: Modellrechnungen zur Frage der Energieabstrahlung in schottergefüllten Tälern. Dargestellt sind zwei verschiedene Lokationen der Energiequelle in einem Querschnitt des Isartales zwischen Wallgau und Fall. Im oberen Teil der Abbildungen sind die Wellenstrahlen mit Reflexionen an einer Unstetigkeitsfläche bei 0,3 sec Reflexionszeit eingetragen. Im mittleren Teil der Figur sind die Amplitudengrößen und in der unteren Abbildung die Einsatzzeiten für die quer über das Tal ausgelegten Empfänger angegeben. Während das erste Beispiel brauchbare Ergebnisse erwärten läßt, dringt beim zweiten Modell keine Energie in den Untergrund ein. Zwischen diesen Extremen liegen Fälle, in denen nur ein Teil der Energie reflektiert wird und zu sehr unterschiedlichen Amplitudenwerten in den Registrierungen führt. Auch die Zeitverschiebungen sind vielfach beträchtlich (Korrektureffekte).

wäre eine sehr gründliche Voruntersuchung der Alpentäler vor Inangriffnahme großer Messungen unerläßlich. Dies würde einen nicht unerheblichen zusätzlichen Meßaufwand bedingen. Optimal wäre eine flächenhafte Vermessung solcher Täler. Da hier die Kosten wahrscheinlich zu hoch würden, wird man sich mit zusätzlichen Querlinien über die Profiltäler durch Nahlinien, gestützt durch Aufzeitsonden, behelfen müssen. Aber auch diese Arbeiten werden zeitraubend und sehr kostenintensiv sein.

Auf der Processing-Seite hat sich bei der Bearbeitung der Messungen im Alpenraum die Bearbeitung nach dem sog. crooked-line-Verfahren (oder auch Slalom-Line-, Mäander-Line-Verfahren) bewährt. Erst durch diese Technik hat man in den gewundenen Tälern optimale Ergebnisse aus dem Material herausholen können. In einigen Fällen, z.B. in dem etwas breiteren Illertal, ist es zugleich möglich gewesen, Querneigungen zu bestimmen, eine Aussage, die bei Strukturandeutungen sehr wertvolle zusätzliche Informationen liefert.

Zur Erlangung eines optimalen Stapelergebnisses sind gerade in den Alpen außerordentlich enge Geschwindigkeitsanalysen erforderlich. Es zeigt sich, daß die Variation der RMS-Geschwindigkeiten auf engem Raum ganz außerordentlich groß ist, so daß in vielen Fällen Nachkorrekturen über die Ausspielung von CDP-Gathern erfolgen müssen. Dies kann unter anderem auch durch die Einflüsse langwelliger statischer Korrekturen bedingt sein, auf die oben bereits hingewiesen wurde.

### 4. ANWENDUNG NICHTSEISMISCHER VERFAHREN

Zusätzlich zu den seismischen Verfahren sollten in allen Gebieten, in welchen die Exploration vor neuen Problemen steht, auch die Möglichkeiten diskutiert werden, andere geophysikalische Verfahren einzusetzen. So, wie man bei der Vermessung neuer Konzessionen im Ausland im allgemeinen nicht auf zusätzliche gravimetrische Vermessungen verzichtet oder auch magnetische Messungen hinzuzieht, so ist die Kombination mehrerer Verfahren auch im Alpenraum anzuraten.

Die gesamte Alpenrandzone vom Bodensee bis in den Raum von Murnau/Benediktbeuren ist bereits in den 50er Jahren von der Preussag gravimetrisch vermessen worden. Es handelt sich hierbei um eine Engvermessung mit 3 bis 4 Stationen pro km². Das Ergebnis zeichnet sehr gut die geologisch bekannten Muldenstrukturen nach. In vielen Fällen lassen sich aber zusätzlich Informationen ableiten, die nicht ohne weiteres aus der bekannten Geologie zu erkennen sind. Hierbei ist z.B. an die Fortsetzung der geologischen Kartierung über Räume hinweg zu denken, die mit Quartär bedeckt sind und somit den Augen des Geologen verborgen sind. Zum anderen zeichnen sich verschiedene Querelemente ab, d.h. Querstörungen, die bei einem weitmaschigen seismischen Netz nicht erkennbar sind oder aber nur vermutet werden können.

Die Abb. 6 zeigt als Ergebnis der gravimetrischen Engvermessung im Raum Murnau eine nach dem Verfahren von Linsser gerechnete gravimetrisch-tektonische Karte. Bei diesem Verfahren, welches nur den Anspruch einer Interpretationshilfe erhebt, werden alle gravimetrischen Anomalien durch das Modell einer Stufe im Untergrund erklärt. Durch Rechenprogramme werden Teufe, Richtung und Verwurfbetrag dieser fiktiven Störungen ermittelt. Man erkennt in den "Hochzonen" – durch fiktive Störungen begrenzt – die Ausbißlinien der dichten Konglomeratschichten der Unteren Bunten Molasse. Im Norden ist die sog. Rottenbucher Mulde und im Osten die Penzberger Mulde erkennbar. Diese Darstellung unterstützt die geologische Kartierung, die im mittleren Raum zwischen den genannten Mulden durch mächtige Quartärbedeckung lückenhaft ist. Diese Karte wurde nach Elimination des Regionalfeldes berechnet. In anderen Fällen konnten durch diese Bearbeitungsprozesse wichtige Hinweise auf Querstörungen gewonnen werden.

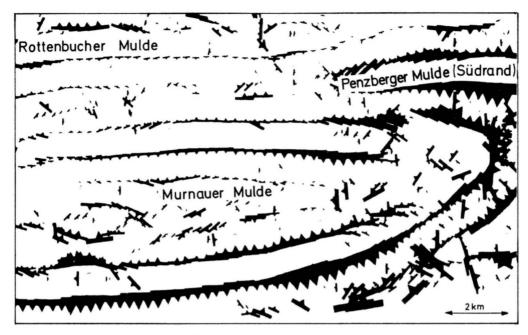


Abb. 6: Gravimetrisch-tektonische Karte erstellt nach dem von Linsser entwickelten Verfahren aus gravimetrischen Engvermessungen im östlichen Teil der Murnauer Mulde. Die durch fiktive Störungen heraustretenden horstartigen Gebilde sind den Austritten der dichten und schallharten Konglomeratschichten der unteren Bunten Molasse zuzuordnen. Das umlaufende Streichen im Ostteil der Murnauer Mulde ist gut erkennbar. Daneben zeichnen sich Querelemente im östlichen Teil dieser Mulde sowie am Ostrand der Rottenbucher Mulde ab.

In neuester Zeit liefern auch Satellitenaufnahmen einen Beitrag zur Exploration. Störungssysteme, die quer durch die Alpen verlaufen wie z.B. das Loisach-Engadin-Element sind aus kleinräumigen Untersuchungen kaum in ihrer Bedeutung so auszumachen. Vergleicht man solche großen Störungssysteme mit den Ergebnissen seismischer Messungen in der Alpenrandzone, so stellt man vielerorts eine verblüffende Übereinstimmung fest. So durchsetzt gerade das genannte Loisach-Engadin-Element den Alpenrand im Ostteil der Murnauer Mulde. Ein Teil dieses Störungssystems ist der bereits seit langem bekannte sog. "Andorf-Iffeldorfer-Sprung". Auch das Vorspringen der Flyschzone im Bereich des Kochelsees und Benediktbeuren ist im Zusammenhang mit diesem großen Querelement zu sehen. Ähnliche Systeme dürften sich im Illertal, Lechtal und auch an einigen Stellen Vorarlbergs finden.

Eine elektrische Tiefensondierung ist erstmals in den 60er Jahren von der BGR im Bereich des Wamberg-Sattels als Testmessung durchgeführt worden.

Zum Einsatz magnetotellurischer Methoden am Alpenrand sind erste Untersuchungen von Berktold u.a. im Gebiet südlich des Chiemsees ausgeführt worden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen eine recht befriedigende Übereinstimmung mit den Deutungen der Refraktionsseismik nach Will. Wenn auch das aus den refraktionsseismischen Daten von Will abgeleitete Modell eine Mächtigkeit der kalkalpinen Decken von etwa 3000–3500 m annimmt – und damit im Gegensatz zu dem Bohrergebnis der

Tiefbohrung Vorderriß 1 steht –, so hat sich doch die von Will postulierte Inversionszone in dieser Tiefe prinzipiell bestätigt. Die Magnetotellurik weist auf eine rel. mächtige Folge niederohmiger Schichten bis etwa 10 km südlich des Nordrandes des Kalkalpins hin.

Mit vorsichtigem Optimismus darf man erwarten, daß die Magnetotellurik künftig eine nicht unwesentliche Rolle bei der Deutung des tieferen Untergrund im kalkalpinen Bereich spielen wird. Dies um so mehr, als wir heute durch die am Alpenrand niedergebrachten tiefen Bohrungen (Staffelsee 1, Miesbach 1, Vorderriß 1) Kenntnisse über die elektrische Leitfähigkeit bis in etwa 5000 bis 6000 m Tiefe haben.

### 5. AUSBLICK

Die bisherigen geophysikalischen Messungen, aber auch die Auswertung der bisher vorliegenden Bohrungen, lassen den gesamten nördlichen Alpenraum exploratorisch außerordentlich interessant erscheinen. Neben der bereits genannten Bohrung Vorderriß 1 sind auf österreichischem Gebiet die Bohrungen Urmannsau und Berndorf abgeteuft worden, die beide unter den kalkalpinen Decken Molasse nachgewiesen haben. Ein gleicher exploratorischer Wert dürfte der z. Z. im Raum von Mariazell abgeteuften Bohrung zukommen und vor allem auch die von der BEB auf Schweizer Gebiet im Entlebuch bei Finsterwald im Abteufen befindliche Bohrung wird ganz wesentlich die exploratorische Bewertung des tieferen Untergrundes des Alpenraums beeinflussen.

So, wie sich das Bild heute zeigt, haben wir ein Gebiet von der Schweiz bis zum Wiener Becken, d. h. in einer Ost-West-Erstreckung von mindestens 600 km und einer Tiefe von 20–30 km als neuen exploratorischen Raum vor uns. Es ist allen gegenwärtig, daß dieses Gebiet mit besonderen Schwierigkeiten behaftet ist, die bei der geophysikalischen Exploration beginnen, sich über die geologische Bearbeitung fortsetzen und last not least auch in den extrem schweren Bohrverhältnissen gipfeln. Das heißt, der Aufschluß in diesem großen Gebiet wird extrem teuer sein. Es ist jedoch im mitteleuropäischen Raum der größte uns noch zur Verfügung stehende Sedimenttrog, dem wir ein hohes Maß von Explorationschancen geben können.

Zur Lösung spezieller Probleme in der geophysikalischen Exploration sind eine Reihe von Forschungsprojekten durchgeführt worden oder angelaufen, die vom BMFT unterstützt werden. Es hat sich hier gezeigt, daß nicht nur eine enge Zusammenarbeit mit Hochschulinstituten nützlich ist, sondern daß gerade eine sehr enge Zusammenarbeit und ein ständiges Gespräch mit der Geologie Voraussetzung für den Erfolg der Exploration ist. Beide Seiten werden auch hier in Zukunft noch viel voneinander lernen können, und vielleicht ist gerade der Alpenraum ein Gebiet, welches von heute auf morgen bestehende Thesen und fest geglaubte Anschauungen als überholt nachweist und zu immer neuen Überlegungen anspornt, eine Aufgabe, die gerade für den Geophysiker außerordentlich reizvoll ist.

#### LITERATURVERZEICHNIS

- Angenheister, G.; Bögel, H. und Morteani, G. (1975): Die Ostalpen im Bereich einer Geotraverse vom Chiemsee bis bis Vicenza. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 148, S. 50–137, Stuttgart
- Bachmann, G. H.; Dohr, G.; Koch, K.; Müller, M.; Weggen, K. und Wildelau, J. G. (1978): Die Erdgas-Tiefenaufschlußbohrung Vorderriß 1, ein erster Schritt zur Erschließung der Kalkalpen im Freistaat Bayern. – Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie, Compendium 78/79, S. 14–40, Leinfelden-Echterdingen
- Bachmann, G. H.; Dohr, G.; Müller, M.; Weggen, K. und Wildelau, J. G. (1980): Exploration in classic thrust belt and its foreland Bavarian Alps, Germany. AAPG/SEPM/EMD 1980 Convention, Denver/Col. (Kurzfassung in Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 64, S. 673, Tulsa 1980)
- Berkthold, A.; Beblo, M. und Kemmerle, K. (1975): Zur Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit unter den Ostalpen. Int. Sympos. Geodynamik Ostalpen (Hrsg. H. Bögel), S. 3, München (Mskr.)
- Breyer, Fr. (1958): Versuche zur geologischen Deutung der reflexionsseismischen Messungen in der Gefalteten Molasse Bayerns. Bull. Ver. Schweizer, Petrol. Geol., 25, S. 29–35, Basel
- Breyer, Fr. und Dohr, G.: Betrachtungen über den Bau der Gefalteten Molasse im westlichen Bayern mit Beziehung auf das Molasse-Vorland und die angrenzenden Teile der Alpen aufgrund geophysikalischer Untersuchungen. Erdöl u. Kohle, 12, S. 315–323, Hamburg
- Clasen, G. und Dohr, G. (1958): Reflexionsseismische Messungen in der Gefalteten Molasse Oberbayerns. Z. dt. geol. Ges., 109, S. 612–623, Hannover
- Dohr, G. (1981): Geophysikalische Untersuchungen im Gebiet der Tiefbohrung Vorderriß 1. Geologica Bavarica, im Druck
- Dohr, G. und Stiller, P. (1975): Migration Velocity Determination, Part II: Applications. Geophysics, 40, S. 6–16, Tulsa
- Ganss, O. und Schmidt-Thomé, P. (1955): Die gefaltete Molasse am Alpenrand zwischen Bodensee und Salzach. Z. dt. geol. Ges., 105, 405 ff., Hannover
- John, H. (1957): Die Gliederung der deutschen Alpenvorlandsmolasse mit Hilfe seismischer Geschwindigkeiten. Erdöl u. Kohle, 10, S. 493–496, S. 570–573, S. 661–664, Leinfelden-Echterdingen
- Kemmerle, K. (1973): Magnetotellurik am Nordrand der Bayerischen Alpen entlang eines Profiles vom Chiemsee bis Reit im Winkl. Dipl.-Arbeit, Inst. f. Angew. Geophys., Univ. München
- Krey, Th. (1951): An approximate correction method for refraction in reflection seismic prospecting. Geophysics, 16, Nr. 3, Tulsa
- Kröll, A. und Wessely, G. (1967): Neue Erkenntnisse über Molasse, Flysch und Kalkalpen aufgrund der Ergebnisse der Bohrung Urmannsau 1. Erdöl-Erdgas Z., 83, S. 342–353, Wien-Hamburg
- 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, München
- Müller, M. (1976): Bohrung Miesbach. Ergebnisse der ersten im Rahmen des Erdgas-Tiefenaufschlußprogrammes der Bundesregierung mit öffentlichen Mitteln geförderten Erdgastiefbohrung. Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie, Compendium 76/76, S. 63–76, Leinfelden-Echterdingen
- Sattlegger, J. W. (1975): Migration Velocity Determination, Part I: Philosophy. Geophysics, 40, S. 1–5, Tulsa
- Veit, E. (1963): Der Bau der südlichen Molasse Oberbayerns aufgrund der Deutung seismischer Profile.

  Bull. Ver. Schweizer, Petr. Geol., 78, S. 15–52