Überreicht von der
PRAKLA
Gesellschaft für praktische
Lagerstättenforschung G. m. b. H.

Beispiele aus der seismischen Bodenforschung

Von Leo Ruprecht und Waldemar Zettel

Mit 24 Abbildungen

Geol. Jb.	Band 74	S. 653—676, 24 Abb.	Hannover / Juli 1957

Geol. Jb.	Band 74	S. 653—676, 24 Abb.	Hannover / Juli 1957

Beispiele aus der seismischen Bodenforschung

Von Leo Ruprecht und Waldemar Zettel *)

Mit 24 Abbildungen

Unter dem obigen Titel hat der eine von uns 1953 an anderer Stelle (W. Zettel 1953) eine Anzahl von Meßbeispielen aus dem wohl wichtigsten Teilgebiet der geophysikalischen Lagerstättenforschung veröffentlicht.

Es ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, erneut einen Ausschnitt aus dem überaus reichhaltigen Material an Meßbeispielen zu geben und insbesondere die in den letzten Jahren erzielten Fortschritte deutlich werden zu lassen.

Dabei werden die Arbeitsgebiete der Refraktionsseismik und der Reflexionsseismik getrennt zu behandeln sein, und es ist der letzteren entsprechend der weitaus stärkeren praktischen Bedeutung auch ein erheblich größerer Raum zuzumessen.

Ausgehend von dem in der Erdbebenseismik entwickelten Verfahren, beobachtet

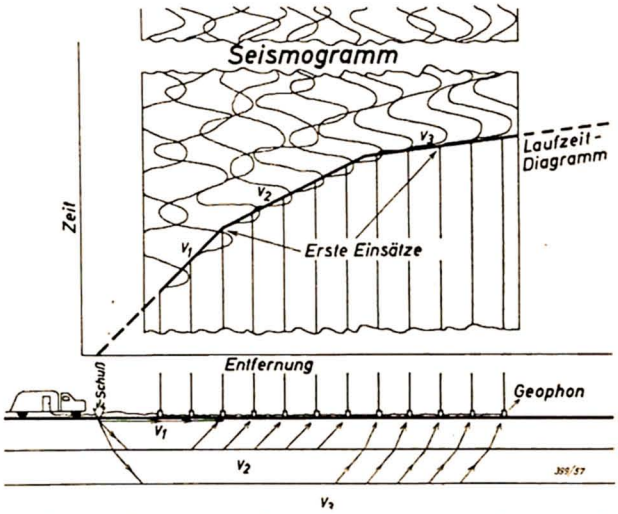


Abb. 1. Schematische Darstellung einer refraktionsseismischen Meßlinie.

Unter der Erdoberfläche liegen drei Schichtserien mit unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit, v_1, v_2, v_3, von oben nach unten zunehmend. In einem Sprengloch links im Bild wird eine Ladung gezündet. Von der Sprengstelle pflanzt sich halbkugelförmig die Schallwelle fort. Auf der meist mehrere Kilometer langen Beobachtungsflucht stehen auf dem Erdboden die Seismographen (Geophone). Sie nehmen die Schallimpulse auf und zeichnen mittels elektrischer Zusatzgeräte die Bodenbewegung auf Papier- oder Magnetbandstreifen auf. Das Laufzeit-Diagramm ist über der Meßstrecke schematisch wiedergegeben. Die ersten Ankunftszeiten der Schallwelle an den Geophonen liegen nicht auf einer Geraden, sondern wegen der Unstetigkeitsgrenzen v_1 bis v_3 auf einer mehrfach geknickten Linie. Der schußnahe Ast v_1 stellt die Laufzeit der direkten, horizontal gelaufenen Welle dar. Der Knickpunkt v_1/v_2 ist die Zeitgleiche der direkt gelaufenen Welle mit der an der Unstetigkeitsfläche v_1/v_2 refraktierten Welle. Der Knickpunkt v_2/v_3 ist eine weitere Zeitgleiche der Laufwege über die Grenzflächen v_1/v_2 und v_2/v_3. Durch die Knickpunkte, ihre Entfernungen und die jeweils ablesbaren Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den Schichtmedien ist die Tiefenlage jeder Grenzfläche berechenbar.

*) Anschrift der Autoren: Dr. Leo Ruprecht und Dr. Waldemar Zettel, Prakla, Hannover, Haarstr. 5.

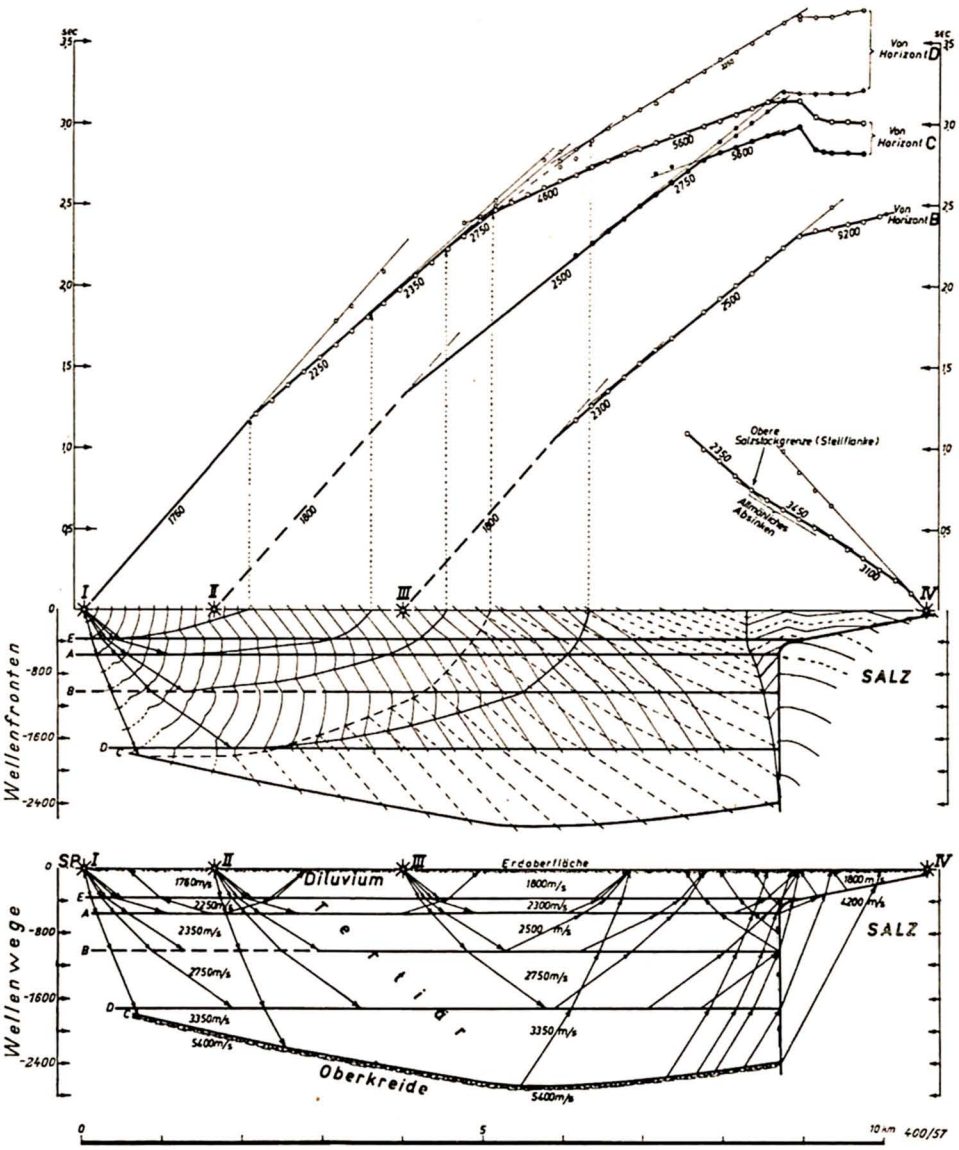


Abb. 2. An einem gemessenen geologischen Beispiel nach v. Helms (1951) mit zahlreichen Unstetigkeitsflächen und Neigung der Schichten sowie mit abrupten Änderungen im Gebirgsbau durch einen Salzstock wird der Verlauf der seismischen Wellen und der Wellenstrahlen unter Beachtung der Refraktionsvorgänge an den Grenzflächen dargestellt.

man in der Refraktionsseismik die Laufzeiten der longitudinalen Wellen als Funktion der Entfernung von der Sprengstelle.

Aus dem Verlauf der Laufzeit-(Entfernungs-)Kurven kann man auf die Schichtung des Untergrundes schließen (Abb. 1). Zur Auswertung gelangt neben der Laufzeit der direkt an der Erdoberfläche verlaufenden Welle auch die der Kopfwellen, die von jeder Grenz- oder Unstetigkeitsfläche nach oben gesandt werden. Ihre Laufzeit steht in Abhängigkeit von der Tiefenlage der Grenzfläche, den herrschenden Wellen-Geschwindigkeiten und der Registrierentfernung. Die Laufgeschwindigkeiten der Wellen in den einzelnen Medien können bei horizontaler Schichtung der

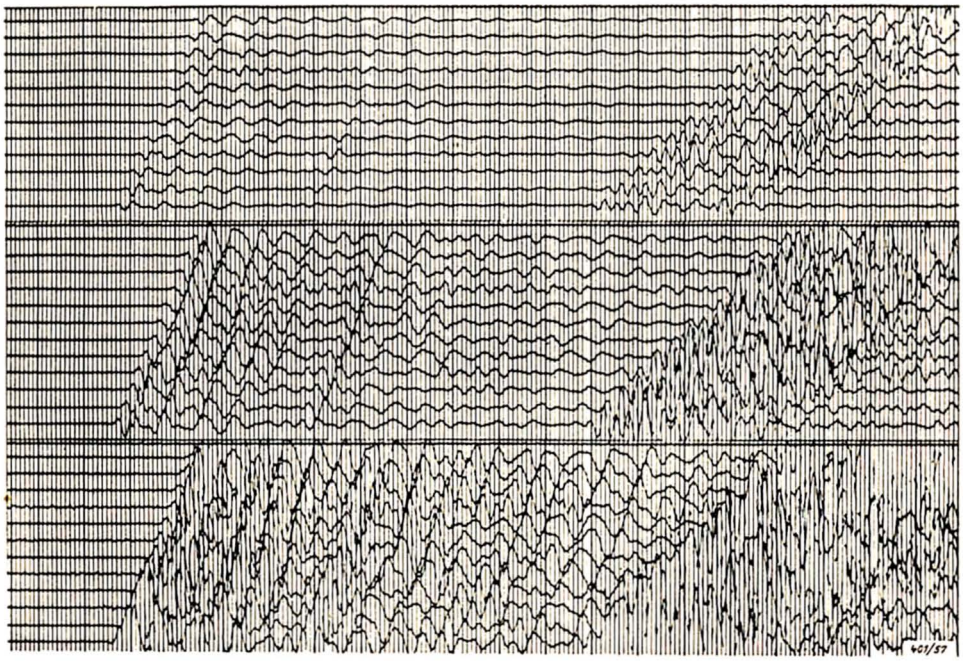


Abb. 3. Neben den ersten Schwingungseinsätzen sind in der Refraktionsseismik auch später eintreffende von Wichtigkeit, da sie Auskunft über Unstetigkeitsgrenzen geben, die mit den ersten Einsätzen nicht erfaßt wurden. In der Technik der Magnetbandaufnahme kann, wie die Abbildung zeigt, die Lesbarkeit der Schwingungsbilder durch mehrmaliges Abspielen der Bänder unter Verwendung geänderter Apparatureinstellungen — hier des Verstärkungsgrades — wesentlich erhöht werden. Die senkrechten Strichmarkierungen auf den Diagrammen stellen die Zeitzählung dar. Die stärkeren Striche haben einen Abstand von 1/10 Sekunde, die schwächeren 1/100 Sekunde.

Laufzeitkurve direkt entnommen werden. Liegen die Schichten geneigt, dann erscheinen in den entsprechenden Ästen der Laufzeitkurve infolge der Veränderung der Mächtigkeiten im Hangenden der refraktierenden Grenzflächen Scheingeschwindigkeiten, aus denen die wahren berechnet werden können, wenn man in entgegengesetzter Richtung eine zweite Refraktionslinie aufnimmt. Ist die Lagerung des Gebirges abrupt verändert, zum Beispiel durch Brüche oder Schichtsteilstellung, tritt dieses in den Laufzeitkurven durch eine ebenso abrupte Laufzeitänderung in Erscheinung (Abb. 2).

Zur Aufnahme der seismischen Wellen werden heute elektrisch registrierende Geräte benutzt, welche die Schwingungen auf photographischen Papierstreifen oder auf Magnetbänder (P. VETTERLEIN 1956) aufzeichnen, wie sie in der Reflexionsseismik üblich sind. Verändert gegenüber der Reflexionsseismik ist lediglich die bevorzugte Aufnahme niederfrequenter Schwingungen von etwa 3 bis 20 Hz, da diese Frequenzen besonders über größere Entfernungen sich durch starke Amplituden auszeichnen (Abb. 3 und 4). In letzter Zeit geht man auch zu ferngesteuerten unbemannten Meßstationen über, um bei einem geringen Personalaufwand möglichst viele refraktionsseismische Meßwerte gleichzeitig zu erhalten.

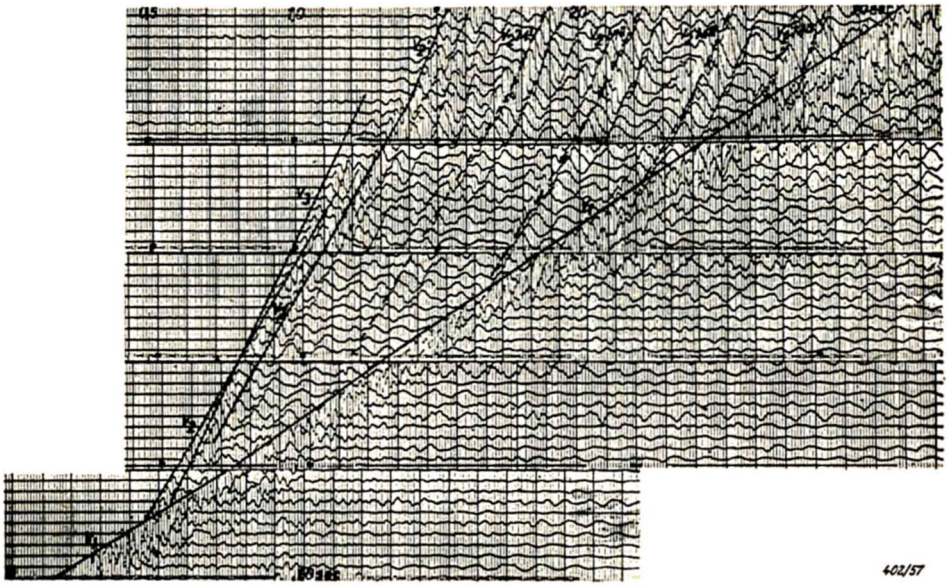


Abb. 4. Refraktionslinie im Seismogramm über einen Zeitablauf von 3 Sekunden. Mit v_1, v_2 und v_3 sind die seismischen Einsätze für ein Dreischichtenproblem ähnlich dem Schema Abb. 1 bezeichnet, die je nach Schußentfernung als erste oder spätere Einsätze erscheinen. Mit v_2' ist der erste negative Schwingungsausschlag nach dem Einsatz von v_2 gekennzeichnet. Die Markierungen v_2' M^{I} bis v_2' M^{IV} entsprechen weiteren Einsätzen von v_2, deren Ursprung multipler Art ist; denn die Zeitdifferenz der Impulse ist jeweils gleich der Reflexionszeit für v_2 am Sprengort. Die Einsätze entstehen durch eine mehrfach hin- und herpendelnde Reflexion der Wellen zwischen der Oberkante von v_2 und der Erdoberfläche. Jeder multiple Reflexionsvorgang erzeugt in diesem Falle beim erneuten Auftreffen auf die Oberkante von v_2 eine weitere refraktierte Welle.

Es wird immer ein Vorzug der Refraktionsseismik gegenüber der Reflexionsseismik bleiben, daß in den Laufzeitkurven neben der Tektonik die Geschwindigkeit der Schichten, also ein durchaus spezifischer Kennwert, erfaßt wird, so daß eine qualitative petrographische Erkenntnis möglich ist. Begrenzt wird ihre Anwendbarkeit für größere Tiefen durch die vorhandenen Geschwindigkeitsverhältnisse, insofern als eine Schicht, um selbst und mit allen liegenden Schichten kartierbar zu sein, im Verhältnis zur jeweils hangenden Schicht eine merklich höhere Geschwindigkeit haben muß.

Wesentlich häufiger benutzt man heute anstatt des Refraktionsverfahrens das Reflexionsverfahren. Man arbeitet hier nach dem gleichen Prinzip wie beim Marine-Echolot, in der Radartechnik oder bei den Ionensphärenlotungen. Elastische Wellen werden von einer dicht an der Oberfläche gelegenen Sprengstelle oder von einem Fallgewicht ausgesandt, an unterirdischen Schichtgrenzen reflektiert und von zahlreichen Seismographen, die in 10—40 m Abstand auf einer Geraden angeordnet sind, aufgezeichnet (Abb. 5). Die Bewegungen aller Seismographen (gewöhnlich 24 oder

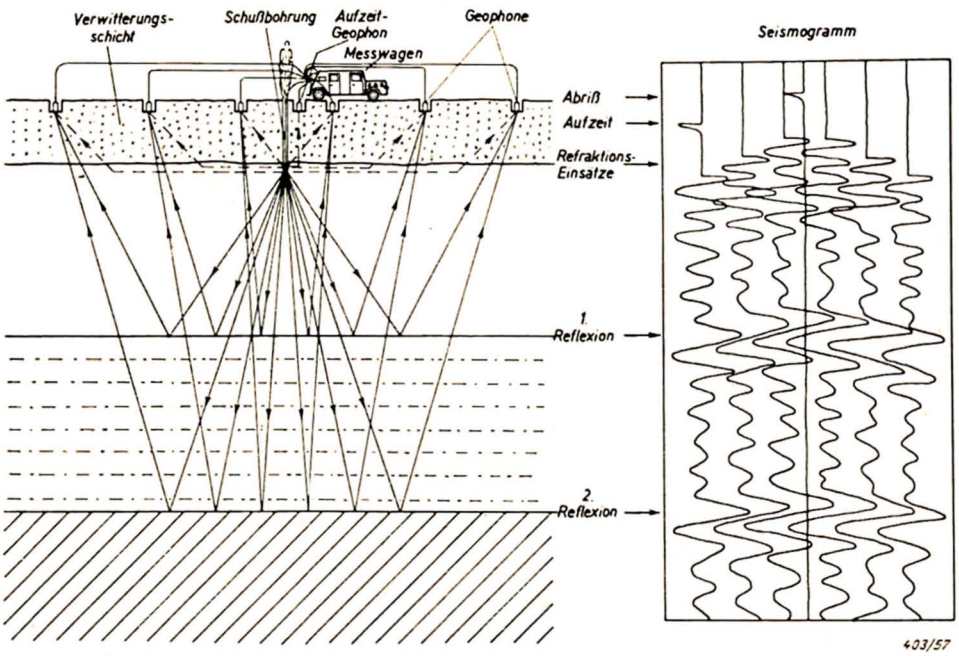


Abb. 5. Schematisches Bild für die Entstehung eines Reflexionsseismogrammes.
Unter einer lockeren Deckschicht liegen zwei Schichten verschiedenen Materials. Deren Mächtigkeit soll bestimmt werden. Dazu werden längs einer Geraden in 10 bis 40 m Abstand 24 oder 32 Seismographen (Geophone) aufgestellt (nur sechs davon gezeichnet). In der Mitte dieser Meßlinie wird eine Sprengladung an der Unterkante der Deckschicht, gewöhnlich im Grundwasser, gezündet. Die Bewegungen aller Seismographen werden elektrisch zu einem Meßwagen übertragen und dort auf einem Film oder Magnetband registriert. Das Seismogramm ist im seitlichen Teil der Abbildung schematisch gegeben. In der Mitte wird der Moment des Schusses durch den „Abriß" registriert. Das Aufzeitgeophon über der Sprengstelle mißt die Laufzeit vom Sprengort bis zur Erdoberfläche. Man sieht zunächst Einsätze von Wellen, die an der Oberfläche des Deckgebirges entlanggelaufen sind. Ihre Laufzeiten sind proportional der Entfernung. Später kommen im Seismogramm die reflektierten Wellen von den Oberkanten der beiden tieferliegenden Horizonte. Ihre Einsätze in den verschiedenen Entfernungen unterscheiden sich zeitlich weniger, weil ihre Laufwege weniger rasch wachsen als die horizontale Entfernung.

32) werden zusammen auf einem Film registriert. Hierdurch wird das Erkennen der Reflexionen wesentlich erleichtert, und ferner kann man den Verlauf des reflektierenden Horizontes ziemlich mühelos verfolgen: Der Untergrund wird gleichsam photographiert. So ergibt das Seismogramm eine unmittelbare Anschauung des Unter-

grundes (Abb. 6). Dieses ist ein großer Vorteil des reflexionsseismischen Verfahrens vor allen anderen.

Von der Sprengung wird ein breites Frequenzband elastischer Wellen ausgesandt. Durch bodenmechanische Vorgänge werden große Teile der ausgesandten und auch der reflektierten Energie absorbiert, und zwar hinsichtlich der Frequenzen selektiv. Es treten demgemäß nur die amplitudenstarken Frequenzteile des Schwingungsbandes im Seismogramm in Erscheinung. Bei breitbandiger Filterung erkennt

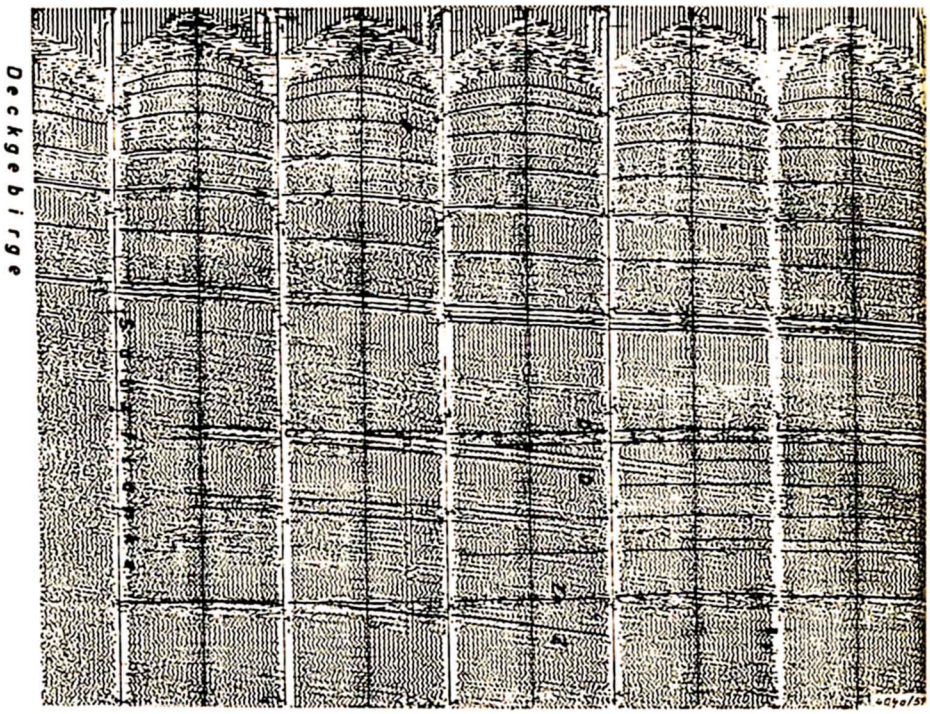
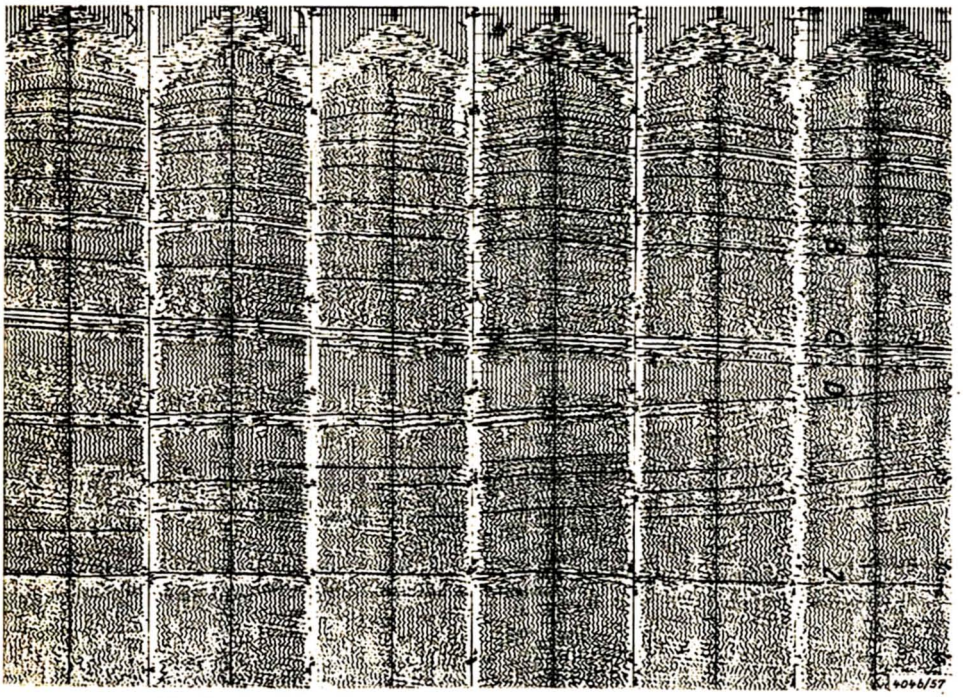


Abb. 6. Reflexionsseismogramme

Die Abbildung zeigt Seismogramme von 12 aneinander anschließenden Sprengungen auf man zahlreiche Reflexionen von untereinander gelegenen Schichtgrenzen. Die geologische gekennzeichnet durch einen reflexionsleeren Raum — liegt transgredierend das Deckgebirge rechts im Bild einen Juratrog — zwischen Horizont C und D — in der Salzrandmulde ab Falle). Horizont Z gibt die Tektonik der Zechsteinbasis wieder. Die Dubletten der Horizonte

man leicht die vorhandenen Frequenzen sowohl der Reflexionen als auch der störenden Oberflächenwellen (Abb. 7). Die unterschiedlichen Frequenzen der in bestimmten Horizonten reflektierten Wellen einerseits und der Störwellen andererseits erlauben das Herausheben und Löschen von Schwingungsbildern durch sinngemäße Beschneidung des Frequenzbandes (Abb. 8). Sind hochfrequente Reflexionsschwingungen vorhanden, so kann man entsprechend der kleineren Wellenlänge das Meßverfahren der „erhöhten Auflösung" anwenden, das die Erfassung geringerer Tiefen und Mächtigkeiten gestattet. Besitzt derselbe Reflexionshorizont mehrere Amplitudenmaxima verschiedener Frequenzen, so kann man seine Beschaffenheit mittels verschiedener Wellenlänge untersuchen (Abb. 9).

Nach dem vorstehend Gesagten kann man nicht erwarten, in der im Seismogramm vorliegenden reflektierten Schwingung die ursprünglich erzeugte wiederzufinden. Weitere Veränderungen des Schwingungsbildes entstehen durch ein Nachschwingen der Schichten im Untergrunde oder auch durch das Zusammenfließen mehrerer kurz aufeinanderfolgender Reflexionsimpulse, ferner noch durch Schwingungsvorgänge im Verstärker, wo die Verlängerung eines durch elektrische Bandfilter laufenden Impulses umgekehrt proportional zu deren Bandbreite ist.



aus Norddeutschland.

einer Flucht. Nach den ersten Einsätzen und nach einer kurzen Zone der Verwirrung erkennt Situation ist leicht zu übersehen: Über einem soeben erfaßten Salzstock im Bilde links — aus Kreide und Tertiär bestehend. Die Kreidetransgressionen — Horizont C — schneidet Die erdölführenden Schichten des Juras stehen hier in einer Fangposition (stratigraphische D und Z im linken Bildteil entstehen durch Projektion räumlicher Reflexionsvorgänge in eine Ebene.

Es besteht hiernach insbesondere auch keine Wechselbeziehung zwischen dem Schwingungsbild der Reflexion und der Mächtigkeit einer reflexionsseismisch erfaßbaren Einlagerung. Dies ändert sich, wie neuere Messungen ergeben haben, wenn die Mächtigkeit geringer als die benutzte Wellenlänge wird; es erscheint dann eine Abhängigkeit, die man zur Mächtigkeitsbestimmung von reflektierenden Gesteinsbänken benutzen kann (L. Ruprecht 1957) (Abb. 24).

Große Schwierigkeiten bereitet die große Schwankungsbreite der im Seismogramm zu erfassenden Bodenamplituden: Die Amplituden beim ersten Einsatz der

direkt ankommenden Welle verhalten sich zur Amplitude einer Reflexion aus einigen Kilometern Tiefe wie $10^5:1$. Um auswertbare Registrierungen zu erhalten, ist also eine Regelung der Empfindlichkeit, die die aufgezeichneten Amplituden konstant zu halten erlaubt, erforderlich. Zu diesem Zweck werden zwei Verstärkungsregelungen — und zwar meist gleichzeitig — angewandt. Eine einstellbare zeitabhängige Regelung läßt die Verstärkung im Laufe der Zeit etwa exponentiell anwachsen; die ersten Einsätze werden wenig verstärkt, erst bei den letzten (tiefen) Reflexionen wird der Verstärker voll ausgenutzt. Eine zweite, vollautomatische Regelung arbeitet

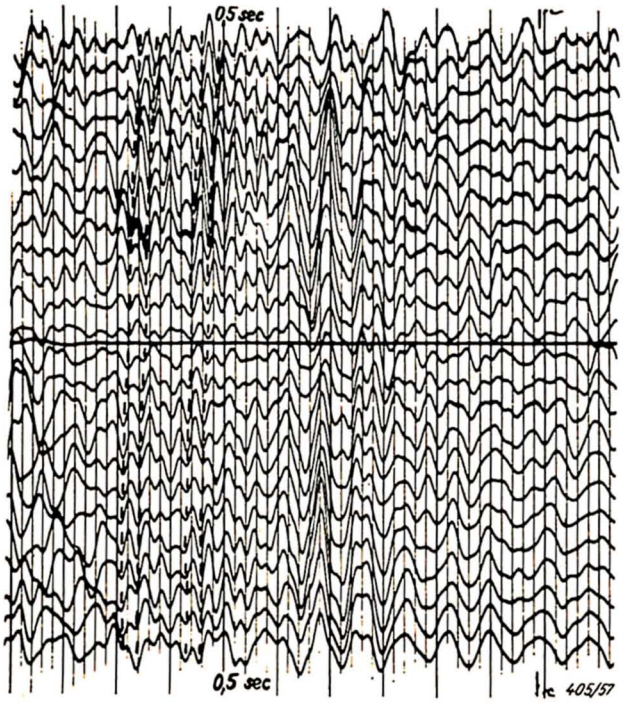


Abb. 7. Benachbarte seismische Unstetigkeitsgrenzen können im Seismogramm Reflexionen mit stark differierenden Frequenzen ergeben, wenn die Aufnahme mit breitem Frequenzband erfolgt. Die erste Reflexion schwingt mit 75 Hz, die zweite mit 25 Hz.

abhängig von der Amplitude der aufgenommenen Schwingung: Sie schaltet die Verstärkung unmittelbar nach einem starken Anwachsen der Amplitude herunter, gibt sie aber nach einer einstellbaren kurzen Zeit wieder frei. Diese Zeit bezeichnet man auch als die „Wiederkommzeit" der Verstärker.

Zur großräumigen Erfassung der Tektonik im Gebirge wird man eine längere Wiederkommzeit verwenden, um nur wenige, aber typische Reflexionshorizonte zu erhalten. Eine kurze Wiederkommzeit bewirkt das Auftreten zahlreicherer Reflexionsimpulse, gleichzeitig mit hochfrequenten Frequenzfiltern angewandt, ermöglicht sie das Messen mit „hoher Auflösung" (Abb. 10).

Um die meist senkrecht von unten eintreffenden Reflexionsschwingungen gegenüber den horizontal laufenden Störschwingungen zu bevorzugen, ist es notwendig, der im Gelände aufgestellten seismischen Apparatur eine Richtwirkung nach unten zu verleihen. Dies geschieht, indem man mehrere (2—50) Geophone, deren Abstände zur störenden Wellenlänge in einem bestimmten Verhältnis stehen, zusammen-

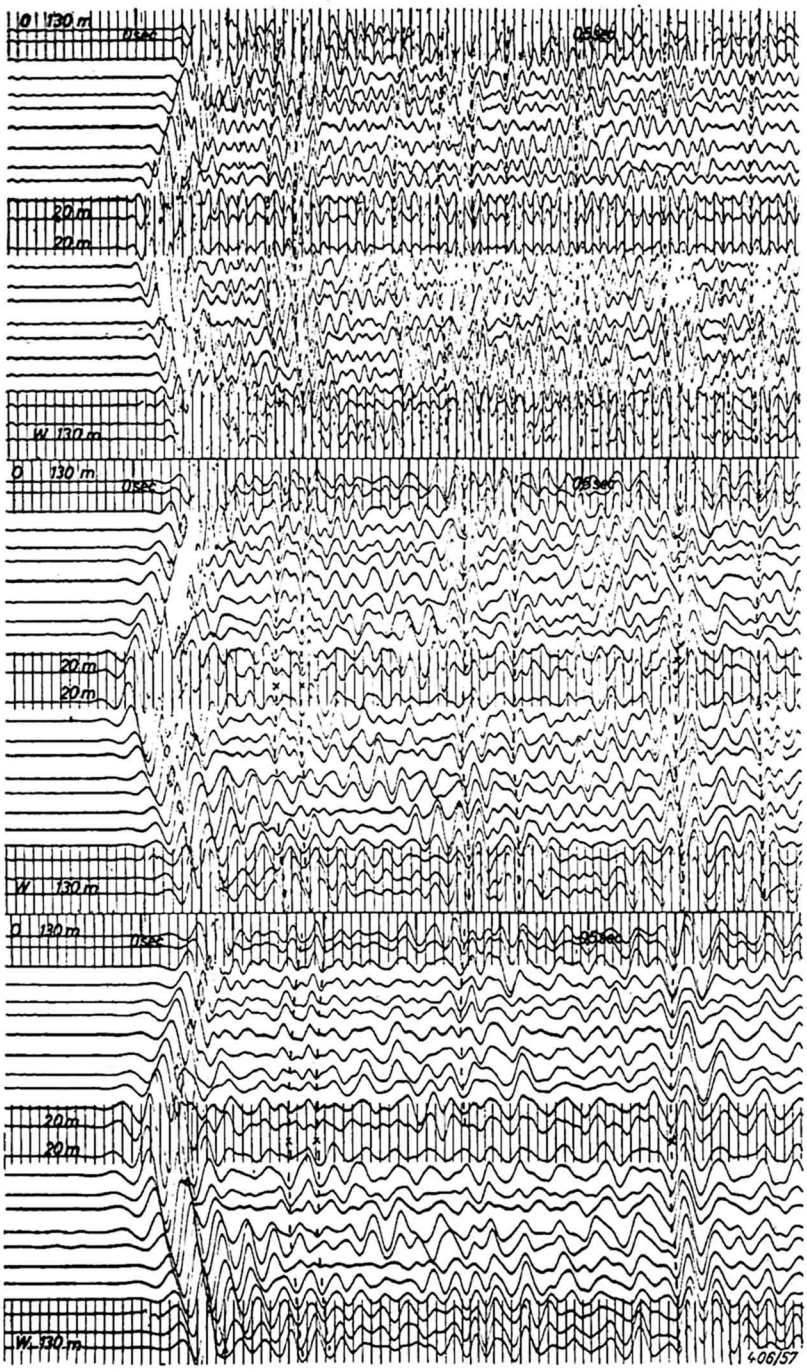


Abb. 8. Eine auf Magnetband aufgenommene Sprengung wurde mit verschiedenen Filterbandeinstellungen abgespielt.

Das obere Seismogramm zeigt eine hochfrequente, das zweite eine mittlere, das untere eine niederfrequente Bandeinstellung. Es ist offensichtlich, daß auf diesem Wege die Qualität einer Reflexion verändert werden kann.

schaltet. Es löschen sich dann die störenden an der Oberfläche laufenden Wellen durch Interferenz aus, während sich die gleichphasig von unten kommenden Reflexionswellen addieren. Die gleiche Richtwirkung kann auch sendeseitig erreicht werden, wenn eine Sprengladung nicht punktförmig, sondern der Wellenlänge entsprechend auf einer Flucht oder Fläche in Einzelladungen verteilt gleichzeitig gezündet wird (Abb. 11).

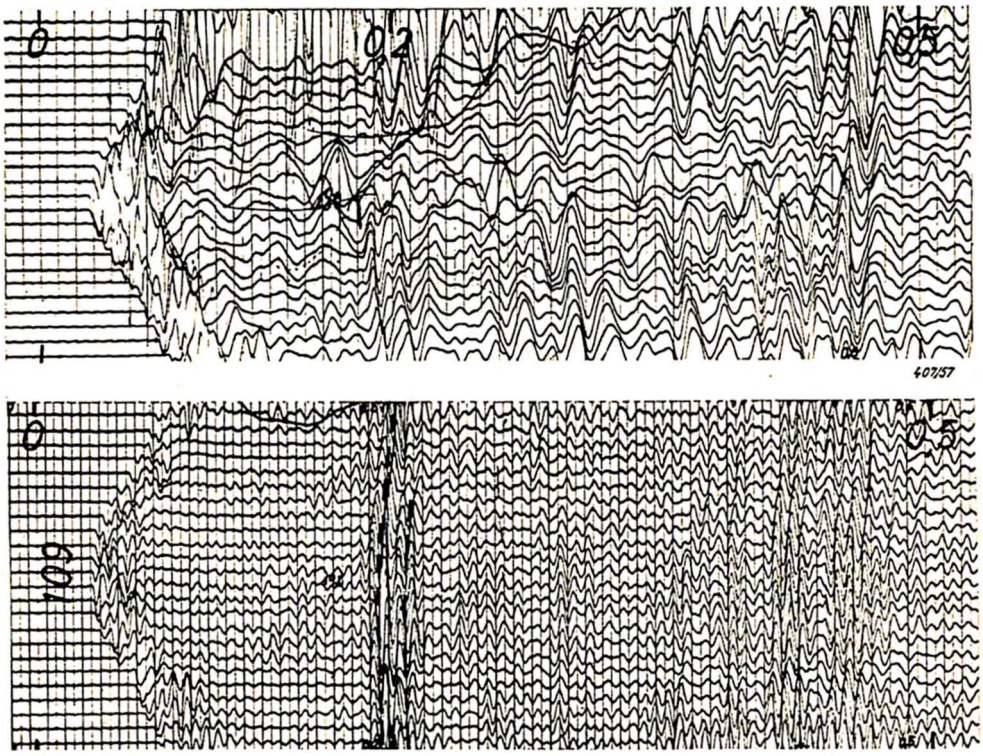


Abb. 9. Zwei an gleicher Stelle gewonnene Seismogramme zeigen, daß der bei 0,2 Sekunden auftretende Reflexionshorizont mit unterschiedlicher Frequenz und zwei Amplitudenmaxima reflektiert.

Die breitbandige Aufnahme mit 30/250 Hz (oberes Seismogramm) ergibt eine starke Amplitude mit 65 Hz, bei Verengung des Bandes auf 90/250 Hz (unteres Seismogramm) erscheint das Amplitudenmaximum mit 150 Hz. Letzteres muß amplitudenschwächer sein, da es von der 65-Hz-Schwingung unterdrückt wird. Die gleiche Erscheinung ist auch bei den späteren Reflexionen zu erkennen, jedoch verschiebt sich mit zunehmender Tiefe das Amplitudenverhältnis noch mehr zugunsten der niederfrequenten Schwingungen.

Neben der Anordnungsform der Sender und Empfänger spielt in der Seismik ihre Verankerung im Erdreich ebenfalls eine wesentliche Rolle.. Die Abbildungen 12 und 13 lassen dieses deutlich erkennen.

Die Schwierigkeiten, die bei direkter Aufnahme eines Schusses mittels Lichtschreiber-Oszillographen auftreten, sind bereits angedeutet worden. Große Anforderungen werden an die Konstruktion der Verstärker und auch an das Bedienungspersonal gestellt, da die Einstellung der zeitabhängigen Regelung sowie der Filte-

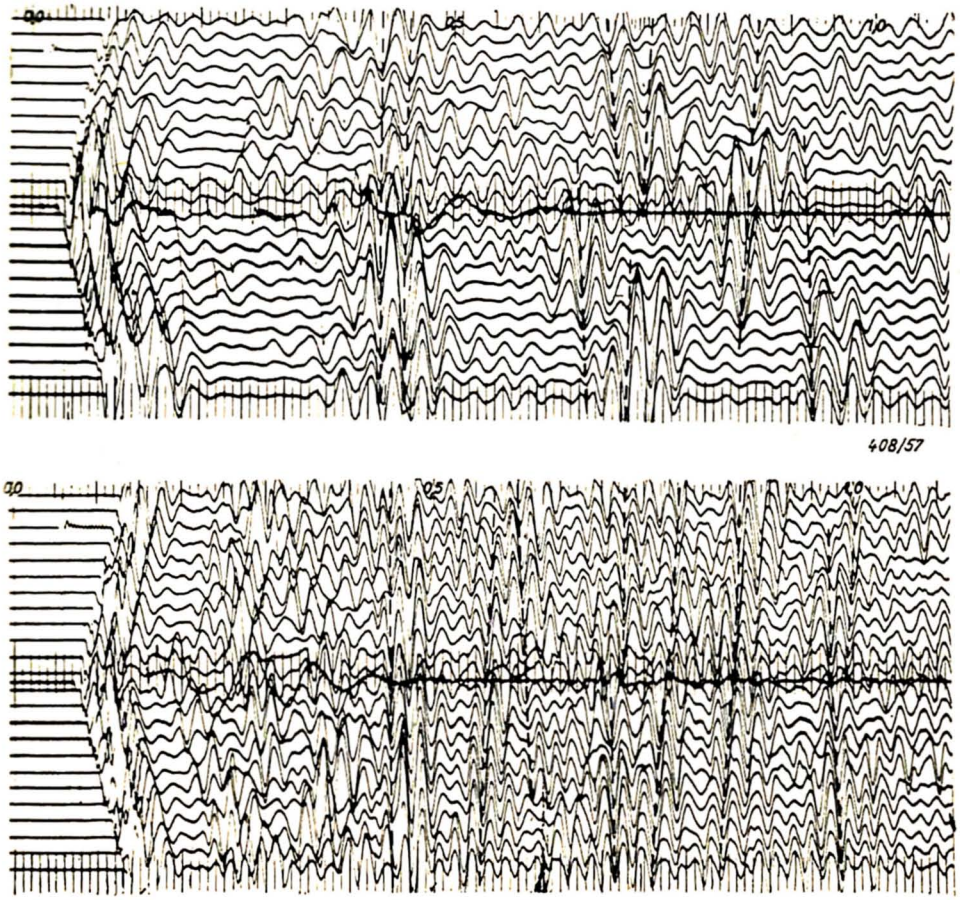


Abb. 10. Die am gleichen Ort aufgenommenen Seismogramme über gefaltetem, produktivem Karbon zeigen deutlich die Wirkung der Wiederkommzeit der Verstärker nach jedem neuen Reflexionsimpuls.

Das obere Seismogramm hat eine längere Wiederkommzeit als das untere. Bei den zahlreichen aus verschiedenen Ebenen und zum Teil gleichzeitig eintreffenden Reflexionsimpulsen ist das Auflösungsvermögen im oberen Seismogramm unzureichend.

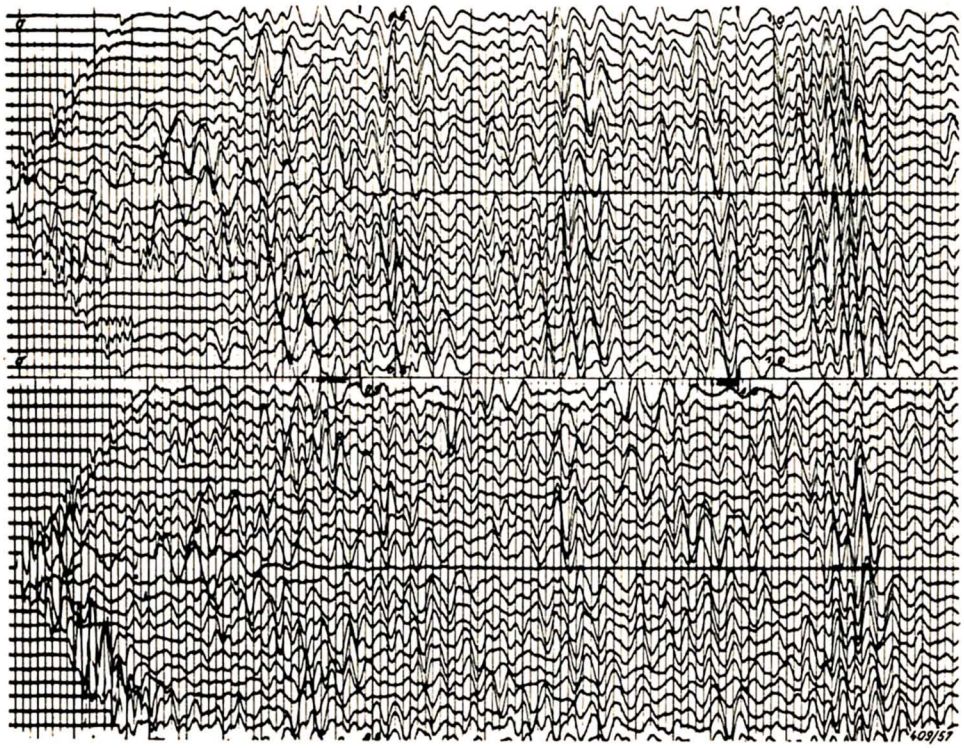


Abb. 11. Durch flächenhafte Anregung der seismischen Welle am Schuß und flächenhaften Empfang mittels mehrerer Geophone je Schreibspur werden durch Interferenz die horizontal laufenden Störwellen weitgehend gelöscht.
Das Bild zeigt im unteren Seismogramm eine punktförmige Anregung, im oberen eine flächenhafte.

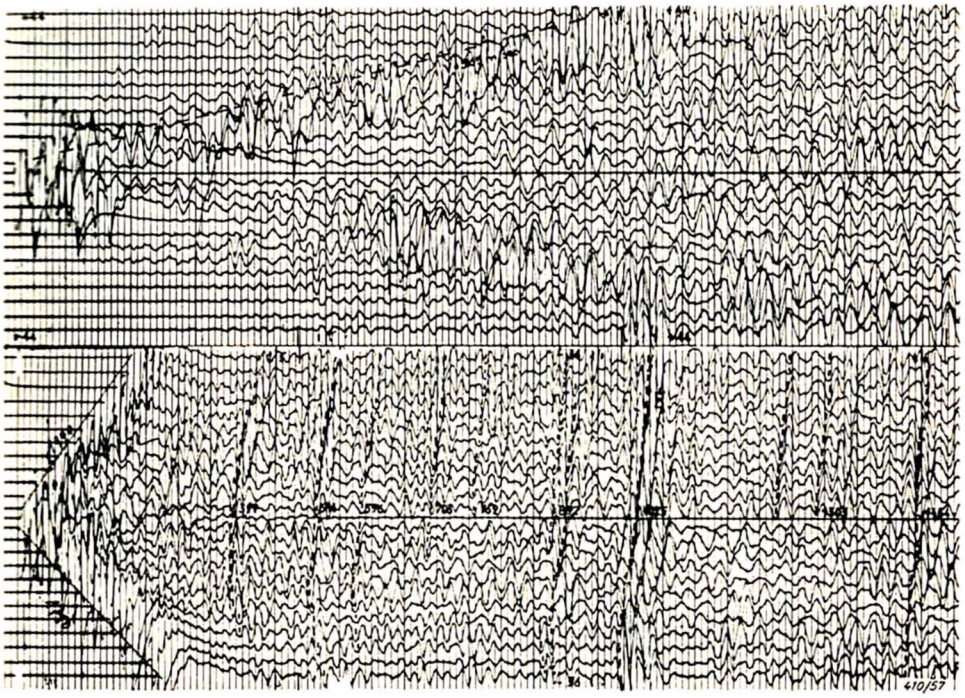


Abb. 12. Das Anbringen der Sprengladung im trockenen oder wasserführenden Gebirge beeinflußt entscheidend die Qualität des Reflexionsbildes.
Beide Seismogramme wurden an gleicher Stelle aufgenommen, beim oberen liegt der Schuß oberhalb des Grundwassers, beim unteren darin.

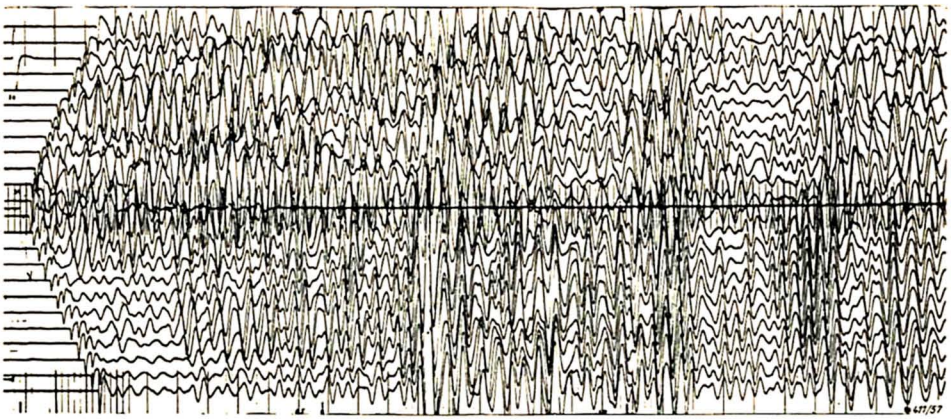


Abb. 13. Eine schlechte Verankerung der Geophone in der Erde, besonders bei weichen und lockeren Medien, stört die Qualität der Reflexionsschwingungen.
Der obere Teil des Seismogrammes ist ein Beispiel für eine schlechte, der untere für eine gute Verankerung an gleicher Stelle der Erdoberfläche.

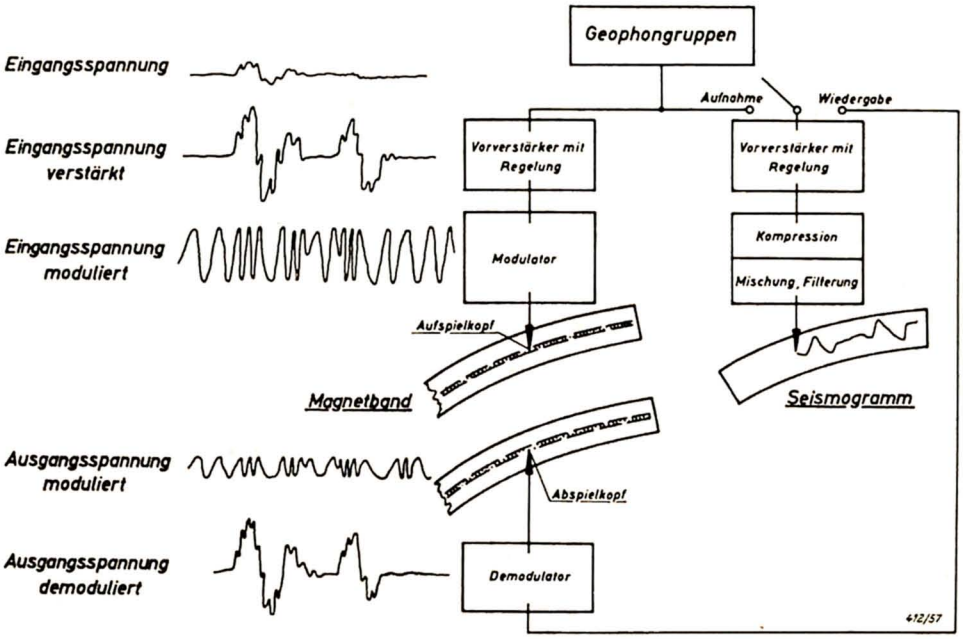


Abb. 14. Schema der Aufnahme- und Wiedergabeapparatur für das Magnetbandverfahren.

Abb. 15. Geländegängiger Meßwagen mit eingebauter Apparatur (24 Kanäle) für Refraktions- und Reflexionsseismik.

An der Rückwand des Führerhauses ist in der Meßkabine die seismische Apparatur befestigt. Der hintere Teil der Kabine dient als Dunkelkammer zum Entwickeln der photographischen Registrierstreifen. Das 24adrige Kabel für den Anschluß der Geophone im Gelände — in der äußeren Rückwand des Wagens im Transportraum befestigt und auf dem Erdboden liegend mit Rückentrage — wird im Gehen ausgelegt. Die hintere Seitenwand des Wagens zeigt den geöffneten Geophonschrank. Am Führerhaus ist hinten ein Kurbelmast für die Antenne der drahtlosen Schuß- und Nachrichtenübermittlung zu sehen.

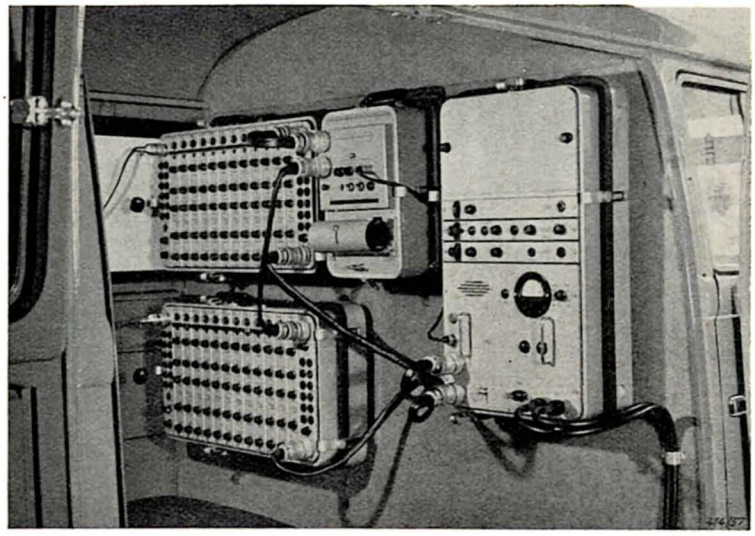


Abb. 16. Einblick in die Meßkabine des Registrierwagens mit den einzelnen in Koffern eingebauten Apparaturteilen: rechts der Stromversorgungskoffer, mitten der Oszillograph für photographische Aufnahmen (25 Spuren), links zwei Verstärkerkoffer.

Die einzelnen Teile sind durch einen Handgriff aus der Halterung herauszunehmen.

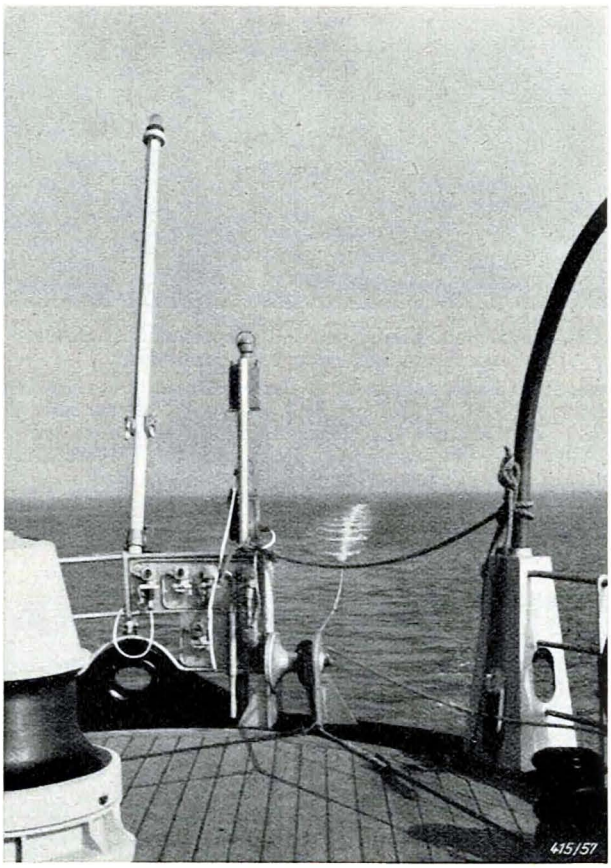


Abb. 17. Blick vom Heck des Meßschiffes auf die schwimmende Hydrophonkette während der Fahrt.

Die weißen Gischtköpfe lassen die Lage der einzelnen Hydrophone erkennen. Der Schuß wird seitlich davon gezündet, sobald sich die Meßkette in zentraler Position zu ihm befindet.

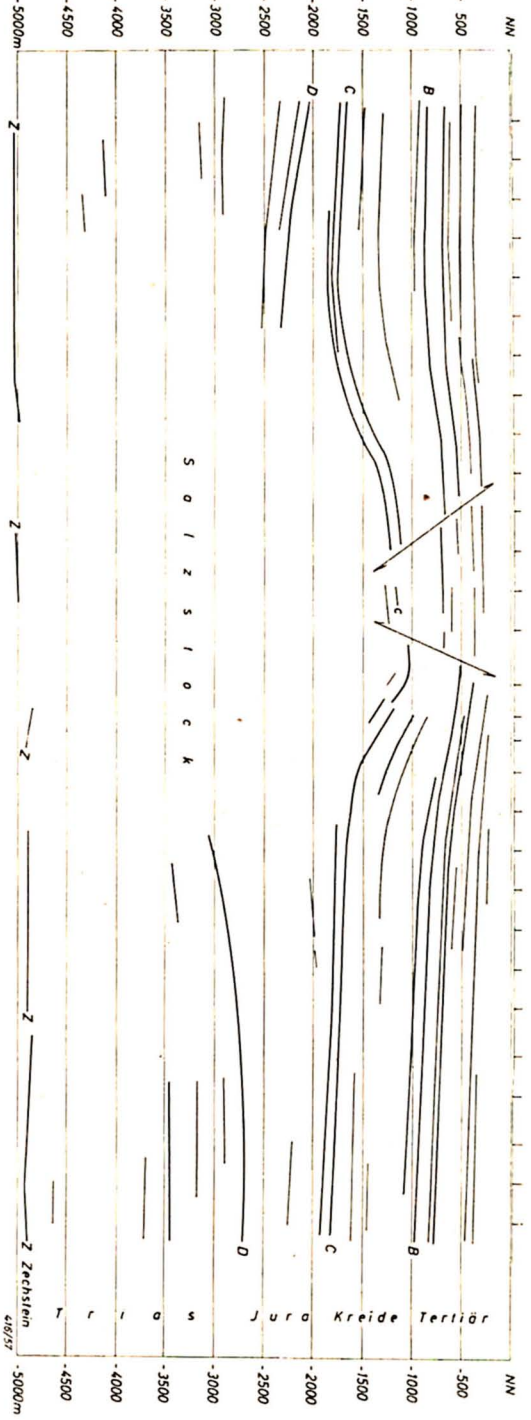


Abb. 18. Reflexionsseismischer Schnitt eines Salzstockes in Norddeutschland unter tertiärer und kretazischer Bedeckung, die über dem Salz angehoben und in Form eines Scheitelgrabens gerissen ist.

Die Albtransgression kappt in den Salzrandmulden einen Juratrog zwischen den Horizonten C und D. Die Zechsteinbasis ist mit dem Buchstaben Z bezeichnet. Ölfangmöglichkeiten sind sowohl im aufgewölbten Deckgebirge über dem Salz als auch an den aufgeschleppten, zerbrochenen Flanken vorhanden (Beginn des reflexionsleeren Raumes in der Bildmitte), ferner im Ausbiß des Juras unter der Transgression (vergleiche auch Abbildung 6).

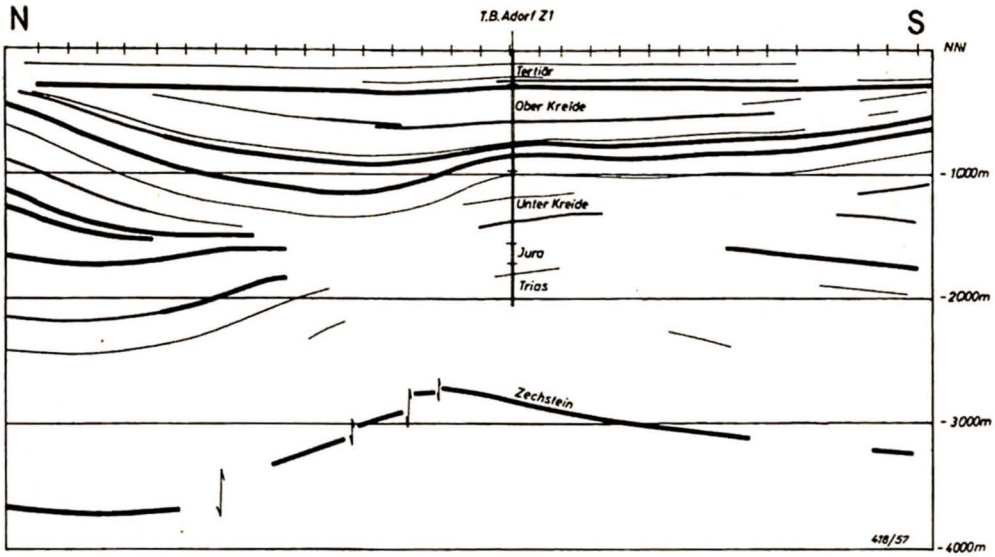


Abb. 19. Zechsteinantikline in NW-Deutschland mit mehreren Transgressionen im jüngeren Mesozoikum unter tertiärer Bedeckung.

Stärkere Schichtreduktionen und erheblich verschiedene Lage der Antiklinenachsen in den tektonischen Stockwerken erfordern ein kompliziertes Rechen- und Konstruktionsverfahren (E. GRAESER, W. LODE & G. POTT 1957), da die seismischen Geschwindigkeiten der verschiedenen Schichtserien stark differieren und somit die Wellenstrahlen im Raum erheblich gebrochen werden. Die Raumbrechung tritt verstärkt dann in Erscheinung, wenn neben der Verschiebung der Faltungsachsen und Schollen ein Drehen der Streichrichtung vorliegt.

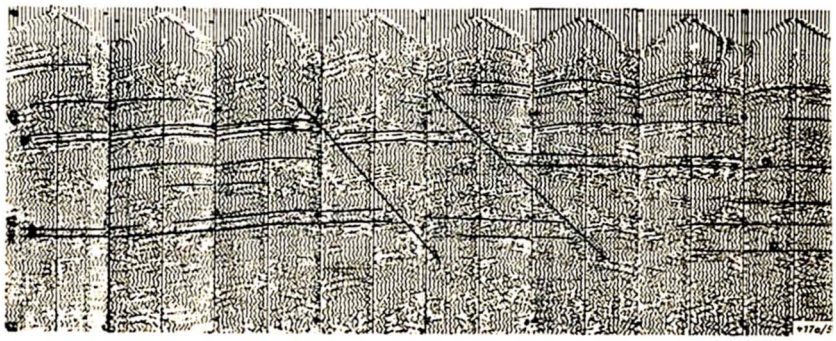


Abb. 20. Seismogrammserie mit Bruchschollentektonik der tertiären
Die Ölfangstellen liegen

rung und in gewisser Hinsicht auch des Verstärkungsgrades der Verstärker entsprechend der zu erwartenden Energie vorher bestimmt werden muß.

Die neuere Technik der Magnetbandaufnahme eines Sprengschusses bringt hier einen wesentlichen Fortschritt, da die Aufnahme im wesentlichen ohne Regelung, ohne Filterung und auf einem Nachrichtenträger erfolgt, der über einen sehr großen Frequenz- und Dynamikbereich verfügt. Hierdurch ist es möglich, durch nachträg-

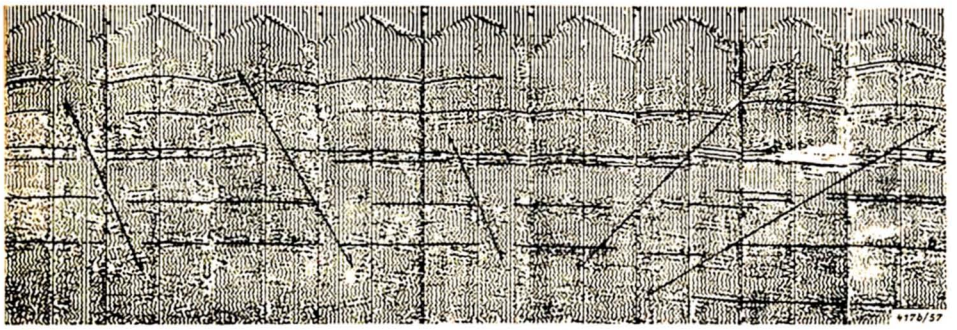
liches Abspielen eines gewonnenen Magnetbandes, unter Umständen mit vielfach variierten Wiedergabebedingungen, gewünschte Effekte zu verstärken und unerwünschte auszulöschen. Ein Schema der Magnetbandtechnik zeigt Abb. 14.

Der Hauptwert der Magnetbandaufnahmen dürfte aber noch darin liegen, daß es möglich ist, Effekte aus dem Oszillogramm bzw. Magnetogramm herauszuholen, die mit direkten Aufnahmemitteln physikalisch nicht erreicht werden können.

Es handelt sich hierbei um die Methode der Kopfverschiebung zum Ausgleich der durch Geophonkopplung, Verwitterungszonen und ähnliche Effekte bewirkten Verschiebungen der einzelnen Spuren im Seismogramm gegeneinander, die mit einfachen Mitteln auszuführen sind, ferner um Abspielmethoden unter Veränderung der Abspielgeschwindigkeit, um die Regeleigenschaften der Verstärker zu verbessern. Es können weiterhin automatische Recheneinrichtungen durch Magnetbänder gesteuert werden, um Korrekturen und Berechnungen von Konstruktionsschnitten schnell und sicher zu ermöglichen. Die letzten Jahre haben bereits große Erfolge auf diesem Gebiet gebracht, und es ist zu erwarten, daß die Entwicklung auf dem Magnetbandgebiet in gleichem Tempo weiterschreitet.

Die Messungen werden im Gelände unter oft schwierigen Verhältnissen ausgeführt, so daß die Apparatur möglichst leicht und klein, aber doch sehr robust sein muß. Alle Bauteile sind daher in tragbaren Kofferbehältern untergebracht, damit auch Gebiete vermessen werden können, die selbst für geländegängige Fahrzeuge nicht mehr passierbar sind (Abb. 15 und 16).

Da die Geologie des Kontinentes sich in seinem Schelfgebiet fortsetzt, werden auch die von der Flachsee bedeckten Gebiete zur Aufsuchung von Lagerstätten seismisch vermessen (Abb. 17). Das Verfahren der Messung vom Schiff aus mit schwimmenden Seismographen (Hydrophonen) läßt infolge der leichten Beweglichkeit der Meßkette und wegen des Fortfallens von Sprengbohrungen einen besonders schnellen Arbeitsfortschritt erreichen (40—70 Messungen täglich). In langsamer Fahrt wird die Hydrophonkette an den Sprengbooten vorbeigeschleppt und nimmt laufend Messungen



Rheintalgrabenfüllung bei schwach geneigten Schichten.
an den Störungen.

längs einer Flucht auf. Einen erheblichen Aufwand erfordert die Ortung der Meßstellen, besonders wenn sie außerhalb von bestehenden Sichtzeichen erfolgt, so daß Funkortung und zusätzliche Markierungszeichen erforderlich werden. Erschwert wird die Seeseismik durch zu groben Seegang, wenn der Geräuschpegel die seismische Energie überdeckt und die zahlreichen Beiboote in ihrer Manövrierfähigkeit behindert werden.

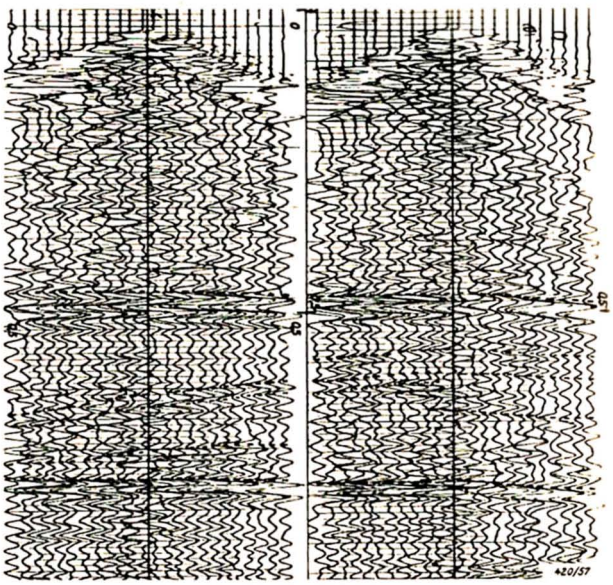


Abb. 22. Die unmittelbar benachbarten Aufstellungen entstammenden Seismogramme enthalten wie in Abbildung 21 zwei deutliche Reflexionshorizonte, im Hangenden von der Grenze Buntsandstein gegen Zechstein, im Liegenden vom Sulfat- und Karbonatfuß des Salzes.

Die divergent zwischen beiden liegenden schwächeren Reflexionen weisen auf eine Zyklenausbildung innerhalb des Salzes hin, deren Schichtung gefaltet ist. Die Aufnahmen stammen von einem Salzkissen aus dem südhannoverschen Raum, wo im Gegensatz zu Abbildung 21 noch jüngere Ausscheidungszyklen vorhanden sind.

Abb. 21. Schnitt einer Salzplatte aus dem mitteldeutschen Raum.

Rechts im Bild die reflektierenden Flächen von der Grenze Buntsandstein/Zechsteinsalz und aus dem Liegenden von dem Sulfat- und Karbonatfuß des Salzes. Nach einer — topographisch bedingten — Meßlücke ist links im Bild ein Zusammenrücken der Horizonte bei zerbrochener Lagerung zu erkennen. Die ansteigende Salzplatte gerät hier in den Auslaugungsbereich.

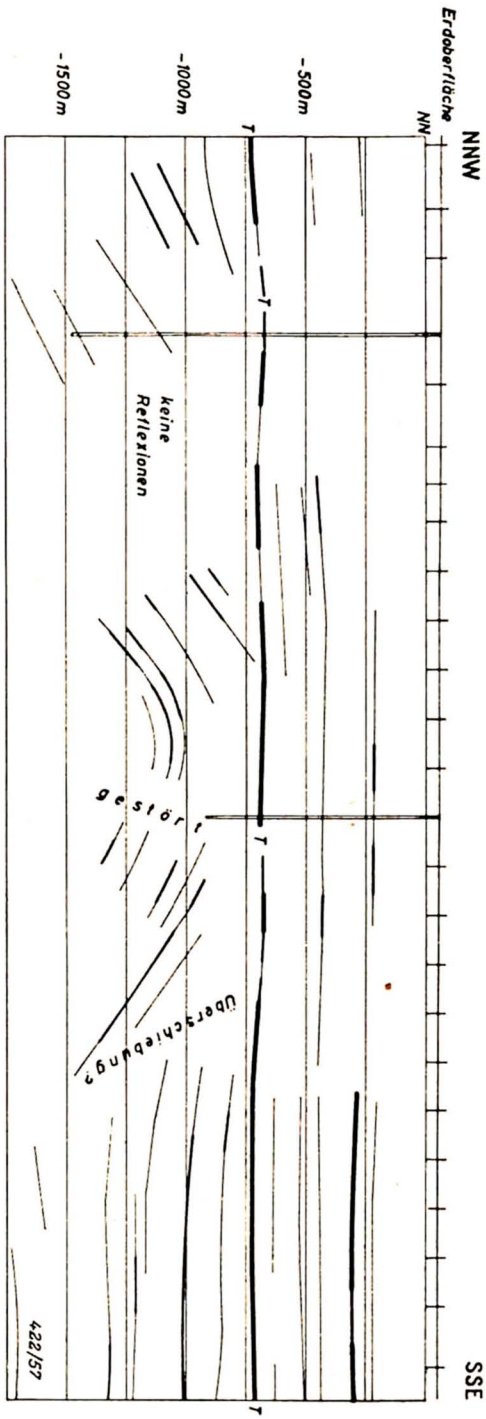


Abb. 23. Reflexionsseismischer Schnitt durch das kohleführende, gefaltete Oberkarbon Westdeutschlands unter Kreidebedeckung. Die Karbonfaltung kann verfolgt werden, soweit die Faltung und die Zerstückelung der Schichten in Schollen nicht zu intensiv ist. In dem Falle erscheinen reflexionsleere Räume. Eine stratigraphische Parallelisierung der Schichten gelingt bisher nur in besonders günstigen Fällen.

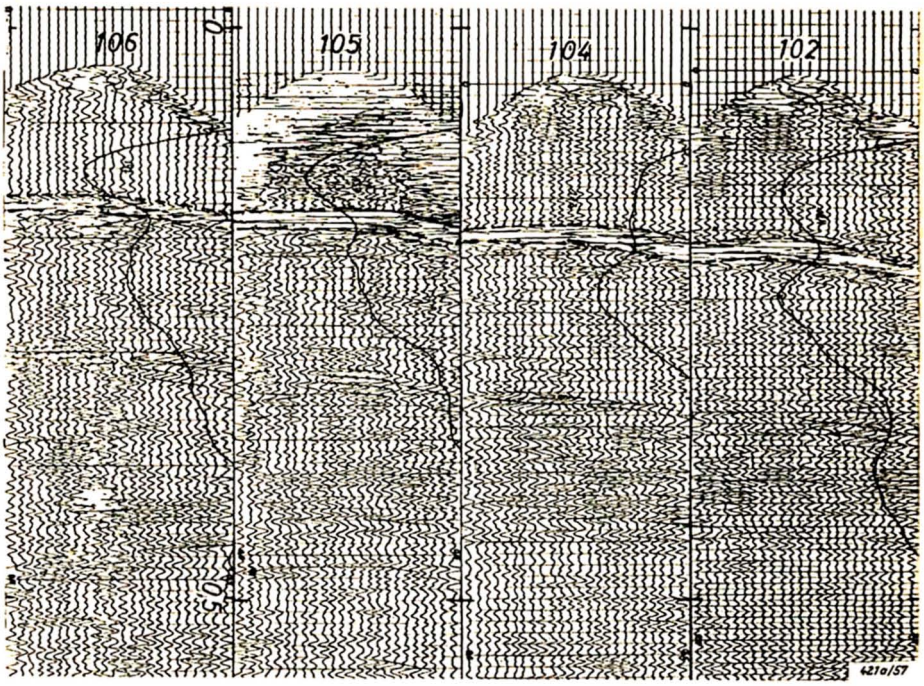
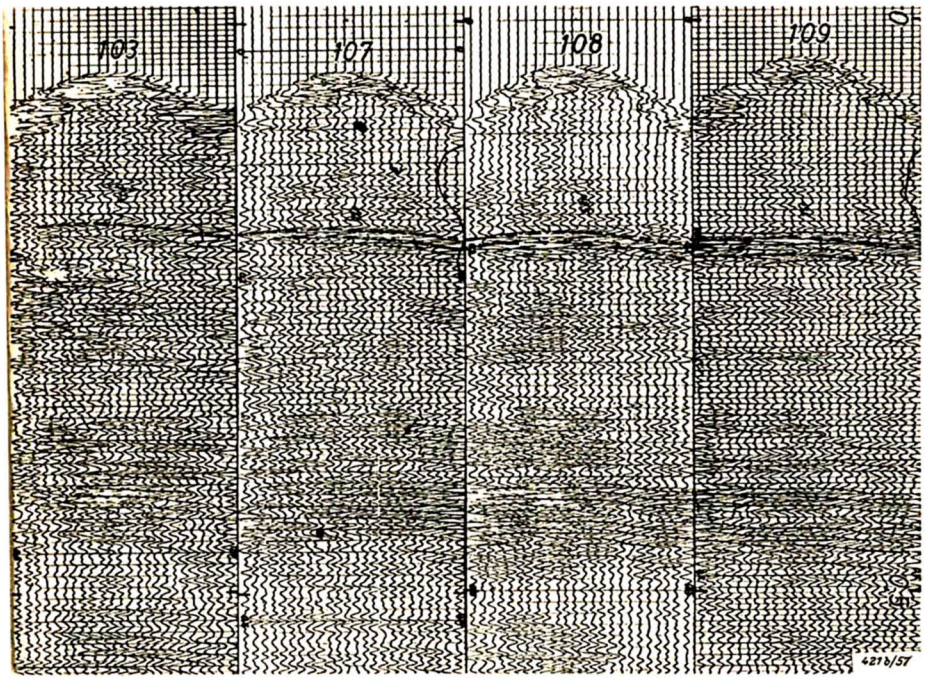


Abb. 24. Das deutliche Reflexionsband dieses Meßprofils stammt von einer
Die erbohrte Erzbank enthält starke fazielle Änderungen. Ihre Mächtigkeit schwankt zum
da eine Abhängigkeit zwischen Schwingungsbandbreite und

Mit diesen immer weiter entwickelten seismischen Meßausrüstungen und Verfahren sind in der letzten Zeit zahlreiche neue Lagerstätten aller Art gefunden worden. Man überdeckt bei der Prospektion das Mutungsgebiet entsprechend der Tektonik mit einem mehr oder weniger engmaschigen Netz von Meßfluchten, um aus den gemessenen Schnitten die gewünschten Strukturkarten herstellen zu können.

Im Erdöl kommt es auf die tektonische Kartierung des Gebirges an, um die Hochpositionen (Fangstrukturen) ölführender Schichten zu ermitteln. Solche sind auf Sattellinien (Abb. 18 und 19), vor Störungen bei geneigten Schichten (Abb. 20), beim Ausbiß des Ölträgers an einer Transgressionsfläche (Abb. 6) und bei seinem faziellen Auskeilen gegeben. Die letzte Art der Lagerstättenform ist seismisch nur dann zu erfassen, wenn der Ölträger selbst reflektiert. Es bestehen in dem Falle ähnliche Möglichkeiten, wie in der Seismik auf sedimentäre Eisenlagerstätten, die seit kurzem bekannt wurden (L. RUPRECHT 1957) (Abb. 24).

Von den überaus zahlreichen Zechstein-Salzlagerstätten werden nur wenige gebaut. Bei plattenförmiger Lagerung kann die Seismik neben der Mächtigkeit der Salzplatten die Störungen und Auslaugungszonen erfassen (Abb. 21). Tritt eine Stauung der Salzmassen zur Kissenform auf, kann die Form des Kissens durch je eine deutliche Reflexion im Hangenden und Liegenden des Salzes bestimmt werden. Zwischen den begrenzenden Reflexionen im Hangenden und Liegenden erscheinen



Trümmereisenerzlagerstätte mit kalkigem Bindemittel aus der Oberkreide von Peine.
Beispiel zwischen 0 und 9 Metern, was aus dem Reflexionsbild unmittelbar abzulesen ist, Amplitudenhöhe der Reflexion und Schichtbeschaffenheit vorhanden ist.

oft schwächere, die auf eine zyklische Sedimentation und beginnende Fließfaltung hinweisen. Ist die Kaliführung der Zyklen bekannt, so kann das Ausdünnen bzw. Anschwellen des betreffenden Zyklus bei nicht zu steiler Lagerung — wie sie besonders bei Salzstöcken vorliegt — verfolgt werden (Abb. 22).

Die sedimentären Eisenerzlagerstätten gewinnen in letzter Zeit immer mehr Bedeutung, da sie zahlreicher als bisher vermutet vorhanden sind. Sie erscheinen als Reflexionshorizont, wenn sie in mächtigere Tone und Mergel eingebettet sind, und können dann direkt untersucht werden. Durch neuere Messungen (L. RUPRECHT 1957) ist es möglich, die Faziesverhältnisse neben der Tektonik zu erfassen (Abb. 24).

In der Kohle (H. HILLER & L. RUPRECHT 1955) erlangt die Reflexionsseismik ebenfalls zunehmende Bedeutung, da die vorherige Kenntnis der Tektonik für die Festlegung von Markscheiden, Schachtansatzpunkten und die Vorrichtungsplanung wichtig ist. Vorkommen in germanotypen Faltungsgebieten sind am leichtesten seismisch zu untersuchen, alpinotyp gefaltete bereiten mehr Schwierigkeiten, da die Tektonik intensiver und die Diagenese der Gesteine meist fortgeschrittener ist, so daß die Reflexionsbilder weniger charakteristisch sind. Wertvolle Hinweise für die Bruchtektonik im Karbon ergeben auch die Reflexionen aus dem Deckgebirge, da sich die Brüche oft abgeschwächt nach dort fortsetzen (Abb. 23).

Schrifttum

GRAESER, E., LODE, W. & POTT, G.: Die Darstellung von Tiefenlinienplänen beliebig gekrümmter Reflexions-Horizonte unter Einschluß der Strahlenbrechung im Raume. — Wird veröffentlicht in Geophysical Prospecting 1957, The Hague, Netherlands, 1957.

HELMS, H. v.: Neuere refraktionsseismische Untersuchungen an flachen und steilen Salzstöcken in Nordwestdeutschland. — Erdöl und Kohle, **4**, S. 615—620, Hamburg 1951.

— & MAASS, H. W.: Seismische Reflexionsmessungen in der Ostsee. Vortrag auf der Tagung der European Assoc. of Exploration Geophys., Hannover, 4. Dezember 1952, unveröffentlicht. — Kurzreferat siehe Erdöl und Kohle, **6**, Febr. 1953, Nr. 2, S. 75, Hamburg 1953.

HILLER, H. & RUPRECHT, L.: Seismische Untersuchungen im Steinkohlenbergbau. — „Glückauf", **91**, H. 37/38, S. 1039/45, Essen 1955.

PRAKLA: Lagerstättenforschung durch Prakla. — Prospekt, Hannover 1957.

RUPRECHT, L.: Neue Möglichkeiten der Reflexionsseismik zur Bestimmung der Mächtigkeit nutzbarer Lagerstätten. — „Glückauf", **93**, H. 19/20, S. 577—584, Essen 1957.

VETTERLEIN, P.: Die Vorteile von Magnetband-Aufzeichnungen für seismische Messungen. — Erdöl und Kohle, **9**, S. 754—757, Hamburg 1956.

ZETTEL, W.: Beispiele aus der seismischen Bodenforschung — Naturwiss., H. 18, S. 469—476, Göttingen/Heidelberg 1953.