

Geophysik bei der Planung eines Kavernenfeldes

J. Schmoll und W. Schürmann

Prakla-Seismos GmbH, Haarstrasse 5, Postfach 47 67, D-3 Hannover 1

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Nutzung einer Salzlagerstätte, insbesondere auch bei der Planung eines Kavernenfeldes, hat die Angewandte Geophysik ihre besonderen Aufgaben bei der Auffindung einer Salzlagerstätte und bei der Bestimmung der Ausdehnung des Salzkörpers. Hierbei geht es in späteren Planungsphasen auch um Informationen über den genauen Verlauf der Salzstockflanke in bestimmten Bereichen. Geeignete geophysikalische Methoden sind die Gravimetrie und die Seismik, wobei sowohl reflexionsseismische als auch refraktionsseismische Verfahren angewandt werden. Mitunter kann auch die zusätzliche Unterschließung eines Salzstockes eine wertvolle Hilfe zur Bestimmung des Verlaufs der Flanke darstellen. Eine besondere Rolle spielen seismische Untersuchungen in Bohrungen, bei denen eine Durchschallung der Salzstockflanke von der Erdoberfläche zur Bohrung oder von einer Bohrung zur anderen erfolgt. Hierbei werden die Signale neuerdings digital registriert, wobei die Aufnahmeapparatur auch für höhere Frequenzen als die bei der Übertageseismik üblichen ausgelegt ist. Durch geeignete Prozesse bei der Datenverarbeitung kann die Interpretation erleichtert werden. Als weitere Verbesserung ist an eine Verdichtung der Meßpunkte in der Bohrung zu denken; der höhere Aufwand auf der Empfangseite kann durch den Einsatz von speziellen Luftpulsern auf der Sendeseite kompensiert werden.

EINLEITUNG

Beim Beginn der Planung von Kavernen in Salzstöcken liegt häufig schon eine Reihe von Informationen aufgrund von geologischen Untersuchungen vor, z.B. durch Bohrungen und aufgrund von geophysikalischer Vermessung, sei es im Rahmen staatlicher Untersuchungen oder im Rahmen einer Kohlenwasserstoffexploration. In dieser ersten Phase spielen sowohl gravimetrische als auch seismische Messungen eine Rolle, und zwar Refraktions- wie auch Reflexionsseismik.

Man muß jedoch bedenken, daß die Fragestellungen bei der Kavernenplanung teilweise von ganz spezieller Art sind, so daß für die konkrete Planung und Erschließung die vorgefundenen Informationen häufig nicht mehr ausreichen. Es setzt eine zweite Phase geophysikalischer Aktivität mit ganz speziellen, projektbezogenen Aufgabenstellungen ein; insbesondere geht es um die Erkundung der Salzstockbegrenzungen in dem für die Kavernen vorgesehenen

Tiefenbereich. Hier kommt in erster Linie die Seismik in Frage, wobei an Reflexions-, Refraktionsseismik und an Bohrlochmessungen zu denken ist. Die Gravimetrie spielt in dieser Phase präziser Aussagen im allgemeinen eine geringere Rolle.

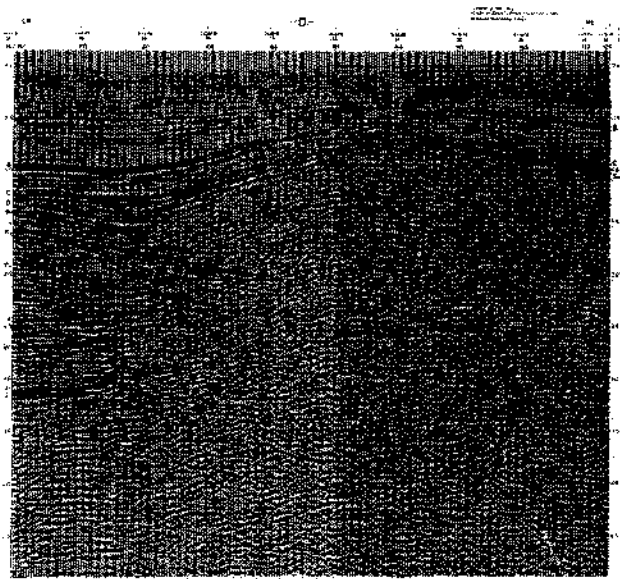
REFLEXIONSSEISMIK

Die Reflexionsseismik hat durch die methodischen und technischen Verbesserungen der letzten Jahre, insbesondere durch die Anwendung von Mehrfachüberdeckung sowie digitaler Registrierung und Datenverarbeitung erheblich an Informationsgehalt gewonnen. Ein reflexionsseismisches Profil über einen Salzstock hinweg bzw. über eine Flanke wird zum Ziel haben, einerseits die Salzstockoberfläche zu erfassen, andererseits ein möglichst klares Bild vom Nebengebirge zu geben, um Schlüsse über den Verlauf der Salzstockflanke ziehen zu können. Zu diesem Zweck muß eine optimale Unterdrückung multipler Reflexionen er-

folgen, und zwar mindestens bis zu einer Maximaltiefe, bis zu der Informationen über die Salzstockflanke erhalten werden sollen. Nicht vollständig gelöschte multiple Reflexionen von der Salzstockoberfläche sind weniger störend, da man sie meist leicht identifizieren kann. Hinsichtlich der Multiplen im Nebengebirge gibt es jedoch genügend Beispiele von älteren Messungen, aus denen eine genauere Aussage über die Salzstockbegrenzungen unmöglich ist oder zu fehlerhaften Aussagen geführt hat.

Das vom Datenzentrum gelieferte Seismogrammprofil erlaubt im allgemeinen eine grobe, vorläufige Aussage, jedoch erst eine sorgfältige Auswertung mit einer migrierten Tiefendarstellung unter Berücksichtigung der Brechung und unter Benutzung möglichst realer Geschwindigkeitsverhältnisse kann zu einer genaueren Aussage führen. Dabei muß der Auswerter auch auf eventuelle Reflexionen von der Salzstockflanke oder von Salzüberhängen achten. Sind solche Reflexionen stark geneigt, so kann es vorkommen, daß sie beim normalen Stapelprozeß untergehen. So sind z.B. mit Schüssen und Geophonen, die auf der einen Seite des Salzstockes lagen, Reflexionen von der gegenüberliegenden, zurückspringenden Salzstockflanke registriert worden.

Fig. 1 zeigt ein Seismogrammprofil über einen Salzstock. Man erkennt die Salzstockoberkante, Reflexionen aus dem Salzstockinneren und ausgeprägte Beugungsbilder. Auch Beugungsbilder können wertvolle Hinweise liefern. Man kann die gekrümmten Indikationen als Beugung deuten, die von einem Punkt ausgeht, nämlich (in diesem Beispiel) vom Endpunkt der Horizonte R und K₃. Die Lage dieser Endpunkte kann damit bestimmt werden. Somit kann die max-



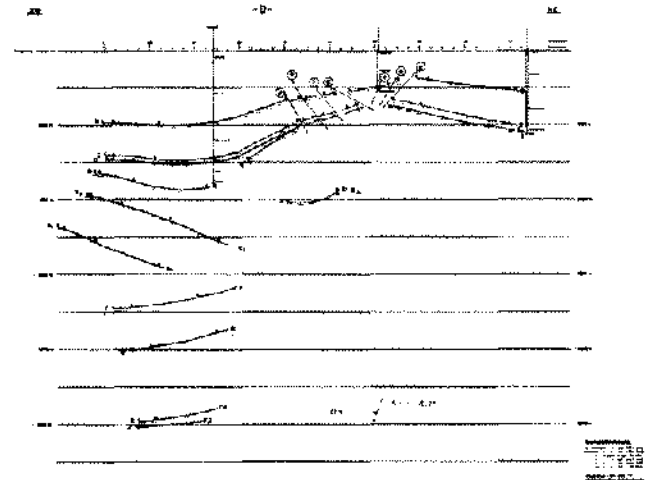
Figur 1. Seismogrammprofil über einen Salzstock mit Reflexionen von der Salzstockoberkante und aus dem Salzstockinneren sowie mit Beugungsbildern an den Endpunkten der Nebengebirgshorizonte.

imal mögliche Ausdehnung des Salzkörpers angegeben werden.

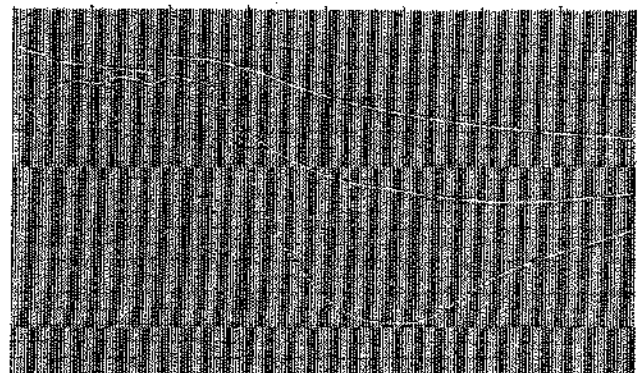
Fig. 2 stellt die Tiefenkonstruktion des ausgewerteten Profils dar, die erst ein wahres strukturelles Bild ergibt. Bei einem komplizierten Bau des Nebengebirges, insbesondere bei starken Horizontkrümmungen empfiehlt es sich, im Datenzentrum ein migriertes Zeit-Tiefenprofil mit dem Prozeß "Migration" erstellen zu lassen.

Fig. 3 zeigt ein einfaches Modell einer Salzstockflanke, das im Computer erzeugt worden ist, während Fig. 4 die reflexionsseismische Abbildung dieses Modells darstellt. Das Bild erscheint wesentlich verändert; man sieht, daß eine Auswertung äußerst schwierig wäre. Durch den Prozeß "Migration" (Fig. 5) wurden die seismischen Daten auf das wahre Bild der Struktur zurückgeführt.

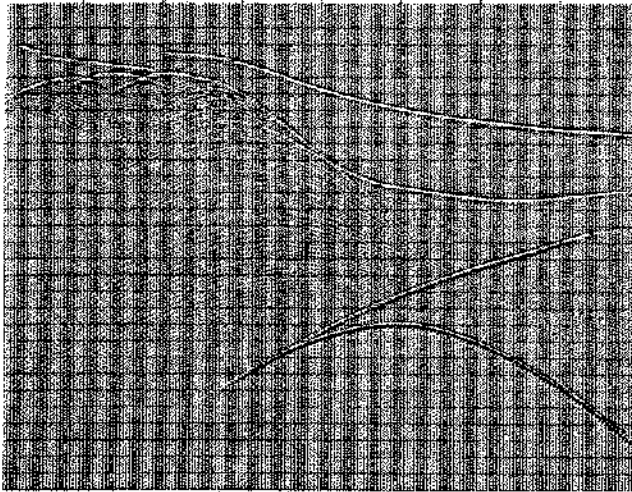
Enthält das Seismogrammprofil Anomalien im Verlauf der Reflexionshorizonte vom Nebengebirge bzw. der Salzbasis (meist Zechsteinbasis), kann das ein Hinweis auf die Existenz z.B. eines Salzstocküberhangs sein, wenn



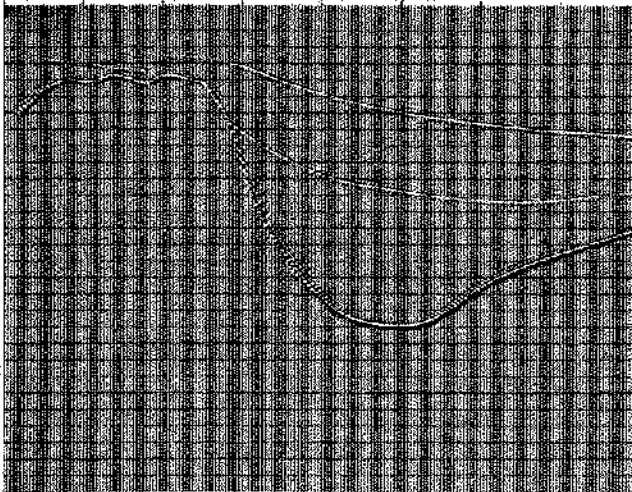
Figur 2. Tiefenkonstruktion der Fig. 1 mit Migration der Lotpunkte.



Figur 3. Synthetisches Modell einer Salzstockflanke mit Nebengebirge.



Figur 4. Reflexionsseismische Abbildung des Salzstockflankenmodells von Fig. 3.



Figur 5. Rückführung der reflexionsseismischen Abbildung einer Salzstockflanke (Fig. 4) auf die wahren Verhältnisse durch den Prozeß Migration

nämlich der Strahlenweg teilweise durch Salz, teilweise durch das Nebengebirge verläuft. Das setzt allerdings voraus, daß Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Salz- und Nebengebirge vorhanden sind. Aus diesem Grund ist eine komplette Auswertung der Profile bis hinunter zum Salzbasishorizont erforderlich. Durch eine Salzstockunterschöpfung kann man sich hier weitere Klarheit verschaffen.

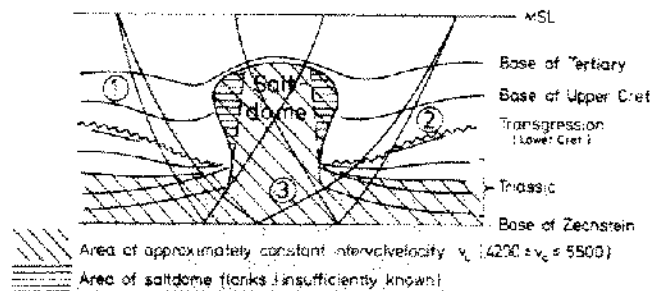
Fig. 6 zeigt das Prinzip einer solchen Unterschöpfung. Wesentlich ist, daß die Reflexionsstrahlen für die Erfassung der Salzbasis außerhalb der Salzstockflankenbereiche verlaufen. Man kann dann durch Teilunterschöpfung oder Totalunterschöpfung eine Tiefendarstellung der Salzbasis vornehmen, die unabhängig vom Aufbau der darüberliegenden Schichten ist.

Fig. 7 zeigt ein normales Seismogrammprofil über einen Salzstock. Klar erkennbar ist die Salzstockoberkante. Im Bereich der linken Flanke sind einige scheinbar sählig verlaufende Horizontstücke zu erkennen, von denen eines als Unterkante eines Salzstocküberhanges gedeutet werden konnte. Die Zechsteinbasis zeigt einen starken scheinbaren Anstieg.

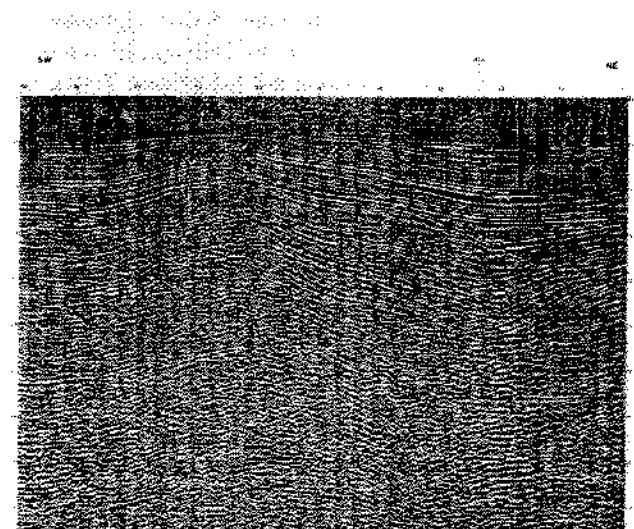
Verschiedene Tiefenkonstruktionen mit unterschiedlichen strukturellen Annahmen ergaben als beste Lösung das in der Fig. 8 dargestellte Bild mit einem Salzstocküberhang. Durch eine später durchgeführte Unterschöpfung konnte die Existenz des Salzstocküberhanges in der etwa hier dargestellten Form bestätigt werden.

REFRAKTIONSSEISMIK

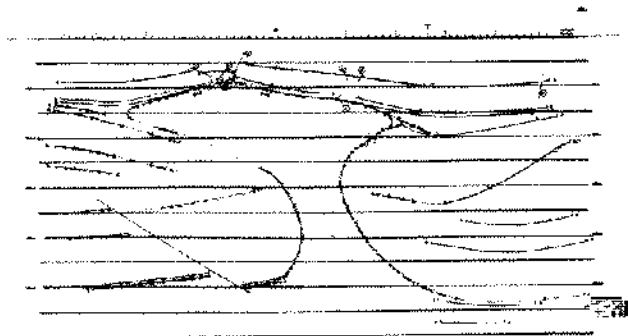
Bei manchen Aufgabenstellungen empfiehlt es sich, zusätzlich zur Reflexionsseismik die Refraktionsseismik heranzuziehen. Der Mehraufwand bei den Feldarbeiten besteht im allgemeinen nur darin, daß unter Benutzung des Geophonaufbaues der Reflexionsseismik zusätzliche Re-



Figur 6. Prinzip einer Salzstockunterschöpfung. Strahlenverlauf Sender-Reflektor-Empfänger für Flankenunterschöpfungen (1 und 2) sowie für Totalunterschöpfung (3).



Figur 7. Seismogrammprofil über einen Salzstock mit Reflexionen vom Salzstockdach, vom Überhang und vom Nebengebirge einschl. Zechsteinbasis.



Figur 8. Tiefenkonstruktion von Fig. 7. Wahrscheinlichste Form des Salzstocküberhanges aufgrund von Überhangreflexionen und von plausiblen Verlauf darunter liegender Horizonte.

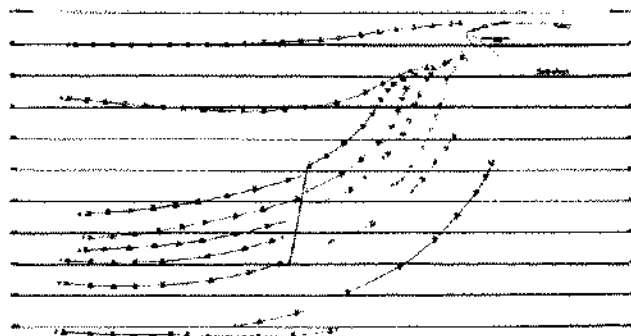
fraktionsschüsse abgetan werden. Liegt z.B. die Salzstockoberfläche in verhältnismäßig geringer Tiefe, so kann sie refraktionsseismisch oft besser erfaßt werden, als durch Reflexion. Darüberhinaus können mit Hilfe der Refraktorgeschwindigkeiten Aussagen über das an der Salzstockoberfläche anzutreffende Material gemacht werden, ob z.B. der Salzstock ganz oder teilweise von z.B. Caprock bedeckt ist oder nicht.

Zu Aussagen über den Verlauf der Salzstockflanke oder eines Salzstocküberhanges kann man Refraktionseinsätze heranziehen, die von Schußpunkten weit außerhalb des Salzstockbereiches stammen, die aber über dem Salzstock registriert werden. Bei Laufzeitkurven von Refraktionsmessungen erhält man oberhalb des Salzstockes eine sehr hohe Scheingeschwindigkeit, die darauf schließen läßt, daß die auftauchenden Strahlen des Refraktionshorizontes von einem bestimmten Punkt an nicht mehr durch das Nebengebirge gelaufen sind, sondern durch das Salz.

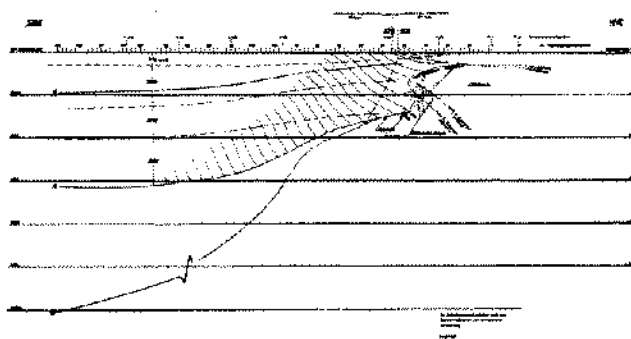
Fig. 9 zeigt ein Beispiel, bei dem Rückschlüsse auf das Vorhandensein und die Form eines Salzstocküberhanges gezogen werden konnten. Es ist ein Tiefenprofil von einer reflexionsseismischen Messung mit mächtigem Tertiär und stark angeschlepptem Mesozoikum. Die Schlußfolgerungen ließen sich aus den Ergebnissen der beiden am weitesten entfernten Refraktionsschußpunkte (R 228 und R 168) ziehen.

Fig. 10 ist ein Ausschnitt, wobei nur das Tertiär dargestellt wurde. Aufgrund der Konstruktionsgeschwindigkeiten, die sich auf eine seismische Geschwindigkeitsmessung in einer Tiefbohrung stützen, und der Laufzeitkurve wurden Wellenfronten und Strahlen konstruiert. Als Refraktor, genannt "Zubringer", kam der Horizont A infrage, der in Salzstocknähe in die Tertiärbasis B übergeht. Der Zubringer endet nach der Reflexionsseisik an einer Störung, hier wurde zur Konstruktion der Abstrahlpunkt angenommen.

Aufgrund von Konstruktionen mit Hilfe von aplanatischen Kurven nach einer Methode von Gardner ließ sich die



Figur 9. Tiefenprofil einer Salzstockflankenbestimmung durch Reflexions- und Refraktionsseismik.



Figur 10. Ausschnitt von Fig. 9: Konstruktion des Salzstocküberhanges nach Refraktionsseismik (Wellenfrontkonstruktion) und Gardnerschen Kurven. Horizont A: "Zubringer".

untere Begrenzung des Salzstocküberhanges in zwei Versionen angeben; sie grenzen den Verlauf des Salzstockrandes im Übergangsbereich ein. Eine später abgeteufte Bohrung hat den Salzstocküberhang bestätigt.

BOHRLOCHMESSUNGEN

Sind in einem zukünftigen Kavernenfeld erst einmal Bohrungen niedergebracht, lassen sich mit Hilfe dieser Bohrungen Grenzflächenbestimmungen durchführen, die eine genauere Bestimmung des Salzflankenverlaufes ermöglichen. Dabei wird in die Tiefbohrung eine Meßsonde eingefahren und es werden mit Hilfe von dicht unterhalb der Erdoberfläche gezündeten Schüssen Laufzeitmessungen zwischen den Schußpunkten und den Geophonmeßpunkten in der Tiefbohrung durchgeführt.

Die Anlage der Schußpunkte erfolgt in unterschiedlichen Entfernungen zur Tiefbohrung, sie richten sich nach der vermutlichen Struktur des zu vermessenden Teiles der Salzstockflanke und nach dem zu erfassenden Tiefenbereich. Die Laufzeitmessungen erfolgen entweder mit einer Drei-Komponenten-Sonde, in der Geophonsysteme in vertikaler und horizontaler Richtung angeordnet sind, oder

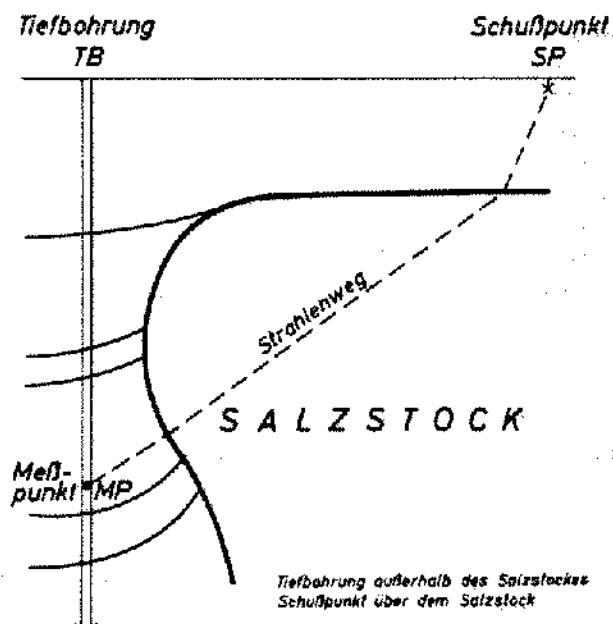
mit einer Sonde, die neben vertikal angeordneten Geophonsystemen zusätzlich Druckempfänger enthält. Beide Sondentypen werden zur besseren Signalübertragung mit Hilfe eines Andrucksystems an die Bohrlochwand angepreßt.

Der Standort der Tiefbohrung, das heißt, ob die Bohrung im Salzstock oder außerhalb des Salzstockes niedergebracht wird, ist im Hinblick auf die Salzflankenbestimmung von untergeordneter Bedeutung. Die Fig. 11 und 12 zeigen mögliche Anordnungen von Bohrung und Schußpunkten.

Fig. 13 bringt ein Beispiel für eine Interpretation einer Salzflankenmessung. Die Bohrung hat einen Salzüberhang durchteuft und ab etwa 1000 m nur noch Nebengebirge durchbohrt. Die Messung erfolgte von zwei Schußpunkten aus, die über dem Salzstock angelegt wurden. Die Salzstockoberkante war durch Refraktion bestimmt worden. Die Auswertung erfolgte auch hier wieder mit Hilfe von aplantischen Kurven.

Die Ergebnisse von beiden Schußpunkten wurden getrennt ausgewertet; sie weichen nur wenig voneinander ab. Diese Interpretation wurde durch die abgelenkte Bohrung 1A bestätigt; sie fuhr hier im Anhydritmantel des Salzstockes entlang.

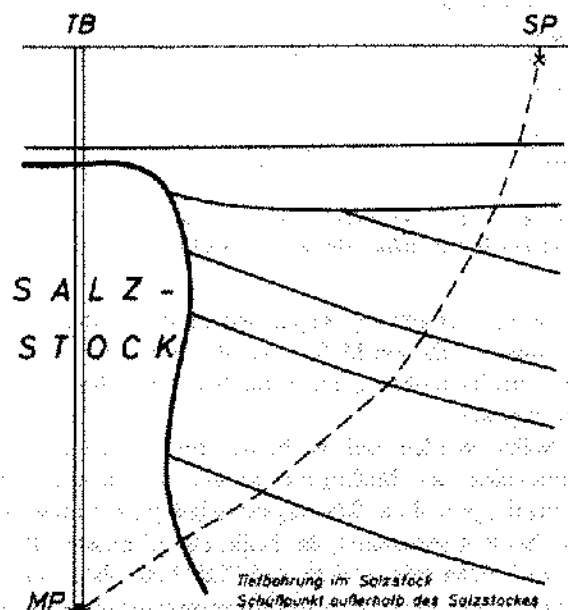
Es gibt aber noch weitere Möglichkeiten, eine Salzflanke meßtechnisch zu erfassen (Fig. 14). Stehen z.B. zwei Bohrungen zur Verfügung, wovon die eine außerhalb und die andere innerhalb des Salzstockes niedergebracht worden ist, kann z.B. eine horizontale Durchschallung erfolgen, wobei eine der beiden Bohrungen als Schußbohrung benutzt wird.



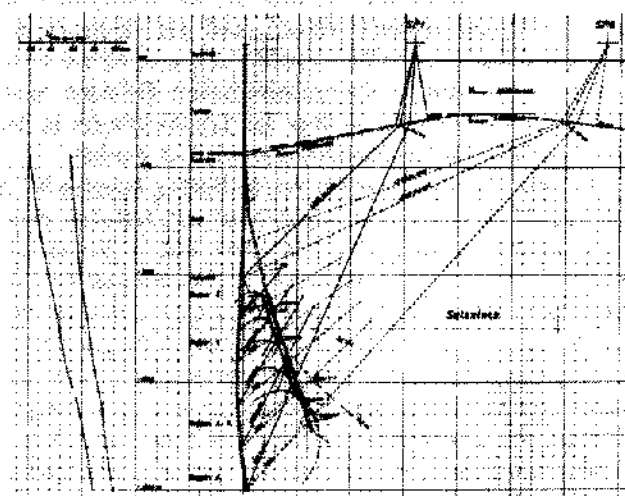
Figur 11. Salzstockflankenbestimmung durch seismische Bohrlochmessung (Typ 1). Bohrung außerhalb des Salzstockes.

Außer den bisher beschriebenen Einsätzen der direkten Wellen lassen sich auch weitere Einsätze zur Auswertung heranziehen, die von anderen Wellenwegen stammen, z.B. reflektierte Wellen oder solche, die teilweise im Anhydritmantel des Salzstockes gelaufen sind.

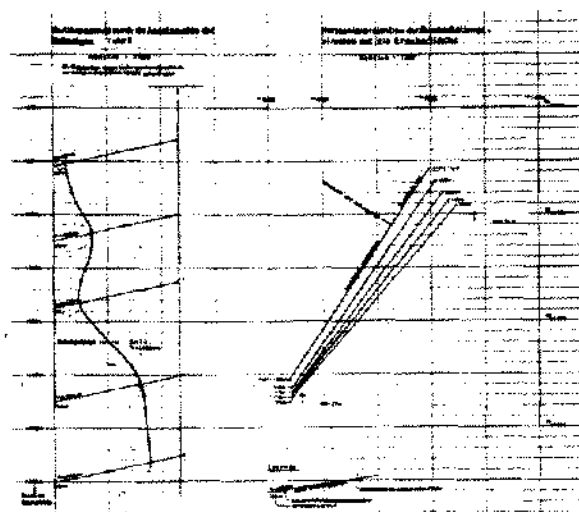
Zur Verdichtung der Meßwerte bei einer möglichst geringen Anzahl von Schüssen kann statt der Bohrlochsonde, die eine Laufzeitmessung nur an jeweils einem Punkt in der Schußbohrung erlaubt, eine Geophon-



Figur 12. Salzflankenbestimmung durch seismische Bohrlochmessung (Typ 2). Bohrung innerhalb des Salzstockes.



Figur 13. Beispiel einer Salzstockflankenbestimmung durch seismische Bohrlochmessung. Die Messung war in der nicht abgelenkten Bohrung erfolgt. Das Meßergebnis wurde dann durch die abgelenkte Bohrung bestätigt.



Figur 14. Salzstockflankenbestimmung mittels zweier Bohrungen (innerhalb und außerhalb des Salzstockes).

kette in die Tiefbohrung eingelassen werden; dadurch kann eine größere Zahl von Meßwerten über einen größeren Bereich in der Tiefbohrung mit einem Schuß gleichzeitig registriert werden.

Erwähnt werden muß noch, daß für eine zuverlässige Interpretation der Meßergebnisse der Schichtaufbau im Nebengebirge und die Schichtgeschwindigkeiten möglichst genau bekannt sein sollen, das heißt, ein seismisches Profil muß vorhanden sein, und zu jeder Salzflankenbestimmung gehören eine normale Geophonversenkmesung sowie Geschwindigkeitslogs. Je genauer diese Daten sind, um so größer ist die Sicherheit der Aussage über den Verlauf der zu untersuchenden Salzstockflanke.

Bei einer Schußanordnung nahe der Erdoberfläche muß auch unbedingt erwähnt werden, daß die Endteufe der Bohrung einige hundert Meter größer sein muß als die Tiefe der Kaverne. Aus strahlengeometrischen Gründen kann nämlich keine Information über die Salzstockflanke in der Tiefe der tiefsten Geophonposition erhalten werden.

Für die Energieerzeugung wurde bislang hauptsächlich Sprengstoff verwandt. Sprengstoff hat zweifelsohne manchen Vorteil: so kann man z.B. ohne größere Schwierigkeiten Ladungsmengen variieren, um so Einfluß auf die Signalqualität zu nehmen. Aber es ist auch durchaus vorstellbar, daß sich der Einsatz von Sprengstoff, z.B. in bebauten Gebieten, verbietet. In diesem Fall kann unter anderem auf den Luftpuls zurückgegriffen werden. Wegen der geringeren Energieabstrahlung des Luftpulsers ist die Verankerung der Sonde an der Bohrlochwand besonders wichtig. Außerdem kann man schwache Signale dadurch verstärken, daß man sie mehrfach wiederholt. Die Registrierung der Seismogramme erfolgt in diesem Fall über ein Stapelgerät, das eine größere Anzahl von Ein-

zelaufnahmen addiert. Auf diese Weise lassen sich ohne zeitlichen Mehraufwand Seismogramme erzielen, die denen der Sprengstoffmethode voll vergleichbar sind. Während des Stapelns können die Zwischenergebnisse ständig beobachtet werden. Mit dieser Methode sind Bohrungen bis zu Tiefen von 5000 m erfolgreich vermessen worden.

Eine weitere Möglichkeit, ohne Sprengstoff auszukommen, bietet das Vibroseis (Continental Oil CompanyTM) Verfahren. Hierbei wird jedoch nicht ein Impuls erzeugt, sondern mittels Vibratoren wird ein mehrere Sekunden dauerndes Signal in den Boden geschickt, das genau definiert ist. Ähnlich wie beim Luftpuls wird das Signal mehrfach wiederholt und gestapelt. Es wird von der Meßsonde aufgenommen und mit Hilfe der Korrelationstechnik wieder in ein kurzes Signal umgewandelt. Auch mit diesem Verfahren sind bis zu 5000 m tiefe Bohrungen vermessen worden.

Die Interpretation von Bohrlochmessungen zur Salzflankenbestimmung beruht, wie bereits erwähnt, teils auf der Auswertung von ersten Einsätzen seismischer Wellen, aber teilweise auch auf der Benutzung späterer Einsätze in den aufgenommenen Seismogrammen. Hier setzt aber eine Analogaufzeichnung gewisse Grenzen. Der Einsatz von digitalen Apparaturen zur Datenaufzeichnung eröffnet in Verbindung mit der Datenverarbeitung große Möglichkeiten zur besseren Signalerkennung.

LITERATUR

- Bading, R., Echterhoff, J., Krey, Th. and Marschall, R. 1974. New Possibilities for Reflection Seismics by Undershooting Bodies with Complicated Tectonics. *Geophysical Prospecting*, 22: 1–21.
- Brinckmeier, G. und v. Helms, H. 1951. Zur refraktionsseismischen Bestimmung des Randes und der Flanke von Salzstöcken. *Erdöl und Kohle*, 4: 321–326.
- Clasen, G. 1958. Salzstockrandbestimmungen mit Hilfe gravimetrischer und seismischer Methoden. *Erdöl und Kohle* 11: 2–5.
- Gardner, L.W. 1949. Seismograph Determination of Salt Dome Boundary using Well Detector Deep on Dome Flank. *Geophysics* 14: 29–38.
- v. Helms, H. 1951. Neuere refraktionsseismische Untersuchungen an flachen und steilen Salzstöcken in Nordwestdeutschland. *Erdöl und Kohle*, 4: 615–620.
- . 1952. Refraktionsseismische Untersuchungen an Salzstöcken im Hamburger Loch. *Erdöl und Kohle* 5: 77–80.
- Holste, W. 1959. Problems and Results with Refraction Seismics in Boreholes (Determination of Salt-Flanks and other Interfaces). *Geophysical Prospecting* 7: 231–244.
- , und Steinmann, W. 1959. Eine Grenzflächenbestimmung in der gefalteten Molasse Oberbayerns. *Erdöl-Zeitschrift* 75: 311–313.
- Krey, Th. and Marschall, R. 1975. Undershooting Salt domes in the North Sea; Petroleum and the Continental Shelf of North-

- west Europe Vol. 1 Geologie, Edition by Austin W. Woodland, Applied Science Publishers Ltd.
- Marschall, R. 1975. Einige Probleme bei der Benutzung größerer Schuß-Geophon-Abstände und deren Anwendung auf Unterschießungen. Dissertation Montan-Universität Leoben.
- Schulze, G. A. und Trappe, H.J. 1956. Das Kartieren von Salzflanken mit seismischen Methoden. Erdöl und Kohle 9: 580-583.
- Steinmann, W. und Rühmkorf, H.A. 1968. Seismische Messungen zur Salzstockflankenbestimmung, eine Case History. Zeitschrift für Geophysik, 34: 457-468.