



Seismische Methoden in der Lagerstättenforschung

Von
Prof. Dr. GERHARD KRUMBACH,
Jena.

Zentralinstitut
für Erdbebenforschung in Jena.

Einleitung: Der Aufbau des Erdkörpers.

Als im Jahre 1889 der junge deutsche Geophysiker von *Rebeur-Paschwitz* die für damalige Zeit Aufsehen erregende Entdeckung machte, daß es möglich ist, die von einem Erdbeben ausgelöste Energie auch an mehrere Tausend Kilometer weit entfernten Stationen zu beobachten, ahnte wohl niemand, daß sich aus dieser Feststellung einst Arbeitsmethoden entwickeln würden, die heute zu einem der wichtigsten Arbeitsgebiete der angewandten Geophysik zählen. Es wurde sehr bald erkannt, daß die bei einem Erdbeben ausgelösten elastischen Wellen — denn diese sind es, die mit Hilfe der feinfühligsten Instrumente beobachtet wer-

den — sich teils durch das Erdinnere, teils längs der Erdoberfläche ausbreiten. Ihr Weg und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit sind daher von dem Aufbau des Erdkörpers in der Tiefe und den Eigenschaften der Materie in weitem Maße abhängig. Umgekehrt aber müssen wir dann wiederum aus Beobachtungen über den Charakter und über die Ausbreitung der Wellen Rückschlüsse ziehen können über den Weg, den sie in der Tiefe genommen haben. Was also für den Physiker die Röntgenstrahlen und Ultraschall bei Strukturuntersuchungen im Laboratorium sind, bedeuten für den Geophysiker die elastischen Wellen, die Erdbebenstrahlen, bei der Erforschung des Aufbaus der Gesamterde. Bei diesen Arbeiten bedient sich der Geophysiker der

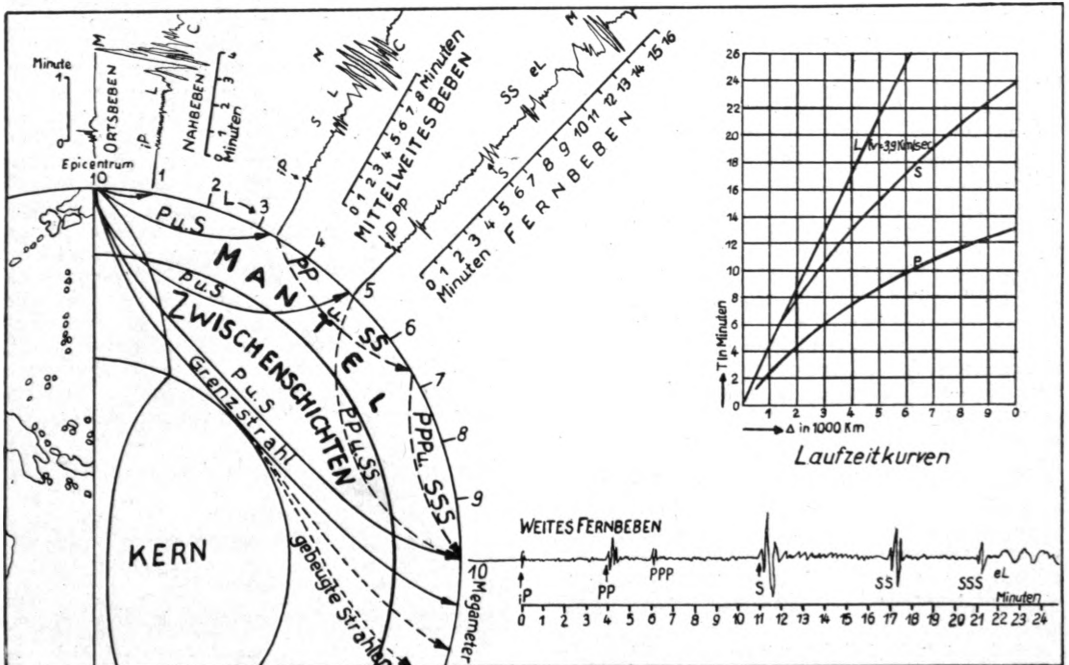


Abb. 1.

Seismische Wellen und Aufbau des Erdkörpers.

der Auslösung und damit auch die genauen Entfernungen zwischen Sprengort und Beobachtungsstationen bekannt sind.

Aus diesen allgemeinen Ergebnissen über den Aufbau der Erde läßt sich also schon folgendes erkennen: Je weiter Herd und Beobachtungsstationen voneinander entfernt sind, desto weiter dringen die von der Energiequelle ausgelösten Wellen in die Tiefe. Da beispielsweise die Wellen, die durch das tiefe Erdinnere längs eines Erddurchmessers laufen, etwa 20 Minuten oder 1200 Sekunden benötigen, so genügt bei der Beobachtungsstation eine Bestimmung der Einsatzzeit des Eintreffens der Wellen auf eine Sekunde genau. Bei der Untersuchung der Nahbeben, bei denen, wie wir gesehen haben, Tiefen bis zu etwa 40 km erreicht werden, beträgt die Laufzeit der ersten Wellen in einer Entfernung von etwa 500 km etwa 60 Sekunden. Um daher eine entsprechende Beobachtungsgenauigkeit bei den Messungen zu erzielen, müssen in diesem Falle die Zeitbestimmungen mindestens auf $\frac{1}{10}$ Sekunde genau durchgeführt werden. Vergewährtigen wir uns jetzt, daß die Lagerstätten nur in wenigen Kilometern Tiefe liegen — die tiefsten Bohrungen erreichen maximal etwa 5 km —, so kann man sich schon jetzt eine Vorstellung über die Zeitgenauigkeit machen, mit der die Untersuchungen der obersten Erdrinde durchgeführt werden müssen. Es liegt dann auf der Hand, daß an Meßinstrumente und Beobachtungsverfahren für diese Zwecke ganz besondere Anforderungen gestellt werden müssen.

b) Grundlagen zur Erforschung oberster Erdschichten.

Einer der wichtigsten Schritte auf dem Wege der Entwicklung der Arbeitsmethoden zur Erforschung der obersten Erdschichten war die Feststellung von *Ludger Mintrop*, einem Schüler unseres bedeutendsten Seismologen *Emil Wiechert*, daß auch bei Untersuchungen über die Ausbreitung der elastischen Wellen in geringen Entfernungen die gleichen charakteristischen Wellengruppen wie bei den Erdbebenbeobachtungen auftreten. Im Gelände des Göttinger Geophysikalischen Instituts führte er Fallversuche mit einer 4000 kg schweren Stahlkugel durch. Bei einer Fallhöhe von 14 m gelang es ihm, die durch den Aufprall erzeugten elastischen Wellen in ihrer Aufgliederung Longitudinal-, Transversal- und Oberflächenwellen, bis etwa 500 m Entfernung einwandfrei festzustellen. Dieses wichtige Ergebnis zeigte dann den Weg zu einer Weiterentwicklung der Methoden und Geräte. Erweiterte Versuche dienen zunächst ganz allgemein dem Studium der Ausbreitung künstlich erzeugter elastischer Wellen, wobei es sich vorwiegend um die Beobachtung von Sprengversuchen, Maschinenschwingungen und Verkehrserschütterungen handelte. Für die Untersuchungen des Schichtbaues im Kleinen kommen ähnlich wie bei speziellen Untersuchungen des Aufbaus der Kontinente Sprengungen als Energiequelle in Anwendung. Man arbeitet also dann mit „künstlichen“ Erdbeben.

Die erste und schnellste elastische Welle ist eine Longitudinalwelle, eine Welle, bei der die Bodenteilchen in Richtung der Fortpflanzung schwingen. Es handelt sich also hierbei um eine Schallwelle, die jedoch ihren Weg durch den Boden nimmt.

Bei der Aufstellung der Laufzeitkurven bei Nahbeben wurde bereits die grundlegende Feststellung gemacht, daß die Laufzeitkurve dieser Longitudinalwellen aus mehreren geradlinigen Ästen besteht. Die Lage der Abzweigungspunkte dieser einzelnen Äste in Verbindung mit den aus der Neigung der Laufzeitkurven bestimmten Wellengeschwindigkeiten erlaubte dann die genaue Bestimmung der Schichtgrenzen in der Tiefe und der Ausbreitungsgeschwindigkeiten innerhalb der einzelnen Schichten.

Gerade diese Beobachtungstatsachen führten zu einer Weiterentwicklung der Arbeitsmethoden für praktische Aufgaben. Bekanntlich wurde schon im ersten Weltkrieg die Ortung feindlicher Geschützstellungen mit Schallmeßbeobachtungen durchgeführt. Man stellte an verschiedenen Orten durch Bestimmung des Zeitpunktes des Mündungsfeuers den Abschlußmoment fest, ebenso den Zeitpunkt des ankommenden Luftschalles. Aus der Zeitdifferenz dieser beiden Beobachtungen und der bekannten Schallgeschwindigkeit war es dann möglich, die Geschützentfernung zu ermitteln und dann aus den Beobachtungsergebnissen mehrerer Schallmeßstationen den Aufstellungspunkt des Geschützes genau anzupeilen. Da aber die Geschwindigkeit des Luftschalles keine Konstante ist, sondern von meteorologischen Faktoren, wie Luftdruck, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung abhängt, ergaben sich manche Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten bei der Durchführung dieser Methoden.

Um sich daher von den genannten Fehlerquellen freizumachen, sollte versucht werden, den Bodenschall, d. h. also die Ausbreitung elastischer Wellen, in gleicher Weise zu verwenden. Man wollte also aus der Ausbreitungszeit der beim Abschluß ausgelösten Bodenerschütterung die Geschützentfernung ermitteln. Dazu mußte dann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen in den obersten Bodenschichten bekannt sein. Man stellte also durch Sprengversuche wieder empirisch Laufzeitkurven zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeit auf. Ihre Anwendung zeigte jedoch, daß die praktisch ermittelten Laufzeitkurven zu keinen brauchbaren Ergebnissen bei der Ortung führten. Vielmehr waren die Laufzeitkurven und damit die Geschwindigkeiten der Wellen weitgehend von der Geologie des Untergrundes zwischen Geschützstellung und Beobachtungspunkt abhängig. Dieser Fehlschlag der seismischen Methoden in militärischer Hinsicht führte jedoch zu einem Erfolg in den Arbeitsmethoden für praktische und friedliche Aufgaben. Denn umgekehrt mußte das Studium individueller Laufzeitkurven für einzelne Beobachtungsgebiete wieder die so wertvollen Rückschlüsse auf die genaue Struktur des Untergrundes ermöglichen.

Und mit dieser Feststellung stehen wir jetzt praktisch schon mitten in den Methoden der seismischen Lagerstättenforschung.

Man wird also zur Erforschung eines engen Gebietes durch einen verhältnismäßig leichten Sprengschuß eine Bodenwelle erzeugen. Es wird dann deren Ausbreitungszeit mit großer Genauigkeit an dicht gelegenen Meßpunkten ermittelt, daraus die Laufzeitkurve gezeichnet und aus der Laufzeitkurve schließlich der Schichtbau in der Tiefe ermittelt.

B. Die instrumentellen Grundlagen der seismischen Lagerstättenforschung.

Bevor wir uns aber mit den auf diese Weise gewonnenen Beobachtungsergebnissen und ihrer Deutung beschäftigen, müssen wir zunächst ganz allgemein die instrumentellen Grundbedingungen für diese Arbeiten kennenlernen. Die allgemeine Erfahrung hat gelehrt, daß die Schwingungsdauer der von irgendeiner Störung ausgelösten elastischen Wellen um so kürzer wird, je dichter sich der Beobachtungsort an der Energiequelle befindet. Ferne Erdbeben erzeugen langsame Bodenschwingungen, ein vorübergehender Lastwagen bringt bei schnellem Zittern des Bodens unsere Fensterscheiben zum Klirren. Die seismischen Instrumente werden also um so besser arbeiten, je genauer sie mit ihrer Eigenschwingung den zu erwartenden Bodenschwingungen angepaßt sind. Für die Erforschung der obersten Bodenschichten müssen wir auf verhältnismäßig kurzen Entfernungen und damit sehr schnelle Schwingungen beobachten. Ebenso ist die Energie der Sprengschüsse im Vergleich mit natürlichen Erdbeben äußerst gering. Für die Lagerstättenforschung benötigt man also sehr kurzperiodische Instrumente mit hoher Vergrößerung.

Für die Lösung dieser apparativen Aufgabe läßt sich natürlich eine große Anzahl Wege finden. Apparate mit mechanischer Übertragung oder Hebelvergrößerung, wie im Stationsdienst, kommen nicht in Frage, da zur Überwindung schädlicher Reibungswiderstände im Übertragungsmechanismus große schwingende Massen erforderlich sind. Die Geländearbeiten erfordern aber Apparaturen, die

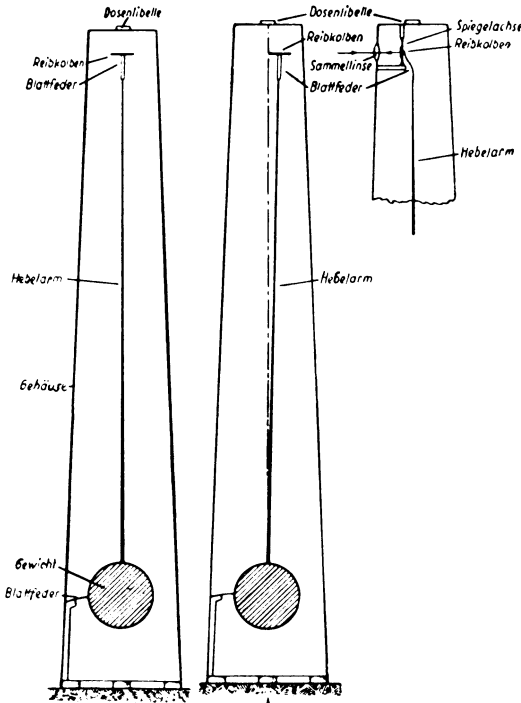


Abb. 4.

Prinzip des Mintrop-Seismometers.

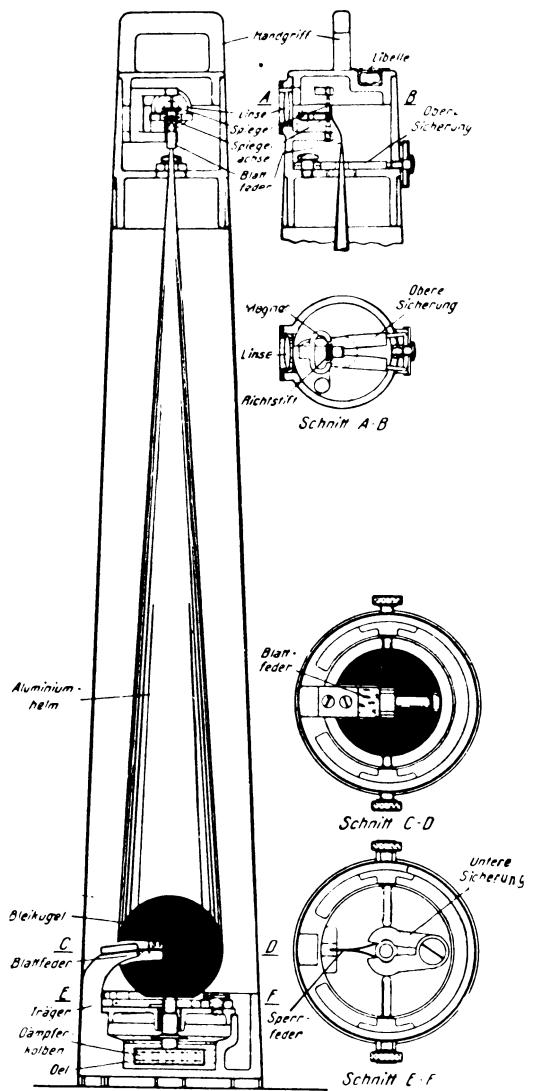


Abb. 5.

Das Mintrop-Seismometer.

handlich und leicht transportabel sind. Für ihre Konstruktion kommen daher zwei Prinzipien heute zur Anwendung:

1. die optische Registrierung,
2. die galvanometrisch-optische Registrierung.

a) Das Mintrop-Seismometer.

(Geräte dieser Art wurden von *Mintrop* selbst entwickelt.)

Das von ihm angegebene Vertikalseismometer arbeitet nach folgendem Prinzip: Eine wenige Kilogramm schwere Bleikugel wird an einer 2 cm langen Blattfeder aufgehängt und an der Kugel ein etwa 50 cm lange leichter Aluminiumhebel befestigt (Abb. 4). Die Hebelspitze bewegt dann einen an einer dünnen Achse befindlichen Registrierspiegel. Die Eigenperiode des Instrumentes beträgt 0,3 Sekunden und die Vergrößerung ist 50 000fach. Auf den Registrierspiegel fällt ein Lichtstrahl, der dann reflektiert wird und dessen Bewegungen auf einem Registrierfilm in 1 m Abstand beobachtet werden (Abb. 5). Das Instrument ist etwa 50 cm hoch.

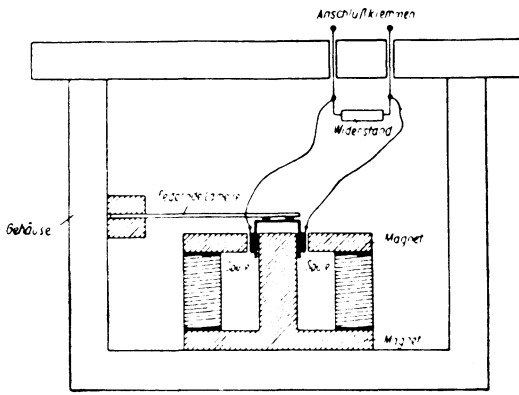


Abb. 6.
Elektrodynamisches Seismometer.

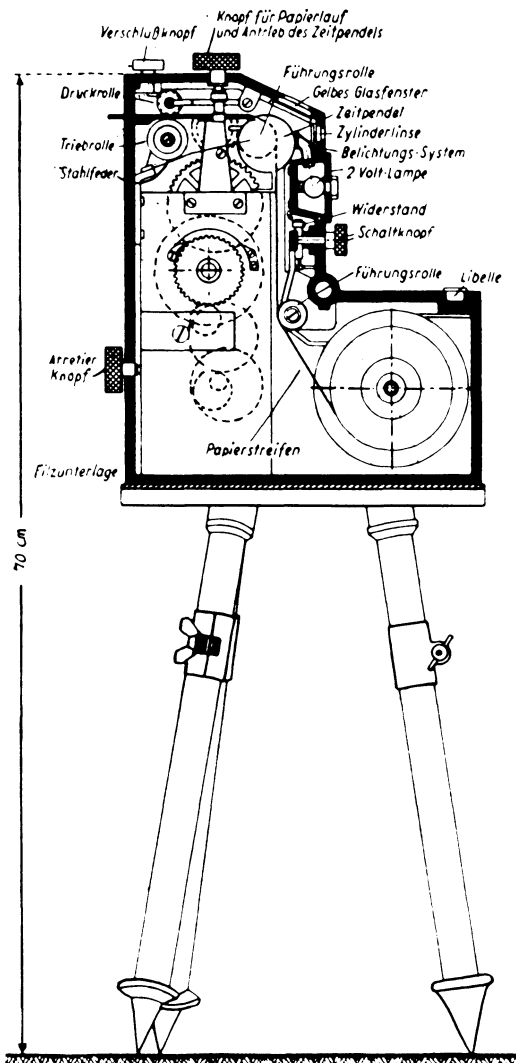


Abb. 7.
Mintrop-Lichtschreiber.

Der zweite Instrumententyp, die elektrodynamischen Seismometer, werden heute in der angewandten Seismologie vorwiegend benutzt. Nach bekannten physikalischen Gesetzen wird in einer Spule, die in dem Feld eines Magneten bewegt wird, ein Strom induziert, dessen Richtung und Größe man dann mit Hilfe eines Galvanometers beobachten kann. In der Praxis verwendet man einen Ringspaltmagneten, wie er in der Lautsprechertechnik zur Anwendung kommt. Die Tauchspule selbst wird an einer Stahllamelle befestigt und dient gleichzeitig als schwingende Seismometermasse (Abb. 6). Der beim Schwingen der Spule induzierte Strom wird dann mit Hilfe eines hochempfindlichen Galvanometers beobachtet oder aufgezeichnet. Die Registrierung geschieht in gleicher Weise wie bei der optischen Registrieremethode. Man hat dann noch die Möglichkeit, wie meist auch in der Praxis angewendet, die Empfindlichkeit der Anordnung durch Zwischenschalten eines Verstärkers zwischen Seismometer und Galvanometer sehr hoch zu steigern.

b) Die Registriereinrichtungen.

Von ebenso großer Wichtigkeit sind die Registriereinrichtungen oder „Lichtschreiber“. Es wird also bei allen Geräten photographisch registriert. Der von dem Registrierspiegel des Galvanometers oder Seismometers reflektierte Lichtzeiger wird mit Hilfe einer Zylinderlinse am Gerät zu einem feinen Punkt zusammengezogen. Bei Schwingungen des Spiegels gleitet der Lichtpunkt über den Film und belichtet ihn. Nach der Entwicklung des Films zeigt dieser entsprechend den Spiegelbewegungen ganz charakteristische Diagramme.

c) Sprengmoment.

Für die Ausmessung der Kurven und Bestimmung der Einsatzzeiten der einzelnen Wellengruppen müssen einmal auf den Film der Zeitpunkt der Auslösung der Wellen oder der Sprengmoment und zweitens auch Zeitmarken zur Bestimmung der Einsatzzeit der einzelnen Wellengruppen übertragen werden.

Für die Übertragung des Sprengmomentes kann man verschiedene Methoden anwenden. Zu seiner Aufzeichnung benutzt man meist ein weiteres Galvanometer. Um die Sprengladung wird dann ein Draht gewickelt und diese Drahtschlinge über eine kleine Batterie mit dem Galvanometer verbunden (Abb. 8). Ist der Stromkreis geschlossen, so fließt ein Ruhestrom, und das Galvanometer macht einen ganz bestimmten Ausschlag, dessen Spur auf dem Registrierstreifen eine gerade Linie ist. Wird die Spreng-

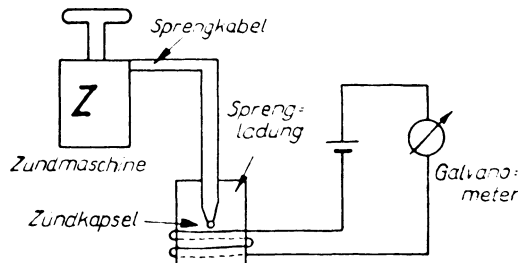


Abb. 8.
Übertragung des Sprengmomentes.

ladung zur Detonation gebracht, so wird die Drahtschlinge zerrissen und der Stromkreis unterbrochen. Das Galvanometer kehrt in die ursprüngliche Ruhelage zurück. Durch diesen plötzlichen Abriß in der Aufzeichnung wird der Zeitpunkt des Sprengmomentes in der Aufzeichnung genau festgelegt. Wird jetzt in der Lagerstättenseismik, wie wir später sehen werden, auf Entfernungen bis zu 5 km registriert, so würde die geschilderte Übertragung des Sprengmomentes für sich schon Kabel von 10 km Länge erfordern, ebenso würde schon allein die Verlegung in dem ungleichmäßigen Gelände sehr oft große Schwierigkeiten verursachen. Deswegen arbeitet man häufig bei der Bestimmung des Sprengmomentes mit Luftschallbeobachtungen unter Berücksichtigung der schon früher geschilderten meteorologischen Faktoren. Außerdem fallen diese jedoch bei den noch relativ kurzen Entfernungen nicht so sehr ins Gewicht. Einsatzzeit, Entfernung und Luftschallgeschwindigkeit ergeben wie früher den Sprengmoment. Zweckmäßig wird dann meist noch mit besonders gebauten Schallempfängern gearbeitet. Jedoch ist das neueste und beste Verfahren heute die funkentelegraphische Übertragung des Sprengmomentes. Mit Hilfe der vorhin schon geschilderten Ruhestromanlage wird von einem Kurzwellensender am Sprengort drahtlos ein Impuls abgegeben, der an sämtlichen Beobachtungsstationen empfangen und auf die Registriereinrichtung übertragen wird. Sämtliche Stationen sind gleichfalls mit Sendern ausgerüstet, so daß bei der Aufstellung des Beobachtungsnetzes mit Hilfe dieser Gegensprechanlagen eine gegenseitige Verständigung der Stationen untereinander und mit dem Sprengort möglich ist. Die Anwendung des drahtlosen Verkehrs gewährleistet heute ein schnelles und sicheres Arbeiten im Gelände.

d) Die Zeitmarkierung.

Der dritte wichtige Faktor bei der Durchführung der Beobachtungen ist die Zeitbestimmung im Diagramm. Die Filme im Registriergerät müssen wegen der hohen Zeitgenauigkeit mit sehr hohen Registriergeschwindigkeiten laufen. Will man auf Bruchteile von $\frac{1}{100}$ Sekunde ablesen, so muß der Abstand der Zeitmarken im Diagramm wenigstens $\frac{1}{50}$ oder $\frac{1}{100}$ Sekunde entsprechen. Dabei müssen die einzelnen Zeitmarken wenigstens 2 mm auseinanderliegen. Es entspricht dies einer Registriergeschwindigkeit von 12 m/min. Wegen des dabei erforderlichen hohen Verbrauches an photographischem Papier muß daher die Messung so eingerichtet werden, daß nur während der unbedingt notwendigen Zeit registriert wird. Ein weiterer Grund für die Wichtigkeit der funkentelegraphischen Verständigung der Stationen bei der Feldarbeit.

Diese Zeitmarken jetzt auf dem Registrierfilm werden in verschiedener Weise erzeugt (Abb. 9):

1. Mit Hilfe eines kurzperiodischen Pendels, dessen Schwingungsdauer genau bekannt ist. An dem Pendel befindet sich ein Schlitz, durch den ein Lichtstrahl fällt. Befindet sich das Pendel in Ruhe, so wird eine gerade Linie auf dem Film aufgezeichnet. Schwingt das Pendel, gibt es in dem Rhythmus der Pendelschwingungen nur beim Durchgang durch die Anfangslage Lichtblitze auf dem Registrierstreifen, die dann als Zeitmarken dienen.

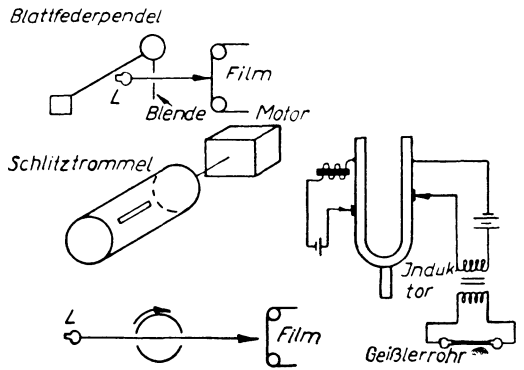


Abb. 9.
Zeitmarkierungen.

2. Man läßt in dem Weg des Lichtstrahles eine Trommel mit zwei Schlitzen rotieren. Befinden sich die zwei Schlitze in der Achse des Lichtstrahles, fällt das Licht ungehindert hindurch. Rotiert die Trommel, wird dann mit Ausnahme dieser einen Trommelstellung das Licht ausgeblendet. Die Aufeinanderfolge der einzelnen Lichtblitze richtet sich nach der Trommelgeschwindigkeit. Man kann durch Einregulierung dieser Geschwindigkeit die zeitliche Aufeinanderfolge der Lichtblitze oder Zeitmarken genau einstellen. Die dritte Methode ist die Stimmgabelmethode. Eine Stimmgabel von 50 Hz oder 100 Hz (also 50 oder 100 Schwingungen in der Sekunde) wird mit einer Kontakteinrichtung versehen. Sie schließt beim Schwingen den Primärstromkreis eines Funkeninduktors. Im Sekundärkreis des Induktors befindet sich ein Geißlerrohr. Wird dann der Primärstromkreis des Induktors im Rhythmus der Stimmgabelschwingungen unterbrochen, so leuchtet im gleichen Rhythmus das Geißlerrohr auf. Je nach Art der verwendeten Stimmgabel erfolgen die Lichtblitze im Abstand von $\frac{1}{50}$ oder $\frac{1}{100}$ Sekunde. Das Geißlerrohr wird vor der Öffnung des Registriergerätes angebracht. Die Lichtblitze zeichnen sich als scharfe Linien quer über dem Registrierstreifen ab und es ist dadurch die Ablesung mit sehr hoher Zeitgenauigkeit gewährleistet.

Damit haben wir jetzt das technische Rüstzeug und die Prinzipien der Beobachtungsmethoden kennengelernt und wollen uns jetzt mit der praktischen Durchführung beschäftigen.

C. Die Prinzipien der seismischen Lagerstättenforschung.

Es war schon anfangs betont worden, daß es die Aufgabe der angewandten Geophysik ist, die Änderung der physikalischen Erscheinungen in der Tiefe zu ermitteln und damit eine Lagerstätte genau zu lokalisieren. Das heißt also, es soll die Lagerstätte selbst sehr genau ermittelt werden, ohne daß zeitraubende oder kostspielige Bohrungen niedergebracht werden müssen. Oder aber die Geologen sollen aus den geophysikalisch ermittelten Daten die günstigste Lage etwa erforderlicher Bohransatzpunkte bestimmen. Das letztere ist besonders wichtig für die Erdölgeologie. Sind durch geophysikalische Messungen, besonders aber durch seismische Verfahren, die Strukturen im Untergrund bekannt,

so kann der Geologe aus seinen Erfahrungen die Punkte ermitteln, an denen mit ziemlicher Sicherheit mit fündigen Bohrungen zu rechnen ist. Bedenkt man, daß eine einzige Tiefbohrung einen Aufwand von 1 Million DM erfordert, so erkennt man die Wichtigkeit der Entwicklung von Verfahren, die dazu beitragen, Fehlbohrungen zu ersparen.

In der seismischen Lagerstättenforschung kann man grundsätzlich zwei Meßverfahren unterscheiden:

1. Die *Refraktionsseismik*. Diese stützt sich, wie der Name schon sagt, auf die Ablenkung seismischer Wellen an Schichten mit verschiedener Geschwindigkeit in der Tiefe. Auch hier wurden die grundlegenden Methoden von *Mintrop* entwickelt und im Jahre 1920 ihre erste praktische Anwendung durchgeführt.

2. Das *Reflexionsverfahren*. Hierbei werden die von einer Sprengstelle ausgesandten seismischen Wellen an Schichten oder Strukturen in der Tiefe reflektiert. Die Laufzeitmessungen ermöglichen dann die Bestimmung der Reflexionstiefe.

D. Die Refraktionsseismik.

a) Versuchsschießen im unbekanntem Gelände.

Wir beginnen mit der Refraktionsseismik. In sehr vielen Fällen schließen die Messungen an bekannte Strukturen an und dienen dann nur zur Erweiterung bekannter Beobachtungsergebnisse.

In unbekanntem Gelände wird zunächst mit orientierenden Arbeiten begonnen. Die einfachste Form ist das Fächerschießen. In der Mitte des zu untersuchenden Geländes wird um einen Fixpunkt ein Kreis mit etwa 500 m Radius geschlagen. Der Sprengort befindet sich im Mittelpunkt des Kreises. Die einzelnen Beobachtungsstationen werden in ziemlich regelmäßigen Abständen auf der Peripherie dieses Kreises angesetzt. Unter Umständen wird, um die Abstände der Stationen untereinander nicht zu groß werden zu lassen, mehrere Male unter Versetzung der Stationen gesprengt. Ist völlig homogener Untergrund vorhanden, so sind die Laufzeiten der Wellen in

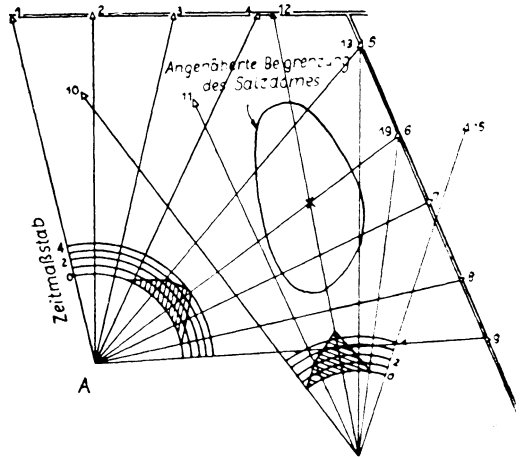


Abb. 11.

Salzdombestimmung durch „Voreilung“.

allen Richtungen gleich. Abweichende Werte lassen darauf schließen, daß die Wellen bei den betreffenden Beobachtungsstellen in der Tiefe andere Schichten durchlaufen haben als die Oberflächengeologie zeigt. Kleinere Laufzeiten deuten das Vorhandensein härterer Schichten mit größerer Geschwindigkeit an. Je kleiner also die beobachtete Laufzeit ist, desto näher befindet sich diese Schicht an der Erdoberfläche. Denn bei oberflächennahen Schichten wird der Wellenweg innerhalb der Aufwölbung wesentlich länger. Ausgehend von dem ersten Fächer, legt man einen weiteren Sprengpunkt auf die Peripherie des Beobachtungskreises und schießt dann weitere anschließende Fächer, bis die gewünschten Beobachtungsergebnisse erzielt worden sind. Hat man durch diese Geschwindigkeitsbestimmung die ungefähre Lage einer Aufwölbung einer Tiefenschicht bestimmt, so wird ein zweiter Fächer etwa senkrecht zu dem vorher festgestellten Bereich angesetzt. Die Analyse der Ergebnisse geschieht in folgender Weise. Es zeigt sich, daß die Seismogramme beim Eindringen der Wellen in einen Salzdom beispielsweise ihren Charakter ändern. Vor dem eigentlichen Welleneinsatz befindet sich eine Welle kleinerer Amplitude, also eine Welle, die mit höherer Geschwindigkeit als die im Deckgebirge gelaufen ist. Man bezeichnet diese Welle als „Salzeinsatz“ oder ihre Laufzeitdifferenz als „Voreilung“. Je tiefer die Welle also in das Salz eindringt, desto größer ist die Zeitdifferenz zwischen beiden Wellen und damit dann die Voreilung (Abb. 11). Die Größe der Voreilung kann man jetzt zur Lokalisierung des Salzhorstes benutzen. Man zeichnet in eine Karte die einzelnen Fächerstrahlen und Beobachtungspunkte ein. Um die Mittelpunkte der Fächer schlägt man Kreise gleichen Abstandes. Der innerste Kreis entspricht einer Voreilung von 0 Sekunden. Jedem der weiteren Kreise entspricht eine konstante Zunahme der Größe der Voreilung. Man ermittelt dann für jeden Fächerstrahl die Größe der Voreilung und trägt auf dem Strahl die Lage der Voreilungswerte innerhalb des Kreisdiagramms ein. Verbindet man die so für jeden Strahl einzeln ermittelten Punkte, so erhält man die schraffierten

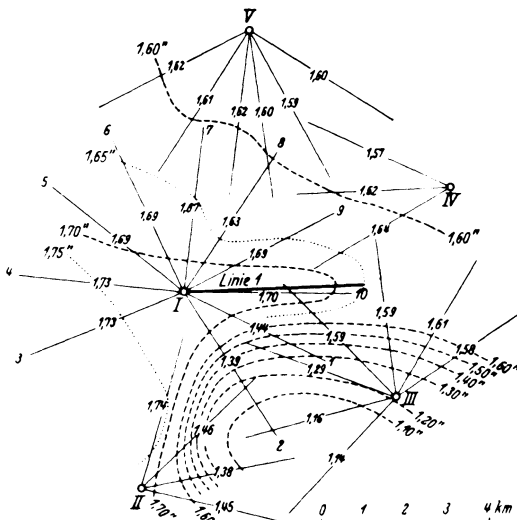


Abb. 10.
Fächerschießen.

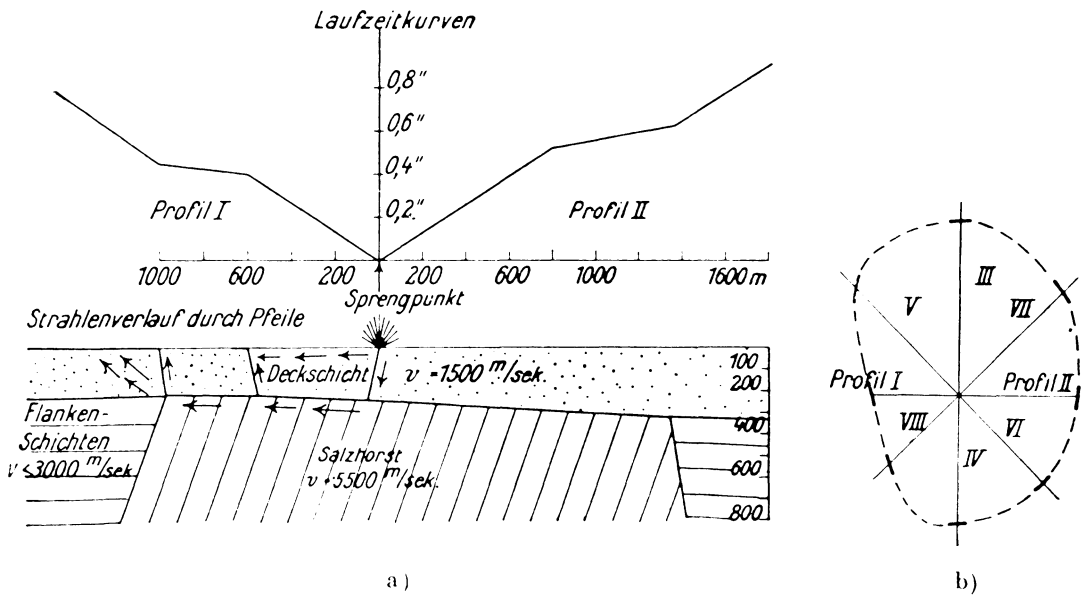


Abb. 12.

Seismische Ermittlung der Grenzen eines Salzhorstes (schematisch) nach H. Reich.

a) Geologisches Profil und die zugehörigen Laufzeitkurven; b) Grundriß der durch 8 (I–VIII) seismische Profile ermittelten Salzgrenzen (gestrichelt). Maßstab $\frac{2}{5}$ der nebenstehenden Profile I und II.

Die Dreiecksfiguren für beide Strahlenpaare. Die Dreiecksspitzen entsprechen den größten Voreilungen und zeigen damit auf die höchste Erhebung des Salzdomes unterhalb der Erdoberfläche. Aus dem Verlauf der Seitenflächen des Dreiecks kann man auf die weitere Form des Domes und ungefähre Lage der Flanken schließen. Hat man die höchste Erhebung des Salzdomes ermittelt oder, wie man fachlich sagt, den „top“, so kann man jetzt durch Profilschießen weitere Einzelheiten bestimmen. Man legt das Profil zweckmäßig zunächst durch die Längsachse der vorher bestimmten Struktur und setzt den Sprengschuß auf der Kuppe an. Mit Hilfe eines verhältnismäßig dichten Stationsnetzes werden die Laufzeitkurven längs der beiden Profilrichtungen festgelegt.

Das Bild zeigt einen senkrechten Schnitt durch das Profil und die ermittelten Laufzeitkurven. Solange sich die Wellen im Deckgebirge befinden, haben wir eine Laufzeitkurve mit einer Steigung, entsprechend der von den Wellen durchlaufenen geologischen Formation. Von einer bestimmten Entfernung an ist die Laufzeitkurve nach unten geknickt. Die Wellen besitzen also eine kürzere Laufzeit infolge der höheren Wellengeschwindigkeit im Salz, in das sie jetzt eingedrungen sind. Wird die Grenze des Salzdomes erreicht, verlaufen die Wellen entweder innerhalb der geschleppten Schichten an den Flanken des Salzdomes oder auch wieder im Deckgebirge. Auf alle Fälle ist also die Geschwindigkeit infolge Fehlens der Salzschichten geringer und damit die Steigung der Laufzeitkurve größer. Der zweite Knickpunkt der Laufzeitkurve zeigt damit also deutlich die Flanke des Salzdomes an. Das gleiche Verfahren wendet man dann auf einem Profil senkrecht zu dem ersten Profil an. Damit ist dann schon eine sehr genaue Abgrenzung des Salzhorstes gewonnen. Weitere Profile können

zur Verbesserung der gewonnenen Ergebnisse beitragen.

b) Bestimmung von Schichtgrenzen.

Das geschilderte Profilschießen wird allgemein zur Bestimmung der Schichtung des Untergrundes angewandt. Es wird ein bestimmtes Profil im Gelände festgelegt. In meist gleichmäßigen Abständen von 200 bis 300 m Entfernung werden die Beobachtungsstationen aufgestellt. In der Regel läßt man heute an einer Meßstelle mit Hilfe der vorhin geschilderten galvanometrischen Methode vier Seismometer auf einem Streifen gleichzeitig nebeneinander registrieren. Außerdem arbeitet man meist gleichzeitig mit vier Registrierstationen (Abb. 13). Man nimmt dann auf diese Weise mit einer einzigen Sprengung ein Profil von 4×1200 m, also 4800 m auf. Die Sprengladung wird mit Hilfe einer Flachbohrung zur Erhöhung der Wirksamkeit und gleichzeitiger Verminderung der Flurschäden in einer Tiefe von 6 bis 20 m je nach Beschaffung des Untergrundes angebracht. Oder aber man setzt mehrere Sprengladungen sternförmig auf den Eckpunkten und im Mittelpunkt eines Sechsecks mit etwa 6 m Kantenlänge an. Ihre Gesamtmenge beträgt in der Regel etwa 30 kg hochbrisanten Sprengstoffes. Bei diesen Methoden kann man in der Regel bis zu fünf Messungen am Tage erledigen. Man kann also bei fortlaufenden Profilen und gutem Arbeitsgang an einem Tage bis zu 20 km abschießen. Der Ansatz weiterer Sprengpunkte wird jedoch meist nach den ersten gewonnenen Beobachtungsergebnissen bestimmt, da in der Regel die Filme im Registrierwagen sofort entwickelt werden und etwa 10 Minuten nach dem Schuß zu einer vorläufigen Beurteilung zur Verfügung stehen. Bei dem Zwei-Schichten-Problem erhält man eine ge-

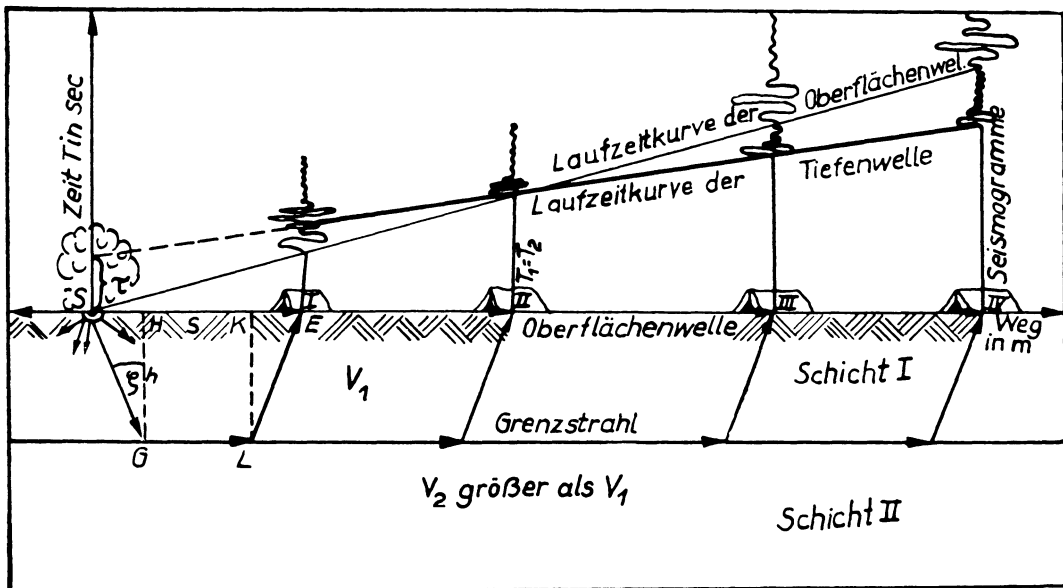


Abb. 13.
Refraktionsschießen.

knickten Laufzeitkurve. Die Steigerung der Laufzeitkurve ergibt aus dem Quotienten Weg/Zeit die Geschwindigkeit der Wellen in den beiden Schichten, die Lage des Knickpunktes in Verbindung mit den bekannten Wellengeschwindigkeiten die Tiefe der Grenzschicht.

Zur Kontrolle der Beobachtungsergebnisse wendet man das sogenannte Gegenschießen an. Das

heißt, man setzt am letzten Punkt des Profils nochmals eine Sprengladung an und beobachtet in umgekehrter Richtung (Abb. 14). Dann ist der erste Sprengpunkt der zweite Endpunkt des rückwärts untersuchten Profils. Haben wir horizontale Schichtlagerung und homogenen Aufbau des Geländes, müssen die Laufzeitkurven in beiden Richtungen vollständig gleich sein. Treten Abweichungen auf, so sind diese ein Anzeichen dafür, daß wir es mit einem schrägen Einfall der Schichten zu tun haben. Dieser schräge Einfall kann dann auch aus den beiden verschiedenen Laufzeitkurven, allerdings mit einem wesentlich schwierigeren Rechenverfahren, ermittelt werden. In bezug auf die beiden Endpunkte des Profils haben wir es in einem Falle mit einer steigenden, beim Gegenschießen dann mit einer fallenden Schicht zu tun.

Dieses Verfahren dient dann gleichfalls zu einer noch exakteren Bestimmung eines Salzdomes als bei der früheren Methode.

Die Ausrüstung eines Refraktionstrupps sollen die Bilder veranschaulichen (Abb. 15 a und b).

E. Die Reflexionsseismik.

Das zweite Verfahren ist das Reflexionsverfahren. Um das Prinzip des Reflexionsverfahrens näher kennenzulernen, vergegenwärtigen wir uns noch einmal die Ausbreitung der seismischen Wellen in geringen Herdentfernungen. Als ersten Einsatz in der Aufzeichnung beobachten wir die direkte Welle, die Welle der obersten Schicht, deren Laufzeitkurve eine gerade Linie ist und durch den Nullpunkt geht (Abb. 16). Hinter dieser folgt die Laufzeitkurve der reflektierten Welle. Sie beginnt auch unmittelbar im Sprengpunkt, also bei der Entfernung Null. Dort muß ihre Laufzeit schon einen hohen Wert besitzen, da die Tiefe der reflektierenden Schicht für den Wellenweg und die Laufzeit maßgebend ist. Bei größeren Entfernungen nähert sich die

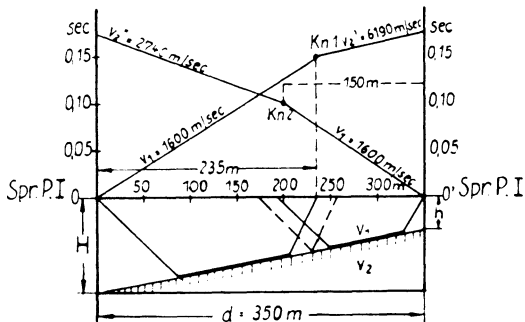
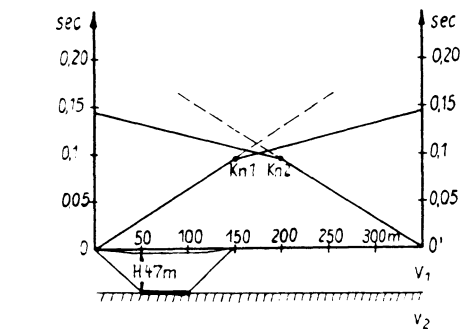


Abb. 14.
Gegenschießen.

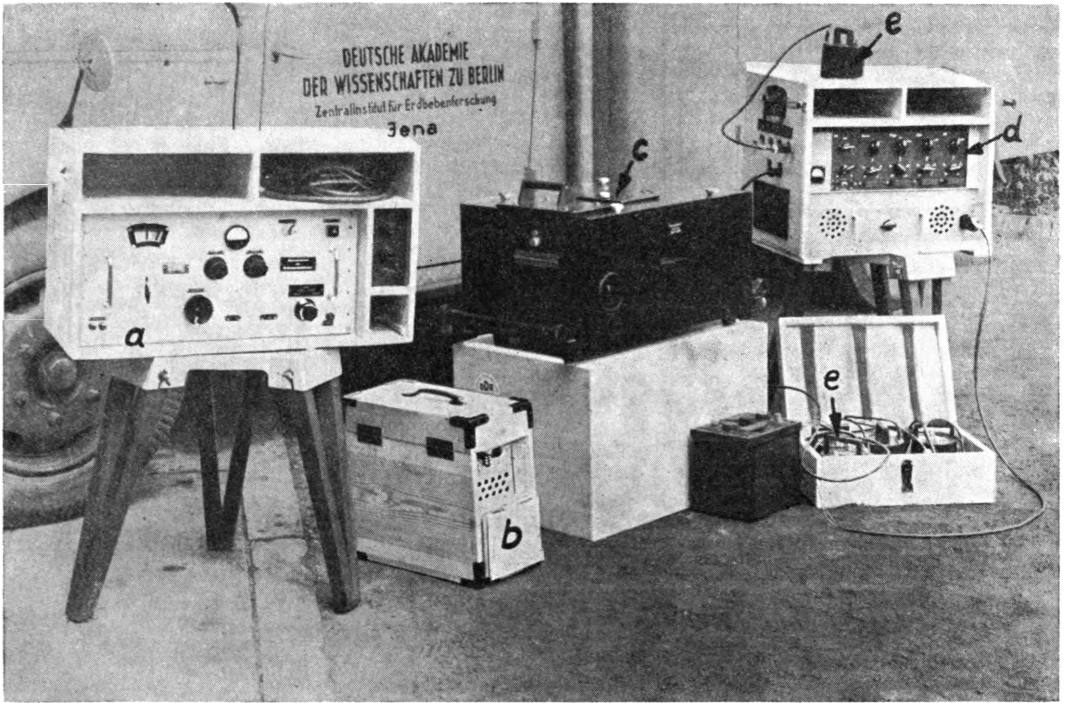


Abb. 15 a.

Meßapparaturen für Refraktionsseismik: a) Gegensprechanlage zur Verständigung zwischen Sprengort und Registrierwagen; b) Umformer; c) Registriergerät; d) Verstärkersatz; e) Elektrodynamische Seismometer.

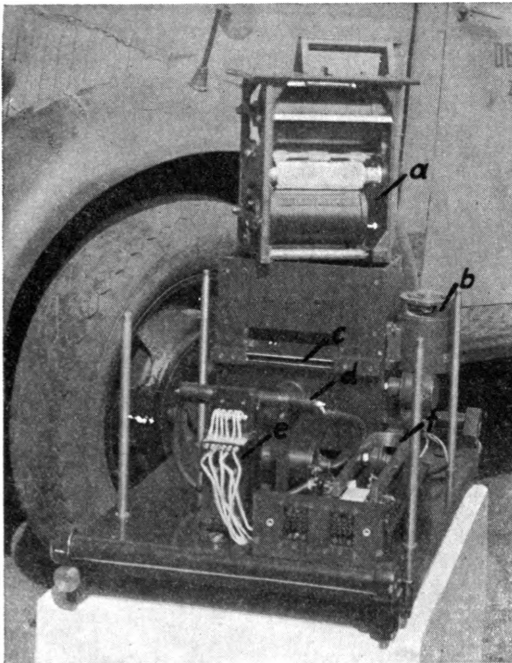


Abb. 15 b.

Innerer Aufbau der Registriereinrichtung.

a) Filmkassette (herausgezogen); b) Antriebmotor; c) Zylinderlinse; d) Geißlerrohr; e) Galvanometerblock mit Meßschleifen; f) Stimmgabelunterbrecher.

Laufzeitkurve der reflektierten Welle immer mehr der direkten Welle, da mit wachsender Entfernung ihr Wellenweg immer mehr mit dem der direkten Welle übereinstimmt. Die Zunahme der Laufzeit ist bei herdnahen Stationen sehr gering. Die Laufzeitkurve verläuft fast parallel zur Abszisse. Hat man also mehrere Beobachtungsstationen in Herdnähe, so müssen die Laufzeiten der Einsätze der direkten Welle immer größer werden, während die Laufzeiten von Amplituden der Reflexion praktisch gleichbleiben. Dieser Vorgang ist dann ein Kriterium dafür, daß das Vorhandensein einer gleichartigen Wellengruppe bei mehreren Stationen wirklich die Reflexion ist. Im Gegensatz zur Refraktionsseismik, bei der man mit langgestreckten Profilen und größeren Entfernungen arbeitet, werden bei der Reflexionsseismik kürzere Profile mit dichter Aufstellung der Instrumente benutzt. Die heutigen Untersuchungsmethoden arbeiten mit 24 Seismometern, neuerdings sogar mit 32, wobei die einzelnen Seismometer in 25 m Abstand aufgestellt werden und die Sprengung selbst in der Mitte des Profils stattfindet. Die Gesamtlänge des Profils ist dann $2 \times 300 = 600$ m. Es werden bis zu zehn Profile täglich hintereinander geschossen. Neben der Sprengstelle befindet sich gleichzeitig der Registrierwagen. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wird der Sprengpunkt immer an das Ende des Profils, also 300 m weiter verlegt. Dann bleibt die eine Hälfte der Seismometer an ihrem alten Beobachtungsort, während die zwölf übrigen in der Verlängerung des ersten Profils aufgestellt werden. Das heißt also, jede Meßstrecke wird automatisch

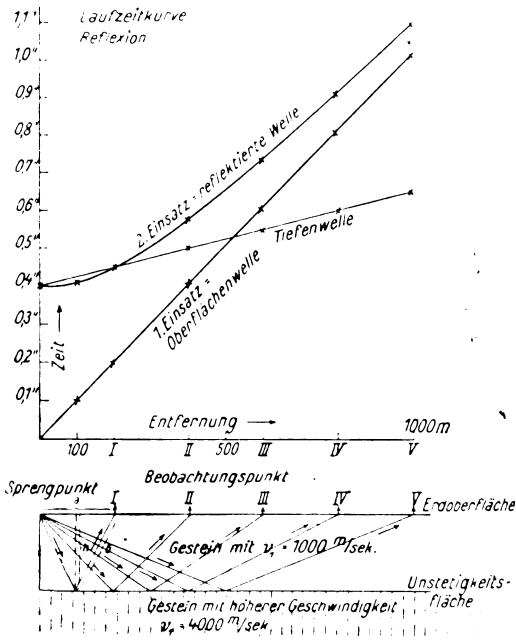


Abb. 16.
Laufzeitkurven bei herdnahen Stationen.

zweimal, also vor- und rückwärts abgeschossen, so daß sofort eine Kontrolle der Beobachtungen erreicht wird. Da die Reflexionen verhältnismäßig dicht auf die direkten Einsätze folgen und die Amplituden der ersten Einsätze infolge des kürzeren Wellenweges sehr groß sind, müssen die Verstärker eine Amplitudenregelung besitzen, die die Energie der direkten Wellen abdrosselt und dann

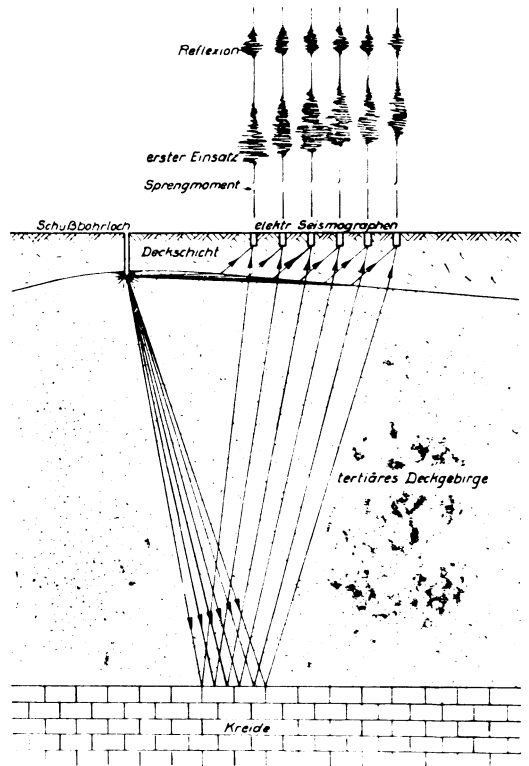


Abb. 17.
Wellenweg und Aufzeichnung reflektierter Wellen.

wieder die späteren Reflexionen genügend verstärkt. Außerdem sind noch Filterketten eingebaut, die es ermöglichen, die charakteristischen Frequenzen aus dem durch den Stoß erzeugten Wellenspektrum

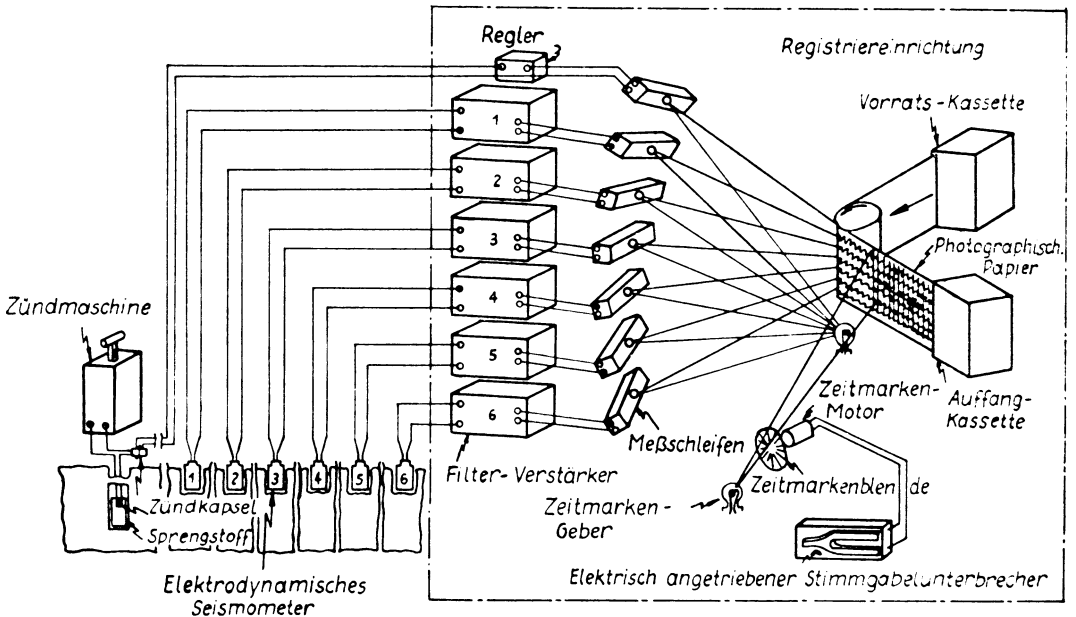


Abb. 18.
Prinzip einer Reflexionsapparatur.

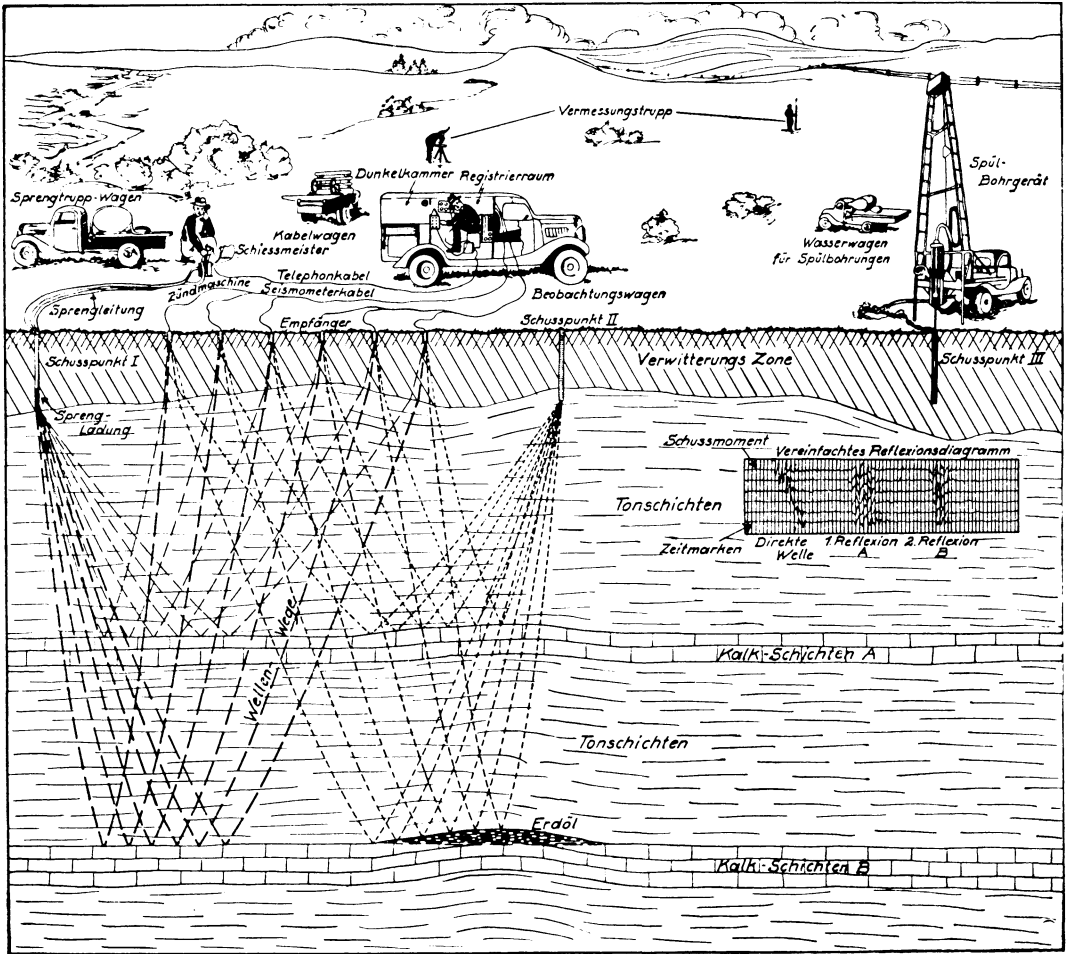


Abb. 19.

Arbeit eines Feldtrupps für Reflexionsseismik.

herauszusieben. Man erkennt also, daß gerade die Reflexionsseismik sehr hohe Anforderungen an die Apparatechnik stellt, obwohl das ganze Meßverfahren im Prinzip sehr einfach ist (Abb. 18). Übertragung des Sprengmomentes und Zeitmarkierung erfolgen in der gleichen Weise wie bei der Refraktionsseismik. Die prinzipielle Arbeitsweise geht aus der Abbildung 18 hervor.

Die Abbildung 19 soll die Gesamtarbeit eines Feldtrupps der Reflexionsseismik zeigen. Die Arbeit beginnt mit der Tätigkeit des Vermessungstrupps zur Festlegung des Profils und der Aufstellungsorte der Seismometer. Mit einem Spülbohrgerät werden die Sprenglöcher zur Aufnahme der Ladung hergestellt. Der Sprengtrupp verlegt die notwendigen Kabelleitungen. Im Registrierwagen befindet sich der Beobachter mit dem Registriergerät, das Galvanometer und Zeitmarkierung enthält. Auf ein besonderes Signal wird die Apparatur in Betrieb gesetzt, der Schuß wird vom Sprengmeister gelöst. Die elastischen Wellen breiten sich nach der Tiefe hin, werden von den Strukturen in der Tiefe reflektiert und dann mit Hilfe der Seismometersätze aufgezeichnet. Etwa 10 Minuten nach

dem Abfeuern des Sprengschusses liegt auch hier das Seismogramm zur Auswertung vor und zeigt die Einsätze der direkten und reflektierten Wellen in der schon früher beschriebenen Form, also einmal Abhängigkeit der Einsatzzeiten von der Entfernung und dann zeitlich auch Übereinstimmung der reflektierten Wellen.

Nach Möglichkeit werden die Beobachtungsreihen an ein Bohrloch angeschlossen, um die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb der obersten Schichten zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird ein Seismometer bis zur tiefsten Stelle des Bohrloches hinuntergelassen und an der Erdoberfläche ein Sprengschuß gelöst. Aus der Laufzeit der Welle und der bekannten Bohrlochtiefe hat man dann die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb der durchlaufenen Schichten. Ist kein Bohrloch vorhanden, sind mehrere orientierende Sprengungen vor Beginn des Reflexionsschießens erforderlich.

Die Meßtechnik ist heute so weit vorgeschritten, daß man bei senkrecht nebeneinandergehängten Registrierstreifen direkt durch die Lage der Reflexionen im Diagramm die Struktur des Unter-

grundes unmittelbar längs eines Gesamtprofiles von mehreren Kilometern Länge erkennen kann.

Wie wertvoll die Arbeit der seismischen Methoden für die Erdölgewinnung ist, geht aus dem ungeheuren Anstieg der Erdölproduktion in den letzten Jahren hervor. Im Weser-Ems-Land ist heute infolge völliger Erschließung des Untergrundes die Erdölproduktion so hoch wie die in ganz Mitteleuropa vor dem Kriege.

In Westdeutschland und im Ausland wird die geophysikalische Prospektierung vorwiegend von Erwerbsgesellschaften durchgeführt, von denen eine der bedeutendsten die von *Mintrop* selbst gegründete Seismos-Gesellschaft ist. Den gleichen Umfang besitzt die Prakla, die Gesellschaft für Praktische Lagerstättenforschung. Im Gegensatz hierzu hat in der Deutschen Demokratischen Republik der Staat selbst diese Aufgaben übernommen. Der Geophysikalische Dienst im Rahmen der Staatlichen Geologischen Kommission führt mit hochentwickelten Apparaturen die Feldarbeit durch

und hat bereits gute Erfolge erzielt. Die Aufgabe der Forschungsinstitute ist es, Instrumente und Methoden immer weiter zu vervollkommen, um die Güte der Beobachtungsergebnisse und die apparative Sicherheit bei der Feldarbeit weiter zu erhöhen.

Wir erkennen also abschließend, daß, ausgehend von der ersten einfachen Erkenntnis, daß sich Erdbebenwellen durch den Erdkörper breiten, heute exakte Aufschlußverfahren entwickelt worden sind, die die höchste wirtschaftliche Bedeutung besitzen. Das Zentralinstitut für Erdbebenforschung in Jena setzt seine ganze Forschungs- und Entwicklungstätigkeit vorwiegend für diese heute so vordringlichen Aufgaben ein, entsprechend dem von seinem ersten Direktor *Georg Gerland* vor 50 Jahren geprägten Leitsatz: „Eine Wissenschaft kann nur dann wirklich gedeihen, wenn sie Stellung im Leben hat. Stellung im Leben hat sie aber nur dann, wenn sie den Bedürfnissen des Einzelnen oder der Gesamtheit fördernd entgegenkommt.“