MITTEILUNGEN DER SEISMOS-GESELLSCHAFT.

II.

ZUR GESCHICHTE DES SEISMISCHEN VERFAHRENS ZUR ERFORSCHUNG VON GEBIRGSSCHICHTEN UND NUTZBAREN LAGERSTÄTTEN

VON

PROFESSOR Dr. L. MINTROP.

HANNOVER
SELBSTVERLAG DER SEISMOS, G. M. B. H.
1930.

MITTEILUNGEN DER SEISMOS-GESELLSCHAFT.

II.

ZUR GESCHICHTE DES SEISMISCHEN VERFAHRENS ZUR ERFORSCHUNG VON GEBIRGSSCHICHTEN UND NUTZBAREN LAGERSTÄTTEN

VON

PROFESSOR Dr. L. MINTROP.

HANNOVER
SELBSTVERLAG DER SEISMOS, G. M. B. H.
1930.

Alle Rechte vorbehalten.
Copyright by Seismos, G. m. b. H., Hannover.

VORWORT.

Die Wirtschaftsgeschichte des Verfahrens zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten mittels elastischer Wellen beginnt mit der am 2. April 1914 erfolgten Patentanmeldung des Amerikaners Reginald A. Fessenden betreffs „Methoden und Apparate zur Ermittlung von Erzkörpern". In der Patentbeschreibung erwähnt Fessenden, daß es ihm mit seiner Methode gelungen sei, die Lage eines verdeckten Erzkörpers zu ermitteln.

Das Verfahren von Fessenden besteht in folgendem: In dem Gebiete, das auf das Vorkommen verdeckter Erzkörper untersucht werden soll, werden Bohrlöcher niedergebracht und mit Wasser gefüllt. In ein Bohrloch wird ein Unterwasserschallsender versenkt, während in einem zweiten in einiger Entfernung von dem ersten niedergebrachten Bohrloch ein Schallempfänger untergebracht wird. Sender und Empfänger sind durch Drahtleitungen miteinander verbunden. Fessenden beobachtet nun die Zeit, welche zwischen der Aussendung des Schallimpulses in dem einen Bohrloch und der Ankunft der Tonwelle in dem anderen Bohrloch verstreicht. Da die Entfernung der beiden Bohrlöcher bekannt ist, ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit der Tonwellen in dem zwischen den beiden Bohrungen gelegenen Gebiete. Es bleibt dabei zunächst noch unbekannt, ob in dem Gebiete ein Erzkörper vorhanden ist, da nur die mittlere Geschwindigkeit der Wellen auf dem ganzen Wege zwischen den beiden Bohrungen gemessen wird. Fessenden bringt deshalb noch zwei weitere Bohrungen nieder, und zwar so, daß die nunmehr vorhandenen vier Bohrungen die Ecken eines Vierecks bilden. In den beiden neuen Bohrungen werden ebenfalls Schallempfänger untergebracht und mit dem Schallsender verbunden. Damit erhält Fessenden die Möglichkeit, die Laufzeit und Geschwindigkeit der Tonwellen in den Verbindungslinien zwischen den verschiedenen Bohrungen zu messen. Solange sich dabei gleiche Geschwindigkeiten ergeben, kann angenommen werden, daß der zwischen den Bohrungen anstehende Gebirgskörper homogen ist. Enthält der Gebirgskörper jedoch Einlagerungen von abweichender Elastizität, z. B. Erzkörper, so ergeben sich auf den Verbindungslinien zwischen je zwei Bohrlöchern ungleiche Wellengeschwindigkeiten. Die Lage des Erzkörpers läßt sich auf diese Weise in erster Annäherung bestimmen. Zur genaueren Ermittlung bringt Fessenden zwecks Beobachtung der Reflexionen, welche die Tonwellen an dem Erzkörper erleiden in eine der vier Bohrungen gleichzeitig je einen Unterwasserschallsender und -empfänger. Es werden die Richtungen der ausgesandten und reflektierten Wellen bestimmt und aus dem Schnittpunkt der Wellenstrahlen die Lage des reflektierenden Erzkörpers festgestellt. Durch Änderung des vertikalen Abstandes zwischen Sender und Empfänger kann auch der Winkel der Totalreflektion ermittelt werden, aus dem sich in Verbindung mit dem vertikalen Abstand von Sender und Empfänger sowie mit der Normalgeschwindigkeit der Tonwellen in dem betreffendem Gebiete der seitliche Abstand des Erzkörpers von der Bohrung ergibt. Unter Umständen hält Fessenden die Niederbringung einer neuen Bohrung in der Nähe des vermuteten Erzkörpers für notwendig.

Das Verfahren von Fessenden hat keine wirtschaftliche Bedeutung erlangt, vornehmlich deshalb nicht, weil das Niederbringen der Bohrungen sehr kostspielig und zeitraubend ist.

Ein zweiter Abschnitt in der Wirtschaftsgeschichte des Verfahrens der elastischen Wellen beginnt mit der am 7. Dezember 1919 durch den Verfasser erfolgten Anmeldung des Deutschen Reichspatentes Nr. 371963 betreffs „Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten". In der Patentbeschreibung werden zwei Fälle der Anwendung des Ver-

fahrens erwähnt, in dem einen Falle erfolgte die Ermittlung einer festen Gebirgsschicht unter einer 9 m starken Deckschicht aus losen Sanden.

Das Verfahren besteht in folgendem: In dem Gebiete, in dem der geologische Untergrund untersucht werden soll, werden an der Erdoberfläche seismische Wellen erzeugt, z. B. durch eine Sprengung. In verschiedenen Entfernungen von dieser Sprengung werden die Wellen mittels Seismographen aufgezeichnet. Die Zeiten, welche die Wellen zum Durchlaufen der Entfernungen gebrauchen, werden den Seismogrammen entnommen. Entfernungen und zugehörige Zeiten ergeben durch Eintragung in ein rechtwinkliges Koordinatensystem die „Laufzeitkurve". Aus der Laufzeitkurve werden die Geschwindigkeiten der Wellen in der an der Erdoberfläche sichtbaren sowie in der im Untergrunde anstehenden unsichtbaren Gebirgsschicht entnommen. Da jede geologische Gebirgsschicht eine ihr eigentümliche Geschwindigkeit hat, so läßt sich aus der ermittelten Wellengeschwindigkeit die Art der im Untergrunde anstehenden Schicht erkennen. Ferner kann an Hand der Laufzeitkurve die Tiefe berechnet werden, in der die Gebirgsschicht im Untergrunde ansteht. Auch mehrere untereinanderliegende Schichten verschiedener Elastizität lassen sich aus der Laufzeitkurve nach Art und Tiefe ermitteln. Der Verfasser folgt hierbei der erstmalig von Wiechert im Jahre 1907 aufgestellten Theorie der Ausbreitung der Erdbebenwellen und ihrer Anwendung auf die Laufzeitkurven natürlicher Erdbeben.

Im Gegensatz zu Fessenden vermeidet der Verfasser das Niederbringen von Bohrlöchern. Dementsprechend ist dem neuen Verfahren ein unvergleichlich größerer Erfolg beschieden gewesen als dem Verfahren von Fessenden. Über den Fortschritt, den das Verfahren des Verfassers gebracht hat, berichtet der amerikanische Geologe Donald C. Barton in dem von dem American Institute of Mining and Metallurgical Engineers in New York herausgegebenen Buche "Geophysical Prospecting 1929". Barton schreibt unter anderem, daß die Einführung des seismischen Verfahrens die Erschließung des Salzdom-Gebietes von Texas und Louisiana um 75 Jahre vorausgeworfen habe. In diesem Gebiete waren in den Jahren 1919 bis 1924 765 Suchbohrungen niedergebracht worden mit einem Kostenaufwand von rd 20 Millionen Dollars. Dabei wurde nur ein Salzdom gefunden. Dagegen sind in dem gleichen Gebiete nach der im Jahre 1924 erfolgten Einführung des seismischen Verfahrens durch die Seismos bis heute etwa 60 neue Salzdome gefunden worden in Tiefen bis zu 2000 m. Die Kosten dieser seismischen Sucharbeiten werden in der amerikanischen Literatur zu rd 30 Millionen Dollars berechnet. Zum Abbohren des seismisch untersuchten Gebietes von rd 300 000 qkm wären wenigstens 30 000 Bohrungen erforderlich gewesen mit einem Kostenaufwand von rd 1 Milliarde Dollars.

Angesichts der weltwirtschaftlichen Bedeutung des in 26 Ländern patentierten seismischen Verfahrens einerseits und der von deutschen Gelehrten unternommenen Angriffe auf das Deutsche Patent andererseits erscheint es notwendig, die Geschichte des Verfahrens und die Äußerungen der Wissenschaftler und Praktiker vor und nach der Bekanntmachung der Patentanmeldung an der Hand der Literatur darzustellen. Die Darstellung beginnt mit den Vorschlägen zu seismischen Geschwindigkeitsmessungen von Mallet in den Jahren 1846/48 und berücksichtigt alle bis heute erschienenen einschlägigen Druckschriften. Außerdem sind einige Zuschriften an den Verfasser aufgenommen worden, weil sie einen wesentlichen Beitrag zur Geschichte des seismischen Verfahrens liefern. Ein alphabetisches Verzeichnis der in der Darstellung erwähnten Autoren ist dem Text vorangestellt.

Hannover, den 25. Oktober 1929. *Mintrop.*

VERZEICHNIS DER AUTOREN.

Seite

Abbot 8
Ambronn . . . 47, 50, 51, 52, 70
Angenheister 74, 80
Ansel 72
Barton 84, 86
Baum 59
Belar 13, 17, 18
Belluigi 87
Benndorf 20
Beyschlag 61
Borne, von dem 22, 23
Bowles 46
Brown 83

Davis 83
Deubel 66, 78

Evans 34, 36
Exploration 76

Fessenden 30
Fouqué 10

Galitzin 27
Gutenberg 64, 72, 81

Haddock 88
Harboe 20
Haußmann 22
Hecker 11, 12, 77
Heiland 62, 67
Heise 47
Henning 24
Herbst 47
Hobbs 26
Hubert 65

Karcher 106
Kayser 34
Keilhack 30
Klebelsberg 19
Königsberger 62, 73
Krusch 30, 47
Kusakabe 16
Kühn 68

Láska 77
Leimbach 30, 50
Lévy 10

Seite

Linke 80
Logan 83, 85
Löwy 25

Mainka 47, 54, 55, 57
Malamphy 85
Mallet 7, 8
Marcosson 85
Martin 77
McCollum 96
Meißer 77, 79
Milne 9
Mintrop 23, 26, 30, 35, 49, 78, 88, 89
Mohorovičić, A. 25
Mohorovičić, S. 29
Müller 77

Nagaoka 15

Omori 11

Petraschek 64
Pfaff 8
Philipp 63
Pompecki 50
Pratt 83

Quiring 63

Rankine 88
Reich 59, 66, 69, 75, 79
Ritter 67
Rudski 11

Salomon 50
Schmidt 9
Schweydar 75
Seismos 51, 61
Sieberg . 14, 16, 33, 64, 77, 79
Stoller 81

Tams 25

Udden 45

Wagner 81
Weinzierl 82
Wiechert 20, 58, 64, 67
Wilip 27
Wroblewski 82

Zoeppritz 20

Der Gedanke, aus der Beobachtung an Erdbebenwellen Schlüsse auf den Aufbau der Erdrinde zu ziehen, hat die Seismologen und Geologen schon lange beschäftigt. Bereits Robert Mallet hat in der Sitzung der Royal Irish Academy vom 9. Februar 1846 vorgeschlagen, die damals bestehenden zahlreichen magnetischen Observatorien auch mit geeigneten Instrumenten für die Beobachtung von Erdbeben auszurüsten. Zugleich regte er an, große Mengen Pulver unter Wasser zur Detonation zu bringen und die dabei entstehende Erschütterung durch geeignete Instrumente in Entfernungen von vielen Meilen von der Sprengstelle zu beobachten. In den Transactions of the Royal Irish Academy, Band XXI, 1848 heißt es auf Seite 96:

Mallet 1846/1848

"It would, therefore, seem very desirable that suitable instruments for earthquake registration were, at least, added to all the magnetic observatories now so widely extended over the earth, accompanied by proper instructions to the observers, unless, indeed, separate geological observatories be established in favourable localities for taking cognizance of all movements of the earth's crust.

But another, and much more rapid, and perhaps even certain, method, remains to be noticed, for obtaining part of our data as to the specific period of wave transit, viz. by direct experiment, which in all matters of inductive science may be pronounced, whenever it is possible better than mere observation.

I have already stated that it is quite immaterial to the truth of my theory of earthquake motion what view be adopted, or what mechanism be assigned to account for the original impulse; so, in the determination of the time of transit of the elastic wave through the earth's crust, if we can only produce a wave, it is wholly immaterial in what way, or by what method, the original impulse be given.

Now the recent improvements in the art of exploding, at a given instant, large masses of gunpowder, at great depths under water, give us the power of producing, in fact, an artificial earthquake at pleasure; we can command with facility a sufficient impulse to set in motion an earth wave that shall be rendered evident by suitable instruments at the distance, probably, of many miles, and there is no difficulty in arranging such experiments, so that the explosion shall be produced by the observer of the time of transit himself, though at the distance of twenty or thirty miles, or that the moment of explosion shall be fixed, and the wave period registered by chronometers, at both extremities of the line for transit.

For this alone very moderate charges of powder will answer, but if the explosion be made out at sea with sufficient energy, there will not only be produced the transit of the earth wave and the sound waves through the sea and air, but the accumulation and subsequent coming in of the great sea wave, so that all the phenomena of the natural earthquake are thus placed within our power of production, observation, and control.

These are experiments, the value of which, to general physics as well as to geology, will be admitted; but they cannot be made without the aid and appliances which our Government can afford, through the Admiralty and Royal Engineer departments. It cannot be doubted, but that application made for such assistance, through the Royal Irish Academy, or some other of our learned bodies, to the proper authorities, would meet with a favourable reception.

It is to be remembered, however, that these direct experiments can only give the time of wave transit for the substances forming the very uppermost crust of the earth. That

earthquake shocks often come from profound depths is in a high degree probable, and while down to a certain depth we may expect to find the density and elasticity of the earth's crust continually increasing, below this again, we must suppose the mineral masses in a more and more softened or even party condition, as they approach the lower fluid region, and hence possessed of lower elasticity. While, therefore, we cannot draw direct conclusions as to the time of transit of the wave in the rocks thus circumstanced at profound depths, from its time of transit in the solid rocks or superficial deposits of the surface, we may reasonable expect to derive information as to some of the physical characters and molecular condition of the deep rocks themselves, by comparing observations of the actual time of wave transit of natural shocks, coming from great depths, with that of natural or artificial shocks traversing at the surface or near it."

Mallet setzt in dieser ersten Arbeit seine Pläne mit künstlich erzeugten Erdbeben auseinander, und betont, daß die Geschwindigkeitsmessungen an oberflächlich erzeugten und beobachteten Sprengungen über die Beschaffenheit der tieferen Schichten keine Auskunft geben können. Wohl erwartet Mallet einige Aufklärung über die Tiefenschichten durch Vergleich der bei natürlichen Erdbeben aus der Tiefe kommenden Wellen mit den an der Erdoberfläche durch Sprengungen erzeugten Wellen, die nur die obersten Schichten durchlaufen haben. Mallet hatte demnach das Wesen der Wiechert'schen Methode, Art und Tiefe der Schichten aus Beobachtungen natürlicher Erdbeben allein abzuleiten sowie das Mintrop-Verfahren bei künstlichen Erdbeben noch nicht erkannt.

Mallet 1859

In einer zweiten Arbeit von Mallet aus dem Jahre 1859 werden die Ergebnisse von Geschwindigkeitsmessungen im Sandstein und im Granit mitgeteilt. Im Sand betrug die Geschwindigkeit 825 Fuß = rd 250 m pro Sekunde, im porösen Granit 1306 Fuß = 400 m pro Sekunde, im festen Granit 1665' = 510 m pro Sekunde, ferner ergab sich in den Steinbrüchen bei Holyhood ein Mittelwert von 1320 Fuß = 400 m pro Sekunde. Diese Werte sind außerordentlich niedrig und beziehen sich, wie wir heute wissen, sicher nicht auf die auch in die Tiefe dringenden longitudinalen Vorläufer, sondern auf die Oberflächenwellen.

Pfaff 1873

Im Jahre 1873 ging Dr. Fr. Pfaff, Professor an der Universität Erlangen, auf Mallet's Untersuchungen, soweit sie sich mit der Ermittlung der Tiefe eines Erdbebenherdes befassen, ein, jedoch nicht auf Mallet's Messungen der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten. Über letztere sagt Pfaff auf Seite 225 nur: „Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ‹der Erdbebenwellen› entspricht genau der aus der Elastizität der Gesteine berechneten 1600—2000 Fuß in der Sekunde, d. h. sie zeigt sich so groß, wie sie experimentell bestimmt werden kann, wenn man durch einen heftigen Stoß Erschütterungen in einem Gestein erzeugt." Von einer Anwendung der Geschwindigkeitsmessungen auf die Ermittlungen der in der Tiefe unter der Erdoberfläche befindlichen Gebirgsschichten, noch von einem Verfahren, wonach diese Ermittlung erfolgen könnte, ist weder bei Pfaff noch bei Mallet die Rede. Im übrigen entsprechen weder die Geschwindigkeitsangaben von Mallet wie von Pfaff auch nur einigermaßen der Wirklichkeit, in der sie bis zu zehnmal größer sind.

Abbot 1878

Im Jahre 1878 veröffentlichte Abbot eine Arbeit "On the Velocity of Transmission of Earth Waves" in American Journal of Science and Arts, Band XV, 1878. Er berichtet über die Geschwindigkeitsmessungen gelegentlich einer Dynamit-Explosion von 50000 engl. Pfund = 23000 kg, ~~an~~ bei Hallet's Point, bei Newyork, am 24. September 1876, wobei in 13 km Entfernung eine Wellengeschwindigkeit von 2500 m pro Sekunde und in 22 km von 1600 m pro Sekunde festgestellt worden ist.

Angriffe von Mallet im "London, Edinbourgh und Dublin Philosophy-Magazin" im Oktober 1878, welche die Ergebnisse der Abbot'schen Beobachtungen bei Hallet's Point bezweifelten, veranlaßten Abbot zur Vornahme eingehender Versuche, die bei Willet's Point vorgenommen wurden und sich über Entfernungen von 2—20 km und Sprengladungen von 30—180 kg erstreckten.

Aus 15 verschiedenen Messungen ergab sich eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 5900 Fuß = 1800 m pro Sekunde. Die kleinste Geschwindigkeit betrug 380 m, die größte 2700 m pro Sekunde. Wenngleich diese Werte im allgemeinen plausibel erscheinen, so ist die Streuung untereinander so groß, daß ihre Ursache in der verschiedenen Art und Größe der Sprengladung gesucht wurde. Dagegen zog Abbot aus seinen Messungen keinerlei Schlüsse auf die Beschaffenheit des geologischen Untergrundes.

Bei beiden Autoren, Mallet und Abbot, ist mit keinem Wort davon die Rede, daß aus den verschiedenen Geschwindigkeiten bisher unbekannte Schichten im Untergrund festgestellt werden sollen. Die Beobachtungen beziehen sich vielmehr auf die Feststellung der Geschwindigkeiten in bekannten Schichten, z. B. bei Mallet in Sand und Granit getrennt von einander und nicht etwa so, daß der Granit durch Sand verdeckt gewesen und durch Mallet's Schießen erst festgestellt worden wäre. Wie die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Mallet und Abbot sowie die Schlußfolgerungen Abbot's zeigen, ist noch nicht einmal die Aufgabe, in bekannten Schichten exakte Geschwindigkeiten zu messen, gelöst worden, sondern in den Anfängen steckengeblieben.

Milne 1885

Im Jahre 1885 veröffentlichte Milne in "Transactions of the Seismological Society of Japan, Vol. VIII", die Ergebnisse von Geschwindigkeitsmessungen bei insgesamt 17 Sprengungen. Bei 3 Sprengungen bestand der Boden aus schwarzem Schlamm mit einem Fuß Bedeckung durch Dammerde, die Geschwindigkeit betrug 105 m pro Sekunde. Bei dem zweiten Versuch bestand der Boden aus 5—6 Fuß rötlicher Erde mit Geröll und darunter aus hartem, schwärzlichem Lehm. Im Mittel aus 7 Sprengungen ergab sich eine Geschwindigkeit von 83 m pro Sekunde und bei einer Wiederholung mit ebenfalls 7 Sprengungen 91 m pro Sekunde. Milne beschreibt die Zusammensetzung der Bodenschichten genau, unterscheidet aber nicht zwischen oberer und unterer Schicht, sondern gibt nur eine mittlere Geschwindigkeit für beide Schichten an. Von einer Trennung der Schichten auf Grund der seismischen Messungen ist nicht die Rede.

A. Schmidt 1888

Im Jahre 1888 erschien im 44. Jahrgang der „Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg" (E. Schweizerbart'sche Verlagshandlung in Stuttgart) eine Arbeit des Realgymnasial-Professors A. Schmidt in Stuttgart über „Wellenbewegung und Erdbeben", ein Beitrag zur Dynamik der Erdbeben. In dieser Veröffentlichung wird die Theorie der Ausbreitung der Erdbebenwellen entwickelt, die später von Rudski, Benndorf und besonders im Jahre 1907 von Wiechert und Zoeppritz eingehender behandelt worden ist. Schmidt unterscheidet schon zwischen Tiefengeschwindigkeiten, Raumgeschwindigkeiten sowie scheinbaren Oberflächengeschwindigkeiten und befaßt sich sehr eingehend mit der Aufstellung und Deutung der Hodographen (Laufzeitkurven). Es werden 2 Beispiele durchgerechnet, von denen das eine sich auf das mitteldeutsche Erdbeben vom 6. März 1872 mit Herdentfernungen zwischen 30 und 500 km und einer berechneten Herdtiefe von wenigstens 40 km bezieht, während das andere das Erdbeben von Herzogenrath vom 22. Oktober 1873 betrifft, bei welchem die Herdentfernungen zwischen 3 und 150 km lagen und die Tiefe des Hypozentrums zu höchstens 3 km berechnet wurde.

Die Arbeit von Schmidt bricht mit der bis dahin gültigen Vorstellung von einer konzentrischen Ausbreitung der Erdbebenwellen mit geradlinigen Stoßstrahlen, sowie mit der Anschauung von einer hyperbolischen Gestalt des Hodographen und weist eine mit der Tiefe zunehmende Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen mit nach unten konvex gekrümmten Stoßlinien nach. Diese neue Vorstellung erklärt, wie Schmidt ausführt, die große Verschiedenheit der Versuchsresultate von Pfaff, Mallet und Abbot. Hierüber schreibt Schmidt: „Eine zweite Schwierigkeit für die Bestimmung der Herdtiefe liegt im Mangel unserer Kenntnis der wahren Oberflächengeschwindigkeit (nicht der scheinbaren), diese muß jedenfalls kleiner sein als die schwächsten Pulverladungen bei den Versuchen Pfaff's, Mallet's und Abbot's ergeben haben, denn wie schon gezeigt, müssen diese um so größere Resultate ergeben, in je weiterer Entfernung vom Zentrum die Messung vorgenommen wird."

Über zukünftig anzustellende Versuche schreibt Schmidt: „Hoffen wir, das zunehmende Interesse der breitesten Bevölkerungsschichten an der Erdbebenfrage werde uns künftig mit reichlichem und gutem Beobachtungsmaterial ausstatten; es werden empfindliche Seismographen in Verbindung mit gutgehenden Uhren uns künftig eine immer genauere Feststellung der Stoßzeiten, auch die Stoßrichtungen und Stoßintensitäten nicht ausgeschlossen, geben, um auf Grund solcher Beobachtungen einem gewiß vorhandenen Gesetze der Geschwindigkeitsänderung mit der Tiefe experimentell immer näher zu kommen. Besonders ließe sich für Ergründung dieses Gesetzes sehr viel aus der Wiederholung künstlicher Versuche gewinnen, denn gerade der Hodograph für ein oberflächliches Zentrum würde über die den einzelnen Tiefenstufen zukommenden Fortpflanzungsgeschwindigkeiten die besten Aufschlüsse gewähren"

A. Schmidt spricht hier aus, daß die Gesetze der Geschwindigkeitsänderungen mit der Tiefe zwar noch unbekannt seien, indessen werde man an Hodographen von künstlichen Erdbeben Aufschlüsse über die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Tiefenstufen erhalten. Schmidt stellte jedoch keine Hodographen von künstlich erzeugten Erdbeben auf und spricht auch nicht aus, daß er hoffe, auf diese Weise die verschiedenen Gesteinsarten in der Tiefe ermitteln zu können. In dieser Hinsicht muß aus der Arbeit von Schmidt entnommen werden, daß er diese Möglichkeit nicht für gegeben ansah, denn an anderer Stelle ⟨Seite 249⟩ heißt es:

„Obgleich nun die Ausbreitung der Energie von einem Punkt im Innern der Erdkruste aus wegen des Wechsels der Mineralien, wegen der Mannigfaltigkeit von Schichtung und Zerklüftung eine höchst mannigfaltige und im einzelnen unregelmäßige sein wird, so läßt sich doch erwarten, daß eben durch das Zusammenwirken der Elementarwellen die kleineren Unregelmäßigkeiten sich ausgleichen, die im selben Sinne sich wiederholenden zu besonderen Gesetzmäßigkeiten sich vereinigen werden, so daß in der Ausbreitung der Gesamtwelle sich eine im einzelnen durch kleine Störungen unterbrochene Regelmäßigkeit im großen muß erkennen lassen, ähnlich wie wenn die Welle im homogenen Material sich ausgebreitet hätte."

Aus diesen Ausführungen ist zu entnehmen, daß A. Schmidt die Ermittlung einzelner Gebirgsschichten nicht für möglich hielt, vielmehr als Ergebnis der anzustellenden Messungen nur Mittelwerte erwartete.

Fouqué, Lévy 1889

Wahrscheinlichere Ergebnisse als Mallet, Abbot und Milne erzielten Fouqué und Lévy ⟨Mémoires de l'Academie des Sciences, T. XXX, Nr. 2, 1889⟩, welche die Geschwindigkeitsmessungen über Tage und in einem Bergwerk in 143 m Tiefe vornahmen und automatische Registrierung der durch Sprengungen erzeugten Wellen anwendeten. Fouqué und Lévy sind nicht auf den Gedanken gekommen, die Geschwindigkeiten der Tiefenschichten von der Erdoberfläche aus zu ermitteln, wie dies bei Benutzung des Laufzeitkurven-Verfahrens möglich gewesen wäre, sondern sie haben die Geschwindigkeiten über Tage und die Geschwindigkeiten unter Tage getrennt voneinander gemessen, und zwar in bereits bekannten Gesteinen. Sie fassen das Ergebnis ihrer Arbeit am Schluß der Veröffentlichung zusammen wie folgt:

»En résumé, ces expériences semblent indiquer que la propagations des vibrations ne ce fait pas de la même façon a la surface du sol que lorsqu'on évite le cheminement superficial. Dans le premier cas, une série de maxima successives et le phénomène se prolonge longtemps.

Dans le second cas il n'y a qu'un maximum observable, et les vibrations s'éteignent rapidement.

En un mot, les photographies obtenues à distances dans une mine ressemblant à celles que donnent à la surface du sol les ébranlements voisins de la cuve à mercure. Les différentes formations geéologigues donnent les vitesses très variables: à ce point de vue, il peut être intéressant de rapprocher les principales vitesses que nous avons déterminées. Dans le granit vitesses 2450 à 3141 m/sec. Dans le grés permiens moins agglutinés 1190 m/sec. Dans les grés homillers compacts 2000 à 2526 m/sec. Dans le marbe cambrien 632 m/sec.

Dans les sables de Fontainbleau environ 300 m/sec. Les nombres que résultant ainsi de nos expériences se rapprochent beaucoup de ceux qui ont été formis par Abbot, ils s'éloignent au contraire considerablement de ceux qui sont dû aux autres observateurs. Les résultats auxquels conduit l'analyse phénomène donnent en partie l'explication des différences, car ils en montrent la complexité et font voir qu'un choc unique engendre les vibrations d'un égal intensité que se propagent dans le sol avec des vitesses différentes.«

Rudski 1898

Aus den, 10 Jahre nach der Veröffentlichung von A. Schmidt, erschienenen Arbeiten von M. P. Rudski: „Über die scheinbare Geschwindigkeit der Verbreitung der Erdbeben" sowie „Von der Gestalt elastischer Wellen in Gesteinen", Gerlands Beiträge zur Geophysik, Band III, 1898, geht hervor, daß Rudski die Möglichkeit, die einzelnen Gebirgsschichten zu bestimmen, für ausgeschlossen hält. Zweck der ersten Arbeit von Rudski ist die mathematische Bearbeitung der Schmidt'schen Theorie krummliniger Erdbebenstrahlen. Auf Seite 517 schreibt Rudski: „Etwas bedenklicher erscheint der Umstand, daß man der notorischen Unregelmäßigkeit des Baues oberer Schichten nicht Rechnung trägt und auch nicht tragen kann. Übrigens glauben wir, daß gegenwärtig noch keineswegs der Zeitpunkt gekommen ist, um auf Grund der Beobachtungen die Bestimmung der Funktion n (= Brechungsindex) für das Innere der Erde zu versuchen. Am Schluß der zweiten Abhandlung heißt es auf Seite 540: „Zum Schluß wollen wir bemerken, daß der Zweck dieser Abhandlung nur in der Untersuchung einer gewissen Seite der Theorien der Erdbeben bestand. Dementsprechend soll man nicht meinen, daß das hier untersuchte ideelle Medium vom Autor als ein in allen Hinsichten vollkommenes Modell der Erdgesteine aufgestellt wurde."

Hecker 1897/1900

Neun bzw. elf Jahre nach dem Erscheinen der Arbeit von A. Schmidt über Wellenbewegung und Erdbeben hat O. Hecker Geschwindigkeitsmessungen an künstlich erzeugten Erdbeben ausgeführt. Über die Ergebnisse der Beobachtung der ersten Sprengung, die am 6. Mai 1897 in Kummersdorf mit 1500 kg Dynamit erfolgte, wird im Jahre 1900 in Band IV von Gerlands Beiträgen zur Geophysik berichtet. Hecker stellte bei den Messungen neun Horizontalseismographen in einer Linie im Abstande von je 70 m voneinander auf und übertrug den Augenblick der Sprengung elektrisch auf die einzelnen Registrierapparate. Dabei ergab sich die Geschwindigkeit der „longitudinalen Hauptwellen" zu 205 m pro Sekunde. Eine Veränderung der Geschwindigkeit mit wachsender Entfernung konnte nicht konstatiert werden, da nicht alle Zeitmarken deutlich waren. Hecker bemerkt, daß den Hauptwellen sehr kleine Vibrationen vorausgegangen seien, die aber zu schwach gewesen seien, um in den Abbildungen der Seismogramme wiedergegeben werden zu können.

Über die beobachtete Veränderung des Aussehens der Hauptwelle mit zunehmender Entfernung von der Sprengstelle schreibt Hecker: „Ist dieses Zerfallen der Hauptwelle in kleinere durch die Inhomogenität des Bodens bedingt ‹es befanden sich ein ungefähr 2 m tiefer kurzer Graben und eine kleine Anhöhe von 3—4 m Höhe in der Nähe der Fluchtlinie, in der die Apparate standen›, so ist das ein Beweis dafür, daß sich bei Explosionen an der Erdoberfläche die longitudinale Erschütterungswelle nur bis in geringe Tiefen hinein erstreckt, da sich sonst die Hauptwelle durch Beugung, Interferenz usw. nicht so sehr verändert haben könnte." Hier spricht Hecker also den „longitudinalen Erschütterungswellen" die Eigenschaft ab, Aufschluß über die Beschaffenheit der Gebirgsschichten in der Tiefe zu geben, weil sie garnicht in die Tiefe eindringen, sondern an der Oberfläche blieben.

Außer den Messungen der Hauptwelle in der Nähe der Sprengung bis zu 631 m Abstand, wurde noch in 6200 m Entfernung durch den Japaner Omori an einem Quecksilberhorizont beobachtet, wobei sich aus der Zeitdifferenz zwischen Sprengung und erster Störung sowie der Entfernung von 6200 m eine Geschwindigkeit von 1430 m pro Sekunde ergab. Hecker bemerkt dazu: „Diese Beobachtungen geben also wiederum den Beweis, wie außerordentlich verschieden die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Wellenformen sind und wie sehr voneinander abweichende Resultate man erhält, je nachdem die benutzten

Apparate für die eine oder für die andere Wellenform der Bodenbewegung empfindlich sind." Alles in allem geht aus der Hecker'schen Arbeit hervor, daß die Vorstellungen über die Ausbreitung künstlich erzeugter Erdbebenwellen im Jahre 1900 noch recht unklar waren. Insbesondere ist die Feststellung wichtig, daß an eine Tiefenwirkung der Sprengung, d. h. an eine Ausbreitung der bei der Sprengung erzeugten Bodenschwingungen in große Tiefen, nicht geglaubt wurde.

Hecker 1899/1904

Am 12. Oktober 1899 beobachtete Hecker, ebenfalls in Kummersdorf, eine Sprengung von 1500 kg Sprenggelatine mit Horizontal- und Vertikal-Seismographen in fünf verschiedenen Entfernungen von 70 bis 350 m Abstand von der Sprengstelle. Über diese Beobachtungen ist im Jahre 1904 in Band VI von Gerland's Beiträgen zur Geophysik berichtet worden. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der „Hauptwelle" ergab sich zu 238 m pro Sekunde gegenüber 205 m pro Sekunde bei der ersten Sprengung am 6. Mai 1897. Vor der Ankunft der Hauptwelle traten kleine Wellen auf, die sich bei einigen Kurven erkennen ließen, auf den Vervielfältigungen der Seismogramme aber wegen ihrer Kleinheit nicht wiedergeben werden konnten. Ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit ließ sich nicht ableiten, da ihr Eintritt sich nicht scharf genug markierte. Es ließ sich nur sagen, daß die Geschwindigkeit dieser Wellen sehr viel größer ist als die der Hauptwellen. Ihre Periodendauer war sehr kurz. In etwa 500 m Entfernung von der Sprengstelle war die Verspätung der Hauptwellen gegenüber den kleinen Wellen sehr auffällig. Unmittelbar nach dem Aufblitzen des Sprengstoffes trat das eigentümliche Erzittern des Bodens ein, das den Durchgang der Wellen kurzer Perioden durch den Erdboden kennzeichnet; darauf vernahm man den von der Explosion herrührenden dumpfen Knall in der Luft, und dann erst machte sich die große Bewegung des Bodens fühlbar.

Hecker nimmt nun an, daß die vorauseilenden Wellen Kompressionswellen sind, während es sich bei den Hauptwellen um Verschiebungswellen handelt. „Um einen vollgültigen Beweis dafür zu erhalten, daß die erste Phase der Aufzeichnungen der seismischen Instrumente bei entfernten Erdbeben Kompressionswellen sind und daß die zweite oder wie sie jetzt gewöhnlich bezeichnet wird, die dritte Phase, die großen Ausschläge, Verschiebungswellen sind, ist das Experiment von größter Bedeutung. Mit Hilfe der vervollkommneten Instrumente, über die die seismische Forschung jetzt verfügt, wären an Orten mit möglichster Homogenität der oberen Schichten der Erdkruste derartige Untersuchungen auszuführen. Ist mit Sicherheit nachzuweisen, daß die erste Phase der Wellenbewegung von Kompressionswellen gebildet wird, wie es den Anschein hat, so ist damit ein großer Schritt zur Erweiterung unserer Kenntnisse des Erdinnern getan. Ergibt sich nämlich aus den Beobachtungen, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verschiebungswellen im Bogen des größten Kreises gemessen konstant oder wenigstens genähert konstant ist — eine wirkliche Konstanz kann nicht vorhanden sein, da die Geschwindigkeit durch die verschiedene geologische Beschaffenheit der durchlaufenden Schichten wesentlich beeinflußt wird — so folgt daraus, daß die Verschiebungswellen sich nur in den oberen Schichten der Erdkruste fortpflanzen, wenn man nicht ganz unwahrscheinliche Annahmen machen will. Die Kompressionswellen werden dagegen unter allen Umständen einen Teil des Erdinnern durchlaufen, mag es fest oder flüssig sein, und zwar werden sie sich im allgemeinen nicht in einer geraden Verbindungslinie zwischen dem Erdbebenherde und dem Beobachtungsorte fortbewegen, sondern sich einen anderen Weg wählen, der von dem Verhältnis von Elastizität und Dichte in den verschiedenen Tiefen im Erdinnern abhängt. Die von verschiedenen Forschern angestellten Untersuchungen ergeben bereits mit einiger Sicherheit, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der ersten Phase der Erdbebenbewegung eine mit der Entfernung vom Erdbebenherde beträchtlich wachsende Geschwindigkeit aufweist. Würde sich nun auch die konstante Geschwindigkeit der Verschiebungswellen, wie sie anscheinend vorhanden ist, mit Sicherheit herausstellen, so würde das einen Beweis dafür erbringen, daß das Erdinnere nicht fest ist. Dieser Beweis wird sich jedoch erst dann führen lassen, wenn ein Netz von Beobachtungsstationen den Erdball umspannt, die ausgerüstet

mit möglichst empfindlichen und gleichartigen Instrumenten, vergleichbares Beobachtungsmaterial ergeben, was bis jetzt nur in sehr geringem Maße vorhanden ist."

Gegenüber der ersten im Jahre 1900 erschienenen Arbeit von Hecker bedeuten die im Jahre 1904 veröffentlichten Ergebnisse einen Fortschritt insofern, als das Problem, mit Hilfe der seismischen Wellen das Erdinnere zu erforschen, schon klarer erkannt wird. Andererseits ist es Hecker aber beide Male noch nicht gelungen, eine Laufzeitkurve der in die Tiefe dringenden Kompressionswellen aufzustellen. Dementsprechend ist auch von einer Erforschung der Beschaffenheit der Tiefenschichten noch nicht die Rede.

Zwischen den beiden Arbeiten von Hecker aus den Jahren 1900 und 1904 liegt eine Notiz von A. Belar vom Jahre 1901 „Über eine neue praktische Verwendung der Erdbebenmesser" in der Zeitschrift „Die Erdbebenwarte", I. Jahrgang, Monatsheft 4/5, Seite 59. Die Notiz lautet: „Allgemein bekannt ist die Tatsache, daß bei örtlichen Erschütterungen unter sonst gleichen Verhältnissen jene Baulichkeiten, welche auf lockerem Boden, sei es Schotter oder Lehmgrund, stehen, stärker in Mitleidenschaft gezogen werden als Gebäude, die auf Felsboden aufgebaut sind. Auch gelegentlich der starken Erdbeben in Laibach konnte man die Wahrnehmung machen, daß die Häuser, die auf Gesteinsboden, so z. B. an den Lehnen des Schloßberges stehen, im allgemeinen viel weniger erschüttert wurden und auch weniger gelitten haben als jene, die in der Ebene auf dem Schotterfelde gelegen sind. Ebenso verschieden lauteten die einzelnen Beobachtungen, die gelegentlich der Erdstöße von Menschen auf der einen oder der anderen Bodenart gemacht wurden. Im allgemeinen charakterisierte man ein und dieselbe örtliche Erschütterung bald als ein kurzes Zittern, bald als ein Schaukeln und Schwanken, je nachdem der Beobachter Felsboden oder im letzteren Falle lockeres Terrain zu Füßen hatte. Die Verschiedenheit des Bewegungscharakters liegt nun in der Natur der Bodenwellen, die sich ganz anders im Gestein als im lockeren Boden fortpflanzen, oder mit anderen Worten gesagt: Die Form und Art der Bodenschwingungen ist abhängig von den Elastizitätsverhältnissen des Mediums, welches die Erdwellen passieren. Belar 1901

Heutzutage, wo damit begonnen worden ist, die leisesten Erzitterungen des Bodens sowie auch langsame Niveauänderungen, die man etwa mit den Pulsschlägen vergleichen könnte, mit Hilfe äußerst empfindlicher Instrumente in allen Einzelheiten von denselben aufzeichnen zu lassen, hat man auch schon erkannt, daß die Bodenbewegungen auf gleichen Instrumenten, die auf verschiedenen Punkten der Erde aufgestellt sind, ungleichartige Bebenbilder einzeichnen, und man hat erkannt, daß zum großen Teile der Untergrund, auf welchem die Instrumente stehen, die Art der Aufzeichnung beeinflußt. So z. B. sammelte man Erfahrungen mit ein und demselben Instrumente, welches vor einigen Jahren zur Ausprüfung in Padua aufgestellt war und dann nach Laibach übertragen wurde. Es stellte sich dabei nämlich heraus, daß die vielfältigen künstlichen Bodenerschütterungen, hervorgerufen durch den Verkehr in der Stadt Padua, am Instrumente einen ganz anderen Charakter zeigten als die gleichen Bewegungen in Laibach. Doch auch in ein und demselben Orte könnte man verschiedene Bebenbilder erhalten, wenn man ein Instrument auf Schotterboden und ein anderes auf Felsgrund aufstellen würde. Ohne besondere Schwierigkeiten wäre man also mit Hilfe der Erdbebenmesser in der Lage, bestimmen zu können, welcher Art oder Zusammensetzung der Boden ist, auf welchem jeweilig die Apparate aufgestellt sind. Auf Grund dieser Tatsachen könnten wir von diesen modernen, empfindlichen Instrumenten leicht einen praktischen Nutzen ziehen, insbesondere dort, wo wir im vorhinein die Zusammensetzung der Erdkruste kennenlernen wollen, um mit Vorteil eine Tunnelbohrung zu unternehmen. Eine experimentell durchgeführte Versuchsreihe längs der Tunneltrace an der Erdoberfläche würde genügen, um uns über die Elastizitätsverhältnisse oder sagen wir über die Bodenfestigkeit einer bestimmten, uns sonst nicht zugänglichen Bodenstrecke im vorhinein ein Urteil zu bilden. Die Versuche wären leicht durchführbar, indem man passende Instrumente, transportable, empfindliche Erdbebenmesser an den verschiedenen zu untersuchenden Punkten aufstellen

würde. Gleichzeitig müßte man künstliche Erschütterungen hervorrufen, am besten durch Minen, die in einer gewünschten Tiefe zur Explosion gebracht werden. Die nun durch eine Explosion hervorgerufenen Bodenschwingungen werden sich an den an der Erdoberfläche aufgestellten Instrumenten nach Zeit und Art verschieden einzeichnen und aus den Aufzeichnungen wird man bei einigem Vergleichsmaterial leicht einen Schluß ziehen können über die Bodenbeschaffenheit jener Stellen, welche diese künstlich hervorgerufenen Schütterwellen durchlaufen haben. Heute, wo die experimentelle Erdbebenforschung sich die Erschließung des Erdinnern über jene Grenzen hinaus, die uns seit jeher gezogen waren, zur Aufgabe gestellt hat, darf man nicht mehr daran zweifeln, daß es mit Hilfe der Instrumente möglich sei, die Zusammensetzung der Erdrinde von der Oberfläche aus klassifizieren zu können. Eben jetzt sollte man sich die schöne Gelegenheit bei den Tunnelbauten der Tauernbahn nicht entgehen lassen, und die maßgebenden Faktoren mögen diese vielversprechenden Versuche ernstlich ins Auge fassen."

Der Belar'sche Vorschlag ist der erste konkrete literarische Hinweis auf die Verwendungsmöglichkeit von künstlichen Erdbeben und Seismographen zur Erforschung des geologischen Untergrundes einer bestimmten Gegend, im vorliegenden Falle des Profiles durch eine Tunnelachse. Belar vermutet, daß die durch eine Sprengung hervorgerufenen Erschütterungswellen sich bei wechselndem, geologischem Untergrund nach Zeit und Art auf den Seismographen verschieden einzeichnen werden. Worin die Verschiedenheit bestehen soll, gibt Belar nicht an. Er will die Zeiten vergleichen, welche die Wellen gebrauchen, um von der Sprengstelle zu den verschiedenen Beobachtungspunkten zu gelangen, und vermutlich annehmen, daß bei losen Schichten die Zeiten länger sein werden als bei festen Schichten. Solche Schlüsse sind in bezug auf die Tiefenschichten, auf die es beim Auffahren eines Tunnels ankommt, ohne die Aufstellung und Auswertung einer Laufzeitkurve nicht möglich. Von dieser ist bei Belar aber nicht die Rede, außerdem schlägt Belar Sprengungen in einer „gewünschten Tiefe", also nicht an der Oberfläche vor, nur die Apparate sollen an der Oberfläche stehen. Wie aus den Arbeiten von Hecker hervorgeht, war ihm die Aufstellung einer Laufzeitkurve trotz der Verwendung von 15000 kg Sprengstoff auf Entfernungen von 70—350 m bzw. von 70—631 m nicht gelungen. Über den Verlauf der Tiefenwellen herrschten nach Hecker auch im Jahre 1904 noch recht unklare Vorstellungen, so daß die Vorschläge Belar's eine praktische Auswirkung nicht gehabt haben. Es bleibt die Frage offen, was Belar mit seinem Vorschlage gemeint hat. Daß er die Aufstellung und vor allem die Benutzung der Laufzeitkurve zwecks Ermittlung der Tiefe und Beschaffenheit von Gebirgsschichten nicht gemeint hat, geht aus den Belar'schen Ausführungen ohne weiteres hervor. Ein heute lebender Fachmann, der über das Mintrop-Verfahren unterrichtet ist und vor allem die letzten Jahre erlebt hat, in denen das Mintrop-Verfahren Gemeingut der Fachwelt geworden ist, kann in die Belar'schen Ausführungen die Veröffentlichung des Mintrop-Verfahrens hineinlegen, während die Zeitgenossen Belar's und die während 18 Jahren nach ihm folgenden Fachleute es nicht herausgelesen haben. Schließlich hat Belar seinen Vorschlag auch nie ausgeführt.

Sieberg 1904

In seinem Handbuch der Erdbebenkunde druckt A. Sieberg im Jahre 1904 die Belar'schen Ausführungen vom Jahre 1901 im wesentlichen ab. Er schreibt in dem Kapitel „Angewandte Seismologie, Untersuchung des Baugrundes und der Erdbeschaffenheit Seite 333 u. ff. folgendes: „Stellen wir an die Spitze den bekannten Erfahrungssatz, daß unter sonst gleichen Verhältnissen jene Baulichkeiten, welche auf lockerem Boden, sei es Schotter oder Lehmgrund, stehen, stärker in Mitleidenschaft gezogen werden als Gebäude, die auf Felsboden aufgebaut sind (man denke beispielsweise an die sogenannten „Erdbebeninseln"), das heißt mit anderen Worten: die Form und Art der Bodenschwingungen ist abhängig von den Elastizitätsverhältnissen des Mittels, welches die Erdbebenwellen passieren. Infolgedessen zeichnen die gleichen Seismometer, an verschiedenen Punkten mit ungleicher geologischer Bodenbeschaffenheit aufgestellt, auch dementsprechend ungleichartig beeinflußte Bebenbilder auf. Infolgedessen

ist man also mit Hilfe der Erdbebenmesser in der Lage, bestimmen zu können, welcher Art der Zusammensetzung der Boden ist, der jeweils die Apparate trägt. Es möge sich beispielsweise darum handeln, sich über die Bodenfestigkeit einer sonst nicht zugänglichen Bodenstrecke, etwa für eine Tunnelbohrung, im voraus ein Urteil zu bilden. Man braucht dann nur leicht transportable und sonst zweckentsprechend eingerichtete Seismometer an den verschiedenen zu untersuchenden Punkten aufzustellen und künstliche Bodenerschütterungen hervorzurufen, am besten durch Minen, welche in einer gewünschten Tiefe zur Explosion gebracht werden. Dann werden sich diese Bodenschwingungen nach Zeit und Art verschieden an den einzelnen Standorten der Seismometer aufzeichnen und bei einigem Vergleichsmaterial kann man nunmehr leicht einen Schluß ziehen auf die geologische Beschaffenheit jener Stellen, welche diese künstlich ausgelösten Schütterwellen durchlaufen haben.

Noch weitergehend und zugleich für die Erkenntnis der dynamischen Vorgänge am Erdbebenherde von größter Wichtigkeit sind die Ausblicke, welche G. Tammann eröffnet. Derselbe hat zunächst für eine Kugel, in welche, wie bei unserer Erde, der Druck mit der Tiefe wächst, das sogenannte „Zustandsdiagramm" eines idealen Stoffes beschrieben, der gewissermaßen das Mittel einer Reihe realer Stoffe darstellt. Am Schlusse seiner Abhandlung gelangt er zu folgendem Ergebnis: „Wären die Zustandsdiagramme zahlreicher hochschmelzender Stoffe bekannt, und wäre die Lage des Erdbebenzentrums, aus dem der Druck und die Temperatur der Umwandlung erfolgt, gegeben, so hätte man in manchen Fällen die Daten zur Bestimmung der Art des Stoffes, dessen Umwandlung das Erdbeben verursachte. Aus geologischen Begleiterscheinungen könnte vielleicht auch auf die Energie und Volumenänderungen bei der Umwandlung geschlossen werden. Eine partielle Analyse der nicht zugänglichen Erdschichten auf Grund umfassender seismischer Beobachtungen und Ausarbeitung von Zustandsdiagrammen der in Betracht kommenden Stoffe ist eine Aufgabe, deren Lösung nicht unüberwindliche Schwierigkeiten entgegenzustehen scheinen. So darf man bereits heutzutage kaum mehr daran zweifeln, daß es im Laufe der Zeit gelingen wird, überhaupt die Zusammensetzung und Beschaffenheit nicht allein der Erdrinde, sondern auch des eigentlichen Erdinnern von der Oberfläche aus mittels der Seismometer bestimmen zu können."

Auf Seite 74 bringt Sieberg die theoretisch berechneten Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen von H. Nagaoka, die nachstehend wiedergegeben sind: H. Nagaoka: „Elastic Constants of Rocks and the Velocity of Seismic Waves." Nr. 4 der Publications of the Earthquake Investigation Committee in Foreign Languages, Tokyo 1900. Nagaoka 1900

Gesteinsart	Formation	Dichtigkeit	Fortpflanzungsgeschwindigkeit in km/sek.
Perodit-Serpentin	Paläozoisch	2,786	5,86
Marmor	„	2,654	4,09
Verwitterter Tonschiefer	„	2,490	2,25
Idzumi-Sandstein	Mesozoisch	2,236	2,93
Idzumi-Sandstein	„	2,223	2,76
Tuff-Sandstein	Tertiär	2,321	3,35
Rhyolit-Tuff	„	2,316	3,18
Rhyolit	„	2,454	2,78
Tuff	Diluvium	2,557	4,44
Andesit	„	2,397	3,06
Tuff	„	1,838	2,75
Andesit-Tuff	„	1,400	2,50
Andesit	„	2,022	2,21

Im Jahre 1903 erschien die Veröffentlichung von Kusakabe: "On the Modulus of Regidity of Rocks and on Explanation for the wide Difference between the Velocities of Propagation Kusakabe 1903

of the Tremors and principal Shocks in seismic Waves" No. 14 der Publications of the Earthquake Investigation Committee in Foreign Languages, Tokyo 1903." Die aus Torsionsversuchen im Laboratorium ermittelten Geschwindigkeiten schwanken zwischen 430 m pro Sekunde in Sandstein und 2580 m pro Sekunde in eruptivem Granit.

Sieberg 1904

Auf Seite 75 der Erdbebenkunde bringt Sieberg eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen von Pfaff, Mallet, Milne, Fouqué und Lévy.

Fortpflanzungsgeschwindigkeiten bei Bodensprengungen.

Gesteinsart	Fortpflanzungsgeschwindigkeit in m pro Sekunde nach			
	F. Pfaff	R. Mallet	J. Milne	F. Fouqué und M. Lévy
Granit	539	398 — 507	800 — 1400	2450 — 3140
Kalk	547	—	900 — 1260	—
Schiefer	737	331	1000 — 1600	—
Sand	—	250	—	300

Im Anschluß hieran schreibt Sieberg: „Die bei künstlichen Erdbeben gewonnenen Zahlen bleiben hinter den theoretisch berechneten meist weit zurück. Daß die Stärke der Erschütterung auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einen so großen Einfluß haben sollte, wäre nur dann möglich, wenn bei jeder einzelnen Fortpflanzung einer Stoßwelle die Geschwindigkeit im Verhältnis der abnehmenden Intensität vom Zentrum nach der Peripherie abnehmen würde; eine solche rasche Geschwindigkeitsabnahme ist aber bei wirklichen Beben noch nirgends beobachtet worden. Wie man sieht, geben uns die künstlichen Bebenwellen keine befriedigenden Aufschlüsse, und zwar hauptsächlich aus dem Grunde, weil der Erregungsort der Bodenschwingungen zu nahe der Erdoberfläche liegt.

Das sicherste Mittel zur Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit sind und bleiben doch die unmittelbaren Erdbebenbeobachtungen; was dabei zur Beobachtung gelangt, sind die langen transversalen Oberflächenwellen."

Sieberg zweifelte also im Jahre 1904, drei Jahre nach Belar's Veröffentlichung, nicht daran, daß es „im Laufe der Zeit gelingen werde", die Beschaffenheit der Erdrinde zu ermitteln, erwartete aber von der Beobachtung künstlicher Bodenwellen keine befriedigende Aufschlüsse.

Der Stand der seismischen Bodenerforschung 13 Jahre später wird sehr scharf gekennzeichnet von A. Sieberg in dem Abschnitt „Methoden der Erdbebenforschung" in dem im Jahre 1917 erschienenen Lehrbuch der praktischen Geologie von Geheimen Bergrat Professor Dr. K. Keilhack, Abteilungsdirigenten der Kgl. Preußischen Geologischen Landesanstalt in Berlin, Dozenten an der Kgl. Technischen Hochschule in Charlottenburg. Sieberg widmet der Erdbebenforschung 55 Seiten des Buches und schreibt auf Seite 54/55 folgende bemerkenswerten Sätze:

„Es kann nicht unsere Aufgabe sein, hier auf die schwierigen und noch ganz ungeklärten Methoden der Ermittlung der Laufzeiten auf den im Erdinnern verlaufenden Stoßstrahle der Vorläufer und der damit Hand in Hand gehenden Berechnungen der: „wahren Fortpflanzungsgeschwindigkeiten" einzugehen. Das Arbeiten auf diesem Gebiete muß dem Mathematiker und Physiker vorbehalten bleiben. Wer sich hierfür näher interessiert, sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. Hiermit erübrigt sich auch eine Besprechung der zur Berechnung der Herdtiefe vorgeschlagenen Methoden, da ihnen die vorerwähnten Probleme zugrunde liegen. Solange wir noch über die physikalischen Verhältnisse in den Erdtiefen und die weitere Beeinflussung der Fortpflanzung seismischer Energie durch den geologisch-tektonischen Aufbau der Erdkruste im unklaren sind, vermögen wir nicht die genannten Methoden hinsichtlich ihres Wertes oder Unwertes gerecht zu beurteilen." Vergleicht man mit diesen negativen Aus-

führungen die positiven Mitteilungen in Sieberg's „Geologische Einführung in die Geophysik" aus dem Jahre 1927, so wird offenbar, welche Fortschritte Mintrop der praktischen Geologie gebracht hat.

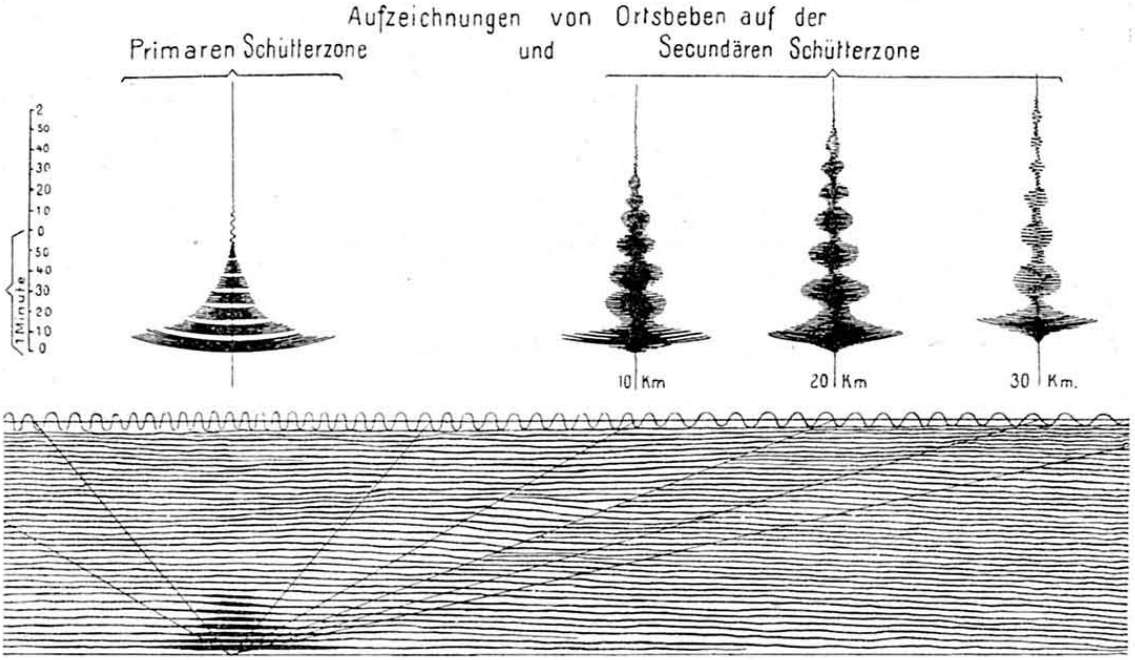
Belar 1906/1907

Belar gibt 6 Jahre nach seiner ersten kurzen Notiz in einer ausführlichen Abhandlung über „Was erzählen uns die Erdbebenmesser von den Erdbeben", Gerland's Beiträge zur Geophysik, Band VI, 1906/07, näheren Aufschluß über den damaligen Stand der Wissenschaft und Technik, insbesondere, soweit seine eigene Erkenntnis in Betracht kommt. Nach dem einleitenden Satz „Der Verfasser wird bestrebt sein, an der Hand der neuesten Errungenschaften unserer Wissenschaft und gestützt auf die Erfahrungen, welche von ihm auf dem klassischen Schüttergebiete von Laibach und bei Eisenbahnen, Bergbau- und anderen Industriebetrieben gesammelt wurden, in möglichst einfacher, leicht faßlicher Art dasjenige zu erläutern, was der Beobachter von den mechanischen Vorgängen eines Erdbebens wissen muß, um ein guter, unsere Wissenschaft fördernder Erdbebenbeobachter zu werden", versucht Belar u. a. an Hand von Abbildungen die einzelnen Phasen in den Seismogrammen zu erklären, indem er auf Seite 108 schreibt: „Früher wurde schon bemerkt, auf welche Weise durch Parallelbeobachtungen beim Bergbau die regelmäßige Abnahme der Stoßgruppen eine Erklärung finden könne. Wenn auch bei bergbaulichen Beobachtungen diese hypothetische Annahme der Entstehung der Stoßgruppen durch Nachbrechen einzelner Erdschichten eine hinreichende Stütze findet, so glaubt der Verfasser noch eine andere Deutung hier anführen zu müssen. Durch die Pulverexplosion am Laibacher Felde, welche am 27. Juni 1906 erfolgt ist und auf allen unseren Erdbebenmessern deutliche Spuren zurückgelassen hat, konnte aus den Diagrammbildern ebenfalls eine regelmäßig abnehmende Stoßgruppenreihe festgestellt werden, die allerdings nicht so deutlich wie bei einem Erdbebendiagramm ausgeprägt war. Da aber an den instrumentellen Aufzeichnungen der Explosionserschütterung doch Stoßgruppen beobachtet wurden, welchen andererseits die Mitteilung von Hunderten von Beobachtern gegenüberstehen, die alle angaben, daß die Explosion nicht in mehreren Abschnitten erfolgt ist, sondern daß nur eine einzige kanonenschußartige Detonation vernommen wurde, könnte für die Entstehung des erdbebenähnlichen Explosionsbildes die Erklärung herangezogen werden, daß die elastischen Wellen, welche bei der Explosion von der Oberfläche ausgehend, sich gegen das Erdinnere fortgepflanzt haben, aus verschiedenen Tiefen wieder zurückgeworfen werden, so daß sich also diese regelmäßig abschwächenden Stoßgruppen als Echo der Explosion an der Oberfläche aus verschiedenen Tiefen der Erde darstellen würden. Wir müssen die Möglichkeit offen lassen, daß die ursprüngliche Anschauung über die Entstehung der Stoßgruppen auch für die Erdbeben in diesem Sinne eine Abänderung erfahren werden. Jedenfalls wäre damit der Weg gekennzeichnet, wie man dieser Frage näher treten könnte, und es ist sicher, daß durch Explosionen oder Minenschüsse künstlich hervorgerufene Erdbeben danach angetan wären, die Frage endgültig zu klären."

„Untersucht man nun die Bebenbilder, welche im Gebiete gesammelt wurden, die der Hauptschütterzone zunächst liegen, so wird man finden, daß zunächst der Habitus des Diagramms viel Ähnlichkeit mit dem Bebenbilde der primären Schütterzone aufweist, nur fällt auf den ersten Blick auf, daß die ganze Aufzeichnung in die Länge gezogen scheint, etwa so, als wenn man das Bild der primären Schütterzone auf ein Gummiband einzeichnen und dieses dann in der Längsrichtung strecken würde.

Je weiter die Beobachtungen vom Herde gemacht wurden, desto stärker erscheint das Bebenbild gestreckt, wie es die Musterdiagramme für 10, 20 und 30 Kilometer anzeigen ⟨Tafel 1⟩. Noch eines fällt bei der Vergleichung der Diagrammbilder auf, daß mit der Zunahme der Entfernung vom Herde die kurzperiodischen Bewegungen hauptsächlich in den ersten Stoßgruppen, ja sogar vor der ersten Stoßgruppe bereits auftreten und dieselbe einleiten als sogenannte Vorläufer. Diese Vorläufer sind die Impulse der rascher sich fortpflanzenden zunächst longitudinalen Wellen, die vom Herde direkt nach allen Punkten der Erdoberfläche

ausstrahlen, sogenannte Erdwellen und vermengt mit ebensolchen Oberflächenwellen (schon früher als Kompressionswellen bezeichnet), die auf kurze Entfernungen fast gleichzeitig im nächsten Umkreise des Hauptschüttergebietes, welches der Verfasser als sekundäre Schütterzone bezeichnet hat, eintreffen werden."



A. Belar: Was erzählen uns die Erdbebenmesser von den Erdbeben?

Nach vorstehendem war Belar sich im Jahre 1906 noch nicht im klaren über die einzelnen Phasen des Seismogrammes, insbesondere auch nicht darüber, ob Reflexionen auftreten oder nicht. Belar hatte aber auch eine durchaus falsche Vorstellung von der Ausbreitung der Vorläufer, von denen er sagt, daß sie sich vom Herde aus direkt nach allen Punkten der Erdbebenfläche ausbreiten. In den beigegebenen Abbildungen zeichnet Belar die Strahlen geradlinig um den Herd zur Erdoberfläche, während diese Strahlen in Wirklichkeit gekrümmt sind, wie das schon A. Schmidt im Jahre 1888 theoretisch abgeleitet hatte. Betrachtet man das von Belar entworfene Bild des Strahlenganges, so wird offenbar, was er mit seinen Ausführungen im Jahre 1901 gemeint hat. Sicher ist jetzt, das Belar im Jahre 1901 nicht gewußt hat, daß Wellen, die an der Erdoberfläche erzeugt werden, in die Tiefe dringen, dort an Unstetigkeitsflächen gebrochen werden und wieder an die Erdoberfläche zurückkehren, wo sie, wie Mintrop zum ersten Male gezeigt hat, durch Seismographen aufgenommen werden können. Infolge der Unkenntnis über diese erst durch Mintrop entdeckte Erscheinung fordert Belar in seinem Vorschlage von 1901, daß die künstlichen Erschütterungen in einer „gewünschten" Tiefe erzeugt werden, während die Seismographen an der Erdoberfläche stehen sollten. Nichts in Belar's Notiz aus 1901 deutet aber darauf hin, daß er die Aufstellung einer Laufzeitkurve meint, noch deren Wesen und Bedeutung für die Ermittlung der Tiefe und Beschaffenheit der Gebirgsschichten erkannt hat.

Belar 1902

In der von Belar herausgegebenen Zeitschrift „Die Erdbebenwarte", 2. Jahrgang, 1902, Monatsheft 1/2, befindet sich auf Seite 39 unter der Überschrift „Erdbebenmesser im Dienste des Bergbaues" folgende Notiz: „Am 15. und 16. April tagte in Oberleutersdorf (Nordböhmen) eine gemischte Kommission von Bergbausachverständigen, Hochbauingenieuren und Erdbebenkundigen, welche vom Revierbergamte Brix eingeleitet wurde, um zu erheben, ob und inwieweit die Erschütterungen durch den nachbarlichen Kohlenabbau ein dortiges Fabrik-

gebäude beeinflußt haben. Als erdbebenkundiger Sachverständiger wurde vom k. k. Revierbergamte Prof. A. Belar eingeladen, während als Privatsachverständiger für das gleiche Fach ein deutscher Erdbebenforscher, Dr. O. Hecker, Mitarbeiter am königlich preußischen geodätischen Institute, an der Kommission teilgenommen hat. Da schon seit Jahren an Ort und Stelle mit einem mechanisch registrierenden Erdbebenmesser Beobachtungen geflogen werden, so oblag den erdbebenkundigen Sachverständigen die Aufgabe, in erster Linie die instrumentellen Aufzeichnungen näher zu bestimmen, und die Frage zu beantworten, welchen Einfluß diese Störungen der Bodenunruhe auf das Fabrikgebäude ausgeübt haben."

Aus dieser Notiz geht hervor, daß Hecker bereits im Jahre 1902 unmittelbare Fühlung mit Belar gehabt hat. Die Belar'sche Anregung vom Jahre 1901 dürfte ihm daher nicht unbekannt geblieben sein, zumal sie in der „Erdbebenwarte" veröffentlicht worden war. Dennoch hat Hecker bei seinen Kummersdorfer Geschwindigkeitsmessungen vom Jahre 1902, die er erst im Jahre 1904 veröffentlichte, keine Schlüsse auf den geologischen Untergrund gezogen. Es kann daraus entnommen werden, daß weder er selbst noch Belar die für solche Schlußfolgerung erforderlichen Mittel und Wege erkannt haben. Diese Erkenntnis lag damals noch sehr fern und erst 25 Jahre später hat Professor Angenheister den geologischen Untergrund in der Nähe von Kummersdorf nach dem Mintrop-Verfahren bestimmt und in Heft 1 des Jahrganges 1927 der Zeitschrift für Geophysik darüber berichtet. Ebenfalls erst in diesem Jahre bestimmten Schweydar und Reich die Geschwindigkeiten der longitudinalen Vorläufer in Kummersdorf zu 1000 m pro Sekunde (siehe Gerland's Beiträge zur Geophysik, Band XVII, 1927, Seite 121 ff.).

Im Hinblick auf die Anregung Belar's aus dem Jahre 1901, die Gebirgsschichten entlang einer Tunnelachse im vorhinein seismisch zu ermitteln, ist folgendes Schreiben von Professor R. v. Klebelsberg, Vorstand des geologischen Instituts der Universität Innsbruck, vom 9. November 1922 an die von Dr. Mintrop geleitete Seismos von besonderem Interesse. Das Schreiben lautet: Mit größtem Interesse habe ich von Ihrer Mitteilung „Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten nach dem seismischen Verfahren" Kenntnis genommen. Bei den so außerordentlich günstigen Erfahrungen, die Sie mit dem neuen Verfahren im Flachlande und Mittelgebirge gemacht haben, drängt sich die Frage auf, inwieweit dasselbe auch im Hochgebirge, in unseren Alpen z. B., anwendbar ist, und zwar sowohl für praktisch — wie auch für theoretisch — geologische Fragen. Unter den Problemen, die sich da der Untersuchung nach der seismischen Methode bieten, steht wohl eines im Vordergrunde, das sich nach den aus Ihren Mitteilungen gewonnenen Eindrücken mittels dieser Methode ohne weiteres lösen lassen müßte. Das ist die Frage nach der Verschüttungstiefe der großen Alpentäler. Die Lösung dieser Frage hätte nicht nur große theoretische Bedeutung, sondern auch praktische Wichtigkeit, man braucht z. B. nur an die Katastrophe beim Bau des Lötschbergtunnels zu denken.

Ein zweites, ohne Zweifel schwierigeres Problem betrifft die tektonische Struktur des Gebirges, die Frage, ob es möglich wäre, mittels des neuen Verfahrens Über- bzw. Unterlagerungen von Gesteinskomplexen festzustellen, die der Dichte nach nicht sehr bedeutend verschieden sind, z. B. die Unterlagerung einer über 1000 m mächtigen Masse kristalliner Silikatgesteine durch Karbonatgesteine.

Im beiderseitigen Interesse — für Sie würde der Nachweis der Anwendbarkeit Ihres Verfahrens auch in diesen Fällen den bisherigen Erfahrungen gewissermaßen die Krone aufsetzen — möchte ich fragen, ob Sie nicht Lust und Gelegenheit hätten, es auf ein paar Versuche in dieser Richtung ankommen zu lassen."

In diesem Schreiben ist bemerkenswert, daß auch das Geologische Institut in Innsbruck das Mintrop-Verfahren im Jahre 1922, d. h. 20 Jahre nach Belar, noch als neu ansah und es für geeignet hielt, die erforderlichen Aufschlüsse über die bei Tunnelbohrungen zu erwartenden Gebirgsschichten zu liefern, Aufschlüsse, die nach dem Vorschlage von Belar aus dem Jahre 1901 nie gewonnen worden sind.

Harboe 1905

Im Jahre 1905 erschien eine umfangreiche theoretische Arbeit von Oberstleutnant Harboe über „Die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Erdbebenwellen" in Gerland's Beiträgen zur Geophysik, Band VII. Über die bis zu diesem Jahre ausgeführten Beobachtungen an künstlichen Erdbeben schreibt Harboe:

„Betrachten wir uns die von Robert Mallet, H. Abbot, F. Fouqué und Michel Lévy, John Milne, O. Hecker und F. Omori mit Sprengungen unternommenen Untersuchungen, so tritt es sogleich deutlich hervor, daß die gefundenen Geschwindigkeiten der ersten Wellen größtenteils auf der Beschaffenheit der zu den Untersuchungen benutzten Apparate beruhen.

Die Beobachtungen Fouqué's und Lévy's bei Sprengungen in Montvicy und Commenty haben gezeigt, daß die Wellen mit den kleinen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten den obersten Schichten und die mit den größeren solchen der tieferen Schichten angehören, weil die Hauptmenge der Wellen mit einer Geschwindigkeit von weniger als ungefähr 1000 m, die bei Sprengungen in der Erdoberfläche vorkommen, bei Sprengungen in einer Tiefe von 142,79 m wegfallen. Völlig übereinstimmend ist ein Umstand, der bei den Untersuchungen Abbot's angetroffen wird, und der übrigens auch durch die Beobachtungen Milne's und durch eine Vergleichung sowohl der letzteren mit den Beobachtungen Hecker's als auch derjenigen Fouqué's und Lévy's mit der oben erwähnten Beobachtung Omoris (bei ersteren wurden nur Sprengladungen von weniger als 15 kg Dynamit, bei letzteren aber 1500 kg Sprenggelatine angewandt) bestätigt wird, nämlich, daß die Größe der Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit der Sprengladung variiert. Es ist nämlich unmittelbar einleuchtend, daß die Wirkung der kräftigen Sprengladung sich bis in größere Tiefen des Erdbodens erstrecken muß, als die der schwächeren, weshalb die tieferen, eilig wandernden Wellen bei den kräftigeren Sprengungen stärker werden als bei den schwächeren."

Harboe rechnete im Jahre 1905 bereits mit einer Zunahme der Wellengeschwindigkeit mit der Tiefe, ohne indessen das Gesetz dieser Geschwindigkeitszunahme zu erkennen, geschweige es für die Ermittlung der in der Tiefe anstehenden Gebirgsschichten zu benutzen. Harboe erklärt vielmehr nur die Erscheinung, daß frühere Autoren bei verschiedenen Sprengladungen verschiedene Geschwindigkeiten erhalten haben, mit einer Zunahme der Geschwindigkeit infolge der durch die stärkeren Ladungen erzeugten größeren Eindringungstiefe der Wellen.

Benndorf 1905/1906

In den Jahren 1905/06 erschienen zwei Arbeiten von H. Benndorf in Graz „Über die Art der Fortpflanzung der Erdbebenwellen im Erdinnern". Ihnen folgte im Jahre 1907 das klassische Buch von E. Wiechert und K. Zoeppritz „Über Erdbebenwellen", Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse. Diese Veröffentlichungen brachten zum ersten Male eine klare Vorstellung über den Verlauf der Erdbebenwellen im Erdinnern.

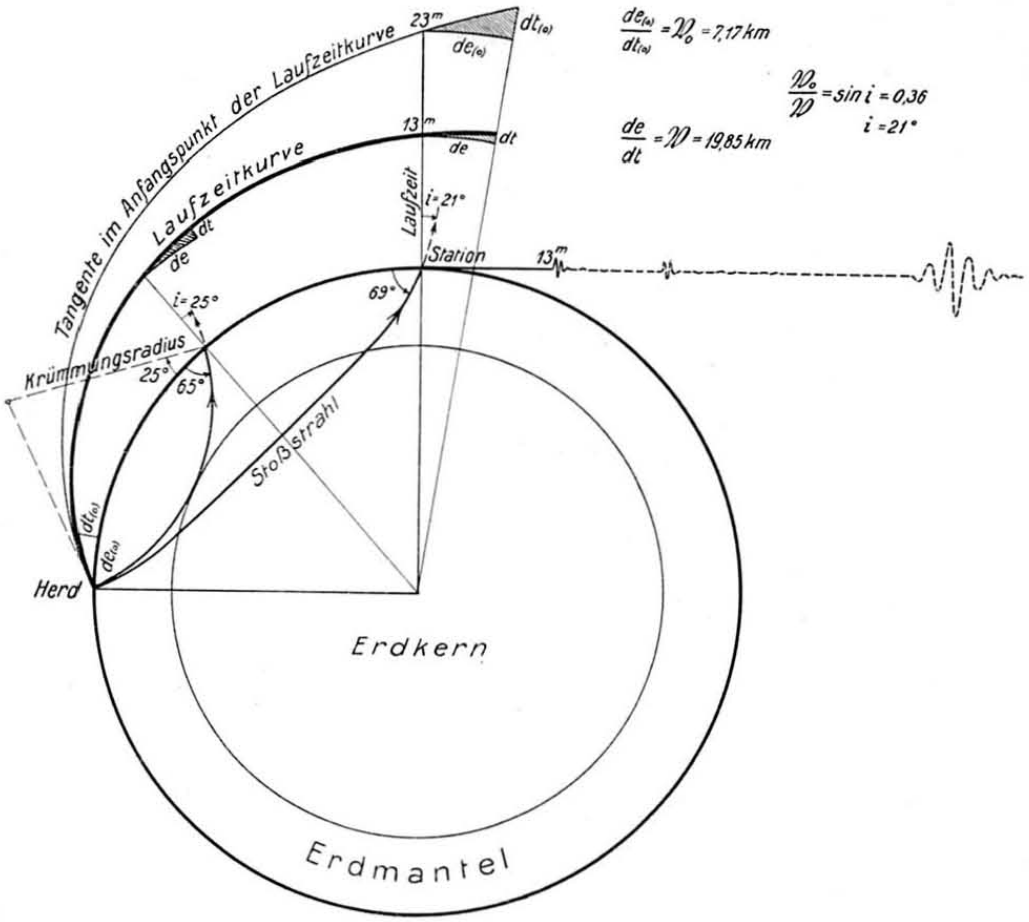
Benndorf bringt auch die experimentelle Bestimmung der Emergenzwinkel in Vorschlag, weil diese einmal eine erwünschte Kontrolle der Laufzeitkurve geben, ferner eine Berechnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen in der äußersten Erdkruste ermöglichen und zugleich ein Mittel an die Hand geben, geologische Abnormitäten in der Nähe der Erdoberfläche ausfindig zu machen." Benndorf spricht aber nur von Laufzeitkurven natürlicher Erdbeben.

Wiechert 1907

Auf Grund der an Beobachtungen natürlicher Erdbeben gewonnenen Laufzeitkurve ermittelte Wiechert die Tiefe der Erdrinde zu 1500 km und darunter einen festen Kern. Ergänzende Beobachtungen führten in den folgenden Jahren zu der Vorstellung, daß die Erdrinde 1200 km dick sei und unter ihr eine Zwischenschicht folge, während der Erdkern erst bei 2900 km Tiefe beginnen soll.

Das Erscheinen des Wiechert'schen Buches im Jahre 1907 bedeutet insofern einen neuen Abschnitt in der wissenschaftlichen Erdbebenforschung, als in demselben zum ersten Male auf Grund einer an Beobachtungen natürlicher Erdbeben aufgestellten Laufzeitkurve die Schichtungen in der Erde ermittelt wurden. Während in der Rinde von oben nach unten eine

ziemlich schnelle und stetige Zunahme der Geschwindigkeit der Erdbebenwellen von 7 auf 12 km pro Sekunde stattfindet, steigt die Geschwindigkeit in der Zwischenschicht von 1200 bis 2900 km nur langsam auf 13 km pro Sekunde an, um dann in 2900 km Tiefe plötzlich auf etwa 8 km pro Sekunde abzunehmen.



Über die Schwierigkeit der Aufstellung und Auswertung einer Laufzeitkurve schreibt K. Zoeppritz auf Seite 126 des Wiechert'schen Buches: „Die Laufzeitkurve muß also kurz vor dem Nullpunkt einen Wendepunkt haben. Die Beziehung zwischen der Lage dieses Wendepunktes und der Herdtiefe ist vielfach diskutiert worden, da es vorläufig noch niemals geglückt ist, das Umbiegen der Laufzeitkurve durch Beobachtung einwandfrei festzulegen." (Die Beobachtungen von Schmidt im Jahre 1888 an den Hodographen des Erdbebens von Herzogenrath mit nahe an der Oberfläche liegendem Herd, sind, wie Schmidt selbst schreibt, noch zweideutig.)

Über den mutmaßlichen Einfluß der Verschiedenartigkeit der äußeren Erdschichten auf die Aufstellung der Laufzeitkurven schreibt Zoeppritz auf Seite 129: „Es wird sich der Umstand geltend machen, daß die Erde vermutlich nicht in konzentrischen Kugeln, sondern in konzentrischen Ellipsoid-Schalen homogen ist. Andererseits wird auch dieses modifizierte Gesetz namentlich in den äußersten Schichten nicht streng erfüllt sein; es werden lokale Abweichungen, Änderungen der Elastizitätsverhältnisse innerhalb einer Schale, von Ort zu Ort sich geltend machen. Doch sind die dadurch veranlaßten Abweichungen, nach allem zu schließen, nur äußerst geringfügig und anscheinend kleiner als die zur Zeit noch unvermeidlichen Fehler

der Erdbebenbeobachtungen. Es hat somit noch weite Wege, bis ein immer mehr verfeinerter Erdbebenbeobachtungsdienst auch derartige Einzelheiten klarlegen wird. Vorläufig müssen wir uns begnügen, die Erdbebenbeobachtungen zu Schlüssen, die sich auf die Erde als Ganzes beziehen, zu verwenden, wobei es überraschen muß und für diesen Zweck sich als äußerst vorteilhaft erweist, daß offenbar in sehr weitgehendem Maße unsere Annahme der Homogenität in konzentrischen Kugelschalen erfüllt ist."

Aus den Ausführungen von Zoeppritz geht hervor, daß nach dem Stande der Wissenschaft und Technik im Jahre 1907, zur Zeit des Erscheinens des für die Entwicklung der Seismik grundlegenden Buches von Wiechert, an eine Aufstellung von Laufzeitkurven zur Ermittlung des Aufbaues der äußersten Erdschichten noch nicht zu denken war. Von den noch schwieriger aufzustellenden und zu deutenden Laufzeitkurven künstlich erzeugter Erdbeben ist in dem Buche von Wiechert und Zoeppritz nicht die Rede. Auf Seite 42 ff. diskutiert Wiechert lediglich, daß es möglich sei, die Dicke einer in Eigenschwingungen befindlichen Oberflächenschicht durch Messung der Schwingungsperiode zu bestimmen, vorausgesetzt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen bekannt ist. Dieser Vorschlag Wiechert's bezieht sich also keineswegs auf Geschwindigkeitsmessungen und keineswegs auf das Laufzeitkurven-Verfahren.

Haussmann 1907

Zur gleichen Zeit als das Buch „Über Erdbebenwellen" von Wiechert-Zoeppritz erschien, veröffentlichte Prof. Haussmann im Glückauf, 1907, Heft 26, einen Aufsatz „Über die Erdbebenstation der Technischen Hochschule in Aachen". H. schreibt: „Mein Assistent, Markscheider Mintrop, wurde beauftragt, die Instrumente in Göttingen abzuholen, dabei die Einrichtungen der Göttinger Erdbebenstation zu studieren und die Aachener Station einzurichten. Mintrop hat sich der Aufgabe mit Eifer angenommen und sie mit Geschick durchgeführt; er hat sich rasch in das ihm zuvor völlig unbekannte Gebiet eingelebt und die Instrumente in kurzer Zeit aufgestellt und in Gang gebracht." Der Zweck der Station, die „Aus Stiftungen des Herrn Moritz Honigmann für die Zeche Nordstern bei Herzogenrath und der Vereinigungsgesellschaft für Steinkohlenbau im Wurmrevier an die Rheinisch-Westfälische Hochschule in Aachen eine dem Bergbau dienende Erdbebenstation" ist, wird von Haussmann nach längeren Ausführungen über Einrichtung und Zwecke der Station wie folgt gekennzeichnet:

„Es gibt in Deutschland nicht selten Erdbeben, die nach Größe und Dauer, auch nach der wechselnden Art ihres Auftretens wohl geeignet erscheinen, Schaden anzurichten. Diese Erdbeben werden nicht gefühlt und sie würden im praktischen Leben unbeachtet bleiben, wenn sie nicht durch Erdbebeninstrumente angegeben werden könnten. Die Erdbebenstation der Technischen Hochschule in Aachen hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Erdbeben und ihre Wirkungen im Interesse technischer Unternehmungen zu untersuchen. Die Grundlage zu dieser Erforschung soll dadurch geschaffen werden, daß die Station den Behörden und Werken die in Deutschland eingetretenen größeren Erdbeben meldet und ihrerseits um Mitteilung über erkannte Erdbebenschäden bittet."

Es ist interessant, daß diese vom Bergbau gestiftete Erdbebenwarte das seismische Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten im Jahre 1907 noch nicht kennt.

von dem Borne 1907

Ebenfalls im Jahre 1907 brachte die Zeitschrift des Oberschlesischen Berg- und Hüttenmännischen Vereins, Kattowitz, eine Beschreibung der schlesischen Hauptstation für Erdbebenforschung zu Krietern, Kreis Breslau, aus der Feder von Privatdozent Dr. Georg von dem Borne. B. schreibt: „Welche Ziele verfolgen wir, wenn wir an zahlreichen Punkten gleichzeitig die Bewegungen des Erdbodens aufzeichnen? Wir erstreben dabei die Lösung geophysikalischer, geologischer und technischer Probleme. Andere geologisch außerordentlich wichtige Schlüsse werden wir vermutlich aus gewissen Details der Erdbeben-Diagramme ziehen können. Ein Beben von einem bestimmten Ursprungsort, etwa aus Ostindien, bildet sich auf den

Diagrammen verschiedener europäischer Stationen zwar in ähnlicher Weise ab, es zeigen sich aber doch bestimmte charakteristische Unterschiede, z. B. zwischen einem in Göttingen gewonnenen Diagramm und einem ebensolchen in Leipzig. In ähnlicher Weise wie ein bestimmter Apparat eine bestimmte Erdbebenbewegung in einer anderen Weise abbildet wie ein anderer, antwortet eben der geologisch verschieden zusammengesetzte, d. h. mechanisch verschieden geartete Untergrund verschiedener Orte in verschiedener Weise auf dieselbe Erregung seismischer Art. Eine methodische Erforschung der Einzelheiten dieser Abbildungsverschiedenheiten fehlt bisher. Es kann aber meiner Ansicht nach keinem Zweifel unterliegen, daß wir hier ein Mittel gewinnen werden, umgekehrt aus der Art und Weise wie ein bestimmter Gesteinskomplex auf eine bestimmte seismische Erregung reagiert, Schlüsse zu ziehen auf seine geologische Struktur, z. B. auf die Gesteinsbeschaffenheit oder auf das Streichen und Fallen der Schichten oder auf das Vorhandensein und den Charakter von Schichtstörungen.

Von dem Borne faßt dann die einzelnen Arbeitsgebiete der schlesischen Erdbebenwarte in folgende Punkte zusammen:

1. die genaue Erforschung der Formen und Gliederung der Erdbeben-Diagramme,
2. die Abhängigkeit der Variationen dieser Diagramme von der geologischen Struktur des Beobachtungsortes,
3. die Erforschung der seismischen Eigenschaften von künstlichen Gebilden, wie z. B. von Gebäuden oder Grubenbauen und das Studium künstlicher Erschütterungen.

Wenngleich von dem Borne in dieser Arbeit das Gebiet des Mintrop-Verfahrens streift, so erkennt er es doch noch nicht, sondern beschränkt sich auf die allgemeine Andeutung, daß aus der Art und Weise, wie ein bestimmter Gesteinskomplex auf eine bestimmte seismische Erregung reagiert, Schlüsse auf den Gebirgsbau gezogen werden können.

Auch in der nach dem Erscheinen des Wiechert-Buches erfolgten Veröffentlichung im Jahre 1908 in Gerland's Beiträgen zur Geophysik, Band IX, Leipzig, über „Die physikalischen Grundlagen der tektonischen Theorien" beschränkt von dem Borne sich auf folgende allgemeine Bemerkungen (Seite 403): von dem Borne 1908

„Wie uns die Beobachtungen der seismischen Erscheinungen über die mechanischen Verhältnisse der Gesamterde, und zwar zunächst der, geologisch gesprochen, tief liegenden Teile derselben Anhaltspunkte liefern, so werden sie uns entsprechende Aufschlüsse über die tektonisch wichtigeren der Oberfläche benachbarten Teile derselben geben. Vor allem wird hier das instrumentelle Studium von schwachen Nahbeben, von künstlichen Störungen und Bodenbewegungen meteorologischen Ursprunges einzugreifen haben."

Auf die Frage, wie dies geschehen müßte, geht von dem Borne nicht ein, noch hat er das Problem selbst gelöst.

Im Jahre 1909 schrieb Mintrop in der Berg- und Hüttenmännischen Zeitschrift Glückauf, Essen-Ruhr, einen sehr ausführlichen Aufsatz über die Erdbebenwarte in Bochum, brachte zahlreiche Beobachtungen an künstlichen Erdbeben und wies auf die Ziele der Erdbebenwarte, die vom Rheinisch-Westfälischen Bergbau getragen wird, hin, ohne indessen die Möglichkeit der Erforschung von Gebirgsschichten zu erwähnen. Da in der Arbeit auch die Veröffentlichung von dem Borne's aus dem Jahre 1907 sowie das Buch von Wiechert angezogen sind, so ergibt sich, daß Mintrop die Möglichkeit der Anwendung der Wiechert'schen Gesetze über die Ausbreitung natürlicher Erdbeben auf künstliche Erdbeben damals noch nicht erkannt hat. Auch in der Beschreibung der gleichen Erdbebenstation in Gerland's Beiträgen zur Geophysik 1912, in der Mintrop sagt, daß die Hauptaufgabe der Station die Beobachtung „künstlicher Erdbeben" sei, ist von der Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten bzw. von dem späteren Mintrop-Verfahren noch nicht die Rede. Mintrop kommt der Sache aber näher in seiner Veröffentlichung „Über künstliche Erdbeben", Berichte Mintrop 1909 Mintrop 1912 Mintrop 1910

des Internationalen Kongresses für Bergbau, Hüttenwesen, angewandte Mechanik und praktische Geologie, Düsseldorf, 1910, in der zahlreiche seismische Aufnahmen künstlicher Erdbeben mitgeteilt und analysiert werden.

Auf Seite 111 dieses Berichtes heißt es: „Sieht man von dem relativ schnellen Verlauf dieses „künstlichen Erdbebens" ab, so ähnelt dasselbe durchaus einem natürlichen Erdbeben, das aus vielen 1000 Kilometer zu uns kam. Der Untergrund bestand aus diluvialem Lehm, Sand und Geschiebeablagerungen in wechselnder Mächtigkeit von 1—10 m. Darunter liegt in flacher Mulde ein etwa 3 m starkes Sphärosiderit führendes Tonlager, auf dem vielfach Wassertümpel stehen bleiben."

Das zusammenfassende Schlußwort der Arbeit lautet: „Die seismische Wissenschaft und mit ihr die Geologie messen den Untersuchungen über die Ausbreitung von Impulsen in der Erdrinde, über deren Wucht und zeitliches Auftreten man beliebig verfügen kann, eine besondere Bedeutung bei, wenn dabei zuverlässige Zahlen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Absorption gewonnen werden, die ihrerseits Aufschluß über die Elastizität der durchdrungenen Materie geben. Ferner interessieren die Abbildungen der einzelnen Phasen der Bewegungen in Abhängigkeit von der Entfernung vom Ursprungsort der Erschütterung, sowie die Reflexionen der verschiedenen Wellenarten. Beobachtungen an künstlichen Erdbeben schließen die Kette der Untersuchungen über die Ausbreitung der Erdbebenwellen. Der Zweck der Abhandlung ist erfüllt, wenn sie ein allgemeines Bild von der Art der Ausbreitung künstlicher Bodenerschütterungen gegeben und zu weiteren Unternehmungen angeregt hat."

Da der Bericht außer in deutscher auch in englischer und französischer Sprache gedruckt worden ist, sollte man annehmen, daß, wenn nicht das Inland, so doch das Ausland durch denselben zur Lösung des den Gegenstand des späteren Mintrop'schen Patentes bildenden Problems veranlaßt worden wäre. Das Ausland hat sich, wie weiter unten noch des näheren ausgeführt werden wird, des Verfahrens aber erst 13 Jahre später bedient, und zwar war es Mintrop selbst, der es im Auslande zum ersten Male anwandte. Auch die Tatsache, daß in der Diskussion über den Düsseldorfer Vortrag, der vor mehreren hundert Bergsachverständigen und Geologen des In- und Auslandes gehalten wurde, niemand auf die Möglichkeit eines solchen Verfahrens hinwies, obschon die geologischen Verhältnisse, unter denen die Beobachtungen stattfanden, mitgeteilt wurden, beweist, daß die Lösung keineswegs in der Luft lag. Dabei zeigte Mintrop in dem Vortrage die auch in der Veröffentlichung beschriebenen neuen Instrumente vor, mit denen es erstmalig gelungen war, alle Phasen der Seismogramme künstlicher Erdbeben, d. h. longitudinale, transversale und Oberflächenwellen bis zu 700 m Entfernung sehr deutlich aufzuzeichnen. Die für die spätere erfolgreiche Anwendung des Mintrop-Verfahrens erforderliche Lösung der Instrumentenfrage lag also damals schon vor.

Hennig 1909

Wie fern auch den rein wissenschaftlich eingestellten Geologen das spätere Mintrop-Verfahren lag, geht aus dem im Jahre 1909 erschienenen Buch: „Erdbebenkunde, eine Übersicht über den gegenwärtigen Stand der Erdbebenforschung, die wichtigsten Erdbebenhypothesen und den internationalen Erdbebenbeobachtungsdienst" von Dr. Edwin Hennig, Assistent am Geologisch-Paläontologischen Institut und Museum der Universität Berlin, hervor. In dem Kapitel „Seismophysik", Seite 127 ff., schreibt Hennig: „Wenn wir nunmehr die wahre Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu erfassen suchen, so spaltet sich das Problem in mehrere Fragen. Einmal ist diese Geschwindigkeit keine gleichmäßige, sie hängt von der Beschaffenheit ⟨Material und Aufbau⟩ der zu durchlaufenden Medien ab. Sie ist aber auch nicht einheitlich insofern, als bei der Erschütterung Bewegungen ganz verschiedener Natur entstehen, deren jede, wie erwähnt, eine von den anderen stark abweichende Geschwindigkeit besitzt. Ferner steht die Geschwindigkeit auch in Beziehungen zu der Intensität des Stoßes. Endlich ist ja der Herd niemals punktförmig, der Ausgangspunkte also kommen viele zugleich in Betracht, ja, jeder von der Bewegung ergriffene Bestandteil der Erde sendet wieder eigene Wellen aus, von

denen jedoch nur einige wenige für uns Bedeutung haben. Hoernes und Sieberg haben uns die Ergebnisse der von mehreren Seiten angestellten Untersuchungen über Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Gesteinsarten zusammengefaßt. Es ergibt sich aus den stark untereinander abweichenden Werten jedoch nur, was zu erwarten war: daß nämlich dichtere Medien schneller leiten als lockere. Die Abweichungen in den Resultaten schreibt Hoernes (Erdbebenkunde, Leipzig, 1893) der jeweils angewandten Erschütterungsstärke zu. Bei der Übertragung auf die Verhältnisse in der Gesteinskruste ist weiter zu beachten, daß einer Bewegung senkrecht zum Streichen der Schichten Widerstände entgegenstehen, die in der Richtung parallel zum Streichen fortfallen, daß tektonisch gestörte Gebiete die Geschwindigkeit stärker hemmen werden, als es bei ruhiger Lagerung der Fall ist usw. Dies nur zur Erklärung dessen, daß es im Einzelfalle unmöglich sein muß, aus der Zeit des Eintreffens von Bodenbewegungen die Entfernung des Epizentrums genau zu berechnen, zumal wenn die dazwischen gelegenen Gebiete geologisch nicht oder schlecht bekannt sind. Dennoch erlaubt die Ablesung am Apparat (Seismograph) eine Bestimmung der Epizentralentfernung mit genügender Genauigkeit, so daß bei der Bekanntschaft der seismisch regsamen Gebiete der Schütterbezirk meist mit großer Wahrscheinlichkeit vermutet werden kann."

In diesen Ausführungen ist nicht einmal von einer Möglichkeit, mit Hilfe der künstlich erzeugten seismischen Wellen die „geologisch nicht oder nur schlecht bekannten Gebiete zu erforschen" die Rede, obgleich die Wiechert'sche Arbeit „Über Erdbebenwellen", die Hennig in seinem Buche genial nennt, bereits zwei Jahre alt war.

A. Mohorovičić 1910

Im Jahre 1910 erschien im Jahrbuch des Meteorologischen Observatoriums in Zagreb (Agram) eine Arbeit von Dr. A. Mohorovičić über das Beben vom 8. 10. 1909. In dieser Arbeit unterscheidet Mohorovičić zwei Arten von Vorläufer: die normalen Primae P und die individuellen Primae $\overline{P}$. Er fand die ersteren in Herdentfernungen von 300—400 km an, während bis dahin nur die individuellen Primae auftraten, die ihrerseits aber nur bis etwa 700 km Herdentfernung beobachtet werden konnten, von wo an nur die normalen Primae auftraten. Mohorovičić erklärte die Erscheinung so, daß die individuellen Primae nur in der obersten Erdrinde gelaufen waren, während die normalen Primae in einer Tiefe von rund 50 km eine plötzliche Änderung des Materials angetroffen hätten, da hier eine sprungweise Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen eintreten muß. Die Laufzeitkurve für die normalen Primae ist, wie Mohorovičić schreibt, bis 1650 km nahezu geradlinig, dann biegt sie plötzlich nach unten ab. „Der Knick ist vielleicht noch schärfer als er in der Kurve zur Darstellung gebracht ist, die Daten zwischen 1000 und 2000 km schienen mir aber nicht genügend, um die Kurve tiefer zu legen."

Die normalen Primae P entsprechen den Tiefenwellen, während die individuellen Primae $\overline{P}$ den sich in den obersten Erdschichten ausbreitenden Wellen entsprechen. Der Nachweis bzw. die Erklärung dieser beiden bei natürlichen Erdbeben auftretenden Wellenarten durch Mohorovičić ist lange Zeit hindurch von den Seismologen entweder nicht verstanden oder nicht beachtet worden. Die beiden Wellenarten entsprechen genau den Oberflächen- und Tiefenwellen bei künstlichen Erdbeben, welche Mintrop in seiner Patentanmeldung vom 7. 12. 1919 beschreibt bzw. deren Geschwindigkeiten er mißt. In bezug auf die Beobachtungen und Erklärungen von Mohorovičić über die normalen und individuellen Primae schreibt Dr. E. Tams, Professor der Hamburger Erdbebenwarte im Jahre 1913 in den Verhandlungen des Naturhistorischen Vereins unter dem Titel: „Neuere Fortschritte auf dem Gebiete der Erdbebenforschung": „Es sind auch Ansätze vorhanden, die auf eine Erforschung der äußeren Erdkruste und den Nachweis einer hier möglicherweise vorhandenen Magmazone hinzielen. Doch tragen diese Überlegungen bis jetzt noch mehr einen nur vorläufigen Charakter, so daß von einer Erörterung derselben hier Abstand genommen werden kann. Bei aller Unsicherheit in den besprochenen Resultaten besteht aber doch schon generell manche Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Untersuchungen, und es ist wohl im Auge zu

Tams 1913

behalten, daß die physikalische Seismologie bei ihrem jugendlichen Alter ihre eigenen Methoden erst zu schaffen, bzw. doch weiter auszubauen und zu erproben hat."

Hobbs 1910

Im Jahre 1910 erschien die erweiterte Ausgabe in deutscher Übersetzung des Buches „Erdbeben, eine Einführung in die Erdbebenkunde" von William Herbert Hobbs, Professor der Geologie an der Universität Ann Arbor, Michigan (Ver. Staaten), eines Freundes von Professor Mainka, der einen Beitrag zu dem Buche von Hobbs geliefert hat. In dem 21 Seiten umfassenden I. Kapitel „Die Entwicklung der Erdbebenlehre" gibt Hobbs in dem Absatz: „Die moderne Erdbebenforschung, Robert Mallet", in zwei Abbildungen die Herdtheorie von Mallet wieder, aus der hervorgeht, daß Mallet noch kugelförmige Ausbreitung der Schwingungsenergie angenommen hat. Bei dieser Art der Ausbreitung ist die Ermittlung von Tiefenschichten aber von vornherein ausgeschlossen. Der Schlußsatz des Kapitels, der die Überschrift „Die neue Erdbebenforschung" trägt, lautet: „Der Ausdruck ‚neue Erdbebenforschung' bezieht sich auf die Umgestaltung der Wissenschaft durch die Möglichkeit der Fernbeobachtung. In dieser Bedeutung lenkt er aber die Aufmerksamkeit nicht genügend auf alle die großen Veränderungen, die gegenwärtig die Wissenschaft durchmacht. Unsere Zeit ist in der Seismologie eine sehr bemerkenswerte Übergangsperiode, und die Entwicklung bewegt sich in zwei Richtungen. Einerseits erkennen die Geologen immer mehr, daß ein wichtiger Teil ihres eigentlichen Forschungsgebietes ihnen wiedergegeben wurde, der zugleich die Möglichkeit bietet, die Grenzen des Unbekannten durch direkte Anwendung geologischer Beobachtungsmethoden immer weiter hinaus zu rücken; dies ist das moderne Erdbebenstudium im Felde. Andererseits erfordern die neuen instrumentellen Methoden, die in der Wissenschaft eingeführt sind, Männer, die in der Handhabung der Apparate erfahren und als Physiker ausgebildet sind. Die Forschungen, welche von Seismologen dieser Richtung ausgeführt worden sind, führen zu weitreichenden Schlüssen auf die Zustände des Erdinnern; die von ihnen studierten Erscheinungen sind wesentlich astronomisch, ihr Gegenstand ist die Physik der Erde als Ganzes betrachtet; das ist das Fernstudium der Erdbeben.

Die Gefahr ist leider groß, daß die beiden Klassen von wissenschaftlichen Arbeitern, Geologen und Geophysiker, auseinanderstrebende Wege verfolgen. Demnach kann keiner sein Bestes für sich allein leisten und die spezielle Deutung der instrumentellen Aufzeichnungen wird erschwert oder selbst unmöglich gemacht, wenn die aus der unmittelbaren „Beobachtung im Felde zu gewinnenden Kenntnisse fehlen".

Diese Ausführungen geben den Stand der „neuen Erdbebenforschung" im Jahre 1910 recht deutlich wieder. Auf der einen Seite reines geologisches Studium der Wirkungen der Erdbeben im Felde und auf der anderen Seite Studium der „astronomischen" Erscheinungen, d. h. das Fernstudium der Erdbeben. Weder in dem ausführlichen Kapitel „Das Erdbebenstudium im Felde", wo es besonders nahe gelegen hätte, noch in dem ebenfalls ausführlichen Kapitel „Die Analyse der Bebenautogramme", ist auch nur mit einem Wort von der Verwendung künstlicher Erdbeben die Rede.

Es ist bemerkenswert, daß das Buch von Hobbs unter Mitwirkung von Mainka bearbeitet worden ist, und zwar drei Jahre nach dem Erscheinen der grundlegenden Arbeit von Wiechert-Zoeppritz „Über Erdbebenwellen".

Löwy 1911

Ein Jahr nach Mintrop's Vortrag auf dem Internationalen Kongreß hielt Dr. Löwy, einer der Gründer der im Jahre 1910 in Göttingen errichteten Erda, Gesellschaft zur physikalischen Erderforschung, auf der Hauptversammlung des Vereins Deutscher Markscheider in Essen-Ruhr einen Vortrag über die „Anwendung elektrischer Wellen zur Erforschung des Erdinnern unter besonderer Berücksichtigung des Bergbaues." (Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, dritte Folge, 1911, Heft IX.) Auf der gleichen Tagung referierte Mintrop über die Wiechert'sche seismische Methode zur Erforschung des Erdinnern. Es ist nun sehr interessant, festzustellen, daß weder Mintrop noch Löwy damals auf den Gedanken gekommen sind, die Wiechert'sche Methode auf die Ermittlung des Aufbaues der obersten für den Bergbau und die praktische

Mintrop 1911

Geologie in Betracht kommenden Gebirgsschichten anzuwenden. Das „Milieu", vor dem die Vorträge erfolgten, war das denkbar günstigste, zumal die Versammlung im Brennpunkt des Ruhrbergbaues und in Anwesenheit von Vertretern der Preußischen Geologischen Landesanstalt stattfand.

Im Jahre 1911 erschien Mintrop's Göttinger Dissertation: „Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen", in der auch das Seismogramm von einem künstlichen Erdbeben, hervorgerufen durch den Aufschlag einer 4000 kg schweren, aus 14 m Höhe fallenden Stahlkugel auf Felsen wiedergegeben ist. In diesem Seismogramm sind bereits die gleichen Wellenarten zu erkennen, wie bei natürlichen Erdbeben. Weder Mintrop noch Wiechert haben aber damals mit diesem Seismogramm etwas anzufangen gewußt. Es ist dies verständlich, weil es das erste je erhaltene bzw. veröffentlichte vollständige Seismogramm eines künstlichen Erdbebens war.

Galitzin 1912

Im Jahre 1912 erschien in Petersburg das Buch „Vorlesungen über Seismometrie" von Fürst Galitzin, das im Jahre 1914 in deutscher Übersetzung von O. Hecker herausgegeben wurde. Galitzin bringt u. a. Abbildungen der von Mintrop auf dem Internationalen Kongreß in Düsseldorf vorgeführten Seismographen für die Aufnahme künstlich erzeugter Bodenschwingungen und schreibt auf Seite 153 in dem Kapitel „Die Hauptprohleme der Seismometrie": „Für die Untersuchung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen und transversalen Wellen in den allerobersten Erdschichten, wie auch für das Studium ihrer verschiedenen charakteristischen Eigentümlichkeiten würde es sehr wichtig und interessant sein, genaue Messungen mit geeigneten Seismographen bei künstlichen Beben anzustellen, wie z. B. bei Sprengungen mittels größerer Mengen Dynamit; man würde hierbei um den Ort der Sprengung in verschiedenen Entfernungen von ihm entsprechende Apparate aufzustellen haben. Ohne Zweifel müssen die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der longitudinalen und transversalen Wellen in hohem Grade von den physikalischen Eigenschaften der oberen Erdschichten abhängen, es müssen z. B. in den Eruptivgesteinen diese Geschwindigkeiten ganz andere Werte haben als im Sand oder überhaupt im Alluvialboden. Durch solche Versuche würden diese Werte leicht festzustellen sein. Es wurden bereits früher in dieser Richtung einige Versuche angestellt, die aber besonders auch wegen der Verwendung unzureichender instrumenteller Hilfsmittel, wie sie damals nur zur Verfügung standen, nicht genügen. Es würde sich lohnen, systematische und rationelle Untersuchungen dieser Art durchzuführen. Daß solche Beobachtungen in der Tat möglich sind, wird durch die Tatsache bestätigt, daß ein sehr empfindlicher in Göttingen aufgestellter Seismograph mit 2000facher Normalvergrößerung eine Explosion, die in Besançon, also in einer Entfernung von 600 km stattfand, registriert hat."

Galitzin, der neben Wiechert als einer der ersten Seismologen angesehen wird, beschränkte sich also noch im Jahre 1912 auf den allgemeinen Vorschlag, Geschwindigkeitsmessungen in verschiedenen Gesteinen anzustellen, wie sie bereits vor ihm von Mallet, Abbot, Fouqué und Lévy, Hecker u. a. mit unbefriedigendem Ergebnis vorgenommen worden waren, ohne indessen die Schlußfolgerung zu ziehen, daß solche Messungen, wenn ihre Ergebnisse zu Laufzeitkurven zusammengestellt werden, die Ermittlung des Aufbaues der Gebirgsschichten und den Nachweis nutzbarer Lagerstätten ermöglichen. Von einer Lösung dieser für die Technik sehr wichtigen Aufgabe ist bei Galitzin nicht die Rede.

Wilip 1914

Galitzin hat nicht einmal die von ihm für zweckmäßig gehaltenen Geschwindigkeitsmessungen vorgenommen, wie aus einer Veröffentlichung seines Assistenten J. Wilip in Petersburg, jetzt in Dorpat, aus dem Jahre 1914 „über ein in Pulkow registriertes künstliches Erdbeben" hervorgeht. Wilip schreibt auf Seite 173: „Die Eigenschaften der elastischen Wellen in den allerobersten Schichten der Erdrinde sind bis heutzutage noch sehr wenig erforscht. In der Nähe des Herdes werden freilich derartige Wellen bei Erdbeben hervorgerufen, und zur Untersuchung dieser Bewegungen wären Nahbeben, deren Herd nicht zu tief liegen müßte, am geeignetsten. Hierbei kommen aber zwei sehr unbequeme Tatsachen in Betracht, die

allgemein auch in der Seismometrie die Erzielung genauer Resultate beeinflussen, nämlich, die große Ausdehnung des Epizentralgebietes, die bisweilen viele Tausende von Quadratkilometern erreichen kann und die Herdtiefe, deren Bestimmung heute noch sehr unsicher ist.

Bei künstlichen Erdbeben, d. h. Erschütterungen, die durch irgendeinen Explosivstoff oder das Fallen eines schweren Gewichtes hervorgerufen würden, könnte man das Epizentralgebiet als einen Punkt auffassen, und dadurch würde die Untersuchung der Bewegungen der obersten Erdschichten in hohem Maße vereinfacht. Leider sind derartige Versuche in großem Maßstabe mit bedeutendem Geldaufwande verbunden, und es ist bis jetzt nicht gelungen, den Hodographen (Laufzeitkurve) der seismischen Strahlen für kürzere Entfernungen und die obersten Schichten der Erdrinde genauer festzustellen. Aber gerade die Eigenschaften der Erschütterungen in den obersten Erdschichten könnten von großer praktischer Bedeutung werden, indem sie uns Aufschluß über diejenigen Regionen der Erdrinde erteilen, in denen die Bergwerke ihre Tätigkeit entfalten. Es sei hier darauf hingewiesen, daß in den Jahren 1897 und 1899 Professor Hecker auf dem Schießplatz in Kummersdorf Versuche ausführte, wobei im letzteren Falle 1500 kg Sprenggelatine zur Explosion gebracht wurden. Die Registrierungen wurden mit verhältnismäßig einfachen und empfindlichen Apparaten und in ziemlich kurzen Entfernungen vorgenommen (etwa 0,5 km). Im Jahre 1910 führte Mintrop in Göttingen Versuche von anderer Art aus. Er ließ ein Gewicht von 4000 kg aus einer Höhe von 14 m auf Felsboden fallen und registrierte die Erschütterungen photographisch mit Hilfe eines sehr empfindlichen Seismographen bis auf Entfernungen von $2^1/_2$ km. Die Vergrößerung der Apparate betrug bis 50000."

Auf Seite 180 heißt es dann weiter: „Inbezug auf die obersten Schichten der Erdrinde ist fürs erste die Seismologie ziemlich schlecht bestellt. Man kann nur annehmen, daß die seismische Energie in den longitudinalen Wellen gleichfalls eine Absorption erleidet, ähnlich wie die Oberflächenwellen. Von Zahlenangaben fehlt faßt die Spur in der Literatur" und auf Seite 182: „Hieraus ersieht man, daß für diese Fälle die Energie der Explosion einige tausend Male größer sein müßte (als 4900 kg wie bei den züfälligen Aufnahmen einer Explosion), um den Eintritt der longitudinalen Wellen sichtbar zu machen. Falls man diese enorm große Ladung in Betracht zieht, erscheint es, als ob zur Konstruktion von Laufzeitkurven bis 1000 km für das Experiment für mehrere Millionen Rubel Explosivstoff erforderlich sein würde, womit wohl gesagt sein soll, daß es ganz zwecklos wäre, an derartige kostspielige Versuche zu denken, wo das Resultat doch schließlich nur einige Zahlenwerte über Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, Absorptionskoeffizienten der seismischen Wellen usw. sein würde. Wie zu allen Zeiten, wird der Experimentator auch hier allzugroße Unkosten zu vermeiden suchen. Es sei hier erstens bemerkt, daß zu solchen Versuchen wohl alte Überreste an Sprengstoffen verwendbar sind, die bereits schon längst aus der Schießtechnik ausgeschieden sind und nirgends Verwendung finden werden, zweitens ist aus der Praxis der seismometrischen Beobachtungen bekannt, was auch an und für sich plausibel ist, daß ein starker Widerstand den Effekt beträchtlich erhöht. Vielfach schreiten starke Erdbeben Vulkanausbrüchen voraus, während beim Ausbruch selbst die Erschütterungen weniger von katastrophaler Wirkung sind. Die Erdbebenschwärme von Alaska im Jahre 1912 z. B. hörten nach einem gewaltigen Vulkanausbruch auf den Alenten auf. Man wird also daher die Ladung möglichst tief einzubetten bestrebt sein, indem man einen geeigneten Ort, an dem die Erdarbeiten leicht ausführbar sind, auswählt. Drittens eben hindert uns nichts, die Empfindlichkeit der Apparate weiter heraufzutreiben. Wo man nicht fortlaufende seismische Registrierungen führt, wie hier, könnte man in solchen Ausnahmefällen das Vergrößerungsverhältnis unter Zuhilfenahme von mechanischen und langen optischen Hebeln leicht auf eine Million bringen. Hiermit wäre erreicht, daß diese Seismographen bereits bei einer Ladung von 5000 kg Artilleriepulver die erste Vorphase noch in einer Entfernung von 1000 km anzeigen werden. Daher kann man wohl voraussetzen, daß zur Feststellung der Laufzeitkurven

durch ein künstliches Erdbeben bis auf Entfernungen von 1000 km das obige Quantum Sprengenergie ausreicht".

Wilip machte nach obigem im Jahre 1914 aus Anlaß der zufälligen Aufnahme einer Explosion von 4900 kg Artilleriepulver durch die Erdbebenwarte in Pulow den Vorschlag, durch seismische Beobachtung von Sprengungen die Laufzeitkurve bis 1000 km Entfernung aufzustellen, ein Verfahren, das erst im Jahre 1926 von Wiechert teilweise ausgeführt worden ist. Wiechert schreibt darüber in der Geologischen Rundschau, Heft 5, Band XVII, 1926, daß er dazu durch die Mintrop'schen Erfolge mit Laufzeitkurven für sehr kurze Entfernungen ermutigt worden sei. Während Wiechert aber die Tiefe und Art der Erdschichten erforschen will, geht aus Wilip's Andeutungen hervor, daß er die Ermittlung der Geschwindigkeiten der verschiedenen Wellenarten, longitudinale und transversale Wellen, im Auge hatte, dagegen nicht die Ermittlung des Aufbaues der Gebirgsschichten. Im übrigen gibt eine Laufzeitkurve von 1000 km bereits Aufschluß über Tiefen von wenigstens 100 km, wobei alle Details in dem für den Bergbau und die praktische Geologie in Betracht kommenden ersten km naturgemäß übergangen werden. Wilip's Vorstellung, daß zur Durchführung seines Vorschlages ein großer Geldaufwand nötig wäre, wobei als Ergebnis nur einige Zahlenwerte über Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, Absorptionskoeffizienten usw. gewonnen werden könnten, zeigt den damaligen Stand der Wissenschaft und Technik.

S. Mohorovičić 1914

Im Jahre 1914 veröffentlichte S. Mohorovičić, ein Sohn von A. Mohorovičić, dessen Arbeit aus dem Jahre 1910 bereits erwähnt wurde, eine Abhandlung in Band XIII von Gerland's Beiträgen zur Geophysik über: „Die reduzierte Laufzeitkurve und die Abhängigkeit der Herdtiefe eines Bebens von der Entfernung des Inflexionspunktes der primären Laufzeitkurve", in der er auf Seite 231 folgendes schreibt:

„Man könnte mir vorwerfen, daß ich auf Grund der individuellen Primae $\overline{P}$ arbeite, welche mein Vater zuerst entdeckte. Er versuchte diese Strahlenart auf ganz einfache Weise zu erklären, indem er annahm, daß in einer Tiefe von etwa 50 km unter der Erdoberfläche eine starke Diskontinuitätsfläche sich befinde, wo die Geschwindigkeit der longitudinalen Wellen eine plötzliche Steigerung erleidet. Die individuellen Primae $\overline{P}$ sind longitudinale Wellen, welche sich aus dem Herde nur in der obersten Schicht ausbreiten, dagegen die normalen Primae P sind jene longitudinalen Wellen, welche aus dem Herde durch die oberste Schicht zu der Diskontinuitätsfläche gelangen, dann einen Teil ihres Weges in der unteren Schicht wandern und zuletzt durch die Diskontinuitätsfläche wieder in die oberste Schicht und zur Erdoberfläche gelangen. Da die normalen Primae P eine zweimalige Brechung erleiden, so gelangen sie an die Erdoberfläche sehr geschwächt. Daraus folgt, daß in einem gewissen Gebiete um das Epizentrum keine normalen Primae zur Erdoberfläche gelangen können. In einem weiteren Gebiete gelangen beide Strahlenarten zur Erdoberfläche: zuerst die normalen Primae P als eine Serie von sehr schwachen Wellen, dann kommt der starke Einsatz der individuellen Wellen oder oberen Primae $\overline{P}$. Die Diagramme des süddeutschen Bebens, welche mein Vater gesammelt hat, bestätigen diese Behauptung. Bis zu einer Epizentralentfernung von etwa 180 km sieht man den Anfang des Bebens an allen Stationen als einen starken Stoß ‹impetus›. München ist die erste Station, welche die normalen Primae P als eine schwache Emersion zeigt, worauf nach wenigen Sekunden der erste Stoß der oberen Primae $\overline{P}$ einsetzt. Alle folgenden Stationen zeigen sehr schön diese Zweiteilung der longitudinalen Wellen.

Wenn aber die individuellen Primae nach dieser Auffassungsart nicht bestehen sollten, sondern wenn sie eigene Strahlenart sein sollten, so ändert dies an der Sache gar nichts; die nach ihnen berechnete Herdtiefe wird doch richtig bleiben, nur würde die Diskontinuitätsfläche nicht bestehen."

Aus den Darlegungen S. Mohorovičić's geht die Unsicherheit hervor, welche im Jahre 1914 noch über den Charakter und die Bedeutung der von A. Mohorovičić im Jahre 1910 beobachteten normalen und individusellen Primae, d. h. der Tiefen- und Oberflächenwellen bestand.

Leimbach 1915

Im Jahre 1915 erschien in der Berg- und Hüttenmännischen Zeitschrift Glückauf, Nr. 14, eine Veröffentlichung aus der Feder von Dr. Gotthelf Leimbach, dem damaligen Leiter der Erda G. m. b. H., Gesellschaft zur Erforschung des Erdinnern in Göttingen über „Physikalische Aufschlußmethoden im Bergbau", in der das seismische Verfahren nicht erwähnt ist, obschon ein Kapitel die Überschrift trägt: „Alte und neue Verfahren zur Erforschung des Erdinnern auf physikalischer Grundlage." Es werden nur Verfahren mit Anwendung elektrischer Ströme und radioaktive Messungen berührt; auch die Schweremessungen mit der Drehwage werden noch nicht genannt, weil letztere erst im Jahre 1918 durch Schweydar in die geophysikalische Bodenerforschung Norddeutschlands eingeführt worden ist (siehe Zeitschrift für praktische Geologie 1918, Heft 11).

Keilhack & Krusch 1916

In dem Lehrbuch der „Praktischen Geologie" von Keilhack, 3. Auflage, 1916, beschreibt der bekannte Geologe Krusch, damals Abteilungsdirektor, jetzt Präsident der Preußischen Geologischen Landesanstalt, in dem Abschnitt: „Die Aufsuchung und Untersuchung technisch nutzbarer Mineralien" zwar die magnetische Schürfung und die Schürfung mittels elektrischer Wellen, erwähnt aber die seismische Erkundung nicht und stellt auch nicht die Möglichkeit einer zukünftigen Entwicklung in Aussicht.

Mintrop 1917

Im Jahre 1917 erhielt Mintrop das Deutsche Patent Nr. 303 344 auf einen „Erschütterungsmesser" und das Deutsche Gebrauchsmuster Nr. 670 330 „Feldseismograph" sowie das Deutsche Verfahrenpatent Nr. 304 317 „Verfahren zur Ermittlung des Ortes künstlicher Erschütterungen".

Fessenden 1917

Im gleichen Jahre erschien das amerikanische Patent Nr. 1 240 328 betreffs „Method and Apparatus for Locating Ore-Bodies" von Reginald Fessenden, in welchem die Aufsuchung von Erzkörpern und dergleichen im Untergrunde durch Beobachtung akustischer Wellen vorgeschlagen wird. Nach diesem Patent, dessen voller Wortlaut weiter unten folgt, werden in den vier Ecken eines zu untersuchenden Gebietes Bohrlöcher niedergebracht und mit Wasser gefüllt. In diese Bohrlöcher werden dann Schallsender und Empfänger untergebracht und die Laufzeiten des Schalles zwischen den einzelnen Bohrlöchern sowie die an den innerhalb des Gebietes etwa verborgenen Erzkörper auftretenden Reflexionen gemessen, und zwar in der Horizontalebene durch die vier Bohrlöcher und in der Vertikalebene durch ein Bohrloch und den reflektierenden Erzkörper. In diesem Bohrloch werden je ein Sender und Empfänger so lange vertikal gegeneinander bewegt, bis der Winkel der Totalreflexion erreicht ist. Die so ermittelte ungefähre Lage des Erzkörpers wird dann durch eine neue Bohrung nachgeprüft und die Messung von diesem Bohrloch aus wiederholt, wenn der Körper durch die erste Bohrung noch nicht getroffen wird.

Fessenden ist der erste, welcher ein Verfahren zur Ermittlung von Gebirgsschichten mittels Erzeugung und Beobachtung elastischer Wellen entwickelt und praktisch angewendet hat. Allerdings ist das Verfahren noch an Bohrlöcher gebunden. Nachstehend der Wortlaut der Patentschrift, die übrigens wegen der Absperrung Deutschlands im Kriege erst mehrere Jahre nach ihrer Herausgabe bekannt geworden ist.

UNITED STATES PATENT OFFICE.

Reginald A. Fessenden, of Brookline, Massachusetts, Assignor to Submarine Signal Company, of Waterville, Maine, a Corporation of Maine.

Method and Apparatus for Locating Ore-Bodies.

1,240,328. Specification of Letters Patent. **Patented Sept. 18, 1917.**

Original application filed April 2, 1914, Serial No. 828,972. Divided and this application filed January 15, 1917. Serial No. 142,421

To all whom it may concern:

Be it known that I, *Reginald A. Fessenden,* of Brookline, in the county of Norfolk and State of Massachusetts, a citizen of the United States, have invented a new and useful Improvement in Methods and Apparatus for Locating Ore-Bodies, of which the following is a specification.

This application is a division of my United States application Serial No. 828,972 filed April 2, 1914.

The invention described herein relates to methods and apparatus whereby, being given or having ascertained, two or more of the following quantities, i. e., time, distance, intensity and medium, one or more of the remaining quantities may be determined.

For example, being given the distance between two points in a mine, and having determined the time taken by a sound wave to travel between the two points, it is possible to draw conclusions in regard to the probable nature of the rock between the two points, or if an echo be observed, or a refraction of the sound, it is possible to estimate the distance of the reflecting or refracting vein.

Heretofore only such ore bodies have been discovered as have had an edge of the mineral vein extending to the surface of the earth and not covered by debris to such an extent as to be hidden, or such as have been reached by drill holes sunk at random in locations where minerals were suspected. The ore bodies so discovered must form an extremely small fraction of the total of such bodies and it is the object of the present invention to disclose methods and apparatus for discovering such hidden ore bodies by means of measurements made on the velocity, direction, reflection, refraction, absorption and other phenomena, of sounds transmitted through the medium containing the ore bodies, i. e., the earth.

By the method herein described I have been able to detect and determine the location of a body of mineral, invisible to the eye, at a distance of two and a half miles, and farther, the test being witnessed and verified by a number of skilled engineers.

In the drawings accompanying and forming a part of this specification,

Figure 1 is a diagrammatic plan, and

Fig. 2 an illustrative section showing also a different source of energy,

Fig. 3 is a modification of the receiver, these views being in part diagrammatical and showing apparatus and methods suitable for carrying out my invention.

In Figs. 1 and 2, 50 represents a territory, which may be assumed to have an area of 25 square miles, within which it is desired to determine the presence or absence of mineral veins.

Four drill holes, 11, 12, 13, 14, shown in plan in Fig. 1 and two of them in section in Fig. 2, are first drilled at the four corners of the territory, approximately five miles apart, and of a depth sufficient to secure the desired results. These holes are filled with water 51, 52, Fig. 2. Sound detective devices, 15, 16, 17, 18, such as microphones or preferably small oscillators, as described in United States Patent No. 1,167,366, January 4, 1916, are suspended in these holes below the water line.

These sound receiving devices are connected by the pairs of leads, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, to the secondaries 31, 33, 35, 37, of transformers, as shown, and to oscillographs of the usual photographic recording type, but preferably with the galvanometer elements of the quartz fiber, described by applicant at the American Association for the Advancement of Science, 1894, and commonly known as Einthoven galvanometers.

49 is a sound producing apparatus, preferably of the said oscillator type, connected by its leads, 39, 40, to the primaries 32, 34, 36, 38, of the transformers in the oscillograph circuits, and to the alternating current dynamo 42, when the key 41 is depressed. 43, 44 are ore bodies.

The primaries 32, 34, 36 and 38 of the transformers are adjustable with reference to the secondaries, as shown, and are so adjusted that when the key 41 is depressed a moderately strong indication is produced on the photographic records of the oscillographs 27, 28, 29, 30, which fixes on the photographic records the instant at which the key is depressed, and at the same time a sound is send out from the oscillator 49, which after being reflected as at 45 by the ore body 43, or reflected back as from 55, Fig. 2, by the ore body 44, or reflected as from 46 by the ore body 44, or refracted as at 47, 48 by the ore body 44, or proceeding directly through the earth, as shown by the dotted lines 56, 59, reaches the indicators 17, 18, 16, 15, and is recorded on the oscillographs 29, 30, 28, 27.

Since the oscillograph photographic strip moves with a regular and known velocity, determined in the manner well known in the art, the distance on the strips between the records produced through the transformers when the key 41 was pressed down, and the records made by the sounds received whether direct, or by reflection or refraction or by the echo, will indicate the distance between the drill holes and the ore bodies.

For example, if the distance between the record made on the oscillograph 30 by the transformer 37, 38 on depressing the key 41, and the record made by the arrival of the sound directly along the line 59 (which would be easily identified, being the first sound to record itself after the depression of the key), is five inches, then one inch on the record corresponds to one mile in distance, since 11 is five miles from 14. This establishes the standard of measurement on the oscillograph.

If, then, the length between the key depression record and the record made at 30 by the sound reflected at 46 is 9 inches, it is evident that the sound proceeding out from 49 and reflected at 46 and finally reaching 14, has traveled 9 miles. If, again, the length between the key depression record on the oscillograph 27 and the record made by the sound sent out from 49 and reflected back from 55, Fig. 2, is eight inches, then it follows that the ore body 44 is approximately 4 miles from the point 11. The ore body therefore lies at the

R. A. FESSENDEN.

METHOD AND APPARATUS FOR LOCATING ORE BODIES.

APPLICATION FILED JAN. 15, 1917.

1,240,328. Patented Sept. 18, 1917.

Fig. 1.

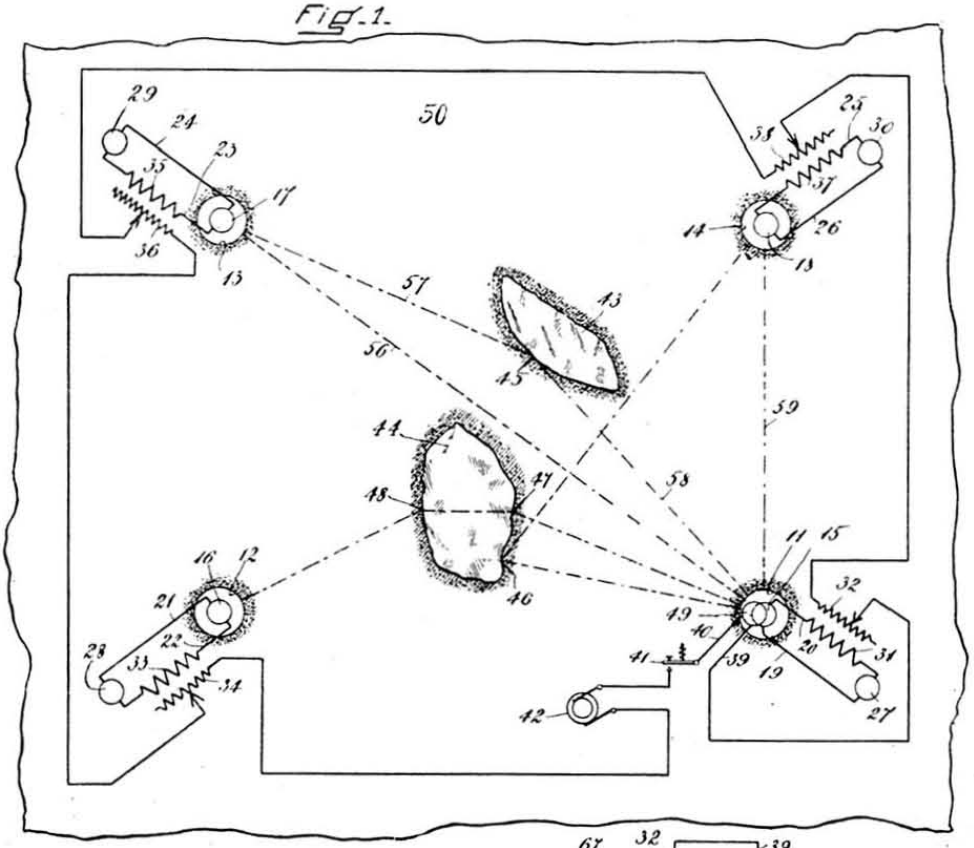


Fig. 2.

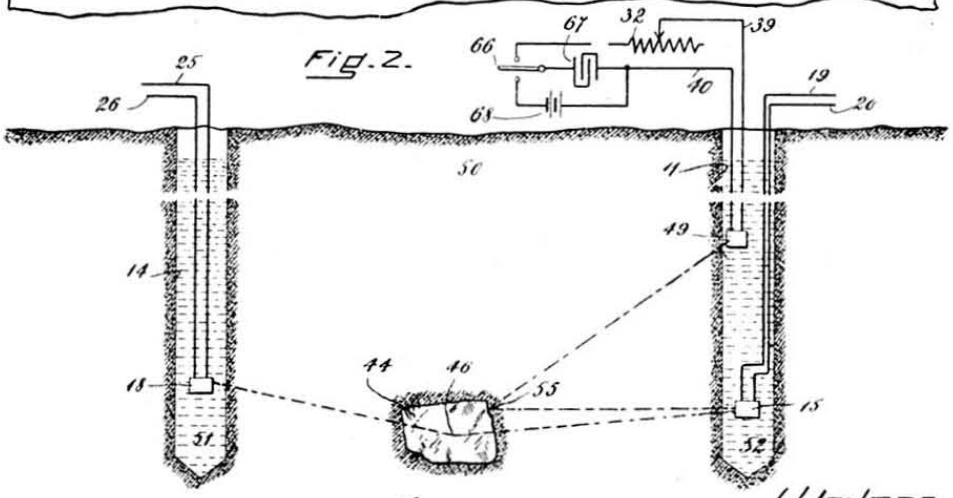
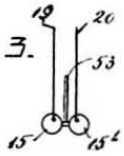


Fig. 3.



INVENTOR=
Reginald A. Fessenden
BY
HIS ATTORNEYS=

intersection of the sphere described about 49 with radius 4 miles, with the sphere described about 18 with radius 9 minus 4, i. e., 5 miles.

The exact point on the line of intersection may be found in a number of ways. For example:

1. By placing 49 in the drill holes 12 or 13 or 14 and taking other sets of records another line of intersections may be found. The point of intersection of the two lines of intersection will give the point at which the ore body is, or sufficiently close thereto.

2. By determining, by means of the apparatus of applicant's United States application Serial No. 54,556, filet October 7, 1915, shown diagrammatically in Fig. 3, and referred to below, the exact direction of the reflection points 46 of Fig. 1 and 55 of Fig. 2, thus knowing the directions and the distances obtained as given above, the ore body is located.

3. By drilling a test hole, passing near but on the far side of the line of intersection obtained as above.

Other modifications of applicant's method may be used. In fact, the mere determination of the time elapsing between the key depression record and the echo record made by reflection at 55, Fig. 2, together with a determination of the direction from which the echo is received is sufficient.

The extent of the ore body can be obtained by readings made by transferring 49 to the drill holes 12, 13, 14, and taking readings on the oscillographs on sending out sounds at these drill holes, or it may be determined by the refraction of the sound sent out from 49 and received at 16, or by the echo obtained at 16 when the sounder 49 is operated at the drill hole 12.

In place of using an alternator 42, a condenser discharge may be used to actuate the sounder 49, as shown in Fig. 2. Here the condenser key 66, on being depressed, charges the condenser 67 from the battery 68 and on the key being released and coming up against the top key contact, discharges the condenser through the transformer secondary 32 and sounder 49, thus making a single sound impulse, or a rapidly oscillating one, if the discharge is an oscillatory one.

The vertical angle of reflection may be determined by hauling the transmitter 49 or the receivers 18, 15, up or down in the drill holes.

In Fig. 3 is shown the apparatus for determining the direction of the sound received. Here 15, 15', are two sound receivers, preferably small oscillators, connected in series preferably, their leads being the conductors 19, 20, connected to the oscillograph 27.

53 is a rod supporting the two receivers, 15, 15', by which they may be turned in any direction. On turning them, the sound will be a maximum if they are connected so as to assist each other, when they are in a plane at right angles to the direction of the received sound. If they are connected so as to oppose each other, the sound will be a minimum when they are in this plane. In this way by drawing a perpendicular to the plane so determined, the direction from which the sound comes may be determined.

By the term "sound inflection" I mean bending of the line of sound propagation, either by reflection, or by refraction.

What I claim is:

1. That method of determining the location of ore bodies which consists in generating sound waves and observing their inflection.

2. That method of determining the location of ore bodies by generating sounds and observing their inflection by the ore bodies, and their velocities.

Reginald A. Fessenden.

Copies of this patent may be obtained for five cents each, by addressing the "Commissioner of Patents, Washington, D. C."

Sieberg 1917

Im Jahre 1917 schrieb Sieberg in dem von Geheimen Bergrat Professor Dr. Keilhack, Abteilungsdirigenten der Kgl. Geologischen Landesanstalt in Berlin, Dozent an der Kgl. Technischen Hochschule in Charlottenburg herausgegebenen „Lehrbuch der praktischen Geologie": Es kann nicht unsere Aufgabe sein, hier auf die schwierigen und noch ganz ungeklärten Methoden zur Ermittlung der Laufzeiten auf den im Erdinnern verlaufenden Stoßwellen der Vorläufer und der damit Hand in Hand gehenden Berechnungen der wahren „Fortpflanzungsgeschwindigkeiten" einzugehen. Die Arbeiten auf diesem Gebiete müssen dem Mathematiker und Physiker vorbehalten bleiben. Wer sich hierfür näher interessiert, sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. Hiermit erübrigt sich auch eine Besprechung der zur Berechnung der Herdtiefe vorgeschlagenen Methoden, da ihnen die vorerwähnten Probleme zu Grunde liegen. Solange wir noch über die physikalischen Verhältnisse in den Erdtiefen und die weitere Beeinflussung der Fortpflanzung seismischer Energie durch den geologisch-tektonischen Aufbau der Gesteinskruste im unklaren sind, vermögen wir nicht, die genannten Methoden hinsichtlich ihres Wertes oder Unwertes zu beurteilen".

Kayser 1918

Im Jahre 1918 beschrieb Professor E. Kayser in der im September 1918 abgeschlossenen 5. Auflage seines bekannten Lehrbuches der „Allgemeinen Geologie" in dem umfangreichen Abschnitt „Erdbeben und seismische Erscheinungen" auch Ergebnisse von Beobachtungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit künstlich erzeugter Erdbebenwellen, ohne daraus weitere Schlüsse zu ziehen. „Sie (die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, heißt es), hängt einmal von der petrographischen Beschaffenheit der Gesteine im Schüttergebiete ab. Je dichter und je freier von Klüften und Hohlräumen das Gestein ist, desto rascher schreitet die Bewegung fort. So bestimmte R. Mallet bei Pulverexplosionen die Schnelligkeit der Fortpflanzung der Erschütterung für nassen Sand zu 250,5 m pro Sekunde, für klüftigen Granit zu 395 m pro Sekunde, für festen Granit zu 507,5 m pro Sekunde. Ähnliche, aber etwas höhere Werte erhielt Pfaff. Neue sehr sorgfältig von Fouqué und Lévy in französischen Bergwerken ausgeführte Versuche haben ergeben: Für kambrischen Marmor 646 m pro Sekunde, für permischen Sandstein 1190 m pro Sekunde, für festen Kohlensandstein 2000—2526 m pro Sekunde, für festen Granit 2450—3141 m pro Sekunde. Die zuletzt aufgeführten Werte nähern sich dem der langen oberflächlich fortgepflanzten Erdbebenwellen, die wie früher hervorgehoben, eine ziemlich gleichbleibende Geschwindigkeit von 3,5km pro Sekunde besitzen."

Kayser beschränkte sich demnach im Jahre 1918 auf die Wiedergabe der Ergebnisse von zum Teil bereits 70 Jahre alten Geschwindigkeitsmessungen in bekannten Gesteinen, ohne auf die Ermittlung des Gebirgsbaues hinzuweisen.

Evans 1919

Am 2. Oktober 1919 erschien in der englischen Zeitschrift "Nature" in dem "Report of the 87. meeting of the British Association The Opening Address by J. W. Evans D.Sc.L. L.B.F.R.S., President of the Section, eine Veröffentlichung, in der es u. a. heißt:

"It deserves consideration, however, as to how far it may be possible to add to our knowledge of the earths crust by experimental work with a view of the determination of surfaces of discontinuity by their action in reflecting vibrations from artificial explosions, a procedure similar to that by means of which the presence of vessels at distance can be detected by the reflection of submarine sound waves. The ordinary seismographs are not suited for this purpose, the scale of their record, both of amplitude and of time, is too small for the minute and rapid vibrations which would be expected to reach an instrument situated several miles from an explosion as to distinguish between direct vibrations and those that may arrive a second or two later after reflection at a surface of discontinuity. As the cylinder on which the record is made would be only in motion while the experiment was in progress, there would be no difficulty in arranging for a much more rapid movement. At the same time it would be desirable to dispense with any arrangement for damping the swing of the pendulum which would be unnecessary with small and rapid vibrations and would tend to suppress them. It is possible that it might be better to employ a seismograph which records, like that described by Galitzin shortly before his death, variations of pressure expressing terrestric acceleration, instead of one which records directly the movements of the ground. It would however, probably be found desirable so substitute for the piezo electric record of pressure employed by Galitzin a record founded on the affect of pressure in varying the resistance in an electric circuit. This is, in fact, the principle of the microphon and most modern telephone receivers, not matter so much for the present purpose, where the time of transmission is the most important feature in the evidence, but satisfactory results even in this respect appear to be given by Brown's liquid microphone, from which the record could be taken, if desired, by means of the reflection of a mirror, attached to the needle of the galvanometer."

"In this review of some of the possibilities of geological research I cannot claim to have done more than touch the fringe of the subject. In every direction there is room for the development of fresh line of investigation, as well as for renewed activity along paths already trodden. Whether my particular suggestion proves fruitful or not, they will have served their purpose if they have stimulated anyone to look for new fields of work."

Obige Vorschläge des bekannten englischen Geologen Evans zeigen, daß das Problem der seismischen Untergrunderforschung im Jahre 1919 noch nicht gelöst war.

Am 7. Dezember 1919 meldete Mintrop das Deutsche Reichspatent Nr. 371963 „Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten" an, dessen Wortlaut hier folgt: Mintrop 1919

DEUTSCHES REICH. REICHSPATENTAMT.

Patentschrift Nr. 371963, Klasse 42f, Gruppe 13.

Dr. Ludger Mintrop in Bochum.

Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten.

Patentiert im Deutschen Reiche vom 7. Dezember 1919 ab.

Zur genauen Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten einer bestimmten Gegend muß man, soweit nicht natürliche Aufschlüsse vorliegen, zu Bohrungen greifen; die Absenkung von Bohrlöchern bedeutet aber regelmäßig eine umständliche und teuere Arbeit, die zudem gar nicht überall in Anwendung gebracht werden kann. Da, wo es sich darum handelt, zunächst vorläufige Anhaltspunkte für die ungefähre Zusammensetzung der Gebirgsschichten zu erhalten, hat man bekanntlich die Wünschelrute versucht; wie aber aus „Glückauf" 1919, Seite 893 ff., hervorgeht, ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Wünschelrutenwirkung und den geologischen Besonderheiten des Untergrundes bisher noch nicht feststellbar gewesen. Eine zweite, zum gleichen Zwecke ungefährer Aufschlüsse dienende Arbeitsweise besteht in der Verwendung elektrischer Wellen, aus deren Verhalten bestimmte Rückschlüsse auf den Aufbau und die Eigenart der Gesteinsschichten gemacht werden.

Gemäß der Erfindung sollen an sich auch Wellen zur Ermittlung des Aufbaues von Gesteinsschichten benutzt werden, aber nicht elektrische Wellen, sondern mechanisch erzeugte, elastische Wellen auf Grund der Erkenntnis, daß deren Zusammenhang mit den Eigenarten der Gesteinsschichten, wie Dichte und Elastizität, ein unmittelbarer und damit ein viel innigerer ist als die Wechselbeziehung zu elektrischen Wellen. Zu diesem Zweck werden in dem Meßgebiet an einer geeigneten Stelle künstlich, z. B. durch Zerknallen einer gewissen Menge Sprengstoffes, mechanische Wellen erzeugt, deren elastische Fortpflanzung durch die verschiedenen Gebirgsschichten durch einen in angemessener Entfernung aufgestellten Erdbebenmesser aufgezeichnet wird. Diese Aufnahmen werden benutzt, um, wie dies von der Erdbebenforschung her bekannt ist, die sogenannte „Laufzeitkurve" aufzustellen und die Geschwindigkeiten der Wellen in den verschiedenen Tiefen zu errechnen; auch bei der Erdbebenforschung hat man schon gewisse Rückschlüsse auf den allgemeinen Aufbau der Erde im ganzen zu ziehen versucht. Im vorliegenden Falle spielt aber zunächst der Umstand eine Rolle, daß man nicht an das unberechenbare Auftreten natürlicher Erdbeben gebunden ist, sondern willkürlich solche Erderschütterungen hervorrufen kann, womit natürlich auch erst die Möglichkeit gegeben ist, für einen bestimmten Ort und eine bestimmte Zeit überhaupt solche Messungen vorzunehmen. Von wesentlicher Bedeutung ist ferner der Umstand, daß man jetzt auch für die Bestimmung des Fortschreitens der elastischen Wellen innerhalb der Gesteinsschicht bzw. ihrer Ankunftszeit am Erdbebenmesser eine bequeme Vergleichsmessung besitzt, indem man zur Feststellung des Zeitpunktes der Erregung der elastischen Schwingungen entweder die bei dem Zerknallen der Sprengladung sowieso entstehenden Schallwellen oder eine Übertragung mittels Licht, elektrischen Stromes bzw. elektrischer Wellen benutzt.

Aus den auf diese Weise festgestellten Oberflächen- und Raumgeschwindigkeiten der Wellen sowie den Tiefen, bis zu denen die Wellen in die Gebirgsschichten eingedrungen sind, besonders auch aus dem Verhältnis der Geschwindigkeiten der longitudinalen und transversalen Wellen zueinander, lassen sich Schlüsse auf die elastischen Eigenschaften der von den Wellen durchlaufenen Gesteinsschichten ziehen. Besonders sind aus den Wendepunkten und Knicken in der Laufzeitkurve Sprünge in den elastischen Eigenschaften der Gesteinsschichten sowie Beugungen, Brechungen und Reflektionen an Grenzflächen zu erkennen. So ergeben sich z. B. für verschiedene Orte die in den zugehörigen Abb. 1 und 2 dargestellten Schaubilder, aus denen einmal der unterschiedliche Verlauf der Geschwindigkeiten und ferner ihre Beziehung zur Tiefe zu erkennen ist. Durch Vergleiche, die mit solchen an Orten bekannten geologischen Aufbaues gewonnenen Laufzeitkurven und Geschwindigkeiten durchgeführt werden, hat man eine wertvolle Nachprüfung für die Zuverlässigkeit der Rückschlüsse auf die Schichtenfolge und -stärke, da die verschiedenen Gesteinsarten sich elastisch stark unterschiedlich verhalten. So läßt z. B. der starke Knick der Geschwindigkeitskurve in Abb. 2 sinnfällig erkennen, daß hier in gleichzeitig damit bestimmter Tiefe ein Wechsel der Gesteinsschichten vorliegt. Tatsächlich zeigen die Bohrungen für den Fall der Abb. 1 in ihrer ganzen Erstreckung diluviale Sande, während in dem Abb. 2 entsprechenden Falle auf eine etwa 9 m dicke Schicht losen Sandes fester Mergel folgt. Durch zweckmäßige Anordnung der Messung der künstlich erzeugten elastischen Wellen können auch Streichen und Fallen sowie Störungen der Gebirgsschichten ermittelt werden.

Wenn damit auch noch nicht immer eine Bestimmung der Gesteinsarten an sich möglich ist, so genügt es doch oft, zu wissen, bis zu welcher Tiefe die sichtbar ausstehenden Gebirgsschichten reichen und in welcher Mächtigkeit darunter festere oder losere Schichten folgen bzw. ob die Schichtenfolge dem normalen geologischen Aufbau entspricht. Z. B. spielt dies bei der Ergänzung der geologischen Kartierung für die Frage des Ansatzes von Bohrlöchern und Schächten in einem bestimmten Gebiet eine große Rolle. Dann aber zeigen wiederum z. B. Braunkohlen- oder Steinsalzablagerungen ein so kennzeichnendes elastisches Verhalten, daß man unter Heranziehung sonstiger Beobachtungen auch unmittelbar mit dem neuen Verfahren derartige Ablagerungen feststellen kann. Das Verfahren selbst ist dabei außerordentlich einfach und billig, da jeweilig nur wenige Kilogramm Sprengstoff zu einer Messung nötig sind und der dabei gebrauchte Erdbebenmesser als einfaches, leichtes, handliches Gerät ausgebildet werden kann; auch bedarf es zu den Aufnahmen an Ort und Stelle keineswegs wissenschaftlich vorgebildeter Personen, da die wissenschaftlichen Auswertungen der Messungen nachträglich vorgenommen werden können.

PATENT-ANSPRUCH:

Verfahren zur Ermittelung des Aufbaues von Gebirgsschichten, dadurch gekennzeichnet, daß in dem zu untersuchenden Gebiet künstlich, z. B. durch Zerknallen einer Sprengladung, elastische Wellen erzeugt werden, die von einem in entsprechender Entfernung aufgestellten Erdbebenmesser aufgenommen werden, aus dessen Aufzeichnungen sich die Geschwindigkeiten der verschiedenen Wellen und die Tiefe, die sie erreicht haben, feststellen lassen, womit — besonders auf Grund von Vergleichen mit Messungen an Stellen bekannten geologischen Aufbaues — sich Rückschlüsse auf die Folge, Stärke und Dichte sowie das Streichen und Fallen der Gesteinsschichten ziehen lassen.

Abb. 1.

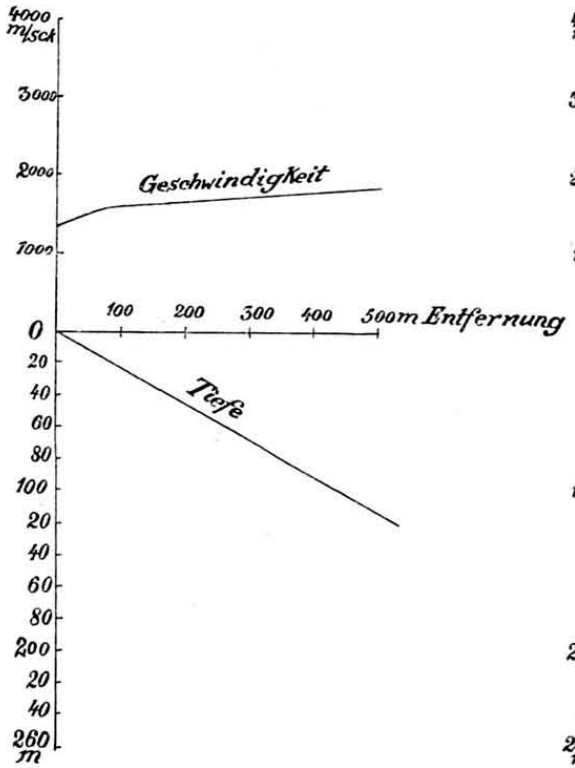
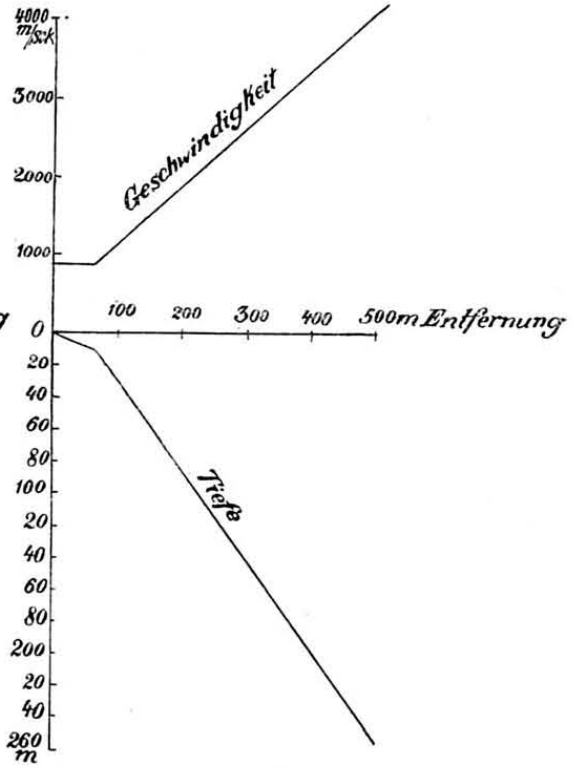


Abb. 2.



Evans 1920

Neun Monate nach seiner Veröffentlichung in Nature und sieben Monate nach Mintrop's Patentanmeldung suchte Evans das englische Patent Nr. 174095: „Improvements in and relating to Means for Investigating the Interior of the Earth's Crust" nach. Das Evans-Patent lautet:

PATENT SPECIFICATION. 174,095.

Application Date: July 9, 1920. No. 20,225/20. Complete Left: May 9, 1921. Complete Accepted: Jan. 9, 1922.

Provisional Specification.

Improvements in and relating to Means for Investigating the Interior of the Earth's Crust.

We, *John William Evans*, of the Imperial College of Science and Technology, South Kensington, S.W., Fellow of the Royal Society, a British subject, and *Willis Bevan Whitney*, of 21, Victoria Road, Surbiton, Surrey, Associate Member of the Institute of Civil Engineers, a naturalised British subject, do hereby declare the nature of this invention to be as follows :—

This invention relates to means for investigating the interior of the earth's crust and consists in novel combinations of apparatus (said apparatus per se being either new or old) and in the new apparatus per se for carrying out a method of investigating the interior of the earth's crust by which it is possible, without making extensive excavations or borings, to determine the nature and position of hidden strata such as coal, oil shale, water, petroleum, surfaces of rock and other strata or deposits or surfaces of discontinuity in the earth's crust.

The invention has for its object to facilitate the exploitation of mineral wealth, engineering operations, the investigation of the available supply of water, petroleum, and the like.

The method is based on the moulding and modifying influence which strata or surfaces of discontinuity in the earth's crust exert upon waves or vibrations, which pass through them or are reflected by them.

The novel combinations of apparatus according to the present invention comprise means for generating the waves or vibrations, at least two and preferably three or more apparatus for receiving the vibrations and one or more apparatus for recording the vibrations when received, the said receiving apparatus being in electrical or other suitable form of connection or communication with the generating means and with the recording apparatus.

The aforesaid combinations of apparatus may be employed in various ways of which the following are examples :—

1. Waves or vibrations are generated by the generating means at or near the surface of the earth and are automatically received at a plurality of stations and recorded. The receiving apparatus is placed in such positions at or near the surface of the earth that some of the waves are received after and others before they have traversed the stratum under examination, or they may all be received after they have traversed the stratum.

2. Waves are generated as before and having travelled downward to the surface of the stratum to be examined they are in part refracted and in part reflected back (owing to the properties possessed by surfaces of discontinuity between media of different densities and elastic moduli). The reflected waves, which may comprise both distortional and longitudinal waves are received at a plurality of stations and recorded.

3. The waves are generated below the stratum to be examined and having travelled upward to the stratum they are, as in the second case, in part reflected and in part refractet. The refracted waves are then received at a plurality of stations and recorded.

4. The waves are generated at or near the surface of the earth and are received at a plurality of stations and recorded after having been reflected and refracted a number of times between the stratum under examination and the surface of the earth.

In employing the aforesaid combinations of apparatus in the manner described the receiving apparatus of which, as staded, there should be at least two, are preferably so placed that they lie approximately on lines radiating from the generating apparatus as centre and between 90 and 120 degrees apart and are in electrical or other suitable form of connection with the said generating apparatus. It is not necessary that there should be three or more recording apparatus as the receiving apparatus may be connected electrically or by other suitable means with one recording instrument placed in any convenient position. Records of the vibrations at the generating station and at the various receiving stations are obtained and a comparison of these records enables the observer to distinguish between the different reflections and ascertain the time intervals between them even when they are so close together as to form composite waves and, owing to the different properties of reflection, refraction and absorption possessed by various media from the nature of the vibrations recorded and the time intervals between them the nature and position of the media under examination is determined.

For generating the waves the following means or means capable of generating the following kinds of vibrations may be employed :—

Vibrations generated by means of sound for instance, explosives, blows struck by hand or mechanical means and the like.

For receiving the vibrations the following instruments, for example, may be employed according to circumstances :—

Microphone-carbon, liquid or jet:

The following are examples of recording apparatus that may be used according to circumstances:

Telephone receivers in combination if necessary with automatic make and break device such as a commutator. Einthoven String Galvanometer fitted with automatic photographic recording device.

Apparatus based on the piezo-electric properties of quartz, stethoscope, oscillograph and the like in combination with automatic recording devices.

Instead of the above mentioned known apparatus a new receiving apparatus hereinafter described may be employed.

The new apparatus, according to the present invention, comprises essentially a casing which can be firmly embedded in the ground, a mass resiliently supported or suspended within said casing in such a manner that when the portion of the stratum in which the casing is fixed is set in motion by the passage of a vibration from the generator there will be relative motion and variation in pressure between the casing and the mass, and meant whereby said relative movement or variation in pressure may be detected.

The apparatus may be constructed in several forms.

In one preferred embodiment it comprises a heavy mass, for example, a hollow steel sphere filled with lead. Said mass is surrounded on all sides by a close fitting rubber envelope having a thickness of say two centimetres. It must be thicker below unless the mass is partly supported by a spring or springs. The rubber envelope is enclosed in a cast-iron or steel casing with a hollow spherical interior. This casing is fixed in a large and solid block of concrete firmly embedded in the ground both vertically and laterally at a depth where it is compact and undisturbed.

The rubber envelope and casing are divided into hemispheres or smaller segments which can be fixed together over the sphere by screws working in flanges so as to exert everywhere a gentle pressure upon it.

Passing through cylindrical holes in the casing and envelope are one or more short cylindrical steel rods, say three millimetres in diameter and five centimetres in length. These fit loosely in the holes in the casing and envelope. On the outer side the surface is flat while on the inner it has the same curvature as the sphere. The inner end of these pins presses lightly against the sphere, and the outer end against the diaphragm of a sensitive microphone so adjusted that a very slight variation in the pressure between the pin and the diaphragm will cause a sensible variation in the current passing through the circuit of the microphone, and these variations are recorded on a rotating drum. The microphone is rigidly fixed in the same concrete block as the casing of the sphere.

If there is only one pin, ist should be vertically above or below the centre of the sphere. If there are three, the other two will be horizontal and at right angles to each other, and all three are connected with different microphones.

It may be convenient to have pins in pairs opposite each other so that there will be two or six in the cases described above. The microphones associated with the opposite pins may then have a common circuit so arranged that an increase of pressure on the diaphragm of one microphone will cause the current to flow in the same direction as a decrease in the other. Alternatively they may be independent, furnishing a check on one another. For some purposes, and especially for the observation of vibrations arising from points at horizontal distances similar to the vertical distance at which reflections takes place, it will be convenient to have either in place of or in addition to the pins already described, four or eight pins at the points which would be in the same position as the angles of a cube with the centres of its faces opposite the first mentioned pins. The heavy mass may have different forms. Instead of being spherical it may have the shape of a regular polyhedron with envelopes and casing of corresponding form. The octahedron will be that most suited for the purpose, but the triangular triakis octahedron and the cube may also be employed. In this case the pins will be at the angles of the polyhedron which will be truncated so that the pins may be in complete contact with them. Springs may be substituted wholly or partially for rubber for keeping the mass in position especially vertically where a suspending spring is advantageous. Lateral variations of pressure may also be recorded even if the mass be suspended by an inextensible cord.

Any charcoal microphone may be employed and some forms of relay are also suitable for the purpose. Also a liquid microphone which acts by the varying resistance at a minute hole in a diaphragm in an electrolytic fluid such as copper sulphate or the piezo electric properties of quartz may also be employed for the purpose.

In a second embodiment of the invention the apparatus consits of a brass or gunmetal casing made in two parts and provided with circular flanges and bolt holes, so that the upper and lower portions may be drawn tightly together by means of bolts. These flanges when drawn together grip a mica, or insulated steel diaphragm which has a weight of at least eight ounces firmly attached to its centre. To this weight are attached two platino-iridium or other metallic points, one on the upper side and one the lower, said points are connected to a conductor which passes out of the casing along the surface of the diaphragm and completes the circuit of te telephone or other recording instrument. Through threaded holes in the centres of the upper and lower faces of the casing adjustable screws pass, these carry at their ends carbon or metallic shoes which are connected by conductors through a primary battery and if desired through a commutator arrangement to the remaining terminal of a telephone, Einthoven string galvanometer or other suitable receiving or recording device.

In one method of employing this apparatus it is placed in rigid connection with the surface of the stratum to be investigated upon one of the lines radiating from the generating apparatus as hereinbefore described. The screws are adjusted so that the faces of the shoes are just out of contact with the tops of the pins, in this state of affairs the circuit will be incomplete and no effect will be registered on the recording instrument.

When however the portion of the stratum to which the casing is attached, is set in motion by the passage of a wave from the generator, the vertical component of the motion will cause the casing to move bodily upwards or downwards while the mass owing to its inertia will remain fixed in space and will not move appreciably with the casing. As a result there will be relative motion between the casing and the mass and one of the shoes will come in contact with one of the platino-iridium points completing the circuit in the recording apparatus.

The make-and-break or commutator device is not essential to the circuit when single isolated waves are being detected. It is however essential when the generator is sending out waves at regular intervals of time. In one method of using the commutator device under such circumstances it is arranged automatically to break contact at intervals co-inciding with the arrival of say that portion of the wave travelling along the surface so that the arrival of this wave produces no effect on the recording apparatus, the reflected portion on the other hand of the wave which has travelled downwards and upwards and therefore by a longer path will arrive after contact has been made again and will therefore leave its record on the recording instrument. Thus by adjusting the speed of the commutator wheel or the make-and-break device a very accurate determination of the interval between the arrival of the direct and reflected wave can be obtained and thus the depth of the reflecting surface determined.

In another method of using the apparatus, the screws may be so adjusted that when no wave is passing one of the shoes is in contact with one of the platino-iridium points while the other is out of contact, the arrival of the wave will then be shown by a complete break of contact in the circuit.

In a modification of this second form of receiving apparatus the casing and the diaphragm are similar to that already described above, the platino-iridium points and the lower adjusting screw are however omitted. In place of the upper point a hemispherical elastic body is firmly attached to the inertia mass. The spherical surface of this elastic body may—if the body itself is not of the required resistance—be coated with a layer of conducting substance of high specific electric resistance. In the same way the shoe of the upper adjusting screw may be provided with a flat or spherical surface of similarly high resistance.

In one method of using this form of receiving apparatus the adjusting srcew is screwed down until the surface of the shoe is in sufficient contact with the hemispherical elastic body to distort the diaphragm to such an extent that whatever the motion of the casing the surface of the hemisphere will always be in contact with the shoe. Upon the arrival of a wave, there will be relative motion between the show and the inertia mass but owing to the adjustment already made this will not cause break of contact but only variation of pressure. This variation of pressure will cause a flattening or bellying of the surface of the hemispherical elastic body resulting in a considerable change in the area of contact between it and the shoe and causing considerable variation in the resistance. Since the resistance will under these circumstances be a function of the area of contact and thus of the pressure and motion of the ground, this form of receiver may be used to obtain quantitative results.

Dated this 7th day of July, 1920.

Clement Lean, B.Sc.,
Chartered Patent Agent, Thanet House, Temple Bar, 231 & 232,
Strand, London, W.C. 2.

COMPLETE SPECIFICATION.

Improvements in and relating to Means for Investigating the Interior of the Earth's Crust.

We, *John William Evans,* of the Imperial College of Science and Technology, South Kensington, Fellow of the Royal Society, a British subject, and *Willis Bevan Whitney,* B.Sc., A.M.Inst.C.E., of "Glen Doon", Bull Lane, Gerrards Cross, Bucks, formerly of 21, Victoria Road, Surbiton, Surrey, a naturalised British subject, do hereby declare the nature of this invention and in what manner the same is to be per formed to be particularly described and ascertained in and by the following statement:—

This invention relates to a method of and means for investigating the interior of the earth's crust and consists in novel combinations of apparatus (said apparatus per se being either new or old) and in the new apparatus per se for carrying out a method of investigating the interior of the earth's crust by which it is possible, without making extensive excavations or borings, to determine the nature and position of hidden strata such as coal, oil shale, water, petroleum, sufaces of rock and other strata or deposits or surfaces of discontinuity in the earth's crust.

An object of the invention is to facilitate the exploitation of mineral wealth, engineering operations, the investigation of the available supply of water, petroleum and the like.

The method is based on the moulding and modifying influence which strata or surfaces of discontinuity in the earth's crust exert upon sound waves or like pressure vibrations which pass through them or are reflected by them.

According to a previous method of this nature, in order to investigate the interior of the earth, a sound is emitted from a suitable source and its echo or return or the sound which arrives at a distant point is observed

by a receiving mechanism and the time elapsing between the emission of the sound and the reception of the echo or between the emission of the sound and its arrival at the distant point is also measured, the sound producer and the receiver being electrically interconnected for this purpose. From the observation obtained conclusions are drawn as to the probable nature of the medium which has been traversed by the wave.

Now the method to which the present invention relates as distinguished from the method heretofore proposed, is characterised in that the sound waves, after having been modified by the medium under examination are received simultaneously or approximately so at a plurality (at least two and preferably three or more) of receiving stations placed at a distance from the transmitting station, and the novel combinations of apparatus, in accordance with the present invention, comprise means for generating the waves or vibrations, a plurality of apparatus for receiving the waves and one or more apparatus in connection with said receiving apparatus and in connection, preferably electrically, with the generating means for recording said waves or vibrations when received and their times of transmission and reception.

The use of at least two receiving apparatus by which the waves are received approximately simultaneously is essential for the following reasons:—

Even in the simplest case when it is known that the stratum to be examined is horizontal there are two unknown quantities namely (1) the average velocity of the reflected wave (which is not the same as that of a surface wave) and (2) the depth of the reflecting stratum and therefore two equations connecting them are required and two observations are consequently necessary. These two observations are made simultaneously in accordance with the present invention and must be so made because, as is wellknown, the surface of the earth, when examined by delicate recording instruments is found to be in a constant state of movement, for example, the condition of the surface layers of the earth's crust varies with difference of temperature and barometric pressure, the strains in the rocks vary with the tides in the earth's crust and in the neighbourhood of the coast they vary with the marine tides as well, there are also diurnal changes of unknown origin of even greater magnitude, the earth's crust is continuously traversed by microseisms of varying intensity, vibrations are also constantly being caused by local traffic, slight landslips and distant earthquakes. The presence of these phenomena, therefore, makes it essential that the arrival of the waves should be recorded simultaneously and preferably on the same drum if the artificial vibrations from the transmitting station are to be clearly distinguished from the natural vibrations of the earth's crust.

Further, especially when the waves are generated by means of explosives, the conditions vary considerably with each experiment and this also makes it essential that there should be at least two receiving stations at which records are obtained simultaneously.

In more general cases when the strata are not horizontal, there will be more unknown quantities and further receiving stations will be required.

The employment of a plurality of receiving stations, therefore, has the advantages that the nature and position of the underground strata or media under examination can be determined with greater certainty than has heretofore been possible and there is a great saving of time since the records are obtained simultaneously.

The aforesaid combinations of apparatus may be employed in various ways of which the following are examples:—

1. Waves or vibrations are generated by the generating means at or near the surface of the earth and are automatically received at a plurality of stations and recorded. The receiving apparatus is placed in such positions at or near the surface of the earth that some of the waves are received after and others before they have traversed the stratum under examination, or they may all be received after they have traversed the stratum.

2. Waves are generated as before and having travelled downward to the surface of the stratum to be examined they are in part refracted and in part reflected back (owing to the properties possessed by surfaces of discontinuity between media of different densities and elastic moduli). The reflected waves, which may comprise both distortional and longitudinal waves, are received at a plurality of stations and recorded.

3. The waves are generated below the stratum to be examined and having travelled upward to the stratum they are, as in the second case, in part reflected and in part refracted. The refracted waves are then received at a plurality of stations and recorded.

4. The waves are generated at or near the surface of the earth and are received at a plurality of stations and recorded after having been reflected and refracted a number of times between the stratum under examination and the surface of the earth.

These methods are illustrated diagrammatically in Figs. 1—4 of the accompanying drawings.

In these figures A—B represents the surface of the earth and C—D the stratum under examination, G represents the generating station and R^1, R^2, receiving stations, which are suitably connected with the generating and recording stations. For the sake of simplicity only two receiving stations are shown in the diagrams.

Refering to Fig. 1, which illustrates method 1 hereinbefore described, waves or vibrations are generated at G and received at the receiving stations R^1, R^2 on either side of the stratum C—D which is under examination.

In the second method illustrated in Fig. 2, the waves or vibrations are received at the receiving station R^1, R^2 after having been reflected from the surface of the stratum C—D.

In the third method, illustrated in Fig. 3, the waves or vibrations are generated below the stratum C—D

and are received at the stations R^1, R^2 after having passed through the stratum and having been refracted by it.

Fig. 4 illustrates the fourth method according to which the waves generated at G are received at R^1, R^2 after having been reflected between the stratum under examination and the surface of the earth a number of times.

Fig. 1.

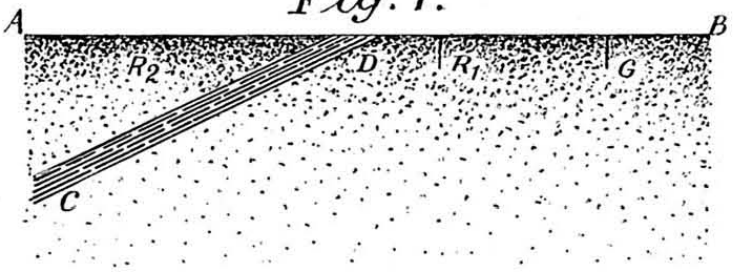


Fig. 2.

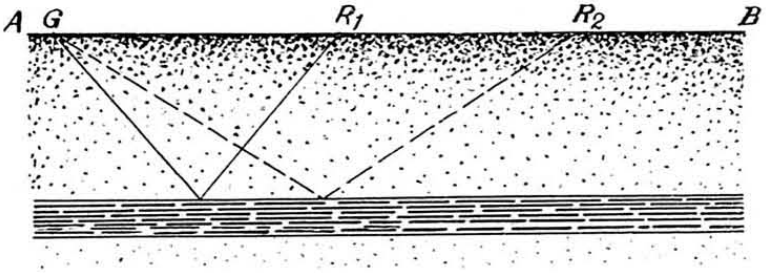


Fig. 3.

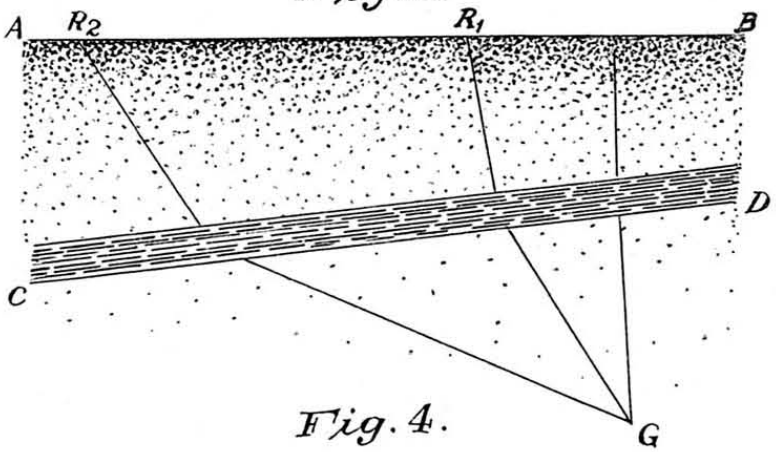
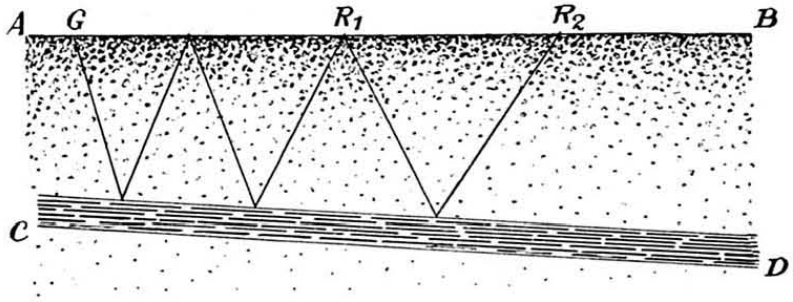


Fig. 4.



It will be understood that the waves may comprise both longitudinal and distortional waves, but as they are generally close together, they are represented as single lines on the diagram.

The distance apart of the generating and receiving stations will generally be considerable, say one mile, but may be greater or less, depending upon the nature of the earth's crust which is under examination.

In employing the aforesaid combinations of apparatus in the manner described the receiving apparatus of which, as stated, there must be at least two, are preferably so placed that they lie approximately on lines radiating from the generating apparatus as centre and between 90 and 120 degrees apart. It is not necessary that there should be three or more recording apparatus as the receiving apparatus may be connected, for example, electrically with one recording instrument, which is in connection, preferably electrically, with the generating apparatus, and may be placed in any convenient position. Records of the vibrations at the generating station and at the various receiving stations are obtained and a comparison of these records enables the observer to distinguish between the different reflections and ascertain the time intervals between them, even when they are so close together as to form composite waves and, owing to the different velocities in different media and the differences in reflection, refraction and absorption, the nature of the vibrations recorded and the time intervals between them will enable the probable nature and position of the media under examination to be determined, (provided there are a sufficient number of stations) for example, in the following manner:—

The time of arrival of the waves at each receiving station will be recorded and on the same record the time of generation of the wave at the transmitting station will be recorded by direct telegraphy automatically from the transmitting station. If the instrument at the receiving station records the actual wave shapes, these can be resolved by harmonic analysis into their components and the time of arrival of the different types of waves sorted out. The "sharpness" of the reflected waves will give information regarding the nature of the reflecting surface and comparison of velocities and times of arrival will give information relating the nature of the medium traversed.

For generating the waves, the following means or means capable of generating the following kinds of vibrations or oscillations may be employed-vibrations generated by means of sound, for instance, explosives, blows struck by hand or mechanical means and the like.

For receiving the vibrations the following instruments for example, may be employed according to circumstances:—

Microphone-carbon, liquid or jet.

Telephone receivers, in combination if necessary with automatic make and break device such as a commutator.

The following are examples of recording apparatus that may be used according to circumstances:—

Einthoven string galvanometer fitted with automatic photographic recording device.

Apparatus based on the piezo-electric properties of quartz, stethoscope, oscillograph and the like in combination with automatic recording devices.

Instead of the above mentioned known apparatus a new receiving apparatus hereinnafter described may be employed.

The new apparatus, according to the present invention, comprises essentially a casing which can be firmly embedded in the ground, a mases resiliently supported or suspended within said casing and one or more pins or the like inserted in an electrical circuit between the mass and a microphone or other apparatus whereby the relative movement between the casing and the mass, which occurs when the portion of the stratum in which the casing is fixed, and thereforethe casing itself, is set in motion by the passage of a vibration from the generator while the mass owing to its inertia tends to remain fixed in space, may be detected. Instead of pins a hemispherical elastic body, as hereinafter described, may be employed.

The apparatus may be constructed in several forms.

In one preferred embodiment it comprises a heavy mass, for example, a hollow steel sphere filled with lead. Said mass is surrounded on all sides by a close fitting rubber envelope having a thickness of say two centimetres. It must be thicker below unless the mass is partly supported by a spring or springs. The rubber envelope is enclosed in a cast-iron or steel casing with a hollow spherical interior This casing is fixed in a large and solid block of concrete firmly embedded in the ground both vertically and laterally at a depth where it is compact and undisturbed.

The rubber envelope and casing are divided into hemispheres or smaller segments which can be fixed together over the sphere by screws working in flanges so as to exert everywhere a gentle pressure upon it.

Passing through cylindrical holes in the casing and envelope are one or more short cylindrical steel rods, say three millimetres in diameter and five centimetres in lenght. These fit loosely in the holes in the casing and envelope. On the outer side the surface is flat while on the inner it has the same curvature as the sphere. The inner end of these pins presses lightly against the sphere, and the outer end against the diaphragm of a sensitive microphone so adjusted that a very slight variation in the pressure between the pin and the diaphragm will cause a sensible variation in the current passing through the circuit of the microphone, and these variations are recorded on a rotating drum. The microphone is rigidly fixed in the same concrete block as the casing of the sphere.

If there is only one pin, it should be vertically above or below the centre of the sphere. If there are three, the other two will be horizontal and a right angles to each other, and all three are connected with different microphones.

It may be convenient to have pins in pairs opposite each other so that there will be two or six in the cases described above. The microphones associated with the opposite pins may then have a common circuit

so arranged that an increase of pressure on the diaphragm of one microphone will cause the current to flow in the same direction as a decrease in the other. Alternatively they may be independent, furnishing a check on one another. For some purposes, and especially for the observation of vibrations arising from points at horizontal distances similar to the vertical distances at which reflection takes place, it will be convenient to have either in place of or in addition to the pins already described, four or eight pins at the points which would be in the same position as the angles of a cube with the centres of its faces opposite the first mentioned pins. The heavy mass may have different forms. Instead of being spherical, it may have the shape of a regular polyhedron with envelopes and casing of corresponding form. The octahedron will be that most suited for the purpose, but the triangular triakis octahedron and the cube may also be employed. In this case the pins will be at the angles of the polyhedron which will be truncated so that the pins may be in complete contact with them. Springs may be substituted wholly or partially for rubber for keeping the mass in position especially vertically where a suspending spring is advantageous. Lateral variations of pressure may also be recorded even if the mass be suspended by an inextensible cord.

Any charcoal microphone may be employed and some forms of relay are also suitable for the purpose. Also a liquid microphone which acts by the varying resistance at a minute hole in a diaphragm in an electrolytic fluid such as copper sulphate or the piezo electric properties of quartz may also by employed for the purpose.

A preferred embodiment of an apparatus of the aforesaid type is illustrated by way of example, in Fig. 5, which represents a sectional diagram of the apparatus.

Referring to Fig. 5, 1 is a solid sphere of lead enclosed in a steel casing 2. The casing 2 is surrounded by a rubber envelope 3 which is enclosed by the two hemi-spherical steel casings 4, having flanges 5 by means of which they are bolted together. The whole is enclosed in a concrete block 6 which is embedded in the ground. The casing 4 and rubber envelope 3 are provided with circular holes 7 in which the steel rods 8 fit loosely. The inner ends of the rods 8 are rounded to the same curvature as the sphere and press lightly against the casing 2, while the outer ends are flat and in connection with the diapraghm or a microphone or with a piezo-electric apparatus which is fitted in suitable openings 9 left in the concrete block, whereby slight variation in pressure may be measured.

A second preferred embodiment is illustrated diagrammatically by way of example in Fig. 6. The apparatus consists of a brass or gun metal casing *a* made in two parts and provided with circular flanges and bolt holes, so that the upper and lower portions may be drawn tightly together by means of bolts *f*. These flanges when drawn together grip a mica, or insulated steel diaphragm *b* which has a weight *c* of at least eight ounces firmly attached to its centre. To this weight *c* are attached two, platino-iridium or other metallic points *g* one on the upper side and one on the lower, said points are connected to a conductor *h* which passes out of the casing *a* along the surface of the diaphragm and completes the circuit of the telephone or other recording instrument *j*. Through threaded holes in the centres of the upper and lower faces of the casing *a* adjustable screws *k* pass, these carry at their ends carbon or metallic shoes *n* which are connected by conductors *l* through a primary battery *p* and if desired through a commutator arrangement *e* to the remaining terminal of a telephone, Einthoven string galvanometer or other suitable receiving or recording device.

In one method of employing this apparatus, it is placed in rigid connection with the surface of the stratum to be investigated upon one of the lines radiating from the generating apparatus as hereinbefore described. The screws *k* are adjusted so that the farces of the shoes *n* are just out of contact with the tops of the pins *g*, in this state of affairs the circuit *l*—*j*—*h*—*g*—*n* will be incomplete and no effect will be registered on the recording instrument at *j*.

When however the portion of the stratum to which the casing *a* is attached, is set in motion by the passage of a wave from the generator, the vertical component of the motion will cause the casing to move bodily upwards or downwards while the mass "*c*" owing to its inertia will remain fixed in space and will not move appreciably with the casing. As a result there will be relative motion between the casing *a* and the mass *c* and one of the shoes *n* will come in contact with one of the platino-iridium points *g* completing the circuit in the recording apparatus *j*.

The make-and-break or commutator device *e* is not essential to the circuit when single isolated waves are being detected. It is however essential when the generator is sending out waves at regular intervals of time. In one method of using the commutator device under such circumstances it is arranged automatically to break contact at intervals coinciding with the arrival of say that portion of the wave travelling along the surface so that the arrival of this wave produces no effect on the recording apparatus, the reflected portion on the other hand of the wave which has travelled downwards and upwards and therefore by a longer path will arrive after contact has been made again and will therefore leave its record on the recording instrument. Thus by adjusting the speed of the commutator wheel or the make-and-break device a very accurate determination of the interval between the arrival of the direct and reflected wave can be obtained and thus the depth of the reflecting surface determined.

In another method of using the apparatus, the screws *k* may be so adjusted that when no wave is passing one of the shoes *n* is in contact with one of the platino-iridium points *g* while the other is out of contact, the arrival of the wave will then be shown by a complete break of contact in the circuit.

A modification of this second form of receiving apparatus is illustrated diagrammatically by way of example in Fig. 7. In this apparatus the casing *a* and the diaphragm *b* are similar to that already described

Fig. 5

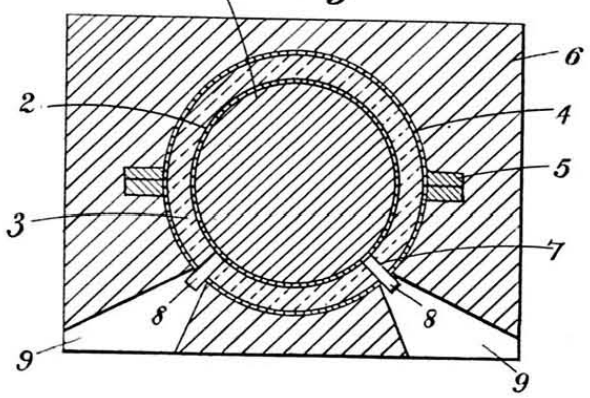


Fig. 6.

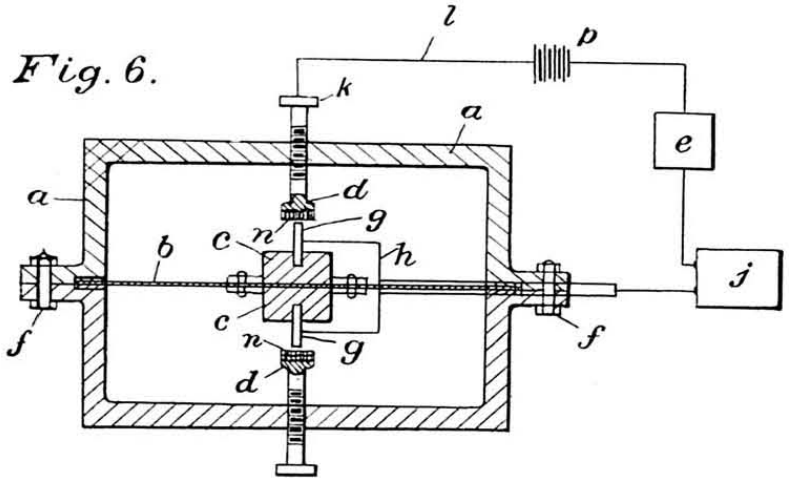
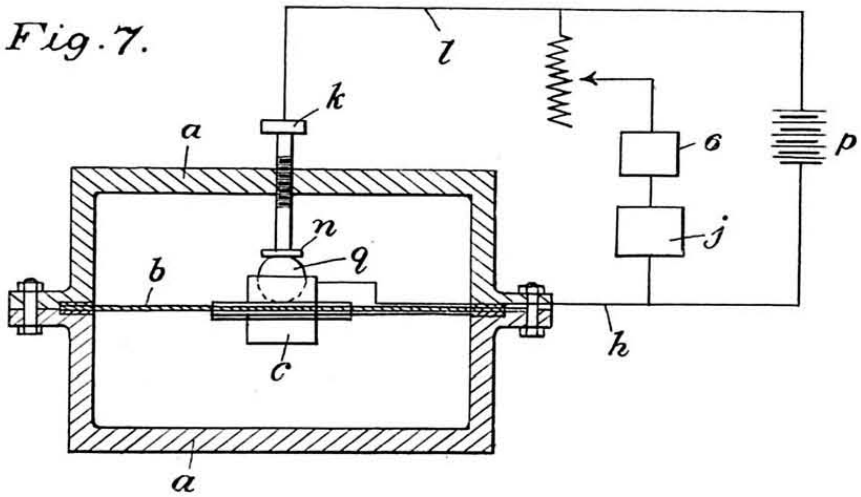


Fig. 7.



above, the platino-iridium points *g* and the lower adjusting screw *k* are however omitted. In place of the upper point a hemispherical elastic body *q* is firmly attached to the inertia mass *c*. The spherical surface of this elastic body may—if the body itself is not of the required resistance—be coated with a layer of conducting

substance of high specific electric resistance. In the same way the shoe *n* of the upper adjusting screw *k* may be provided with a flat or spherical surface of similarly high resistance.

In one method of using this form of receiving apparatus the adjusting screw *k* is screwed down until the surface of the shoe *n* is in sufficient contact with the hemispherical elastic body *q* to distort the diaphragm *b* to such an extent that whatever the motion of the casing *a* the surface of the hemisphere *q* will always be in contact with the shoe *n*. Upon the arrival of a wave, there will be relative motion between the shoe *n* and the inertia mass *c* but owing to the adjustment already made this will not cause break of contact but only variation of pressure. This variation of pressure will cause a flattening or bellying of the surface of the hemispherical elastic body *q* resulting in a considerable change in the area of contact between it and the shoe *n* and causing considerable variation in the resistance. Since the resistance will under these circumstances be a function of the area of contact and thus of the pressure and motion of the ground, this form of receiver may be used to obtain quantitative results.

We are aware that, for the purpose of detecting sounds by means of ground vibrations, it has hitherto been proposed to employ various devices of the microphone type, such as, a casing adapted to be fixed or embedded in the ground and containing two electrodes one of which is fixed and the other is attached to a diaphragm or supported by means of springs so as to be capable of vibration. The vibrating electrode is set in motion by the ground vibrations and varies the resistance in a hearing circuit in the usual manner.

Having now particularly described and ascertained the nature of our said invention and in what manner the same is to be performed, we declare that what we claim is:—

1. Means for carrying out a method of investigating the interior of the earth's crust based on the moulding or modifying influence which strata or surface of discontinuity in the earth's crust exert upon sound waves or like pressure vibrations which pass through them or are reflected by them comprising in combination means for generating the said waves or vibrations, a plurality of apparatus whereby said waves or vibrations are received simultaneously or approximately so, and one or more apparatus in connection with said receiving apparatus and in connection, preferably electrically, with the generating apparatus for recording said waves or vibrations when received and their times of transmission and reception, substantially as described.

2. A combination in accordance with Claim 1, in which the receiving apparatus comprises a casing which can be firmly embedded in the ground, a mass resiliently supported or suspended within said casing, and pins or the like inserted between the mass and the sensitive portion of a microphone or other apparatus, whereby relative motion or variation in pressure between the casing and the mass may be detected.

3. A combination in accordance with Claim 1, in which the receiving apparatus comprises a heavy mass, a close-fitting envelope of elastic material, such as rubber, surrounding said mass, a casing enclosing said envelope, a concrete block or the like adapted to be embedded in the ground in which said casing is enclosed, and means whereby relative motion between the mass and the concrete block may be detected.

4. In apparatus in accordance with Claim 2, the feature that the pins are arranged in pairs opposite each other, for the purpose specified.

5. A combination in accordance with Claim 1, in which the receiving apparatus is substantially as described with reference to Fig. 5 of the accompanying drawings.

6. A combination in accordance with Claim 1, in which the receiving apparatus is substantially as described with reference to Fig. 6 of the accompanying drawings.

7. A combination in accordance with Claim 1, in which the receiving apparatus is substantially as described with reference to Fig. 7. of the accompanying drawings.

Dated this 20th day of December, 1921.

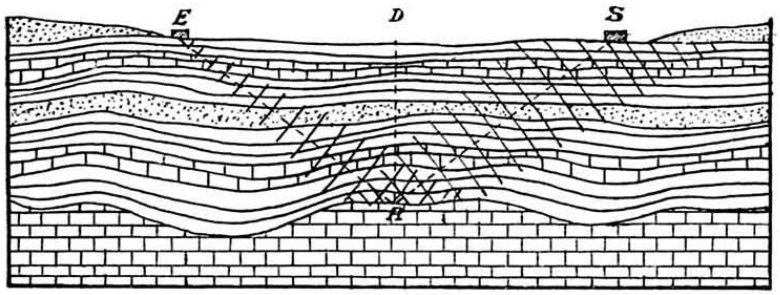
Clement Lean, B.Sc., A. M. I. Mech. E.,
Chartered Patent Agent,
Thanet House, 231, Strand, W.C. 2.

Udden 1920

Ein Jahr nach der Patentanmeldung von Mintrop und drei Jahre nach Erscheinen des Fessenden'schen Patentes machte der bekannte amerikanische Geologe und Professor an der Universität Austin in Texas, J. A. Udden, Director of Bureau of Economic Geology and Technology in dem Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist, Band 4, 1920, Nr. 1, unter der Überschrift: "Suggestions of a new Method of making underground observations" den Vorschlag, an der Erdoberfläche eine Sprengung vorzunehmen und einen Seismographen aufzustellen, der in gewissen Erdölgebieten die Wellen registrieren sollte, welche an dem unter weicher Bedeckung anstehenden harten Kalk reflektiert würden und so wieder an die Erdoberfläche gelangten. Udden meint, es müsse auf diese Weise möglich sein, die Tiefe des Kalkes an den verschiedenen Stellen eines Gebietes zu bestimmen und so

einen Tiefenkurvenplan auf der Oberfläche des Kalkes zu gewinnen. Udden schreibt: "It has suggested itself to the writer that it ought to be possible with present refinements in physical apparatus and their use, to construct an instrument that would record the reflections of earth waves started at the surface, as they encounter such a well — marked plane of difference in hardness and elasticity as that separating the Bend and the Ellenburger formations. Some such instrument as a seismograph, especially constructed to be sensitive to vertical waves, possibly a slight adaptation of some of the present seismographs would be ample suitable for the purpose. A seismic wave might be started by an explosion at the surface of the earth, and a record of the emerged reflection of this wave from upper surface of the Ellenburger limestone might be registered on an instrument placed at some distance from the point of explosion. The record would, of course, be a component of the direct and the reflected waves. It ought to be possible to notice the point at which the first reflection from the Ellenburger appears on a continuous record. The time of the record being known, it ought to be possible to figure the depth to the plane of reflection. It seems to me that by making of a number of observations at points where the distance to the upper surface of the Ellenburger is known, it would be possible to learn to interpret the record correctly. It might be found necessary to make new adaptations on the working parts of the instrument. The difficulties ought not to be insurmountable. After these are once mastered, observations could be made anywhere, probably with quite rapid progress, and the entire upper surface of the Ellenburger might be mapped over wide areas with relatively small effort. The topography of the Ellenburger could, so to speak, be contoured directly by any number of observations desired. With such a topographic map of the surface of the Ellenburger, it seems to me that millions of dollars worth of drilling could be eliminated, which will otherwise have to be done before all of the pools in the Bend shall have been located.

Why not pay twenty thousand dollars for "theoretical" experiments, if by so doing a million in expenses on "practical" work can be saved?"



Die durch nebenstehend wiedergegebene Figur illustrierte Veröffentlichung Udden's ist in mehrfacher Hinsicht bemerkenswert. Udden gibt im Gegensatz zu Belar, von dem Borne, Galitzin und Wilip, die sich auf allgemeine, von den Zeitgenossen nicht verstandene Andeutungen, ohne den Weg zur Lösung des Problems zu zeigen, beschränken, eine vollständige Regel zum technischen Handeln an und erläutert gleichzeitig den wirtschaftlichen Vorteil, den die Anwendung dieser Regel mit sich bringen würde. Ferner gibt Udden auch eindeutig den Zweck des Verfahrens an. Gelöst hat Udden die Aufgabe allerdings nicht.

Die Veröffentlichung Udden's beweist, daß das drei Jahre vorher bekanntgewordene Verfahren von Fessenden den praktischen Bedürfnissen nicht gerecht wurde, denn Udden sagt mit Nachdruck, daß bei Anwendung von Sprengungen und Seismographen von der Erdoberfläche aus Millionen Dollars an Bohrungen gespart werden könnten, während das Fessenden'sche Verfahren selbst an Bohrlöcher gebunden ist. Die Bedeutung eines Verfahrens, das Bohrungen vermeidet, geht aus einem Aufsatz von E. Bowles in Oil and Gas Journal vom 19. November 1925 über Economic Significance of new Wells hervor. Danach sind in den Vereinigten Staaten zwecks Aufsuchung von Erdöl in den 12 Jahren von 1913—1925

insgesamt 302541 Bohrungen niedergebracht worden mit einem Kostenaufwand von 4,910,500,000 Dollars. Von diesen Bohrungen waren 65564 trocken, d. h. nutzlos und der Kostenaufwand von 719,300,000 Dollars war vergeblich.

In der im Oktober 1920 abgeschlossenen dritten Auflage seines Buches: „Die Untersuchung und Bewertung von Erzlagerstätten" widmete der damalige Abteilungsdirigent, jetzt Präsident der Preußischen Geologischen Landesanstalt, Geheimrat Krusch, den Magnetischen Schürfungen, dem Elektrischen Schürfen, dem Schürfen mit Hilfe der drahtlosen Telegraphie, der „Eötvös'schen Drehwaage" und der „Wünschelrute" längere Ausführungen, erwähnt aber nicht die seismische Methode, ein Beweis dafür, daß das Mintrop-Verfahren im Jahre 1920 noch nicht bekannt war. Andererseits beweist die Erwähnung der erst im Jahre 1917 von Professor Schweydar auf Anregung des Direktors der Deutschen Bank, von Stauß, in Deutschland eingeführten Verwendung der Eötvös'schen Drehwaagen für geologische Bodenuntersuchungen, daß Krusch die neueste Literatur berücksichtigt hat. Krusch 1920

Das im In- und Auslande sehr bekannte Lehrbuch der Bergbaukunde von Heise/Herbst bringt in der im September 1920 abgeschlossenen 4. Auflage das seismische Verfahren noch nicht, während die magnetischen und elektrischen Methoden der Lagerstättenforschung erwähnt werden. Dagegen enthält die im Jahre 1923 erschienene 5. Auflage auch einen Hinweis auf das seismische Verfahren. Heise/Herbst 1920

Am 15. Dezember 1919 schrieb Professor Mainka in der Physikalischen Zeitschrift in dem Aufsatz: „Emergenzwinkel von Erdbebenstrahlen und Poisson'sche Konstante in der obersten Erdschicht" folgendes: „Aus Laboratoriumsversuchen und aus dem Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten longitudinaler und transversaler Wellen sind Näherungswerte für T (= Poisson'sche Konstante) vorhanden, die in der Nähe von 0,26 liegen. Jedenfalls wird T von der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes der oberen Erdschichten des Beobachtungsortes abhängen." „Nach den bisherigen Erfahrungen scheinen alle Bodenbewegungen künstlicher oder seismischer Art eine vertikale Komponente aufzuweisen, soweit es sich um kurzperiodische Erschütterungen handelt. Bei Versuchen mit künstlichen Erschütterungen (Fall- und Sprengversuchen) auf Felsboden einheitlicher Art sollte der Versuch gemacht werden, Vlong. und Vtrans. zu bestimmen, da dann auf dynamischem Wege die elastischen Konstanten verschiedener Gesteinsarten festgestellt werden können. Nach obigem können somit rein seismische Beobachtungen für physikalische Ziele verwertet werden." Mainka 1919

Zur Zeit der Anmeldung des Mintrop'schen Patentes diskutierte also Professor Mainka noch die Möglichkeit, durch Versuche die Geschwindigkeiten der longitudinalen und transversalen Wellen auf Felsboden einheitlicher Art bei künstlichen Erschütterungen zu bestimmen, um damit physikalische Konstanten verschiedener Gesteinsarten zu ermitteln, während Mintrop diese Geschwindigkeiten nicht nur bereits bestimmt, sondern sie schon zur Ermittlung der in der Tiefe anstehenden verschiedenen Gesteinsschichten technisch verwertet hatte.

Die Patentanmeldung Mintrop's datiert vom 7. Dezember 1919, öffentlich ausgelegt ist sie im November 1920, jedoch hielt Mintrop bereits am 15. August 1920 auf der Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft einen öffentlichen Vortrag über sein Verfahren. Es ist deshalb lehrreich, zu sehen, was die Fachwissenschaftler unmittelbar vor und nach dem Bekanntwerden des Verfahrens, d. h. vor dem 15. August 1920 und nach diesem Zeitpunkt veröffentlicht haben.

Am 30. April 1920 schrieb Dr. Richard Ambronn, der spätere Leiter der Erda G. m. b. H. bzw. Erda A.-G., Gesellschaft zur physikalischen Erderforschung in Göttingen, in der Zeitschrift der Bauingenieure eine Abhandlung, betitelt: „Die Untersuchung des Untergrundes mittels physikalischer Messungen". In dieser Arbeit wird die seismische Bodenuntersuchung nicht erwähnt, obgleich doch einleuchtet, daß sie für die Beurteilung eines Baugrundes in erster Linie in Betracht kommt, weil sie gestattet, die Elastizität der Untergrundschichten festzustellen. Ambronn 1920

Im August 1920 schrieb Mainka in seiner Druckschrift: „Kurzer Hinweis auf die Notwendigkeit der Errichtung einer Erdbebenwarte im oberschlesischen Industriebezirk" folgendes: Mainka 1920

„Im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte ist in den Zeitschriften des Berg- und Hüttenwesens öfters auf die Notwendigkeit hingewiesen worden, die in Berg- und Hüttenbezirken auftretenden verschiedenartigen Bodenbewegungen mit Hilfe zuverlässiger Instrumente — Seismographen — genauer und laufend zu beobachten, ebenfalls aber auch die Registrierung der fernen und nahen Erdbeben bzw. der von ihnen ausstrahlenden elastischen Wellen einzuführen. Die aus der Praxis hervorgehende Literatur zeigt also, daß in solchen Gebieten das Vorhandensein eines derartigen Beobachtungsortes „Erdbebenwarte" oder „Erdwarte" aus praktischen, wie aus wissenschaftlichen Gründen erforderlich ist. Eine solche Einrichtung ist sicherlich keine überflüssige, deren Ergebnisse etwa nur einer begrenzten Zahl von Personen am Herzen liegt. Der Wissenschaftler, der Bergmann, der Industrielle haben in solchen Gebieten an den erwähnten Aufzeichnungen die regste Anteilnahme.

Natürlich müssen die entsprechenden Instrumente richtig gebaut, aufgestellt und täglich von einem Fachmann kontrolliert werden. Soll eine solche Einrichtung in ihren Ergebnissen nicht illusorisch werden, so darf natürlich auch die Diskussion und Verarbeitung der Aufzeichnungen nur von einem in derartigen Arbeiten erfahrenen Wissenschaftler in die Hand genommen werden und nicht etwa von jemandem, der aus bestimmten Gründen mit solchen Beobachtungen sich erst kurz vorher vertraut gemacht hat.

Wie in den obigen Zeilen zu erkennen ist, kommen nicht nur bergbauliche und industrielle, sondern auch wissenschaftliche Gesichtspunkte in Frage, die aber eng miteinander verbunden sind. Ohne auf Vollständigkeit Anspruch zu erheben, soll hier auf einige Teilgebiete hingewiesen werden. Sprengungen in den Schächten, Bergschläge, Einstürze, Senkungen, Maschinen-, Dampfhammerbetriebe und noch andere vorhandene Ursachen bergbaulicher oder industrieller Art rufen Bodenbewegungen hervor, die groß genug sein können, um Bauwerke über oder unter Tage in ihrem Bestehen zu gefährden. Aber nicht jede Bodenbewegung ist in ihrer Wirkung schädlich. Oft werden bestimmte Betriebe zu Unrecht für Schäden verantwortlich gemacht, deren Ursache ganz woanders zu suchen ist. Eine sichere Feststellung kann aber nur mit Hilfe von seismographenähnlichen, dem Zweck entsprechenden mehr oder weniger empfindlichen Apparaten von einem Fachmann gemacht werden.

Auch sehr langsam vor sich gehende Neigungen, die oft eine Folge von Senkungsvorgängen sind, lassen sich auf instrumentellem Wege erkunden, was sicher oft zu begrüßen sein wird.

Andere nützliche Untersuchungen können gleichfalls mit Hilfe seismographenähnlicher Apparate angestellt werden. Z. B. sind in neuerer Zeit die durch den Wind verursachten Schwankungen eines sehr hohen (160 m) Schornsteins in Japan untersucht worden. Untersuchung von Brücken und im Betrieb befindliche Eisenbahnwagen gehören gleichfalls hierher, und nicht zu vergessen die Schwingungen von Maschinenfundamenten und des benachbarten Bodens.

Die durch den täglichen Straßenverkehr, namentlich auf schlechten Straßen, hervorgerufenen kurzperiodischen Schwingungen, stoßartigen Erschütterungen, beeinflussen nach den Erfahrungen die an Verkehrswegen stehenden Gebäude stark. In Bergwerks- und Industriegegenden müßte diesen Bodenschwingungen durch entsprechende Beobachtung mehr Beachtung geschenkt werden.

Die durch ein Erdbeben im Innern der Erdrinde ausgelösten elastischen Bewegungen pflanzen sich durch die Erdschichten und entlang der Oberfläche fort und verursachen Bodenbewegungen, deren Amplituden und Perioden u. a. auch von der Entfernung abhängig sind und entsprechende Beschleunigung im Gefolge haben. Gerade von bergbaulicher Seite ist auf die Wirkung solcher Bewegungen auf den Bergbau hingewiesen worden. Es ist hierbei zu beachten, daß die Wirkung nicht sofort einzutreten braucht, sondern einige Zeit später. Besonders zu beachten sind aber Beben, die in der Nähe bergbaulicher Gebiete oder in diesen stattgefunden haben. Es kann der Fall eintreten, daß nahezu gleichzeitig stärkere künstliche Erschütterungen eingetreten sind und daß diesen Schäden zugeschrieben werden, die aber den ersteren zur Last fallen. In solchen Fällen kommt die Schadenersatzfrage zur Geltung und die Einrichtung einer Erdwarte würde von großem Nutzen und großer Wichtigkeit sein.

Besonderes Interesse bieten Beobachtungen, die gleichzeitig im Bergwerk und oben in der Erdwarte angestellt werden. Die Ergebnisse solcher Vergleichsbeobachtungen können auch der reinen Praxis zum Vorteil sein.

Infolge meteorologischer Vorgänge machen sich oft Bebenbewegungen geltend, die allerdings nur instrumentell nachweisbar, einige Zeit andauern; es sind die sogenannten mikroseismischen Unruhen. Auch auf diese ist das Augenmerk des Bergbaues gerichtet gewesen, sollen doch mit dieser Erscheinung manche Geschehnisse, z. B. Schlagwetter, Bergschläge in Verbindung stehen. Bisher ist der Zusammenhang noch nicht erschöpfend behandelt worden. Regelmäßige einwandfreie Beobachtungen einer Erdwarte im Bergwerksgebiet und deren richtige Auswertung müssen die Grundlagen für weitere Untersuchungen in dieser Richtung bilden.

In diesem Falle, ebenso wie bei den Aufzeichnungen der Erdbeben, werden die Registrierungen anderer außerhalb des oberschlesischen Bezirks liegenden Warten des Vergleichs wegen herangezogen werden müssen; auf richtiges einwandfreies Arbeiten der Instrumente solcher Warten ist aber besonders zu achten.

An einer Erdwarte können auch andere Beobachtungen, die für den oberschlesischen Bezirk nützlich sind, z. B. meteorologische, erdmagnetische angestellt werden, ohne daß zunächst eine größere Anzahl von Beobachtern in Betracht käme.

In Bochum und Aachen bestehen Erdbebenwarten, die nicht nur wissenschaftlichem Interesse, sondern ebenso intensiv solchem des dortigen Berg- und Industriebetriebes dienen.

Wie ersichtlich, ist das Arbeitsgebiet einer Erdwarte im oberschlesischen Bezirk ein sehr ausgedehntes und sicherlich Nutzen bringendes."

Mainka zählt in dieser Denkschrift alles auf, was von einer Erdbebenwarte in einem Bergbaugebiet nur irgendwie geleistet werden könnte. Das wichtigste Arbeitsgebiet aber, nämlich die Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten, erwähnt Mainka überhaupt nicht. Der Grund dafür liegt darin, daß Mainka das Verfahren damals, im August 1920, noch nicht kannte. Die Anmeldung des Mintrop-Patentes war noch nicht öffentlich ausgelegt.

Am 15. August 1920 berichtete Mintrop auf der Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in einem Vortrage mit Lichtbildern eingehend über sein Verfahren: „Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten aus seismischen Beobachtungen". Mintrop 1920

In dem Vortrage führte Mintrop folgende Lichtbilder vor:

1. Horizontalseismograph von Wiechert (1200 kg-Pendel).
2. Seismogramm eines natürlichen Erdbebens in 2500 km Entfernung.
3. Laufzeitkurven natürlicher Erdbeben.
4. Weg des 1. Vorläufers (longitudinal) im homogenen und inhomogenen Erdinnern.
5. Verschiedene Wellenarten in der Erde, longitudinale, transversale Oberflächenwellen.
6. Wege der 1. Vorläufer bis 5400 km und 10000 km Herdentfernung.
7. Schematische Darstellung der Wirkungsweise des Mintrop-Pendels (D.R.P. 303344).
8. Schnitt und Ansicht des Mintrop-Pendels.
9. Lichtschreiber von Mintrop in Ansicht (geöffnet).
10. Feldseismograph aus Pendel und Lichtschreiber in geöffnetem Zelt.
11. Feldseismograph auf dem Transport (Ansicht zwei Träger mit den Apparaten).
12. Seismogramm eines durch ein fallendes Gewicht erzeugten künstlichen Erdbebens in 1300 km Entfernung.
13. Seismogramm von künstlichen Erdbeben durch fallende Gewichte in 1300, 1600 und 2000 m Entfernung.
14. Einrichtung zur Zeitübertragung mittels elektrischen Stromes.
15. Seismogramm mit Vorläufer eines durch eine Sprengung erzeugten künstlichen Erdbebens.
16. Vollständiges Seismogramm eines durch eine Sprengung in 900 m Entfernung erzeugten künstlichen Erdbebens.

17. Laufzeitkurve im diluvialen Sand.
18. Laufzeitkurve im tertiären Ton.
19. Laufzeitkurve im diluvialen Sand und im tertiären Ton gegenübergestellt.
20. Laufzeitkurve im Buntsandstein.
21. Laufzeitkurve im Steinsalz.
22. Laufzeitkurve im Tertiär und Steinsalz zusammen dargestellt.
23. Verlauf der Stoßstrahlen im diluvialen Sand und tertiären Ton gegenübergestellt.
24. Verlauf der Stoßstrahlen im tertiären Ton, im Buntsandstein und im Steinsalz zusammen dargestellt.
25. Grundriß und Profil eines Salzhorstes.
26. Ermittlung eines unter der Erdoberfläche anstehenden Salzhorstes.
27. Laufzeitkurve mit erst zu-, dann abnehmender Geschwindigkeit.
28. Laufzeitkurve mit sprungweisen Geschwindigkeitsänderungen.
29. Laufzeitkurve mit erst zu-, dann abnehmender Geschwindigkeit sowie mit sprungweiser Geschwindigkeitsänderung.
30. Verlauf der Stoßstrahlen in einem unter der Erdoberfläche anstehenden Salzhorste.
31. Verlauf der Stoßstrahlen bei erst zu-, dann abnehmender Geschwindigkeit.

Ein kurzer Auszug aus dem Vortrage ist in der Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 72, Jahrgang 1920, veröffentlicht. Der Vortrag erregte ein außerordentliches Aufsehen. Leider wird auf den Hauptversammlungen der Deutschen Geologischen Gesellschaft die Diskussion nicht protokolliert, aber aus den damaligen Tageszeitungen und aus der bekannten Berg- und Hüttenmännischen Zeitschrift „Glückauf" ist zu entnehmen, daß der Vortrag tatsächlich etwas Neues gebracht hat. „Glückauf" vom 18. August 1920 schreibt aus der Feder von Geheimrat Keilhack, Abteilungsdirigenten an der Preußischen Geologischen Landesanstalt über die genannte Tagung u. a.: „Hierauf hielt Dr. Mintrop aus Bochum einen außerordentlich bemerkenswerten Vortrag über die Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten aus seismischen Beobachtungen. Ausgehend von der Theorie der Erdbebenwellen im Erdinnern, wie sie namentlich von Wiechert gegeben worden ist, legte der Vortragende ein von ihm ausgearbeitetes Verfahren dar, das mit einfachen Hilfsmitteln ermöglicht, aus den Aufzeichnungen der von kleinen Sprengungen an der Erdoberfläche erzeugten Erschütterungswellen Schlüsse auf die Art und den Verlauf der Gebirgsschichten in der Tiefe zu ziehen. Nach dem ganzen Aufbau des Verfahrens und den bisher vorliegenden Ergebnissen ist anzunehmen, daß ein wertvolles Hilfsmittel zur Erkundung und Erforschung nutzbarer Lagerstätten gewonnen worden ist."

Der „Hannoversche Kurier" vom 16. August 1920 berichtet über den Geologen-Kongreß u. a.: „Sodann folgte wohl als interessantester Vortrag der Tagung der von Herrn Mintrop-Bochum über die Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten aus Beobachtungen von Erderschütterungen. Durch die Arbeiten von A. Schmidt und Wiechert waren schon die natürlichen Erdbebenwellen zur Erforschung des Erdinnern benutzt worden. — Herr Professor Salomon (Universität Heidelberg) erklärte, man verspreche sich viel von dieser neuen Methode. Der Vertreter einer Bergwerksgesellschaft erklärte, er habe die Versuche an Ort und Stelle beobachtet, die Ergebnisse seien noch verblüffender als im Vortrage angegeben. Wenn das Verfahren weiter ausgebaut würde, würde es sicher noch Überraschungen bringen. Herr Professor Pompeckj (Universität Berlin, seinerzeit Vorsitzender der Deutschen Geologischen Gesellschaft) berichtete, er habe den ersten Versuchen in Göttingen beigewohnt, auch er könne nur dem Erfinder seine aufrichtigsten Glückwünsche zu seinen praktischen Erfolgen aussprechen."

Ambronn, Leimbach 1920

Alsbald nach dem ersten öffentlichen Vortrage Mintrop's über sein Verfahren schrieb die auf dem Gebiete der Bodenerforschung tätige Physikalische Werkstätten A.-G. in Göttingen am 13. September 1920 folgenden Brief an Dr. Mintrop:

„Sehr geehrter Herr Doktor! Beifolgend lassen wir Ihnen einen Brief zugehen, welcher uns versehentlich infolge falscher Adressierung zugegangen ist. Wir bitten um Entschuldigung, daß die Absendung infolge der Abwesenheit unseres Herrn Dr. Ambronn auf einer Untersuchungsreise erst etwas verspätet erfolgen konnte.

Wir benutzen die Gelegenheit, Ihnen mitzuteilen, daß wir mit großem Interesse von Ihren Ausführungen gelegentlich der Tagung der Geologischen Gesellschaft in Hannover Kenntnis genommen haben und bedauern, daß dort nicht einer unserer Vertreter anwesend sein konnte. Wir würden uns sehr freuen, auch unmittelbar gelegentlich einmal über die Fortschritte Ihrer Arbeiten zu hören, da wir ohne Zweifel bei der großen Ausdehnung, die die Anwendung unserer Verfahren in diesem Jahre genommen haben, öfter Gelegenheit haben würden, auch die Anwendung Ihres Verfahrens zu empfehlen, bzw. durch zweckmäßige Kombination möglichst verschiedenartiger Verfahren die oft schwer zu übersehenden geologischen Verhältnisse, speziell bei der Aufsuchung von Kalihorsten schärfer zu erfassen. Infolge der großen Ausdehnung, welche unsere Arbeiten durch die erfolgte Aufnahme verschiedener neuer sehr wirkungsvoller physikalischer Aufschlußmethoden genommen hat, sind wir eben gerade dabei, die bisherige Abteilung für Erderforschung der Physikalischen Werkstätten, Aktiengesellschaft, wiederum in eine besondere Gesellschaft umzuwandeln, welche mit sehr bedeutenden Geldmitteln ausgestattet werden soll, um die Anwendung der physikalischen Verfahren, welche für die immer schwieriger sich gestaltenden Aufgaben eine sehr große Bedeutung haben werden, in möglichst großer Zahl in sich zu vereinigen und durch geeignete Kombination der für jeden Einzelfall anwendbaren Verfahren ihren Wert noch besonders zu steigern; denn da physikalische Aufschlußarbeiten ja stets nur eine indirekte Methode zur Aufsuchung solcher Objekte, welche den Bergmann interessieren, bleiben müssen, so ist unseres Erachtens durch die mit der Kombination mehrerer voneinander unabhängigen Verfahren verbundene Behandlung eines Problems von verschiedenen Seiten eine ganz besonders große Förderung der zu gewinnenden Erkenntnisse verbunden. Physikalische Werkstätten A.-G., gez. Dr. Leimbach, Dr. Ambronn."

Am 21. Mai 1921 schrieb Dr. R. Ambronn, Göttingen, in der Berg- und Hüttenmännischen Zeitschrift „Glückauf" eine Abhandlung über „Physikalische Aufschlußmethoden als Hilfsmittel für geologische Forschungen" über die Verwendung elastischer Wellen folgendes: „Aus den Beobachtungen über den Verlauf von Erdbebenwellen ist schon seit langem bekannt, daß sich die Wellen in den Gesteinen je nach deren Elastizität mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausbreiten. Aus den Erscheinungen bei großen Weltbeben hat man auf das Vorhandensein eines von der Substanz der Schale scharf abgegrenzten Erdkernes geschlossen, dessen Elastizität derjenigen des Stahles vergleichbar ist. Nach einem Vorschlage von von dem Borne werden diese Elastizitätsbestimmungen mit Hilfe künstlicher elastischer Wellen auf kleinere Verhältnisse angewendet, und aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit künstlicher, von Mintrop durch Fallenlassen großer Massen oder durch die dazu schon früher viel benutzten Dynamitexplosionen hervorgerufener Erdbebenwellen wird auf die Verteilung der Elastizität und damit auf den Bau der tieferliegenden Schichten geschlossen. Als Empfangsvorrichtungen für die Erschütterungswellen können höchstempfindliche selbstschreibende Seismometer der verschiedensten Bauarten dienen." Ambronn 1921

Zu dieser Darstellung der Geschichte des seismischen Verfahrens durch Ambronn sei bemerkt, daß die inzwischen errichtete Erda G. m. b. H., Gesellschaft zur Erforschung des Erdinnern unter Leitung von Dr. Ambronn Einspruch gegen die Anmeldung des Mintrop'schen Patentes veranlaßt hatte.

Am 4. April 1921 errichtete Mintrop zusammen mit der Phoenix, A.-G. für Bergbau- und Hüttenbetrieb in Hörde (jetzt Düsseldorf), Gelsenkirchener Bergwerks-A.-G. in Gelsenkirchen (jetzt Essen-Ruhr), Deutsch-Luxemburgischen Bergwerks- und Hütten-A.-G. in Bochum (jetzt auf die Gelsenkirchener A.-G. übergegangen), Eisen- und Stahlwerk Hoesch A.-G. in Dortmund, Rheinische Stahlwerke A.-G. in Duisburg-Meiderich (jetzt Essen-Ruhr) zwecks Seismos 1921

wirtschaftlicher Verwertung des seismischen Verfahrens die Seismos, Gesellschaft mit beschränkter Haftung zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten in Hannover. Es ist die erste Gesellschaft, welche sich in der Welt zum Zwecke der Anwendung des seismischen Verfahrens konstituierte. Aus der Tatsache, daß die Anregung zu dieser Gründung von den größten deutschen Montankonzernen ausgegangen ist und gleichzeitig Konzerne mit internationalen Interessen sich um das Verfahren beworben haben, kann auf die Neuheit und den wirtschaftlichen Wert des Mintrop-Verfahrens geschlossen werden.

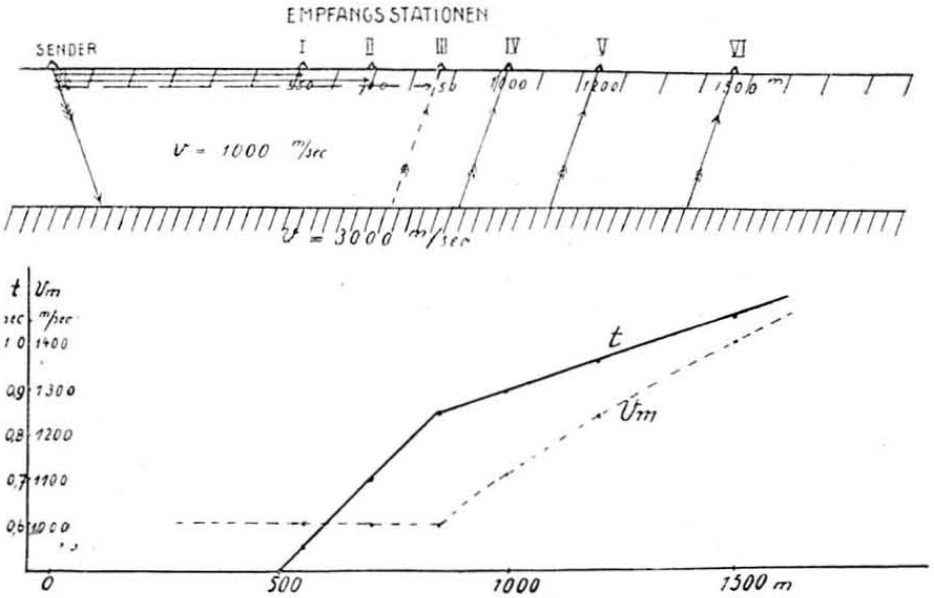
Nachdem der hohe wirtschaftliche Nutzen des Verfahrens erwiesen war, entstanden im In- und Auslande weitere geophysikalische Gesellschaften, die sich das Verfahren zunutze machten. Die Erfolge Mintrops sind auch, wie Wiechert und andere a. a. O. darlegen, die Veranlassung zur Aufnahme der kleinen Seismik als Forschungs- und Lehrgebiet der einschlägigen wissenschaftlichen Institute und Lehrstühle gewesen. Seit dem Bekanntwerden des Mintrop-Verfahrens hat eine neue Entwicklungsperiode der angewandten Seismik begonnen.

Ambronn 1921

Im Juniheft (Heft 12) 1921 der Zeitschrift „Kali" schrieb Dr. Richard Ambronn, Göttingen, in dem Aufsatz: „Über die Verwertung physikalischer Untersuchungsmethoden zu Aufschlußarbeiten im Kalibergbau" über das seismische Verfahren u. a. folgendes: „Sehr beträchtlich ist der Unterschied der Elastizität und damit der Größe der Schallgeschwindigkeit in dem harten Salze gegenüber den oft wesentlich weicheren Sand- und Tonschichten der jüngeren Formationen, besonders da, wo das Salz die härteren Sandsteine und Kalke des Trias durchbrochen und sich ein Salzhut aus Trümmern der jüngeren Gesteine, Gips usw. gebildet hat. Diesen Unterschied nützt das Mintrop'sche Verfahren (L. Mintrop, Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten aus seismischen Beobachtungen, Vortrag auf der 59. Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft, „Glückauf", 1920, S. 752) aus nach einem Vorschlag von von dem Borne (Von dem Borne: „Die physikalischen Grundlagen der tektonischen Theorien, Beiträge zur Geophysik IX, S. 403, 1908)", indem er genau in der gleichen Weise, wie einst Wiechert und Zoeppritz (Wiechert und Zoeppritz: „Über Erdbebenwellen", Göttinger Nachrichten 1907, S. 533 ff.) die Härteverteilung im Erdkörper als Ganzes mittels einer Diskussion der Beobachtungen über die Ausbreitung der von starken natürlichen Erdbeben herrührenden Wellen bestimmten aus der Art der Ausbreitung von durch die zu diesem Zwecke üblichen Dynamitexplosionen (vgl. z. B. Fouqué & Lévy, Expériences sur la vitesse de propagation des secousses dans les sols divers. Mémoires de l'Académie des sciences de France, Tom XXX, 2, Paris, 1889 II. S. 57—77) hervorgerufenen künstlichen Erdbebenwellen Schlüsse auf die Verteilung der Elastizität im Untergrunde zieht. Dadurch läßt sich das Vorhandensein und die ungefähre Tiefenlage von Salzkörpern feststellen, falls die geologischen Verhältnisse so geklärt sind, daß die harten Schichten nicht aus Sandsteinen, Kalkbänken oder stark verkalkten oder verkiesten Sanden usw. bestehen können."

In diesem Aufsatz führt Ambronn das Verfahren mit Recht auf die Arbeiten von Wiechert und Zoeppritz zurück, ohne indessen das Wesen der Wiechert'schen Methode verstanden zu haben. Es geht dies aus Ambronn's Ausführungen über „Die Anwendung physikalischer Aufschlußmethoden im Berg-, Tief- und Wasserbau", Vortrag in der Mitgliederversammlung des Halle'schen Verbandes für die Erforschung der mitteldeutschen Bodenschätze und ihre Verwertung vom 19. März 1921, im Druck erschienen 1922, hervor. Ambronn erklärt die Ausbreitung der elastischen Wellen in einer oberen losen Schicht und in der darunterliegenden festeren Schicht, in welchem Falle die erste Schicht also dem Erdmantel und die zweite dem Erdkern entsprechen würde, folgendermaßen: „Die Energie, die sich dem elastischen Materiale anschmiegt, kommt schneller nach dem Empfänger als die, welche in der oberen Schicht blieb. Vergrößert man, wie in der Abbildung für die Punkte I, II angedeutet, die Entfernung zwischen Sender und Empfänger, bei jedem folgenden Versuche und teilt die Entfernung durch die jeweilig gemessene Laufzeit der Energiewelle, wodurch man eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der elastischen

Wellen im Zwischenmedium erhält, so bleibt diese solange konstant und von der Entfernung der Stationen v_m abhängig, als die zuerst ankommende Energie nur in der oberen Schicht verläuft.



Sobald aber der Umweg durch die Schicht größerer Ausbreitungsgeschwindigkeit schneller durchlaufen wird als der direkte Weg, wächst die mittlere berechnete Wellengeschwindigkeit plötzlich an, bis sie bei sehr großer Entfernung der Stationen im Verhältnisse zur Mächtigkeit der Deckschichten nahe an die Schallgeschwindigkeit im unteren härteren Medium herankommt, indem die kurzen Wege von den Stationen bis zur unteren Schicht durch die weichere Decke hindurch gegen den langen Lauf im harten Grundgebirge vernachlässigt werden können. Ambronn bringt dann ein rechnerisches Beispiel, in welchem er annimmt, daß die Geschwindigkeit der elastischen Wellen in der oberen weichen Schicht 1000 m/sek. in der unteren festen Schicht 3000 m/sek. beträgt und die obere Schicht 300 m mächtig ist. Hierzu schreibt Ambronn: „Bei einer Entfernung von 10 km zwischen den Stationen würde die mittlere Geschwindigkeit sich schon zu 2570 m in der Sekunde berechnen, dem für das Tiefengestein charakteristischen angenommenen Werte von 3000 m in der Sekunde also schon nahe kommen". „Die Tatsache, daß die Geschwindigkeit der Ausbreitung der elastischen Wellen in einem Gebiete von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger abhängig ist, bedeutet also, wenn die Oberflächenschicht an sich ihre Struktur dazwischen nicht ändert, daß unter der oberflächlichen Bodenbedeckung eine Schicht abweichender Elastizität sich befinden muß. Weiß man aus geologischen Vorarbeiten die Schallgeschwindigkeiten in ihnen bereits bestimmt, so kann man auch die Tiefe der Grenzschicht berechnen. Es ist klar, daß diese Bedingungen bereits wesentliche Einschränkungen der Anwendungsfähigkeit der Methode geben."

Mit diesen Ausführungen, die übrigens im Jahre 1922 in der „Zeitschrift für angewandte Geophysik" im wesentlichen wiederholt worden sind, beweist Ambronn, der sich damals noch nicht der Seismik zugewandt hatte, daß er das Wesen einer Laufzeitkurve nicht verstanden hat. So z. B. zeichnet er in der Abbildung den Tiefenast der Laufzeitkurve geradlinig, berechnet dann aber die mittlere Geschwindigkeit V_m, anstatt sich der durch die Laufzeitkurve selbst gewonnenen Geschwindigkeit zu bedienen. Daraus ergibt sich dann die oben erwähnte falsche Auffassung über die sehr beschränkte Anwendbarkeit des Verfahrens. Die Kenntnis des Wesens der Laufzeitkurve ist für das Verständnis der Mintrop'schen Patentschrift selbstverständliche Voraussetzung und von jedem Fachmann zu erwarten.

Mainka 1921

Im März/April 1921 schrieb Professor Mainka in der Zeitschrift „Kohle und Erz" eine ausführliche Abhandlung: „Einiges aus der Erdbebenkunde und Beziehungen zum Bergbau und industriellen Betrieb". Obschon Mainka in dieser Arbeit die Methoden der Erdbebenforschung, insbesondere die Laufzeitkurven sehr ausführlich erörtert, erwähnt er jedoch nicht die Möglichkeit, diese in der großen Seismik angewandten Methoden für bergbauliche Zwecke nutzbar zu machen.

Auf Seite 154 dieser Veröffentlichung schreibt Mainka: „Bei Explosionen, die in gewisser Hinsicht auch hierher gehören (d. h. zu den störenden Erschütterungen), muß unterschieden werden zwischen Wirkungen der Explosionswelle und tatsächlichen Bodenerschütterungen. An dieser Stelle interessieren nur die letzteren. Auch bei solchen Bodenerschütterungen ist über eine Tiefenreichweite nichts bekannt, was für manche Fragen aber wertvoll wäre."

Mainka hat demnach das seismische Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten damals noch nicht gekannt. Es geht dies auch aus seinem Briefe vom 3. August 1921 an Mintrop hervor. Das Schreiben lautet: „Als ich s. Z. gelegentlich hinsichtlich Ihrer Pläne befragt wurde, habe ich mich zurückgehalten, da ich Näheres über diese nichts weiß und auch vor allem eigene Erfahrungen, aus denen heraus ich ein sachliches eigenes Urteil mir bilden könnte, nicht habe. Könnten Sie mir nicht die Arbeitsweise Ihrer Methoden in mehr als einigen 2—3 Zeilen mitteilen? Patentiert ist doch alles schon, das ist ja neuzeitlich. Ich denke vor allem an die Möglichkeit einer Vertretung in Schlesien, Oberschlesien und, wenn es recht ist, im polnischen Industriebezirk, der ja größer als der unsrige ist. Wie ist es übrigens mit dem Schutz Ihrer Sache im Ausland bestellt? Gegen Ausbeutung Ihrer Idee dort können Sie nichts machen, das wissen Sie doch, wenn nicht andere Kniffe da sind. Ich müßte natürlich Ihre Methode kennenlernen, um sie zu vertreten."

Wenn Mainka in diesem Schreiben betont, daß er das Mintrop-Verfahren im August 1921 noch nicht kennt, so zweifelt er in seinen Ausführungen in der Zeitschrift „Kohle und Erz" vom 5. Dezember 1921 das Verfahren an. Mainka schreibt dort:

„Die künstlichen Erschütterungen, wie wir sie nennen wollen, um ihre Herkunft zu bezeichnen, sind von sehr kurzer Periode, ihre Amplituden nehmen mit der Entfernung ab. Über die genaue Größe ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit sind entsprechende Untersuchungen, die einwandfrei wären, noch anzustellen. Ebenso sind noch andere Fragen rein physikalischer Natur mit größerer Sicherheit zu beantworten, die aber auch für den Praktiker von Interesse sind, u. a. Art der Wellen, ob dilatational oder torsional, Berechnung der elastischen Konstanten des den Baugrund bildenden Stoffes auf diesem, d. h. dynamischen Wege." — „Bei Explosionen, die in gewisser Hinsicht auch hierher gehören, muß unterschieden werden zwischen Wirkungen der Explosionswelle und den tatsächlichen Bodenerschütterungen. An dieser Stelle interessieren nur die letzteren. Auch bei solchen Bodenerschütterungen ist über eine Tiefenreichweite nichts bekannt, was für manche Fragen aber wertvoll wäre. Zum Schlusse seien noch zwei Verwendungsmöglichkeiten von Erdwellenmessern berührt. Über die Benutzung der durch künstliche Erschütterungen, Sprengungen, Explosionen unter oder über Tage hervorgerufenen Bodenschwingungen zur Feststellung physikalischer Eigenschaften des Bodens ist bereits oben berichtet worden. Finden Explosionen über oder insbesondere unter Tage statt, so können wir auch an eine Erforschung der zwischen Explosionswelle (Sendestelle) und Apparaturstelle (Empfangsstelle) liegenden Schichten denken. Eine Analogie hierzu finden wir im Kalibergbau in den physikalischen Aufschlußmethoden zur Feststellung, ob Lauge oder Wasser nahe ist, in der Anwendung elektrischer Wellen und Schwingungen. In unserem Falle der Verwendung elastischer Bodenbewegungen müssen natürlich erst noch Versuche angestellt werden, um die Sicherheit solcher Methoden kennenzulernen. Es ist nicht jeder theoretisch mögliche Versuch auch praktisch anzuwenden möglich. Es wäre gut, wenn man namentlich in der neueren Zeit in dieser Hinsicht doch etwas vorsichtiger wäre."

Sehr interessant ist hier die Gegenüberstellung der Verwendung von elektrischen und elastischen Wellen, wobei die Verwendung der ersteren als reif, die der letzteren aber noch als im Versuchsstadium betrachtet wird, so daß zu Vorsicht zu mahnen sei.

Trotz dieser Zweifel in die Anwendbarkeit bzw. Nützlichkeit des Mintrop'schen Verfahrens erstattete Professor Mainka in einem von der Erda entfesselten Patentstreit gegen Mintrop unter dem 25. November 1921 ein ausführliches Gutachten über „Die Patentfähigkeit der Anmeldung des Herrn Dr. L. Mintrop „Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten". Auch in diesem Gutachten, das das Verfahren als längst bekannt hinstellt, hegt Mainka Zweifel über die Durchführbarkeit des Verfahrens, indem er schreibt: „Die Benutzung künstlich erzeugter elastischer Wellen zur Darstellung des geologischen Aufbaues der Erdkruste im Großen wie im Kleinen ist nicht ganz ohne Dornen und Bedenken. Herr Dr. Mintrop scheint in der Anwendung künstlicher elastischer Wellen durchaus kein Haar zu finden. Durchweg denkt man nicht so. Deswegen hat man auch für die geologische Erkundung kleinerer Gebiete zunächst zu den sozusagen auf natürlichem Wege hervorgerufenen elastischen Wellen, seismischen Wellen, seine Zuflucht genommen."

„Prüft man noch einmal die Möglichkeit einer Patentfähigkeit der Mintrop'schen Anmeldung", fährt Mainka fort, „so kommt man zu dem Ergebnis, daß es nicht die Anwendung künstlich erzeugter elastischer Wellen ist, auch nicht die Möglichkeit die Anordnung der Schichtung der Erdrinde mit Unterstützung anderweitiger geologischer Kenntnisse zu ermöglichen ist, sondern das Vorgehen mit Hilfe der Laufzeitkurve irgendwelche Unstetigkeitsstellen in der Erdkruste zu erkennen. Diese Arbeitsweise ist aber der Seismik entnommen, wie sich aus der vom Einsprechenden Herrn H. Wagner schon erwähnten Wiechert'schen Arbeit „Erdbebenwellen" schon ergibt. Auch bezüglich Anwendung künstlicher Wellen sind, wie oben hingewiesen, schon vor Mintrop Versuche mit mehreren ‹neun› Empfangsstellen angestellt worden, allerdings ist von einer Aufstellung von Laufzeitkurven auf Grund der von den Einzelinstrumenten unmittelbar gelieferten zeitlichen Daten nicht die Rede.

Die Patentfähigkeit des Mintrop'schen Anspruches ist besten Falls auf Grund dieses Gedankenganges, der ihm sehr entgegenkommt, eine beschränkte, nur auf die Anwendung von Laufzeitkurven ‹Laufkurven, Hodographen› sich beziehende. Nach diesem müßte Herr Dr. Mintrop die Fassung seines Patentanspruches etwas ändern."

Mainka, Patentanmeldung 1921

Professor Mainka hatte demnach im November 1921 das Wesen des Mintrop-Verfahrens voll erkannt. Dennoch fand er Bedenken, es praktisch anzuwenden. Eine deutlichere Anerkennung der Neuheit des Verfahrens als durch Mainka's eigene Ausführungen ist kaum denkbar.

Vier Tage bevor Mainka obiges Gutachten erstattete, ging beim Reichspatentamt die Anmeldung E 27 359/42 l ein betreffs: „Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der elastischen Eigenschaften in den obersten Schichten der Erdrinde". Die Anmeldung ist durch die Erda A.-G. und Professor Mainka, letzterer in seiner Eigenschaft als Erfinder, eingereicht worden. Der Patentanspruch lautet:

„Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der elastischen Eigenschaften in den obersten Schichten der Erdrinde mit Hilfe künstlich erregter elastischer Wellen, bei denen die von den Erregungsorten sich allseitig ausbreitenden elastischen Wellen an einem oder mehreren Beobachtungsorten von geeigneten Empfangsgeräten registriert werden, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Aufzeichnungen der nach drei vorzugsweise zueinander senkrechten Richtungen gemessenen Verrückungskomponenten der Bodenteilchen am Empfangsorte bzw. an den Empfangsorten die dazugehörigen Auftreffwinkel der Wellenstrahlen errechnet werden."

Die Beschreibung zu diesem Anspruch lautet: „Eine an der Erdoberfläche oder unter der Erdoberfläche künstlich erregte elastische Welle breitet sich ähnlich wie die durch Erdbeben erzeugten elastischen Wellen nach allen Seiten im Erdboden aus. Aus der räumlichen Verteilung der Wellenstrahlen, insbesondere aus dem Auftreffwinkel der Strahlen an mehreren Empfangspunkten läßt sich dann entsprechend ein Schluß auf die räumliche Verteilung der

elastischen Verhältnisse im Untergrunde ziehen. Anstatt nur an einem Orte elastische Wellen auszusenden, kann man natürlich auch Beobachtungen miteinander kombinieren, welche an Wellen, die von verschiedenen geeignet verteilten Punkten ausgesandt sind, beobachtet werden. Man vermeidet durch ein solches Verfahren jegliche Zeitmessungen und benötigt insbesondere weder die Zeit des Einsetzens der Störung bzw. der Störungen, noch auch die Zeitdifferenzen zwischen der Erregung der Störung oder der Störungen und ihrem Eintreffen am Beobachtungsorte. Zum Empfang der Wellen und zur Feststellung der räumlichen Lage ist eine seismographenähnliche Apparatur nötig, welche es gestattet, die in Richtung der an dem Aufstellungsorte auftretenden Wellenstrahlen vor sich gehenden Bodenverrückungen zu messen. Eine solche Apparatur, welche die Richtung und die Größe der Bodenverrückungen quantitativ festzustellen erlaubt, besteht aus vorzugsweise gleichartig gebauten Einzelgeräten, die je eine der drei vorzugsweise senkrecht zueinander zu wählenden linearen Komponenten der Bodenverrückungen aufnehmen. Als Richtungen für die drei Komponenten wählt man zweckmäßig die nordsüdliche, die ostwestliche und die Vertikalkomponente der Bodenbewegung, welche dann von den drei Apparaten im Verhältnis zu ihren wahren Größen aufgezeichnet werden. Aus den so an den Einzelgeräten erhaltenen Amplituden der Bodenverrückungen ergeben sich dann für die verschiedenen Meßpunkte nach bekannten Rechnungsvorschriften die gesuchten Auftreffwinkel der vorüberziehenden elastischen Bodenwellen, von denen man die in der Seismik als scheinbare Emergenzwinkel bezeichneten Größen, ohne daß irgendwelche Beobachtungen zeitlicher Größen notwendig geworden wären, ableitet. Die räumliche Verteilung dieser Emergenzwinkel läßt sodann ohne weiteres auf die räumliche Verteilung der elastischen Größen im Untergrunde schließen."

Das Reichspatentamt hat diese Anmeldung in dem Vorprüf-Verfahren unter Hinweis auf die zwei Jahre ältere Anmeldung des Mintrop-Patentes 371 963 zurückgewiesen. Mit ihrem Einspruch gegen die Zurückweisung hatte die Erda Erfolg, wie die im folgenden wiedergegebene Entscheidung der Beschwerdeabteilung des Patentamtes vom 9. Oktober 1924 ergibt. Entscheidungsgründe: Gegenstand des Patentes 371 963 ist ein Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues der oberen Erdschichten, das auf der Messung der Geschwindigkeiten beruht, mit der sich elastische Wellen durch diese Erdschichten fortpflanzen. Das Eintreffen der Wellenzüge am Beobachtungsorte wird durch Erdbebenmesser registriert und aus den erhaltenen Laufzeitkurven werden Schlüsse auf Änderungen in den elastischen Eigenschaften der durchlaufenen Gesteinsschichten, auf Biegungen, Brechungen und Reflexionen der Wellen an Grenzflächen zwischen verschiedenen von ihnen durchlaufenen Schichten gezogen. Die Anmelderin hat erkannt, daß sich nicht nur aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer Wellen im Erdboden, sondern unabhängig davon auch aus der Ablenkung der Wellen aus der geraden Richtung wichtige Schlüsse über den Aufbau der von den Wellen berührten Gesteinsschichten ziehen lassen. Zu diesem Zwecke wird gemäß der Erfindung die Verrückung der Bodenteilchen in drei, zueinander senkrechten Richtungen mittels hierzu geeigneten Instrumenten gemessen und daraus der Auftreffwinkel der Wellenstrahlen berechnet. Dieses Verfahren ist weder Gegenstand des Patentes 371 963 noch ist es in der amerikanischen Patentschrift 1 240 328 (Fessenden) oder in der Zeitschrift „Glückauf" aus den Jahren 1920 und 1921 o. a. a. O. beschrieben. In allen diesen Fällen handelt es sich um die Benutzung der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten künstlich erzeugter elastischer Wellen für den angegebenen Zweck. Den Beanstandungen in den Bescheiden vom 2. März 1923 und 19. April 1923 ist darin zuzustimmen, daß das beanspruchte Verfahren in den ersten Unterlagen nicht mit ausreichender Deutlichkeit beschrieben war. Durch die ausführliche Darstellung des Verfahrens in der am 5. Juli 1923 eingegangenen Beschreibung ist dieser Mangel indessen geheilt worden, ohne daß dabei das für den Sachverständigen aus der ersten Unterlage schon erkennbare Wesen der angemeldeten Erfindung geändert worden ist. Die Erfindung ist im Sinne des § 20 des Patentgesetzes bereits am 22. November 1921 offenbart worden, woraus sich dieser Tag als Anmeldetag ergibt."

Am 30. Oktober 1922 meldete die Erda A.-G. unter E 28 652/42 ein anderes durch Professor Mainka bearbeitetes seismisches Verfahren an, dessen Ansprüche lauten: Mainka Patentanmeldung 1922

1. „Verfahren zum Ermitteln von Unstetigkeiten in den der Oberfläche nahe liegenden Erdkrustenteilen, dadurch gekennzeichnet, daß an zwei Orten gleichzeitig Bodenverrückungen periodischer oder unperiodischer Art künstlich erregt werden und einfache Empfangsgeräte, die auf den Mittelsenkrechten der Verbindungslinie der Störungsorte aufgestellt sind, beeinflussen und in geeigneter Weise beobachtet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß die Empfangsgeräte in der beiderseitigen Verlängerung der Verbindungslinie der Störungsorte angeordnet sind und eine Feststellung der ankommenden Störungen gestatten.

3. Verfahren nach 1 und 2 dadurch gekennzeichnet, daß die Empfangsgeräte örtlich beliebig aufgestellt sind, aber so, daß zu jedem Beobachtungsort ein weiterer spiegelbildlich zur Mittelsenkrechten und ein solcher spiegelbildlich zur Verbindungslinie gehört und beide gleichzeitig oder nacheinander für die Beobachtung der ankommenden Störungen eingestellt werden können."

In der Beschreibung zu diesen Ansprüchen heißt es einleitend: „Zum Feststellen von Unstetigkeiten in der obersten Erdkruste sind in neuerer Zeit verschiedene Arbeitswege eingeschlagen worden, die z. B. zum Ermitteln von Bodenschätzen gewerblich verwertet werden, d. h. beispielsweise zum Aufsuchen der Lagerstätten von Erzen irgendwelcher Art in den gewöhnlichen Schichten, Verwerfungen, die Wasser führen und deren Lage daher für die Trinkwasserversorgung von Bedeutung ist, Kohlenlagerstätten in sonst sterilen Gegenden und dergleichen. Für derartige Feststellungen sind auch an bestimmten Punkten im Gelände, z. B. durch Sprengungen, Bodenbewegungen hervorgerufen worden, deren Ankunftszeiten an entfernter liegenden mit geeigneten Empfangsgeräten, Erschütterungsmessern und dergleichen ausgestatteten Punkten beobachtet worden. Aus zeitlichen Beobachtungen dieser Art wurde dann eine Laufzeitkurve hergestellt, deren weitere Bearbeitung die Hinweise für die Lage der Unstetigkeiten in der Erdkruste ergab. Das Auswerten der Laufzeitkurve hat aber manches Umständliche und Unsichere im Gefolge, wozu kommt, daß am Ort der Störung das Eintreten der Störung genau beobachtet werden muß. Die vorhandenen Bedenken eines solchen Verfahrens und vor allem das Benutzen einer Laufzeitkurve sollen durch das neue Verfahren, durch das ein vorteilhafter Arbeitsweg geschaffen wird, beseitigt werden. Ebenso wie das Anwenden der Laufzeitkurve der Erdbebenwellenphysik entnommen ist, ebenso ist das im folgenden angewendete Zeitunterschiedverfahren dem gleichen Wissenszweig entnommen."

Bemerkenswert in dieser Anmeldung der Erda-Mainka ist die Feststellung, daß das Laufzeitkurven-Verfahren in „neuerer Zeit" eingeschlagen worden sei, aber mit Umständlichkeiten und Unsicherheiten verbunden und deshalb bedenklich sei. Die Behauptung Mainka's in dem gegenwärtigen Patentstreit, daß das Mintrop-Verfahren schon vor 25 Jahren bekanntgewesen sei, steht mit seinen Ausführungen in der eigenen Patentanmeldung nicht in Einklang.

Gegen die Anmeldung ist von der Seismos G. m. b. H. in Hannover Einspruch erhoben worden mit der Begründung, daß der Gegenstand der Anmeldung bereits durch das Mintrop-Patent 371963 vorweg genommen sei bzw. sich auf die Anwendung abstrakter geometrischer Gesetzmäßigkeiten auf den Einzelfall beziehe, die nicht patentfähig seien. Außer der Seismos hatte auch die „Gesellschaft für praktische Geophysik" in Freiburg Einspruch gegen die Anmeldung der Erda erhoben mit der Begründung, daß ihre eigene früher eingegangene Anmeldung K 80 369 IX/42 l Ansprüche enthalte, welche den Ansprüchen der Erda entgegenständen. Der Vorprüfer hat beide Einsprüche zurückgewiesen und auf die Anmeldung der Erda ein Patent erteilt. Die von der Seismos gegen diese Entscheidung eingelegte Beschwerde ist nicht zur Durchführung gelangt.

In der „Zeitschrift für Geophysik", Jahrgang 1926, Seite 141, schreibt Professor Mainka, daß die oben genannten Patentanmeldungen der Erda A.-G. „alles das decken, was außerhalb der Laufzeitkurve liegt."

Während die Gruppe Ambronn — Mainka einerseits versuchte, die Mintrop'sche Patentanmeldung zu Fall zu bringen, andererseits aber und für alle Fälle eigene Patente auf dem gleichen Gebiete nachsuchten, fanden die Arbeiten Mintrop's und seine Priorität in den Fachzeitschriften allgemeine Anerkennung.

Wiechert 1921

Wiechert selbst, auf den auch nach den Feststellungen Mainka's, Gutenberg's u. a., die seismische Methode zur Erforschung des Erdinnern zurückgeht, führte in der Sitzung des Erzausschusses des „Vereins Deutscher Eisenhüttenleute" am 15. Dezember 1921 (siehe Bericht in der Zeitschrift „Stahl und Eisen") nach einem Vortrage von Dipl.-Bergingenieur Gornick über die Drehwaage und von Dr. Mintrop über das seismische Verfahren folgendes aus:

„Seit 25 Jahren beschäftige ich mich mit der Anwendung der Physik auf die Erforschung des Erdinnern. In dieser Zeit sind zwei Verfahren bei meinen Arbeiten angewendet worden, nämlich eines unter Benutzung der Schwerkraft und eines unter Benutzung der Seismik. Ich verwandte dieselben Erscheinungen, die jetzt die Technik verwertet! Sonderbarerweise war es die leichtere Aufgabe, die Verhältnisse der Erde in großer Tiefe festzustellen. Jetzt aber ist die Erdphysik, die ich vertrete, darauf angewiesen, ihre Aufmerksamkeit auf die Rinde zu wenden. Wir bereiten uns vor, die Rinde von unserem Standpunkte aus zu untersuchen. Sie sehen, welch hohes Interesse unsere Wissenschaft an den Arbeiten hat, die hier vorgenommen werden. Es wäre die größte Freude, die uns beschieden sein kann, wenn die Verfahren, die wir für die Ziele der reinen Erkenntnis teils ausgeführt, teils vorbereitet haben und die wir auf die Erdphysik anwandten, jetzt für die Technik nutzbar gemacht werden könnten. Das würde eine neue Berechtigung unserer Arbeiten zeigen. Umgekehrt ist es ganz sicher, daß das, was die Herren der Technik erreichen, für unsere wissenschaftlichen Arbeiten von großem Wert ist. Es handelt sich um Punkte, die für die Wissenschaft ebenso bedeutungsvoll sind wie für die Technik. Es würde mich ungemein freuen, wenn von der Technik weiter in diesem Sinne gearbeitet würde, und wenn dabei ein bißchen von dem, was wir geschaffen haben, für die Technik von Nutzen sein könnte. —

Ich möchte das eine noch sagen: Beide Verfahren, das der Schwerkraft und das der Seismik, haben ihre Vorteile und ihre Nachteile; beide sind anwendbar. Die Seismik darf ich mit der Anwendung der Röntgenstrahlen vergleichen. Die Röntgenstrahlen haben unseren Körper durchsichtig gemacht, sie zeigen in ihm die Knochen, die Gewebe, die Fremdkörper. Die Seismik ist bestimmt, den Erdkörper durchsichtig zu machen. Mit den Erdbebenstrahlen ist es jetzt schon möglich gewesen, die Erde in ihrer Tiefe zu durchschauen. Ich hoffe, daß es ebenso möglich sein wird, mit den Erdbebenstrahlen die Rinde in Einzelheiten zu durchschauen."

Aus diesen Ausführungen Wiechert's im Jahre 1921 ist zu entnehmen, daß er im Jahre 1907 bei der Herausgabe des Buches „Über Erdbebenwellen" noch nicht an das Mintrop-Verfahren gedacht hat. Wie aus den Ausführungen von Zoeppritz (siehe oben Seite 20) hervorgeht, wurde das Verfahren damals noch als weit außerhalb jeder technischen Möglichkeit liegend betrachtet. Zoeppritz begrüßt sogar die dadurch bedingte Erleichterung der Aufstellung einer Laufzeitkurve, aus der wenigstens der Aufbau der Erde im großen abgeleitet werden könnte.

Die Aufstellung der Laufzeitkurve an Stellen, an denen die Folge, Tiefe und Mächtigkeit der einzelnen Gebirgsschichten genau bekannt ist, wie dies durch Beobachtungen künstlich erzeugter Erschütterungen in geologisch und bergmännisch bekannten Gebieten erfolgen kann, liefert der Theorie der Ausbreitung der Erdbebenwellen eine feste Basis. Eine solche Basis fehlt den von den verschiedenen Autoren, wie A. Schmidt, Rudski, Benndorf, Wiechert u. a. aufgestellten Theorien über die Ausbreitung der Erdbebenwellen im Erdinnern, weil der wirkliche Aufbau des tieferen Erdinnern sich einem unmittelbaren Aufschluß durch Bohrungen oder Schächte entzieht. Es fehlt der Theorie der Erdbebenwellen die experimentelle Nachprüfung. Durch die erstmalig von Mintrop durchgeführte Anwendung der Theorie auf eine bergmännisch-geologisch bekannte Schichtenfolge ist die Möglichkeit einer Nachprüfung

geschaffen worden. Daß eine solche Nachprüfung durchaus erforderlich ist, geht am deutlichsten aus den abweichenden Ergebnissen hervor, zu denen die verschiedensten Forscher bei der Aufstellung und Auswertung von Laufzeitkurven natürlicher Erdbeben gelangt sind. Schon Schmidt bedauert in seiner Veröffentlichung vom Jahre 1888 über „Wellenbewegung und Erdbeben", daß das Gesetz der Zunahme der Wellengeschwindigkeit mit der Tiefe nicht bekannt sei. Wiechert und Zoeppritz ermittelten im Jahre 1907 die Tiefe des Erdkerns unter dem äußeren Erdmantel zu 1500 km, während Zoeppritz und Geiger zwei Jahre später bereits in 1200 km Tiefe eine erste Unstetigkeitsfläche annehmen, unter der in 2900 km Tiefe eine zweite Unstetigkeitsfläche folgt. Zwei weitere, weniger deutlich ausgesprochene Grenzflächen sollen in 1700 km und 2450 km liegen. Aus der zweiteiligen Erde von 1907 war also zwei Jahre später bereits eine drei- bzw. vierteilige Erde geworden. Was ist nun richtig? Die Anwendung der Wiechert'schen Theorien auf bergmännisch-geologisch bekannte Gebirgsschichten liefert der reinen Wissenschaft die Möglichkeit der Nachprüfung dieser Theorien, wie aus den zahlreichen nach dem Bekanntwerden der Mintrop'schen Arbeiten erschienenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen hervorgeht. Es ist nicht zuviel gesagt, daß diese Arbeiten eine Neubelebung der gesamten Erdbebenforschung zur Folge gehabt haben. Das Mintrop-Verfahren hat neben dem technisch-wirtschaftlichen Fortschritt auch der reinen Wissenschaft großen Nutzen gebracht, worauf die verschiedensten Autoren hinweisen.

Die wirtschaftliche Bedeutung eines Verfahrens, das keine Bohrungen benötigt, geht u. a. aus den Ausführungen von Bergassessor Baum, des Vorsitzenden des Erzausschusses des „Vereins Deutscher Eisenhüttenleute" in der Sitzung vom 15. Dezember 1921 in Düsseldorf hervor (siehe Bericht der Zeitschrift in „Stahl und Eisen"), wo es heißt: „Zu den Ausführungen von Bergrat Bartsch darf ich vielleicht noch mitteilen, daß die Erforschung des Deckgebirges allen Gesellschaften, die auf der linken Rheinseite Bergwerksbetriebe haben, bisher sehr große Kosten verursacht haben. Die Fülle der Bohrungen, die diese Gesellschaften ausführen mußten, um zu vollständig einwandfreien Schachtansatzpunkten zu kommen, hat ganz gewaltige Mittel verschlungen. Erst neuerdings haben wir eingesehen, daß z. B. unsere Gesellschaft, die für den Schachtansatzpunkt ungefähr 20 Bohrungen auf der linken Rheinseite angesetzt hat, unter Zuhilfenahme derjenigen Mittel, die uns die Herren Vortragenden soeben vorgeführt haben, nur ungefähr ein Hundertstel der Kosten aufzuwenden gehabt hätten." Baum 1921

Der Referent für geophysikalische Verfahren der Bodenuntersuchung bei der Preußischen Geologischen Landesanstalt, Bezirksgeologe Dr. H. Reich, schrieb im Jahrbuch der Landesanstalt für 1921 in dem Aufsatz: „Versuch einer Anwendung der Seismometrie auf die Geologie" über das Mintrop-Verfahren folgendes: Reich 1921

„Nicht nur für diese mehr wissenschaftlich interessierenden Fragen haben geologisch-geophysikalische Methoden hohe Bedeutung, sondern auch für die Praxis. Für so kurze Strecken, wie sie hier in Frage kommen, kann man, wie Mintrop das zeigt, durch Sprengungen künstliche Erdbeben erzeugen und an diesen seismometrische Bestimmungen vornehmen. Auch hier ist man erst am vielversprechenden Anfang. Man denke nur, welche Perspektive sich da z. B. für unsere norddeutsche Tiefebene eröffnet. Geologie und Geophysik zusammen werden auch ihr einst ihre Rätsel entreißen und uns ihre Bodenschätze erschließen."

In den Nachrichten der K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathm. phys. Klasse 1921, veröffentlichte Reich eine Arbeit: „Über die Intensität der Hauptphase eines Bebens in ihrer Beziehung zur Tektonik", die er mit den Worten schließt: „Der weitere Ausbau solcher seismometrisch-geologischen Methoden verspricht sowohl dem Geophysiker, wie dem Geologen großen Nutzen. Der Geophysiker wird dem Problem elastischer Bodenwellen unter Berücksichtigung geologischer Einzelheiten näher kommen, der Geologe wird über für ihn sonst immer verborgene, sei es vom Meere bedeckte, oder von jungen Bildungen zugeschüttete Gebiete Auskunft bekommen und auch theoretisch wichtige Begriffe wie Maße usw. rein physikalisch genau fassen können. Schließlich sind, wie Mintrop's (Mintrop's Vortrag

auf der Versammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft 1920) Versuche mit künstlichen Beben zeigen, diese Dinge auch von hohem praktischen Wert."

In der Zeitschrift „Stahl und Eisen" vom 21. April 1921 schreibt Reich über „Elastische Bodenwellen als Hilfsmittel zur Aufsuchung von Lagerstätten":

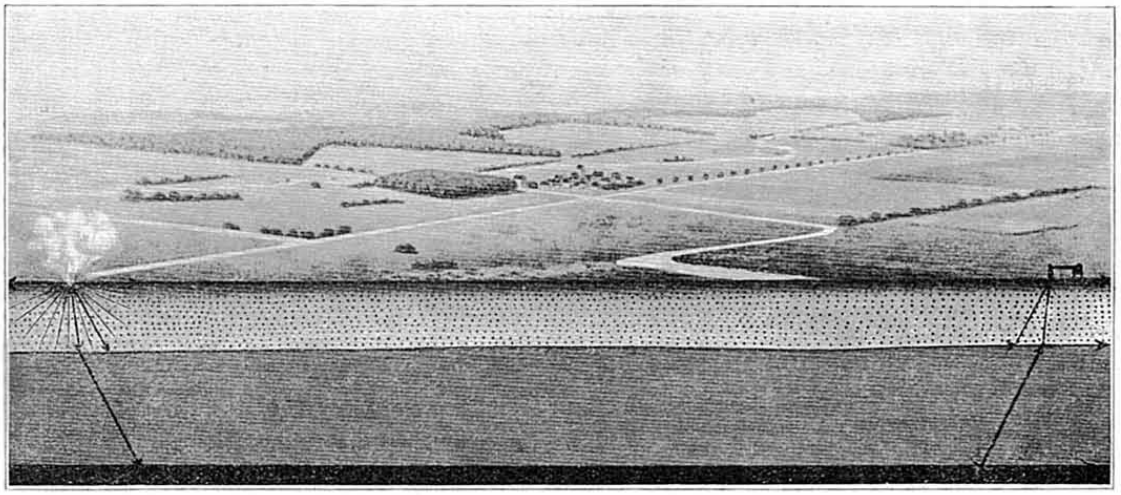
„Es ist längst bekannt, daß die Intensitätsverteilung eines Erdbebens sehr von der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes abhängt. Man hat daher mit großem Nutzen für die Geologie, besonders in Gegenden, die häufig von Erdbeben betroffen werden, Beobachtungen über den Stärkegrad, mit dem das Beben da und dort auftrat, gesammelt und verwertet. Da es sich hier nur um Schätzungen (makroseismische Verfahren) handelte, konnte die Abhängigkeit der Intensitätsverteilung von den geologischen Verhältnissen nur in großen Zügen erkannt werden. Einzelheiten, wie sie für den Bergbau wichtig sind, konnten nicht festgestellt werden. Die Möglichkeit hierzu besteht erst, seitdem die instrumentelle Aufzeichnung der Erdbeben (Seismogramm) besonders durch Wiechert's grundlegende Arbeiten und Apparatekonstruktionen in größerem Maße durchgeführt sind. Dadurch ist es ferner möglich geworden, auch in Gegenden, in denen Erdbeben nicht verspürt werden, sei es durch Beobachtungen an fernen, natürlichen oder an künstlich erzeugten Beben, derartige Messungen vorzunehmen. Dabei zeigt es sich, daß die durch ein Erdbeben hervorgerufenen elastischen Bodenwellen sehr verwickelter Natur sind, wodurch ihre Analyse sehr erschwert ist. Zunächst gelang es, die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten und damit die Winkel, unter denen die Bebenstrahlen die Erdoberfläche treffen, näher zu bestimmen. In der wissenschaftlichen Geophysik erlangte man dadurch sehr interessante Aufschlüsse über den Bau des Innern der Erde, die die Veranlassung waren, daß diesen Dingen mit großer Aufmerksamkeit weiter nachgegangen wurde. Der Einfluß der obersten Schichten der Erde, die für den Bergbau allein in Betracht kommen, wurde zwar immer wieder festgestellt, aber nicht näher untersucht.

Die bei diesen Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse zuerst auf die Praxis angewandt zu haben, ist das Verdienst Mintrop's, der über seine bisherigen Ergebnisse in einem Vortrag auf der Versammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Hannover berichtet hat (Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 1920, Monatsberichte S. 269). Die elastischen Wellen, an denen Mintrop seine Messungen vornimmt, werden künstlich durch Sprengungen hervorgerufen, ein Verfahren, das schon Milne, Mallet, Fouqué, Hecker, Wiechert und andere zu Messungen an Fortpflanzungsgeschwindigkeiten usw. in den obersten Schichten der Erde benutzt haben. Mintrop's Verfahren gründet sich in der Hauptsache auf Geschwindigkeitsmessungen und Feststellungen des Einfallswinkels der zuerst ankommenden longitudinalen Wellen. Die Anwendbarkeit des Mintrop'schen Verfahrens wird sich zunächst auf die Erforschung solcher Lagerstätten erstrecken können, die an auffallenden Gesteinswechsel gebunden sind und bei denen die Grundzüge des tektonisch-geologischen Baues bekannt und verhältnismäßig einfach sind: So z. B. wird sich, wie das bereits praktisch erprobt ist, die Ausdehnung und Tiefenlage von Salzhorsten feststellen lassen, ebenso wird man das Verfahren mit Erfolg bei der Aufsuchung und Untersuchung sedimentärer Erzlagerstätten von der Art der Lias- und Kreideerze Norddeutschlands erproben können. Auch für die Tiefenlage des alten Gebirges im Untergrund der Norddeutschen Tiefebene, die für die etwaige Neuerschließung von Steinkohlenfeldern usw. wichtig ist, wird sich das Verfahren eignen. Neben diesen Fragen allgemeiner Art werden sich aber auch solche Einzelfragen, wie sie der Bergbau täglich aufgibt, auf diese Weise lösen lassen, wenn die oben gegebenen Voraussetzungen zutreffen. Es sind nun aber in einem Seismogramm, außer den von Mintrop ausgewerteten noch eine ganze Reihe anderer nutzbarer Größen enthalten, die bei näherer Berücksichtigung unser Bild über die Beschaffenheit und Lagerverhältnisse der obersten Schichten der Erde wesentlich vervollständigen würden. Allerdings eignen sich zu deren näheren Erforschung künstliche Beben einstweilen weniger gut, bei ihnen folgen die einzelnen Wellenarten zu rasch aufeinander und die Intensität ist so gering, daß das so erschütterte Gebiet immer

nur von geringer Ausdehnung ist. Derartige Arbeiten mußten daher zunächst bei natürlichen Beben einsetzen. Dieser Aufgabe ist der Verfasser in den beiden letzten Jahren nachgegangen und dabei zu ganz bemerkenswerten Ergebnissen gelangt." Reich bespricht dann ausführliche Intensitätsmessungen an natürlichen Erdbeben und fährt fort:

„Selbstverständlich müßten die an natürlichen Erdbeben gewonnenen Ergebnisse an künstlichen nachgeprüft und weitergeführt werden. Es ist meines Erachtens kein Zweifel, daß man auf diese Weise mit der Zeit ein Verfahren herausfinden wird, das eine außerordentlich wertvolle Ergänzung für die durch Tiefbohrungen festgestellten Erkenntnisse bilden wird, besonders, wenn man an eine Kombination mit anderen physikalischen Verfahren denkt. Auf diese Weise dürfte sich die Anwendbarkeit des von Mintrop ausgearbeiteten Verfahrens noch wesentlich erweitern lassen, da man sich so auch an Lagerstätten mit geringerem Gesteinsunterschiede und verwickelten Lagerungsverhältnissen wird wagen können. Dabei wird es sich empfehlen, die Beobachtungen an natürlichen Beben nicht zu vernachlässigen, da sie uns mit einem Schlage über große Gebiete Auskunft geben können, für die sich Einzeluntersuchungen mit künstlichen Beben von selbst verbieten. So eröffnen sich für die Untersuchung von weiten Gebieten, deren tieferer Untergrund uns wegen seiner Bedeckung mit jungen Ablagerungen unbekannt ist, wie das für den größten Teil Norddeutschlands zutrifft, vielversprechende Aussichten."

Im Juli 1922, noch vor der Erteilung des Mintrop-Patentes erschienen die Mitteilungen I der Seismos-Gesellschaft „Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten." In Seismos 1922



Erregung, Ausbreitung und seismographische Aufzeichnungen von Erschütterungswellen.

dieser Veröffentlichung sind der Strahlengang für die normalen und individuellen Primae (Mohorovičić) für künstliche Erdbeben dargestellt, sowie die Ergebnisse der Anwendung des Verfahrens auf neun verschiedene Objekte unter Angabe der Örtlichkeit und der Namen der Firmen, für welche die Arbeiten ausgeführt worden sind.

Der damalige Präsident der Preußischen Geologischen Landesanstalt, Geheimrat Beyschlag, schrieb in der Berg- und Hüttenmännischen Zeitschrift „Glückauf" vom 9. September 1922 in seinem Aufsatz: „Der gegenwärtige Stand der Erforschung der deutschen Lagerstätten", Seite 1090: „Die Elastizität der Gesteine, d. h. die verschiedengradige Fähigkeit der Fortpflanzung elastischer Wellen nach Geschwindigkeit und Intensität, wie sie z. B. bei Erschütterungen durch Erdbeben erkennbar geworden sind, benutzt ebenso (d. h. wie Eötvös die Drehwaage) erfolgreich Dr. Mintrop, indem er durch Sprengungen künstlich erzeugte elastische Wellen nach Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Intensität feststellt und aus der Beyschlag 1922

graphischen Darstellung der Geschwindigkeitsunterschiede in den vorhandenen Medien Schlüsse auf die Lage von Gesteinsgrenzen und Dislokationen ableitet."

Königsberger 1922

In der Zeitschrift für praktische Geologie, 30. Jahrgang, 1922, Heft 3, schreibt Professor Königsberger in dem Aufsatz: „Die Anwendung physikalischer Verfahren in der praktischen Geologie" über die Verfahren der elastischen Wellen folgendes: „Von älteren Versuchen abgesehen, hat zuerst L. Mintrop ein praktisch brauchbares Verfahren ausgearbeitet. Er zieht aus den Zeitregistrierungen der Erschütterungswellen, die von einem Punkte an der Erdoberfläche durch Sprengung erzeugt, sich in der Erde fortpflanzen, Schlüsse auf die Beschaffenheit und die Erstreckung von Gesteinsschichten in der Tiefe. Das Verfahren beruht auf den in der Seismologie ausgearbeiteten Theorien. Die Apparate (D. R. P.) sind für die künstlichen kurzwelligen Erschütterungen entsprechend abgeändert. Über die Art des Verfahrens und über die Berechnung gibt Mintrop wenig an. Er sagt nur: daß es mit den neuesten Verfahren in kürzester Zeit gelungen ist, Salzhorste unter der Erdoberfläche in bezug auf Tiefe und Erstreckung nachzuweisen usw."

Heiland 1923

Im Jahre 1923 schrieb C. A. Heiland in seiner Hamburger Dissertation über „Das Erdgasvorkommen von Neuengamme im Lichte geologischer und geophysikalischer Forschung, ein Beitrag zur Kritik der geophysikalischen Aufschlußmethoden im Norddeutschen Flachlande": „Die mikroseismischen Untersuchungen nach dem Mintrop'schen Verfahren ergaben anscheinend das Vorhandensein eines Salzhorstes von herzynischem Streichen und höchstens 50 m Teufe, ca. 500 m südwestlich der Quelle. Die daraufhin an der bezeichneten Stelle angesetzte, sogenannte Mintrop-Bohrung ergab bis 125 m Teufe nur normale Schichtenfolge. Während des Abteufens der Bohrung kam Mintrop indes zu dem Resultat, daß das Studium der Kurven auch die Deutung zuließe, daß der Salzhorst erst in einigen 100 m Teufe anzutreffen ist. Wodurch dieser Mißerfolg bzw. die verkehrte Deutung der Seismogramme bedingt war, entzieht sich der Kenntnis des Verfassers; er hatte jedoch Gelegenheit, sich auch anderswo davon zu überzeugen, daß das Verfahren Ergebnisse liefert, die z. T. den bereits bekannten geologischen Verhältnissen direkt widersprachen. Auch findet sich in dem von der Gesellschaft Seismos herausgegebenen Prospekt beispielsweise die Angabe, daß durch das seismische Verfahren eine Verbindung der Salzhorste von Wietze und Hambühren in ca. 100 m Teufe festgestellt worden sei. Nach liebenswürdiger Mitteilung des Herrn Dr. Monke, in dessen Hand die geologische Kartierung des Gebietes lag, hat jedoch eine zwischen den beiden Horsten niedergebrachte der Seismos offenbar nicht bekannte Tiefbohrung den Beweis erbracht, daß die beiden Horste, jedenfalls in der von der Seismos festgestellten Tiefe, nicht in Verbindung stehen.[1] Andererseits verdient hervorgehoben zu werden, daß an anderen Orten, wie der Prospekt der Seismos zeigt, das Verfahren mit trefflichem Erfolge arbeitet."

„Zur Beantwortung der Frage, wo nach den Ergebnissen der geophysikalischen Aufschlußmethoden ein Hochkommen der gasführenden Schichten im Untergrunde zu erwarten ist, müssen die Ergebnisse der Radioaktivität, der mikro- und makroseismischen Untersuchungen ausgeschieden werden, weil sie keine brauchbaren Ergebnisse lieferten." In der allgemeinen Beurteilung des seismischen Verfahrens schreibt Heiland:

„Die Unterscheidung zwischen Oberflächen- und Tiefenwellen verliert ihren Sinn in Anbetracht der wechselvollen elastischen Eigenschaften der oberen Erdkruste. Es wird kaum möglich sein, eine so klare zeitliche Aufeinanderfolge der longitudinalen und transversalen Tiefenwellen und der transversalen Oberflächenwellen wie in einem Fernbebenseismogramm festzustellen. Jedenfalls aber werden die longitudinalen vom Erschütterungspunkt ausgehenden Wellen zuerst am Empfänger sein; mit der für diese erhaltenen Auskunftszeit wird die Laufzeitkurve konstruiert."

Im Jahre 1923 erklärte Heiland es also noch für sinnlos, zwischen Oberflächen- und

[1] (Anmerkung: Die Richtigkeit der Angabe der Verbindung der Salzhorste von Wietze und Hambühren wird heute von geologischer Seite nicht mehr bestritten).

Tiefenwellen zu unterscheiden, während Mintrop bereits vier Jahre früher auf diesem Unterschiede sein seismisches Verfahren aufgebaut und es seitdem mit steigendem Erfolge angewandt hat.

In Nr. 17 des „Glückauf" vom 20. April 1923 schreibt Bergassessor Dr.-Ing. H. Quiring, Geologische Landesanstalt Berlin, in einem Aufsatz über: „Die Drehwaage als Hilfsmittel bei bergmännischen Aufschlußarbeiten im Siegerlande" über das seismische Verfahren folgendes: „Mit bedeutsamem Erfolg ist das seismische Verfahren von Dr. Mintrop in geologisch einfacher gebauten Teilen Deutschlands angewandt worden. Steinkohlenflöze am Niederrhein, Braunkohlenflöze, Salzhorste und Öllagerstätten, ferner Eisenerzgebirge des Jura und der Kreide sowie tertiäre Quarzitlager hat man nach Lagerung, Ausdehnung und Mächtigkeit unter jüngerer Bedeckung erkundet. Auch ist es gelungen, über älterem Gebirge Mächtigkeit und Ablagerungsformen jüngerer, transgredierender und eingefalteter Schichten, z. B. tertiären und diluvialen Alters festzulegen. Inwieweit es jedoch glücken wird, durch seismische Messung ein altpaläozoisches, stark gefaltetes und zerklüftetes Gebirge auf die in ihm aufsetzenden Gänge und Lager zu durchforschen, wird die Weiterentwicklung des Verfahrens ergeben. Vielleicht wird dies einmal möglich sein, meines Erachtens aber erst dann, wenn die Geologie des betreffenden Gebietes so klar erkannt ist, daß sich das durch seismische Feststellungen erhaltene Bild überhaupt ausdeuten läßt." Quiring 1923

In dem Handbuch der ~~bio~~geologischen Arbeitsmethoden Abt. X, Heft 4, schreibt Professor H. Philipp in Greifswald in dem Heft: „Methoden der geologischen Aufnahmen", 1923, folgendes: Philipp 1923

„Seismische Aufnahmeverfahren (Mintrop'sches Verfahren): Das Verfahren beruht auf der physikalischen Erscheinung, daß Gesteine je nach ihrer Elastizität Erdbebenwellen mit verschiedener Geschwindigkeit durchlassen. So z. B. ist die Geschwindigkeit der elastischen Wellen im Salzgebirge ein Vielfaches von der im tertiären Sande. Zur Feststellung der Art und Tiefe eines Gesteines unter der Oberfläche wird folgendes Verfahren eingeschlagen: An dem einen Endpunkt einer zu untersuchenden Profillinie wird ein leichter Feldseismograph aufgestellt; in verschiedenen Abständen von diesem Gerät erfolgen dann in der Profillinie nacheinander an der Erdoberfläche, also ohne Bohrungen, kleine Sprengungen. Die von diesen erzeugten Erschütterungswellen durcheilen den Erdboden nach allen Richtungen und werden auch von dem Seismographen aufgezeichnet. Die zu den verschiedenen Entfernungen gehörigen Laufzeiten der Wellen von der Sprengstelle bis zum Gerät werden zu einer Laufzeitkurve zusammengestellt. Bei gleichmäßiger elastischer Beschaffenheit der Gesteine ist die Laufzeitkurve nahezu eine gerade Linie. Erfolgt indessen in einer gewissen Tiefe ein Wechsel der Gesteinsschichten, z. B. ein Übergang aus Tertiär in Kreide oder Salz, so macht sich dieser Übergang in einem Wendepunkt der Laufzeitkurve bemerkbar. Dieser Wendepunkt kommt in folgender Weise zustande: Die elastischen Wellen schreiten wie die optischen Wellen nicht auf dem geometrisch kürzesten Wege, sondern auf dem Wege der kürzesten Zeit fort. Gleichzeitig mit den z. B. aus den tertiären Schichten eintreffenden Wellen treten von einer gewissen Sprengentfernung an auch solche Wellen auf, die zunächst in die Tiefe eingefallen, einen Teil des Weges durch die dort anstehenden schneller leitenden Schichten gelaufen und dann wieder an die Oberfläche gelangt sind. Trotz des Umweges, den sie gemacht haben, kommen sie doch gleichzeitig mit den Oberflächenwellen an, weil sie bei dem schnelleren Lauf durch das feste Gestein Zeit gewonnen haben. Von dem Wendepunkt an treten mit weiter zunehmender Entfernung die Tiefenwellen zuerst auf, erst später folgen die Oberflächenwellen. Aus der Gestalt der Laufzeitkurven lassen sich die Geschwindigkeiten der Oberflächen- und Tiefenwellen entnehmen und ferner die Tiefen berechnen, in welchen der Übergang von einer zur anderen Schicht erfolgt. Eine eingehend begründete Theorie dieses auf die Erde als Ganzes angewendeten Verfahrens befindet sich in der Arbeit von Wiechert und Zoeppritz „Über Erdbebenwellen", Nachr. d. Ges. d. Wiss. Mathm.-phys. Klasse, 1907. (Nach freundlicher Mitteilung des Herrn Dr. L. Mintrop, Direktor der Seismos, G. m. b. H.,

zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten, Hannover. Vergleiche außerdem R. Ambronn, Jahrbuch des Halle'schen Verbandes für die Erforschung der mitteldeutschen Bodenschätze usw., Band III, Seite 39—41. Während des Druckes ist eine mit guten Abbildungen versehene eingehendere Darstellung unter dem Titel: „Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten nach dem seismischen Verfahren im Selbstverlage der Seismos-Gesellschaft, Hannover, 1922, erschienen.)

Petraschek 1923

In der Zeitschrift des Internationalen Vereins der Bohringenieure und Bohrtechniker vom 15. Dezember 1923 schreibt Professor Dr. W. Petraschek, Leoben, über „Erfahrungen mit physikalischen Schürfmethoden": „Seismische Untersuchungen nach der Methode Mintrop zeitigten im Fohnsdorfer Revier plausible Ergebnisse, im Mürztale fehlten sie nicht sehr weit, bei Leoben versagten sie dagegen vollständig. Es scheint, daß die Elastizität der Gesteine nicht immer zutreffend eingeschätzt wurde."

Sieberg 1923

Der durch die Mintrop'schen Arbeiten erzielte Fortschritt in der theoretischen Erkenntnis über die Art der Ausbreitung der Erdbebenwellen und in der technischen Anwendung dieser Erkenntnisse spiegelt sich in auffallender Weise in den Büchern von A. Sieberg wieder. Während Sieberg, wie oben bereits ausgeführt, in den Jahren 1904 und 1917 das seismische Verfahren noch gar nicht kannte, hielt er im Jahre 1923, als das Mintrop-Verfahren sich in der Wirtschaft noch durchsetzen mußte und auch weite Kreise der Wissenschaftler ihm sehr skeptisch gegenüberstanden, mit seinem Urteil noch sehr zurück. In dem 1923 erschienenen 500 Seiten starken Buche „Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde", ist über das seismische Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbbaren Lagerstätten noch nichts enthalten, außer den beiden Sätzen: „Erst die seismometrische Arbeitsmethode führte mit der Zeit zu befriedigenden Ergebnissen und diese sind nicht allein der Epizentralberechnung zugute gekommen, sondern ermöglichen vor allem auch den inneren Aufbau unseres Erdkörpers klarzustellen. Hand in Hand damit gehen Bestrebungen, auf seismometrischem Wege Fragen zu lösen, die für den Bergbau von Bedeutung sind." Dagegen enthält die weiter unten zu besprechende Auflage des Sieberg'schen Buches von 1927 über die seismische Bodenerforschung ein ganzes Kapitel.

Gutenberg 1923

Benno Gutenberg, der Mitarbeiter Sieberg's an dem im Jahre 1923 erschienenen Buche, beschränkt sich in dem Kapitel „Die Oberflächenwellen bei Nahbeben" auf die beiden Sätze: „Auch künstliche Erschütterungen (Sprengungen) wurden zur Bestimmung von V_m benutzt, die Ergebnisse jedoch meistens geheimgehalten (Mintrop). Ältere Beobachtungen liegen von Hecker und E. Wiechert vor, die in dem Sande der Schießplätze von Kummersdorf $V_m = 238$ m pro Sekunde bzw. von Meppen $V_m = 240$ m pro Sekunde fanden." Dagegen wird in dem im Jahre 1926 erschienenen Lehrbuch der Geophysik von Gutenberg der Verwendung von elastischen Wellen zur Erforschung der obersten Erdschichten ein besonderes Kapitel von 30 Seiten gewidmet.

Wiechert 1923

Wiechert war der erste, welcher die große Bedeutung des Mintrop-Verfahrens für die Wissenschaft erkannte. Er hatte bereits im Jahre 1921 (siehe Seite 58) auf den Wert des Verfahrens hingewiesen und zwei Jahre später erschien die erste wissenschaftliche Veröffentlichung über „Untersuchungen der Erdrinde mit dem Seismometer unter Benutzung künstlicher Erdbeben". (Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen.)

Wiechert 1924/25

Eine zweite Veröffentlichung von Wiechert erfolgte in Band I der Zeitschrift für Geophysik, Jahrgang 1924/25, Heft 1/2, in der u. a. auf die besonderen Schwierigkeiten hingewiesen wird, die von Mintrop bei der Entwicklung seines Verfahrens zu überwinden waren. Wiechert schreibt: „Während es der Seismik gelungen ist, über die Beschaffenheit des tieferen Erdinnern weitgehende Aufschlüsse zu bringen, steht es ungünstiger um die seismische Erforschung der Erdrinde. Hierbei ist es nötig, Nahbeben zu beobachten. Verwendet man natürliche Erdbeben, so hat man mit allen den Schwierigkeiten zu kämpfen, welche durch die Unbestimmtheit des Herdes und der Herdzeit gegeben werden. Die künstlichen Erschütterungen

bei Explosionen bieten in mancher Hinsicht günstige Verhältnisse, aber auch die größten Explosionen sind gegenüber den natürlichen Erdbeben so geringfügige Ergebnisse, daß die gebräuchlichen Erdbebenapparate meistens im Stich lassen. Nach alledem kann es nicht wundernehmen, daß die Seismik bisher wenig Zuverlässiges über die Schichtung der Erdrinde ausgesagt hat, und doch handelt es sich hier um ein Problem, welches für die Physik der Erde von großer Wichtigkeit ist. Dies bedenkend, legte ich mir 1905 die Frage vor, ob es möglich wäre, unter Benutzung künstlicher Erdbeben Fortschritte zu erzielen, wenn ungewöhnlich hochempfindliche Instrumente verwendet werden. Ich baute ein Horizontalseismometer mit 50 000facher Vergrößerung und wandte es 1906 dazu an, auf dem Schießplatz Meppen Erderschütterungen infolge von Kanonenschüssen in ungefähr 16 km Entfernung noch zu erkennen, aber sie lagen bei dieser Entfernung schon an der Grenze des Beobachtbaren, trotzdem die Verhältnisse ganz ungewöhnlich günstig waren: Der wasserdurchtränkte Sanduntergrund bei Meppen leitet die Erderschütterungen viel leichter in die Ferne als Felsboden. Der Apparat wurde in der Folge von Herrn L. Mintrop für die Untersuchungen von Erderschütterungen durch Maschinen, durch Fall von Gewichten usw. ausgenutzt, führte aber nicht dazu, nennenswerte Aufschlüsse über geologische Tiefen der Erdrinde zu gewinnen. Später hat dann Herr Mintrop für den Feldgebrauch geeignete, leicht transportable Vertikalseismometer gebaut, und es ist ihm gelungen, durch Verwertung von Sprengungen diese Apparate zur Untersuchung der Erdschichten bis in etwa 1 km Tiefe praktisch zu verwerten. Der Erfolg für bergmännische Ziele ist schon heute sehr hoch zu schätzen, es handelt sich hier um eine Anwendung der Seismik von großer Tragweite. Durch die Mintrop'schen Erfolge wurde ich meinerseits angeregt, meine früheren Arbeiten wieder aufzunehmen. Ich war mir nun klar, daß mein Ziel, die seismische Untersuchung der für die Geologie in Betracht kommenden Tiefen der Erdrinde, nur erreicht werden kann, wenn die Empfindlichkeit der Apparate bis zu der äußerst möglichen Grenze gesteigert wird."

Hubert 1924/25

In Heft 4 des 1. Jahrganges 1924/25 der „Zeitschrift für Geophysik" veröffentlicht F. Hubert ‹Assistent am Geophysikalischen Institut der Universität Göttingen› eine Abhandlung: „Die Registrierung der durch fallende Gewichte erzeugten Bodenschwingungen mit einem zweimillionenfach vergrößernden Wiechert'schen Vertikalseismometer", deren Einleitung für die Geschichte des Mintrop-Verfahrens von Interesse ist. In der Abhandlung heißt es: „In den Jahren 1921/22 ist im Göttinger Geophysikalischen Institut von Herrn Geheimrat Wiechert mit Mitteln der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft ein zweimillionenfach vergrößerndes Vertikalseismometer konstruiert worden zur Registrierung schneller Bodenschwingungen. Ich übernahm es, mit diesem Seismometer die Bodenerschütterungen zu untersuchen, die durch freifallende Gewichte hervorgerufen werden. Über die dabei gewonnenen Ergebnisse soll in folgendem berichtet werden. Zwei Berichte über das Seismometer und einige Versuche sind schon veröffentlicht worden ‹E. Wiechert›: „Untersuchungen der Erdrinde mit dem Seismometer unter Berücksichtigung künstlicher Erdbeben" ‹Nachr. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Mathm.-phys. Kl. 1923›. Derselbe: „Beobachtungen an Lufterschütterungen in Göttingen, bei Sprengungen in Jüterbog ‹Seismische Untersuchungen, Erste Mitteilung›, Zeitschrift für Geophysik 1924/25. Die Versuche bestanden in der Registrierung der Bodenerschütterungen, hervorgerufen durch Sprengungen in einem 17 km entfernten Basaltsteinbruch und in der Registrierung von Schallwellen einer Sprengung in Jüterbog."

Ähnliche Versuche mit einem fünfzigtausendfach vergrößernden Horizontalseismometer hat Herr Geheimrat Wiechert schon 1906 auf dem Artillerieschießplatz bei Meppen zur Untersuchung von Bodenerschütterungen durch Schiffsgeschütze angestellt. ‹Derselbe: Über Erdbebenwellen I, S. 53, Nachr. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Mathm.-phys. Klasse, 1907›. Mit demselben Seismometer untersuchte L. Mintrop in einer Doktordissertation ‹L. Mintrop: Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen› die Bodenschwingungen, die von den Großgasmaschinen des Göttinger Elektrizitätswerkes

erzeugt werden. Dort befindet sich auch das Diagramm eines künstlichen Erdbebens, hervorgerufen durch den Fall einer 4000 kg schweren Stahlkugel aus 14 m Höhe. Über weitere Fallversuche derselben Art, in verschiedenen Entfernungen registriert, über Bodenunruhe, hervorgerufen durch Wagen, Eisenbahnen und den Betrieb der Großstadt, über Bodenerschütterungen durch einen Rammbären, Gesteinssprengungen u. dgl. hat Mintrop auf einem Kongreß in Düsseldorf vorgetragen. (L. Mintrop: „Über künstliche Erdbeben." Intern. Kongreß für Bergbau, Hüttenwesen, angewandte Mechanik und praktische Geologie, Düsseldorf, 1910, Berichte der Abteilung für praktische Geologie.) Ähnliche Versuche sind auch in dem Bericht Mintrop's über die Erdbebenstation in Bochum erwähnt. (Derselbe: Die Erdbebenstation der Westfälischen Berggewerkschaftskasse in Bochum. „Glückauf", Berg- und Hüttenmännische Zeitschrift, 45. Jahrg., Essen-Ruhr, 1909.) Später hat Mintrop ein Vertikalseismometer, als Gegenstück zu diesem Wiechert'schen Horizontalseismometer, und zwei Horizontalseismometer so zusammengestellt, daß die Registrierung der drei Komponenten auf einem Filme erfolgen kann. Abbildungen dieser Instrumente und der erzielten Registrierungen finden sich außer in den zitierten Abhandlungen noch in Galitzin „Vorlesungen über Seismometrie", S. 205 ff. Mintrop hat dann leicht transportable Vertikalseismometer konstruiert, die von der von Mintrop geleiteten Firma „Seismos", Hannover, für Zwecke der praktischen Geologie des Bergbaues erfolgreich verwendet werden (Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten nach dem seismischen Verfahren. Mitteilungen der Seismos-Gesellschaft, Hannover, 1922. Selbstverlag der Seismos). Lichtschreiber für die photographische Registrierung nach Mintrop waren von der Firma Seismos, Hannover, dem Institut zur Verfügung gestellt worden."

Deubel 1924

In den Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der Universität Greifswald, Band V, 1924, schreibt Dr. F. Deubel in seinem Aufsatz über „Neue Methoden der Erduntersuchung und ihre Bedeutung für die Provinz Pommern" auf Seite 17 folgendes:

„Für norddeutsche Verhältnisse ist das seismische Verfahren von Dr. Mintrop, für die Anwendung in der Praxis neuerdings durchgearbeitet worden, von erheblich größerer Bedeutung (als die elektrischen Verfahren). Es gründet sich auf die Ergebnisse der modernen Erdbebenforschung, nur sind die natürlichen Erdbebenwellen dabei durch künstliche Erschütterungswellen ersetzt, welche mit Hilfe von Sprengungen oder durch Fallwerke hervorgerufen werden. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Erschütterungswellen ist in außerordentlich hohem Maße von der Beschaffenheit des Untergrundes abhängig. Sie beträgt in lockeren Massen (Schotter usw.) einige Hundert Meter, kann in harten und dichten Gesteinen (Eruptivgesteinen) jedoch viele Kilometer erreichen. Die Registrierung erfolgt durch eigens für diese Zwecke konstruierte Apparate, insbesondere den Mintrop'schen Feldseismographen."

Reich 1924/25

Auf die Schwierigkeiten, welche einer erfolgreichen Anwendung des seismischen Verfahrens entgegenstehen, schreibt Dr. H. Reich in der Zeitschrift für Geophysik, Heft 3, 1924/25, Seite 121, in einem Bericht über seinen Vortrag über „Instrumentelle Seismik und Geologie" folgendes: „Ein Ziel der instrumentellen Seismik muß es sein, die besonders von A. Sieberg immer wieder aufgezeigten Zusammenhänge zwischen Geologie und Seismik klarzulegen und die Ergebnisse auf die obersten Schichten der Erde anzuwenden. Das Seismos-Verfahren des Dr. Mintrop stellt bereits eine mit viel Erfolg in der Praxis durchgeführte Anwendung seismometrischer Beobachtungen auf geologische Probleme dar. Das Verfahren benutzt in der Hauptsache Laufzeitkurven künstlich erzeugter elastischer Wellen. Es ist bei dem komplizierten Aufbau der obersten Teile der Erdrinde nicht wie im Erdinnern nur mit Unstetigkeitsflächen parallel zur Erdoberfläche zu rechnen, sondern mit Verwerfungen, Schichtflächen, Überschiebungen und ähnlichen Flächen, die gegenüber der Erdoberfläche die verschiedensten Neigungen haben können. Lagerungen parallel und senkrecht zur Oberfläche sind nur als Grenzfälle aufzufassen, zwischen denen alle Übergänge möglich sind. Daraus ergibt sich eine große Mannigfaltigkeit in der Gestalt der Laufzeitkurven, die sich aber doch durch bestimmte

Versuchsanordnung eindeutig auswerten lassen. Hauptanwendungsgebiete solcher Untersuchungen sind die Ermittlung der Tiefenlage bestimmter Schichten, die Festlegung von Verwerfungen und die Bestimmung von Mulden und Achsenlinien im gefalteten Gebirge, wobei immer genügend große Unterschiede im elastischen Verhalten der verschiedenen Gebirgsschichten die Voraussetzung bilden."

Heiland 1925

In einer ausführlichen Veröffentlichung über „Instrumente und Methoden zur Ermittlung nutzbarer Lagerstätten" in der Zeitschrift für Instrumentenkunde, 1925, Seite 427 ff., schreibt Heiland, der im Jahre 1923 das seismische Verfahren noch so skeptisch beurteilt hatte ‹siehe Seite 62›:

„Indem wir nun zu der zweiten großen Gruppe geophysikalischer Untersuchungsmethoden übergehen, die das Verhalten der Lagerstätten bei künstlich erzeugten Kraftfeldern zum Gegenstand haben, wären zunächst diejenigen Messungen zu behandeln, welche die Beobachtung elastischer Wellen verwenden. Hierbei können entweder akustische Wellen zur Anwendung kommen, wie der Amerikaner Fessenden vorgeschlagen hat, oder seismische, wie von Mintrop angegeben. Mehr an die in der Seismologie übliche Arbeitsweise lehnt sich das Mintrop'sche Verfahren an, dessen Anwendung aber nicht wie die Fessenden'sche Methode von dem Niederbringen von Bohrungen im Untersuchungsgebiet abhängig ist. Die Mintrop'sche Methode arbeitet mit großer Schnelligkeit und hat ein sehr umfassendes Anwendungsgebiet; fast alle in der praktischen Geologie vorkommenden Fälle lassen sich mit ihr ermitteln."

Ritter 1925

In den während der Kölner Herbstmesse 1925 erschienenen wissenschaftlichen Vorträgen, im Verlag des Messeamtes Köln, schreibt Oberregierungsrat Dr. Ritter von der Chemisch-Technischen Reichsanstalt in seinem Aufsatz: „Messungen bei Explosionen mit Nutzanwendung auf den Bergbau": „Aus den Seismogrammen kann man nach Wiechert's Theorien der Erdbebenwellen die Tiefe der Grenzschichten und physikalischen Konstanten der durchdrungenen Schichten angeben. Das Verfahren ist zuerst von Dr. Mintrop praktisch benutzt worden, um von der Erdoberfläche aus Tiefe, Art und Mächtigkeit sowie Streichen und Fallen von Gebirgsschichten und Lagerstätten festzustellen. Es hat sich als ein wertvolles Hilfsmittel der praktischen Geologie und des Bergbaues bewährt, das schnell und billig Auskunft über Lagerungsverhältnisse geben kann und geologische Projektionen wirksam unterstützt. E. Wiechert wendet das Verfahren zur wissenschaftlichen Untersuchung der Erdrinde an und hat hierzu ein Vertikalseismometer von $1^1/_2$ millionenfacher Vergrößerung konstruiert."

Wiechert 1926

In der Geologischen Rundschau, Heft 5, Band XVII, Jahrgang 1926, spricht Wiechert in dem Aufsatz ‹Wiedergabe eines Vortrages auf der Naturforscher-Versammlung in Düsseldorf, September 1926›: „Untersuchung der Erdrinde mit Hilfe von Sprengungen" die Priorität des seismischen Verfahrens zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten Mintrop zu und hebt die großen Schwierigkeiten hervor, welche bei der Anwendung des Verfahrens zu überwinden sind. Wiechert schreibt: „Es ist der Seismik gelungen, über die Beschaffenheit des tieferen Erdinnern weitgehende Aufschlüsse zu gewinnen; sie hat uns die Erde durchsichtig gemacht. Man könnte nun denken, daß durch die gleichen Methoden die Beschaffenheit der Erdrinde, über die unsere Füße gehen, besonders leicht klarzustellen wäre. Aber das ist merkwürdigerweise nicht der Fall. Zwei Schwierigkeiten stellen sich hier in den Weg. Erstens ist die Erdrinde viel komplizierter gebaut als das tiefe Innere. Beim Erdkörper boten sich der Seismik im wesentlichen zwei Trennungsflächen, eine in etwa 1200 km, die andere etwa in 2900 km Tiefe, welche in regelmäßiger Anordnung die Erde in drei Teile teilen: Steinmantel, Zwischenschicht und Metallkern. Ungleich komplizierter ist die äußere Erdrinde beschaffen, welche den Erdkörper wie eine verhältnismäßig dünne Haut von 100 oder 200 km Dicke umgibt. Land und Meer, Gebirge und Flachland deuten schon äußerlich eindringlich auf die Ungleichförmigkeit der Beschaffenheit hin; die geologischen und geophysikalischen Aufschlüsse vertiefen dieses Urteil.

Der zweite Umstand, welcher der Seismik bei der Erdrinde Schwierigkeiten bereitet, besteht darin, daß die natürlichen Erdbeben verhältnismäßig sehr selten auftreten. So ist es in gleicher Weise unmöglich, genügend viele Erdbebenstationen zu unterhalten und genügend viele Erdbeben zu finden, um die Einzelheiten der Beschaffenheit der Erdrinde klarzustellen. — Schon im Anfang meiner seismischen Arbeiten wurde ich mir dieser Schwierigkeiten bewußt. Ich baute darum 1906 ein 50000fach vergrößerndes Seismometer; aber eine Anwendung bei Beobachtung von Kanonenschüssen auf dem Schießplatz Meppen und auf der Insel Helgoland enttäuschte mich sehr, denn ich mußte erkennen, daß es bei den mir zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln für die Untersuchung der Erdrinde nicht ausreichend war. Später hatte einer meiner Schüler, L. Mintrop, der von Bergbaukreisen zu mir kam und seine Doktorarbeit unter Benutzung der hochempfindlichen Apparate machte, den glücklichen Gedanken, die seismischen Methoden könnten bei passender Einrichtung und Anordnung gestatten, die hochgelegenen Schichten der Erdrinde zu untersuchen, welche für den praktischen Bergbau in Betracht kommen. Es ist bekannt, daß Dr. Mintrop große Erfolge erzielt hat. Insbesondere ist es gelungen, die Ausdehnung und Tiefenlage der Salzkörper festzustellen, an welche vielfach das Ölvorkommen gebunden ist. Die Mintrop'schen Erfolge und eigene Überlegungen gaben mir Anlaß, meinerseits auf die Frage der „kleinen Seismik" oder der „experimentellen Seismik", wie man sie nennen könnte, wieder zurückzukommen. Ich wußte nun, daß es nötig sein würde, den Apparaten viel größere Empfindlichkeit zu geben, als ich früher gedacht hatte. Aber dieses schreckte mich nach inzwischen gewonnenen Erfahrungen nicht mehr. Die wundervollen Erfolge, welche durch das Zusammenarbeiten von Geophysik und Geologie gewonnen worden waren, wobei insbesondere die Schwerkraft Führer war, gaben mir neuen Anreiz. Zu den wissenschaftlichen Überlegungen trat der Gedanke, daß die Arbeiten wertvoll für wirtschaftliche Fragen werden könnten. Zwar mußte ich damit rechnen, daß langwierige und kostspielige Arbeiten nötig sein würden, aber hier fand ich in schöner Weise die Hilfe der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft mit ihrem Führer, Staatsminister Dr. F. Schmidt-Ott."

Nach längeren, sehr bemerkenswerten Ausführungen über die Schwierigkeiten der Aufstellung und Deutung einer Laufzeitkurve schreibt Wiechert: „Es erscheint ein erstrebenswertes und wohl erreichbares Ziel der experimentellen Seismik, jede Zacke, jede Welle der Seismogramme zu erklären und für die Entwirrung der Beschaffenheit der Erdrinde dienstbar zu machen." Wiechert schloß seinen Vortrag mit folgenden Worten: „Hochverehrte Anwesende, ich habe es schmerzlich empfunden, daß ich heute noch so wenig bringen konnte. Immer wieder mußte ich die Geringfügigkeit des Beobachtungsmaterials anerkennen, mußte naheliegende Fragen unbeantwortet lassen. Ich bitte zu bedenken, daß wir bei aller Mühe, die wir aufwandten, doch nur im Anfang der Arbeit stehen. Immer noch kämpfen wir um die passende Ausgestaltung der Apparate und Methoden. Was nötig ist, lernen wir Schritt für Schritt erst durch die Arbeit selbst! Bedenken Sie, wieviel Menschenarbeit eine einzige Bohrung von 1 oder gar 2 km Tiefe verlangt; bedenken Sie, welch einer außerordentlichen Fülle von Einzelheiten die Geologie ihr stolzes Gebäude verdankt! Meine Aufgabe für heute muß ich als erfüllt ansehen, wenn meine Zuhörer erkennen, daß es sich hier um eine aussichtsreiche Methode der Forschung handelt. Im Geiste aber sehe ich die seismische Vermessungsarbeit sich zu einem Hilfsmittel ausgestalten, welches Geologie und Geophysik zu neuen großen Erfolgen führt. Wir Anfänger müssen uns damit begnügen, mühsam und doch hoffnungsfroh die vorbereitende Arbeit zu tun."

Kühn 1926

Im Jahrgang 1926 der Zeitschrift für Geophysik, Heft 8, veröffentlichte B. Kühn, Abteilungsdirektor bei der Preußischen Geologischen Landesanstalt, eine längere Abhandlung über „Die Bedeutung der geophysikalischen Methoden für Geologie und Bergwirtschaft", in der u. a. geschrieben wird:

„Nun vermögen aber andererseits auch die geophysikalischen Verfahren den Anwendungsbereich der geologischen Methoden zu überschreiten, und wir werden ihre Indikationen wahrlich

nicht geringer bewerten, weil wir sie — ~~theoretisch~~ drastisch ausgedrückt — nicht mehr mit dem Hammer in der Hand nachprüfen können, kommen wir doch selbst in unmittelbarer geologischer Beobachtung in hohem Maße zugänglichen und zudem durch Bohrungen aufgeschlossenen Gebiete, wie der darüber herrschende Meinungsstreit lehrt, mit unserer Auffassung ihres Baues nicht immer über ein gewisses Maß von Wahrscheinlichkeit hinaus. Am meisten dürfte das seinem Wesen nach unter den geophysikalischen eine Sonder- — man kann sogar sagen — Vorzugsstellung einnehmende seismische Verfahren, das durch Geschwindigkeitsmessung der fortschreitenden elastischen Wellenbewegung auch zu Tiefenangaben befähigt ist, berufen sein, uns einigermaßen sichere Kunde über Teufen zu geben, in die kein Bohrgestänge dringt. So erscheint es beispielsweise aussichtsvoll, auf diesem Wege nach und nach zu einem zusammenhängenden Bilde von der Tiefenlage der in einzelnen Schollen bis zur Tagesoberfläche aufragenden kristallinen Grundgebirges bzw. des mehr oder minder metamorphischen Altpaläozoikums in den vom mesozoischen Flözgebirge bedeckten Gebieten Deutschlands zu gelangen, was für unsere Erkenntnis der die Gebirgsbildung beherrschenden Gesetze von höchster Bedeutung sein müßte. Doch treten wir damit bereits in das Gebiet der theoretischen Geologie ein, deren engere Beziehungen zur Geophysik über den dieser Betrachtung gesteckten Rahmen hinausgehen."

„Wenn in den vorstehenden Ausführungen über die der Anwendung geophysikalischer Methoden auf Aufgaben der Geologie ~~unvorhergesehene~~ innewohnende Schwierigkeiten hervorgehoben und die Schranken ihrer Leistungsfähigkeit betont worden sind, so liegt darin keine Herabsetzung ihres Wertes. Es bleibt ihnen ein weites und dankbares Feld der Betätigung. Eine Fülle von Aufgaben sind es, zu deren Lösung sie der zur kritischen Beurteilung ihrer Tragweite und ihrer Ergebnisse befähigte Geologe heranziehen kann. Wenn die reine Geophysik der theoretischen Geologie schon bisher eine feste Grundlage für die Erkenntnis der die Bildung und Umgestaltung der Erdrinde beherrschenden Gesetze gewährt hat, so mag ein späterer Geschichtsschreiber der Geologie einen charakteristischen Zug für ihre gegenwärtige Phase wohl auch darin erblicken, daß nunmehr eine angewandte Geophysik zur Helferin der aufnehmenden und praktischen Geologie wird, zu dessen bisherigem Rüstzeug noch Drehwaage und magnetisches Variometer, Erschütterungsmesser und elektrische Apparate aller Art treten."

Dr. H. Reich schrieb anläßlich der Hauptversammlung der Gesellschaft Deutscher Metall- Reich 1926
hütten- und Bergleute in Heidelberg im Juniheft 1926 der Zeitschrift „Metall und Erz" in seiner Veröffentlichung „Der gegenwärtige Stand und die Entwicklungsaussichten der geophysikalischen Untergrundforschung", die auch seinem Vortrage zugrunde lag, über das Mintrop-Verfahren folgendes: „Die letzte von den wichtigeren großen Gruppen der geophysikalischen Verfahren ist das seismische Verfahren, über das wir durch Herrn Professor Weigelt Näheres hören werden. Dieses Verfahren hat sich im Erzbergbau bisher wohl am wenigsten betätigt. Leider ist gerade über Ergebnisse auf diesem Gebiete nur sehr wenig bekannt, weil die Firma Seismos, die sich bisher fast ausschließlich damit befaßte, außerordentlich zurückhaltend ist. Es kann aber nach allem, was durchgesickert ist, kaum zweifelhaft sein, daß die Versuche, Erzlagerstätten direkt festzustellen, mit dem seismischen Verfahren bisher nicht geglückt sind, oder jedenfalls nicht so geglückt sind, daß die zweite Forderung, die anfangs aufgestellt wurde, nämlich, daß Lagerstätten damit festgelegt werden könnten, erfüllt wäre. Dagegen hat das Verfahren bei Deckgebirgsfragen immer gut abgeschnitten und ist in dieser Richtung unübertroffen. In der schon oft erwähnten schwedischen Publikation ‹K. Sundberg, H. Lundberg und J. Eklund, Electrical Prospecting in Schweden. Sver. Geol. Unders. Ser. C. Nr. 327, Årsbok 17, Nr. 8, Stockholm, 1925› wird berichtet, daß es gelang, nach diesem Verfahren die Dicke des Diluviums über dem Grundgebirge bis auf ungefähr 1 m genau festzustellen, wie Sundberg übrigens auch erwähnt, wurden die Arbeiten im Januar und Februar 1923 durch die Seismos bzw. Dr. Mintrop persönlich durchgeführt ‹bei 1—2 m Schneehöhe und Temperaturen von 30—40° Celsius unter Null›. Ähnlich günstige

Urteile hört man aus dem Limburger und Aachener Steinkohlengebiet. Experimentelle und theoretische Arbeiten auf diesem Gebiete sind indes in der letzten Zeit eine ganze Reihe ausgeführt und veröffentlicht worden. Ich nenne unter Wiechert's Schülern besonders F. Hubert, J. Brand und Krumbach. Sonst hat sich noch F. Ritter eingehend mit diesen Dingen beschäftigt. Das bisher allein angewandte Mintrop-Verfahren benutzt bekanntlich die Geschwindigkeit elastischer Wellen zu seinen Feststellungen. Dieselbe ist abhängig von der Dichte und den Elastizitätskonstanten eines Gesteins. Ändern sich diese an einer möglichst ebenen Fläche (Schichtgrenze, Transgressionsgrenze, Verwerfung, Überschiebung usw.) sehr erheblich, so ist es möglich, diese Unstetigkeitsflächen festzulegen, Bedingung ist aber, daß die elastischen Wellen wenigstens einen nicht zu kleinen Bruchteil ihrer ganzen Laufbahn in jedem der untereinander verschiedenen Medien zurücklegen und die Geschwindigkeit mit der Tiefe zunimmt, was i. a. der Fall ist. Bei mehr oder weniger seigeren Erzlagerstätten wird dieser Weg relativ zu den Messungen an der Erdoberfläche meist zu kurz sein. Außerdem können Elastizitäts-Konstanten und Dichte sich gerade so ändern, daß beide gleichermaßen zunehmen. Dann bleibt die Geschwindigkeit der elastischen Wellen trotz der Strukturänderung gleich.

Hier scheint ein anderer Weg gangbar. Bei jeder Brechung oder Reflexion, welche die elastischen Wellen an der Grenze zweier verschiedener Medien erleiden, tritt ein Energieverlust ein, der unter anderem daher rührt, daß z. B. eine longitudinale Welle bei der Brechung und Reflexion in je einen longitudinalen und transversalen Anteil mit verschiedener Geschwindigkeit zerlegt wird. Es müssen also auch Intensitätsbeobachtungen die Lage von Unstetigkeitsflächen zu erkennen erlauben. Es ist das eine in der Erdbebenforschung schon lange bekannte und auch angewandte Tatsache. Daß diese auch praktisch Wert haben kann, hat Reich vor Jahren in einem kleinen Aufsatz in „Stahl und Eisen", 1921, bemerkt. „Neuerdings soll diese Methode nun wirklich durch eine neugegründete Firma (Prospektion, Göttingen) in die Praxis umgesetzt worden sein." Leider stehen keinerlei Unterlagen über die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Verfügung, so daß ich nicht sagen kann, wie weit diese Bemühungen von Erfolg gekrönt gewesen sind. Theorie und Praxis haben oft einen weiten Weg zurückgelegt, bis sie zusammenkommen. Immerhin möchte ich aber darauf hinweisen, daß das seismische Verfahren in dieser Form zum mindesten Aussicht hat, auch im Erzbergbau etwas zu erreichen. Unter Tage ist dieses Verfahren jederzeit ohne Schwierigkeiten durchführbar, so daß es auch in dieser Richtung aussichtsvoll erscheint. Da die Untersuchungen über elastische Konstanten von Gesteinen und Erzen bisher nur in sehr bescheidenem Umfange der Öffentlichkeit bekannt sind, kann man im übrigen sich kaum ein Bild über die Möglichkeit dieser Methoden bilden und wird die Ergebnisse abwarten müssen."

Der allgemeine Eindruck aus vorstehenden Ausführungen Reich's ist wohl unverkennbar der, daß es sich bei dem seismischen Verfahren um ein neues Gebiet in der Gebirgsschichten- und Lagerstättenforschung handelt, das durch Mintrop geöffnet worden ist.

Ambronn 1926

In seinem im Jahre 1926 erschienenen Buche „Methoden der angewandten Geophysik", Band XV der Wissenschaftlichen Forschungsberichte, beschreibt Ambronn in dem Kapitel „Die Untersuchung des Aufbaues des Untergrundes mittels elastischer (seismischer) Wellen" das Laufzeitkurven-Verfahren richtig, allerdings ohne zu erwähnen, daß seine Darstellung in der Halle'schen Veröffentlichung von 1921 (siehe Seite 52) falsch waren. Insbesondere hat Ambronn im Jahre 1926 erkannt, daß aus der Laufzeitkurve die Geschwindigkeiten in den Tiefenschichten entnommen werden können, während er 1921 noch der Meinung war, daß die Laufzeitkurve einen Mittelwert zwischen Oberflächen- und Tiefengeschwindigkeiten ergibt. Über die Vorgeschichte des Verfahrens schreibt Ambronn auf Seite 181 ff.: „Durch Explosionen künstlich erregte Erdbebenwellen wurden zunächst von Mallet benutzt, um die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elastischen Wellen in den verschiedenen Gesteins- und Bodenarten zu messen. Abbot arbeitete in gleicher Richtung mit sehr großen Sprengladungen,

Milne brachte die Erschütterungen auch durch fallende Gewichte hervor; auch Fouqué, Lévy und Noqués haben umfangreiche Untersuchungen dieser Art ausgeführt. Die Ergebnisse dieser älteren Arbeiten sind aber recht vieldeutig, oft scheint nicht genügend zwischen den longitudinalen Vorläuferwellen und später folgenden, meist viel kräftiger wirkenden Oberflächenwellen unterschieden zu sein. Die Empfangsmessungen werden meist mit einem Quecksilberspiegelmikroskop ausgeführt. Die Sendezeit wurde nur aus der Empfangszeit des Luftschalles zurückberechnet, was natürlich exakten Ansprüchen niemals genügen kann. Noqués benutzte auch Sprengungen unter Tage und stellte Unterschiede der Geschwindigkeiten parallel und senkrecht zu einem Erzgange fest. Er weist dann auf zahlreiche Umstände hin, welche auf die Wellengeschwindigkeiten im Untergrunde von Einfluß seien: Die Eigenart und die Zusammensetzung der Gesteine, ihr Molekularzustand, die Orientierung der Mineralmassen, die Art der Ablagerung, ihre Dichte, ihr Wassergehalt, die räumliche Lage der Wellenflächen und auch die Art der Erschütterung selbst. Sorgfältige Untersuchungen über die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch Sprengungen hervorgerufener elastischer Bodenwellen hat dann Hecker auf dem Sande des Schießplatzes von Kummersdorf durchgeführt. Als Empfangsapparate dienten Pendel von 2 kg Masse, die auf berußten Glasscheiben registrierten. Als Fortpflanzungsgeschwindigkeit der den ersten Einsatz verursachenden (longitudinalen) Wellen fand er 1430 m pro Sekunde, für die Oberflächenwellen größter Amplitude 238 m pro Sekunde. Auch die Einflüsse des geologischen Baues des Untergrundes werden beachtet. Wiechert berichtet, daß sich die Geschwindigkeit der Haupt- (Oberflächen-) Wellen im Sande des Schießplatzes Meppen zu 240 m pro Sekunde ergab. Die Messungen erfolgten mit einem 50000fach vergrößernden Erschütterungsmesser, der den Schritt eines Menschen noch in 100 m, eine Schafherde in 500 m, einen Eisenbahnzug in 10 km Entfernung feststellen ließ.

Von der theoretischen Seite aus weist dann von dem Borne auf die große Bedeutung der seismischen Untersuchungen mittels künstlicher elastischer Wellen für die geologische Erforschung der obersten Erdschichten hin, wenn er schreibt: „Wie die Beobachtungen der seismischen Erscheinungen über die mechanischen Verhältnisse der Erde, und zwar zunächst die, geologisch gesprochen, tiefliegenden Teile derselben Anhaltspunkte liefern, so werden sie uns entsprechend Aufschlüsse auch über die tektonisch wichtigeren der Oberfläche benachbarten Teile derselben geben. Vor allem wird hier das instrumentelle Studium von schwachen Nahbeben, von künstlichen Störungen und Bodenbewegungen meteorologischen Ursprungs einzugreifen haben." Auch Galitzin betont schon in seinen Vorlesungen über Seismometrie die praktische Bedeutung von Untersuchungen über die Ausbreitung künstlich erregter elastischer Wellen im Untergrunde.

Die Methode der Herdbestimmung von Erdbeben aus der Laufzeit der Erdbebenwellen suchte dann Mintrop anzuwenden, um den Ort künstlich erregter Erschütterungen, z. B. von Geschützstellungen, zu ermitteln, zu welchem Zwecke er seinen Seite 176 beschriebenen Erschütterungsmesser ausbildete. Die praktische Durchführung dieser Methode scheiterte aber daran, daß die Schüsse sehr vereinzelt fallen müssen, um die allgemeine Bodenunruhe nicht zu groß werden zu lassen, und daß der Abschuß eines modernen Geschützes mittels Rohrrücklauf einen viel geringeren Energiebetrag in den Untergrund überträgt, als der Einschlag eines Geschosses, insbesondere eines solchen mit Verzögerungszünder. Als prinzipielles Hindernis stellen sich dieser Methode aber die sehr großen Unterschiede der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elastischen Wellen in verschiedenen Böden entgegen, welche von einigen Hundert bis zu ca. 6000 m pro Sekunde wechseln. Dieser Hinderungsgrund verwandelt sich aber in einen ebenso großen Vorteil, wenn man die Aufgabe umkehrt und nun, nach Fessenden, Mintrop u. a. die beobachteten Wellengeschwindigkeiten bei bekannter Entfernung zwischen Explosionsstelle und Aufnahmevorrichtung in geeigneter Weise zur Bestimmung der unbekannten geologischen Struktur des Untergrundes ausnutzt.

Fessenden benutzt als Erreger der Erschütterungswellen Unterwasserschallsender, welche er evtl. auch („evtl. auch" ist von Ambronn hinzugefügt und bei Fessenden nicht vorhanden) in Bohrlöcher bis zur gewünschten Tiefe einsenkt. Als Empfänger sind Schallempfänger angeordnet, die ebenfalls bis zur erforderlichen Tiefe in Bohrungen hinabgelassen werden können. Die Registrierung der ankommenden Erschütterungswellen sowie der Zeit der Absendung der Wellen erfolgt mittels Saitengalvanometers. Die Benutzung von Membran-Schallsendern und abgestimmten Unterwasserschallempfängern nach dem Telephonprinzip hat auch den Nachteil, daß die Einsätze je nach der Dämpfung der Apparatesysteme mehr oder weniger scharf sind. Wieweit sich seine Methoden aber tatsächlich praktisch durchführen lassen, muß dahingestellt bleiben."

Über das Mintrop-Verfahren schreibt Ambronn: „In enger Anlehnung an die genannten Arbeiten von Wiechert und seinen Schülern über die Zusammenhänge zwischen dem Schichtenbau des Erdinnern und der Form der Laufzeitkurve, wendet z. B. Mintrop das Laufzeitverfahren unter Benutzung künstlicher elastischer Wellen auf die Analyse der Schichtenstruktur der obersten Erdrinde an. Dabei erweist es sich als sehr günstig, daß offenbar die Schichtengrenzen in der Natur meist sehr scharf ausgebildet sind, so daß in vielen Fällen ausgedehnte Schichten mit stark voneinander abweichenden Wellengeschwindigkeiten aneinander grenzen, während innerhalb dieser Schichten wohl infolge lange Zeit hindurch wesentlich gleichbleibenden Bildungsbedingungen dieser Sedimente die Wellengeschwindigkeit nahezu konstant bleibt."

In einem längeren Absatz, der mit den Worten beginnt: „Die seismischen Methoden sind nun aber insbesondere geeignet, die tektonische Struktur eines geschichteten Untergrundes zu untersuchen", bespricht Ambronn die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten an Beispielen, wobei ihm im wesentlichen die im Jahre 1922 erschienene Druckschrift der Seismos „Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten ~~auch~~ nach dem seismischen Verfahren" als Unterlage dient.

In einer Besprechung des Buches von Ambronn führt Dr. H. Reich, Bezirksgeologe bei der Preußischen Geologischen Landesanstalt, in der Zeitschrift für praktische Geologie, 1926, Heft 11, aus, daß Ambronn die Arbeiten Mintrop's nicht entsprechend gewürdigt habe. Reich schreibt: „Der Inhalt des Buches ist neben einer allgemeinen Einführung in das Wesen der jeweiligen Methode ein i. a. ohne besondere Wertung vorgenommenes Referat der dem Verfasser bekanntgewordenen Arbeiten auf diesem Gebiete. Nur offenbar rein spekulative Verfahren werden abgelehnt. Dabei berührt es nicht ganz angenehm, daß die gewiß vorhandenen Verdienste des Verfassers um viele dieser Methoden sehr in den Vordergrund geschoben werden, während andere dem Verfasser anscheinend unbequeme Persönlichkeiten entweder nicht ihrer tatsächlichen Bedeutung entsprechend gewürdigt (z. B. Mintrop) oder einer sonst nicht üblichen scharfen Kritik (z. B. Krahmann) unterzogen werden."

Gutenberg 1926

In seinem im Jahre 1926 erschienenen „Lehrbuche der Geophysik" schreibt Gutenberg über das Mintrop-Verfahren:

„Während die akustischen Methoden (des Amerikaners Fessenden) zur Erforschung des Aufbaues der obersten Erdschichten nicht weiter ausgebaut worden sind, haben sich die seismischen Methoden mehr und mehr entwickelt. Der erste, welcher auf deren Verwendung hinwies, war wohl G. von dem Borne. Die erste praktische Ausführung rührt wohl von L. Mintrop her."

Ansel 1926

Auf Seite 500/01 des gleichen Buches schreibt Professor Ansel „Gleichwertig (mit der Untersuchung des Schwerefeldes oder des erdmagnetischen Feldes) gesellt sich das z. T. von der Seismik vorgebaute Verfahren von Dr. Mintrop hinzu. Bei dem Verfahren von Dr. Mintrop werden Erschütterungen durch Detonation kleiner Sprengstoffmengen auf den Boden und weiter auf den Schichtenverband übertragen, indem sie sich nach den Gesetzen elastischer Wellenfortpflanzung ausbreiten. Aus ihren an der Erdoberfläche gemessenen Laufzeiten lassen sich dann Tiefe, Lagerungsart, sowie Verwerfungen der angeregten Schichten verschiedener Elastizität berechnen. Im Prinzip einfach, erfordert die Methode, wenn die Ergebnisse zuverlässig sein sollen, einen komplizierten Apparat und viel Felderfahrung."

Auf Seite 596 schreibt Gutenberg: „Über die praktische Ausführung der Methoden wurde bisher nichts bekannt; in dem von Mintrop patentierten Verfahren wird nur ganz allgemein von der Verwendung von Laufzeitkurven gesprochen. Es sei daher im folgenden der Versuch gemacht, auf einzelne Fälle etwas näher einzugehen."

Über die Anwendung der Methode schreibt Gutenberg auf Seite ~~609~~ 10: „Für die praktische Anwendung kommt, da jede Benutzung von Laufzeitkurven unter das Patent von Mintrop fällt, vorerst im wesentlichen die Feststellung des Einsatzes von reflektierten Wellen (Echolotmethode) in Frage. — In allgemeinen Fällen muß man von Erdbebenaufzeichnungen Laufzeitkurven konstruieren, d. h. die in diesem Falle als „Mintrop-Verfahren" bezeichnete Methode anwenden. Die Genauigkeit, welche bei dem Mintrop-Verfahren erzielt wird, soll nach R. Ambronn im allgemeinen 2—4 % in den Tiefenangaben und ½ % (soll wohl ½ ° heißen) bei den Einfallswinkeln betragen, doch wurden z. B. von C. Heiland zwei Fälle veröffentlicht, in denen von Mintrop berechnete Profile durch die Bohrungen als falsch erwiesen wurden. Leider ist nachprüfbares Material bisher überhaupt kaum veröffentlicht worden."

Auf Seite 616 heißt es dann weiter: „In der Praxis liegt die Ausführung der Aufschlußarbeiten in der Hand mehrerer Aktiengesellschaften, denen es leider naturgemäß mehr auf die Erzielung eines wirtschaftlichen Betriebes als auf Förderung der Wissenschaft ankommt. Die meisten von ihnen haben sich auf eine oder zwei Methoden spezifiziert. Obwohl sie zweifellos in ihren Spezialmethoden besondere Erfahrungen gesammelt haben, muß man bei der Beurteilung der von ihnen veröffentlichten Ergebnisse berücksichtigen, das Werbeschriften meist besonders optimistisch gehalten sind. Einen Fortschritt würde es zweifellos bedeuten, wenn die Erfahrungen, auch die ungünstigen, zwischen den einzelnen Gesellschaften und der Wissenschaft ausgetauscht würden. Die dabei sich entwickelnde größere Sicherheit der Ergebnisse würde zweifellos das Ansehen der Methoden und damit auch die Zahl der Interessenten für diese heben und Praxis und Wissenschaft würden sich gegenseitig beleben, wie dies z. B. im Wetterdienst der Fall ist.

Aber auch für rein wissenschaftliche Untersuchungen sind die geophysikalischen Aufschlußmethoden von vielseitiger Bedeutung. Hier sei z. B. auf die Feststellung verborgener Tektonik auf Grund von Erdbebenaufzeichnungen (§ 332) verwiesen oder auf die Schlüsse, die man aus magnetischen Anomalien auf den geologischen Aufbau ziehen kann. Ferner hat E. Wiechert (vgl. S. 602/03) damit begonnen, aus den Laufzeitkurven, die aus Registrierungen von Sprengungen in Distanzen bis etwa 200 km von Göttingen konstruiert waren, Schlüsse auf den Aufbau der Schichten bei Göttingen zu ziehen. Er fand, daß in etwa 2—3 km Tiefe die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen auf 5,9 km pro Sekunde steigt und daß sich zwischen der genannten Grenze und der Schichtgrenze in 60 km Tiefe eine weitere Fläche befindet, in der die Wellengeschwindigkeit ein wenig zunimmt. Ob in 2—3 km Tiefe dort das varistische Grundgebirge beginnt, wie Stille vermutete, und welche Bedeutung die andere Sprungschicht besitzt, können erst weitere Untersuchungen ergeben. Jedenfalls besteht die Aussicht, daß auf diese Weise der tektonische Aufbau der Kontinente bis zur Simagrenze geklärt wird, während uns die Erdbeben Aufschlüsse über die tieferen Schichten geben."

Es trifft übrigens nicht zu, wenn Gutenberg behauptet, daß nachprüfbares Material kaum veröffentlicht worden sei, denn in den Mitteilungen der Seismos-Gesellschaft vom Jahre 1922 sind nicht weniger als neun verschiedene Ausführungsbeispiele mitgeteilt und durch Abbildungen erläutert worden.

Über die Zurückhaltung der wirtschaftlichen Kreise mit Veröffentlichungen schreibt Professor Königsberger in der Zeitschrift für praktische Geologie, Heft 5, Jahrgang 1926, bei Besprechung der Grenzen der Anwendungsmöglichkeit geophysikalischer Methoden folgendes: „Interessant wäre es zu erfahren, auf welche Erfahrungen und Studien Herr Z. seine Urteile über die geophysikalischen Methoden gründet, die er in dieser wissenschaftlichen Zeitschrift kundgibt. Insbesondere wäre das hinsichtlich der „seismischen Methoden" wertvoll; denn Veröffent- Königsberger 1926

lichungen von Mintrop über seine „seismische Methode" sind, von zwei kurzen Notizen ganz im Anfang abgesehen, nicht erfolgt. Man ist lediglich auf unsichere Berichte vom Hörensagen angewiesen. Andere seismische Verfahren sind aber meines Wissens bisher noch nicht erprobt. Daß Mintrop von Anfang an und C. Schlumberger seit ungefähr sechs Jahren nichts mehr veröffentlichen, ist aus verschiedenen Gründen begreiflich. Ein Grund für Nichtveröffentlichung dürfte auch der sein, daß der wissenschaftliche und praktische Geophysiker dann seine Zeit nicht mit Erwiderung von Kritiken verlieren muß, von Kritiken, die ohne Fachkenntnis und ohne Leistung eigener Arbeit aus persönlichen und nicht aus sachlichen Motiven, dafür aber mit um so größerer Sicherheit geschrieben sind."

Angenheister 1926

In dem Korrespondenzblatt der Deutschen Wissenschaft und Technik „Forschungen und Fortschritte", Nr. 14, vom 15. Juli 1926 berichtet Professor Angenheister über die „Geophysik auf der XIV. Tagung des Internationalen Geologenkongresses in Madrid" und schreibt: „Die großen deutschen Bergbaugesellschaften gründeten geophysikalische Studiengesellschaften, die heute in den wichtigsten Lagerstättengebieten der Erde tätig sind. Unter ihnen sind insbesondere die „Seismos" zu nennen, die ihr Entstehen dem tatkräftigen Eingreifen Dr. Mintrop's verdankt, der als erster die seismische Methode unter Verwendung künstlicher Erschütterungen für Aufschlußarbeiten nutzbar machte."

In Heft 1 des Jahrganges 1927 der Zeitschrift für Geophysik schreibt Professor Angenheister in der Arbeit: „Beobachtungen bei Sprengungen" ‹gehört zu den Forschungsarbeiten bei Sprengungen, unterstützt von der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft›: „Es wurden Seismogramme bei Sprengungen aufgenommen bis zu 1500 m Entfernung. Aus den Aufzeichnungen werden Laufzeitkurven für verschiedene Phasen abgeleitet und ihre Deutung versucht." Künstliche Sprengungen versetzen den Untergrund in elastische Bewegung, die sich durch geeignete Seismographen aufzeichnen läßt. Die Diagramme dieser experimentellen Seismik zeigen ähnlich wie die Erdbebendiagramme wohl unterscheidbare Einsätze. Bei der Betrachtung eines einzelnen Diagramms liegt es nahe — analog wie bei Erdbebendiagrammen —, diese Einsätze als longitudinale, transversale und Oberflächen-Wellen anzusprechen. Beim Vergleich der Aufzeichnungen aus den verschiedenen Entfernungen von einigen hundert Metern treten jedoch erhebliche Schwierigkeiten hervor. Schon bei der Identifizierung der zusammengehörigen Einsätze, noch mehr bei der physikalischen Deutung der Wellennatur. Vor allem gilt dies, wenn nur Aufzeichnungen einer einzigen Komponente vorliegen: dann ist der Willkür viel Raum gegeben. Finden die Versuche statt auf einem Untergrund, der schon in den von den aufgezeichneten Wellen durchlaufenen Tiefen ausgesprochene Schichtung aufweist, so mehren sich die Einsätze und damit die Schwierigkeiten ihrer Deutung. Gewiß gibt schon die bisher meistens benutzte Laufzeitkurve des ersten Einsatzes einen für die Schichtung des Untergrundes sehr wichtigen Anhalt. Gelingt es jedoch, die Wellennatur weiterer Einsätze zu deuten und die zusammengehörigen Einsätze in den Aufzeichnungen aus verschiedenen Entfernungen zu erkennen, so öffnen sich neue Wege zur seismischen Erschließung des Untergrundes. Zum Studium der obigen Aufgabe ist eine systematische Untersuchung der Aufzeichnung, der Bewegung in verschiedenen Entfernungen vom Sprengort in jeder Entfernung mit drei Komponenten erforderlich. Für die Theorie der Erdbebenwellen haben experimentelle Arbeiten dieser Art eine große Bedeutung, denn die physikalische Natur der Erdbebenwellen ist noch keineswegs für alle Einsätze mit Sicherheit festgestellt.

Der praktische Wert der seismischen Aufschlußmethode für den Bergbau braucht nicht mehr besonders betont zu werden. Er ist durch die schönen Erfolge von Dr. L. Mintrop hinlänglich bekannt.

Ein Teil der elastischen Wellen, die bei Sprengungen aufgezeichnet werden können, dringt noch tiefer hinab als die durch Bergbau erschließbaren Schichten liegen. Die Arbeiten, die in den letzten Jahren vom Geophysikalischen Institut in Göttingen unter Leitung von Professor Wiechert ausgeführt worden sind und über die Herr Professor Wiechert ausführlich berichtet

hat, deuten dies an. Es besteht somit berechtigte Hoffnung, daß die seismische Methode als Hilfsmittel der geologischen Forschung die großen Probleme der Tektonik und des Aufbaues der Erdrinde lösen helfen wird."

Interessant an diesen Ausführungen Angenheister's ist, daß die Wissenschaftler die Hoffnung aussprechen, die von der Notgemeinschaft unterstützten Versuche möchten die seismische Methode zum Hilfsmittel der geologischen Forschung für die großen Probleme der Tektonik heranbilden und daß gleichzeitig auf die von Mintrop bereits erzielten Erfolge hingewiesen wird. Mintrop war demnach auch der Wissenschaft Führer auf dem Gebiete der Verwendung künstlich erzeugter Erdbeben.

Schweydar und Reich 1926

Im Jahre 1926 begann Professor Schweydar mit Arbeiten nach dem Mintrop-Verfahren und stellte zunächst zusammen mit H. Reich und der Preußischen Geologischen Landesanstalt Versuche mit Sprengungen an. Über die ersten Ergebnisse ist in Heft 8 des Jahrganges 1926 der Zeitschrift für Geophysik unter dem Titel „Aufzeichnungen von künstlichen Erdbeben" berichtet worden. Es heißt dort: „Die Versuche wurden zuerst in Kummersdorf auf losem Sand ausgeführt. Es zeigte sich das überraschende Resultat, daß auf die kurze Entfernung von 200 m die Wellen bereits von unten kamen. Dieselbe Erscheinung zeigte sich in Rüdersdorf im Kalkstein und ebenfalls in Sperenberg in Gips. In Sperenberg betrug die kürzeste Herdentfernung 5,2 m, wobei der erste Stoß unter einem Winkel von etwa 76° gegen die Oberfläche geneigt war. Entweder sind die ankommenden Wellen bei den kurzen Entfernungen keine rein longitudinalen Wellen, oder die alleroberste Schicht nimmt an der Schwingung nicht teil, so daß man also auch auf kürzeste Entfernungen gebrochene Wellen beobachtet. In Kummersdorf war die Periode der Bodenwellen 0,06 ~~m pro~~ Sekunde, ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit rund 1000 m pro Sekunde, in Rüdersdorf betrug die Periode etwa 0,02 ~~m pro~~ Sekunde und die Ausbreitungsgeschwindigkeit 4100 m pro Sekunde."

Schweydar und Reich 1927

Ausführlich berichten Schweydar und Reich über diese Versuchsarbeiten in Band XVII, Heft 1, von Gerland's Beiträgen zur Geophysik, Jahrgang 1927, unter dem Titel: „Künstliche elastische Bodenwellen als Hilfsmittel geologischer Forschung". Über den Ursprung des seismischen Verfahrens schreiben die Verfasser in der Einleitung: „Die englischen Seismologen Mallet und Abbot haben zuerst vorgeschlagen, künstliche Erdbeben zum Studium der Geschwindigkeit elastischer Wellen in den oberflächlichen Schichten der Erde zu verwenden. Von diesen Arbeiten ausgehend, hat A. Schmidt den Gedanken ausgesprochen, Laufzeitkurven bei künstlichen Erdbeben aufzustellen, um das Gesetz der Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit der Tiefe zu studieren. Belar wollte derartige Untersuchungen praktischen Zwecken dienstbar machen, um z. B. bei einer Tunnelbohrung von vornherein die Zusammensetzung der Erdschichten kennenzulernen. Er schlägt vor, transportable empfindliche Erdbebenmesser bei einer künstlichen Erschütterung aufzustellen und hofft, aus den Aufzeichnungen einen Schluß auf die Beschaffenheit ziehen zu können. Unter anderen Seismologen, wie Benndorf, von dem Borne, Mintrop usw. hat besonders Galitzin mehrfach künstliche Erdbeben durch Sprengungen vorgeschlagen, um die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen und transversalen Wellen in den allerobersten Erdschichten zu studieren. Er weist darauf hin, daß diese Geschwindigkeiten in hohem Grade von den physikalischen Eigenschaften der oberen Erdschichten abhängen, und daß man aus den Änderungen der Geschwindigkeiten auf die Zusammensetzung dieser Schichten Schlüsse ziehen könne. Geschwindigkeitsmessungen bei künstlichen Erdbeben sind in neuerer Zeit von E. Wiechert und seinen Schülern, besonders von Mintrop, ausgeführt worden. Über die Ergebnisse der Arbeiten des letzteren ist nichts bekanntgeworden." Die letzte Behauptung ist angesichts des bereits erwähnten Vortrages von Mintrop auf der Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft im Jahre 1920, sowie des veröffentlichten Vortrages im Erzausschuß des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute in Düsseldorf, 1921, und endlich der mit zahlreichen Ausführungsbeispielen versehenen Veröffentlichung der Seismos vom Jahre 1922 nicht zutreffend. Ferner

ist die Darstellung unzutreffend, daß Galitzin darauf hingewiesen habe, aus den Änderungen der Geschwindigkeiten seien Schlüsse auf die Zusammensetzung der Schichten zu ziehen. Galitzin ‹siehe Seite 26› spricht vielmehr nur von der Ermittlung der Geschwindigkeiten im Eruptivgestein einerseits und im Sand bzw. Alluvialboden andererseits, dagegen nicht von der Ermittlung einer Gesteinsart, welche durch eine andere Gesteinsart verdeckt ist. Diese Ermittlung ist Gegenstand des Mintrop-Verfahrens.

In der Patentschrift von Mintrop aus dem Jahre 1919 ist bereits von Tiefenwellen die Rede. Wenn Schweydar und Reich erst sieben Jahre später durch Versuche feststellen, daß die Wellen fast lotrecht von unten kommen und durch dieses Resultat überrascht sind, so beweist dies nur, daß Mintrop bereits im Jahre 1919 erkannt hatte, was der übrigen Fachwelt noch fremd war.

Tatsächlich hat Schweydar jahrelang nicht an die Ausführbarkeit des Mintrop-Verfahrens geglaubt, wie aus nachstehendem Schreiben der „Exploration" vom 29. August 1929 hervorgeht. Das Schreiben lautet:

EXPLORATION
Boden-Untersuchungs- und Verwertungs-
Gesellschaft mit beschränkter Haftung

Hannover, den 29. August 1929.
Königshof

Herrn Professor Dr. L. Mintrop, Hannover.

Sehr geehrter Herr Professor!

Zu dem Angriff des Herrn Professor Dr. Mainka auf Ihr seismisches Verfahren-Patent möchten wir Ihnen einige Mitteilungen machen, die für die Beurteilung des Standes der Fachwissenschaft zur Zeit der Anmeldung Ihres Patentes von Bedeutung sein dürften.

Vor der Übernahme der Anteile unserer Gesellschaft durch die Seismos, welche im November 1927 erfolgte, versuchten wir neben unserem Hauptarbeitsgebiet, welches aus gravimetrischen Arbeiten zur Erforschung des Untergrundes bestand, uns auch der seismischen Bodenerforschung zuzuwenden. Unser wissenschaftlicher Berater auf dem Gebiete der gravimetrischen Arbeiten war bis zum Jahre 1924 Herr Professor Dr. Schweydar in Potsdam, der durch die Drehwaage Eötvös-Schweydar und andere Arbeiten bekanntgeworden ist. Herr Schweydar, mit dem wir unsere seismischen Pläne besprachen, riet zunächst wegen der Schwierigkeiten, die der Durchführung des seismischen Verfahrens auf dem theoretischen und dem praktischen Gebiete begegneten, ab. Insbesondere erklärte Herr Schweydar dem Unterzeichneten gegenüber wörtlich:

„Ich glaube nicht, daß Herr Mintrop die Wellen bekommt, die er zu bekommen glaubt."

Herr Schweydar entschloß sich aber, zu Herrn Geheimrat Wiechert nach Göttingen zu fahren, um dessen Ansicht über die Möglichkeiten des seismischen Verfahrens zu hören. Über das Ergebnis der Göttinger Reise berichtete Herr Schweydar dem Unterzeichneten etwa mit folgenden Worten:

„Wiechert hat sich überlebt, seine Ansichten können nicht mehr als maßgebend angesehen werden."

Diese pessimistische Einstellung des auch auf dem Gebiete der Erdbebenforschung bewanderten Herrn Schweydar war wesentlich mitbestimmend, daß wir die seismische Bodenerforschung nicht in unser Arbeitsgebiet aufnahmen. Erst nach dem Ausscheiden unseres wissenschaftlichen Beraters, Herrn Schweydar, und nachdem die Erfolge Ihres Verfahrens im norddeutschen Kalirevier und insbesondere an der Golfküste der Vereinigten Staaten bekanntgeworden waren, wandten wir uns dem seismischen Gebiete zu.

Herr Schweydar ist dann später selbst zu der seismischen Bodenerforschung übergegangen und hat darüber erstmalig zusammen mit Herrn Dr. Reich in der Zeitschrift für Geophysik berichtet.

Mit vorzüglicher Hochachtung

„EXPLORATION"
Boden-Untersuchungs- und Verwertungs-Gesellschaft mit beschränkter Haftung
gez. Gornick

Der Satz: „Ich glaube nicht, daß Mintrop die Wellen bekommt, die er zu bekommen glaubt", wird voll verständlich angesichts der ersten Versuchsergebnisse von Schweydar und Reich im Jahre 1926. Bis dahin hat Schweydar tatsächlich nicht geglaubt, daß die in der Mintrop'schen Patentbeschreibung genannten Tiefenwellen auftreten. Schweydar, der auf dem Gebiete der Anwendung der Eötvös'schen Drehwaage für die Erforschung des geologischen Untergrundes, insbesondere in Erdölgebieten, sehr bekannt geworden ist, hat sich dem seismischen Verfahren erst zugewendet, als dieses die Drehwaage zu verdrängen drohte.

„Über die Bedeutung der neueren Seismometrie für die Ölgeologie" schreibt Professor V. Laska, Prag, in Band XXIII, der Zeitschrift „Petroleum" vom 1. Juli 1927: Laska 1927

„Zu den schwierigsten, aber auch wichtigsten Problemen der praktischen Geophysik gehört unstreitig die Bestimmung der Tiefe einer horizontalen Diskordanz, d. h. einer Schicht, in welcher die Geschwindigkeit der seismischen Wellen einen Sprung erleidet. In der Geologischen Rundschau, 1926, Heft 5, ist nun ein Aufsatz des bekannten Geophysikers Professor E. Wiechert erschienen, welcher uns der praktischen Lösung dieses Problemes wesentlich näher bringt. Bekanntlich hat L. Mintrop mit der seismischen Methode bedeutende Erfolge erzielt, indem es ihm gelungen ist, Salzstöcke räumlich festzulegen."

In der Berg- und Hüttenmännischen Zeitschrift „Glückauf" vom 8. Januar 1927 schreibt Dr. M. Müller (Mitteilungen aus dem Geologisch-Mineralogischen Institut der Universität Köln) in der Abhandlung „Die geophysikalischen Schürfverfahren": „In enger Anlehnung an die Ergebnisse der Wiechert'schen Arbeiten ist von Mintrop ein mit vielfachem Erfolg angewandtes Verfahren zur seismischen Bodenerforschung entwickelt worden. Er benutzt in der Hauptsache die erwähnten Laufzeitkurven von künstlichen Erdbeben, deren Auslösung durch Explosionen oder durch das Fallenlassen von Gewichten hervorgerufen wird, wobei Entstehungsort, Zeit und Stärke des ausgelösten Bebens genau bekannt sind. Das Mintrop-Verfahren dient in erster Linie zur Untersuchung der Tektonik des geschichteten Untergrundes. Am einfachsten gestalten sich die seismischen Untersuchungen, wenn die zu untersuchenden Schichten parallel zur Erdoberfläche verlaufen. Schwieriger werden sie, sobald die Flächenlagen der einzelnen Untergrundschichten eine beliebige Neigung gegen die Erdoberfläche einnehmen. Mintrop hat aus begreiflichen Gründen nur sehr wenig über sein Verfahren veröffentlicht. Als hauptsächlichstes Anwendungsgebiet dafür kommen die Ermittlung von Verwerfungen und Überschiebungen, sowie die Bestimmung von Mulden und Achsenlinien in gefaltetem Gebirge in Betracht." Müller 1927

In seinem im Jahre 1927 erschienenen Buch „Geologische Einführung in die Geophysik" bespricht Sieberg in dem Kapitel „Einige Arbeitsmethoden der Seismik" „die seismische Erforschung der örtlichen Tiefengeologie" und anerkennt die Verdienste Mintrop's mit den Sätzen: „Besonders bekanntgeworden durch seine Erfolge ist das durch Deutsches Patent im Jahre 1919 geschützte Verfahren von L. Mintrop. Hierbei werden, im Ausbau von E. Wiechert's Arbeiten, künstliche Erdbeben durch Sprengungen, fallende Gewichte und dergleichen erzeugt." Sieberg 1927

Sieberg bringt dann in seiner Abbildung 235 im wesentlichen die Abbildung 1 der Mitteilungen der Seismos-Gesellschaft vom Jahre 1922 über „Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten nach dem seismischen Verfahren", wobei die gleiche Überschrift „Erregung, Ausbreitung und seismographische Aufzeichnung der Erschütterungswellen" gewählt wird wie in der Seismos-Abbildung.

Während Sieberg-Jena die Erfolge Mintrop's zugibt, erwähnen O. Meißer und H. Martin (Jena) in der Veröffentlichung „Zur experimentellen Seismik I", Zeitschrift für Geophysik, 3. Jahrgang, 1927, die Mintrop'schen Arbeiten nicht. Der Direktor der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena, O. Hecker, schreibt in dem Vorwort zu dem Aufsatz von Meißer-Martin: „Im Jahre 1915 wurden von mir die ersten Versuche gemacht, für die Messung von Bodenerschütterungen eine akustisch-seismische Apparatur statt der üblichen Erschütterungsmesser zu verwenden. Der Mangel an Mitteln während des Krieges und in Hecker, Meißer, Martin 1927

der Nachkriegszeit gestattete aber die Weiterführung dieser aussichtsreichen Versuche nicht. Jetzt ist es durch die Unterstützung seitens der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft möglich geworden, die akustisch-seismische Methode systematisch auszuarbeiten."

Mintrop 1925

Mintrop bzw. die Seismos-Gesellschaft haben Hecker's Nachkriegsarbeiten jahrelang mit Geldmitteln unterstützt, bevor die Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft helfend einsprang. Eine Zeitlang hat dann die von Hecker geleitete Reichsanstalt für Erdbebenforschung sowohl von der Notgemeinschaft wie von der Seismos Mittel erhalten.

Auf das von Hecker, Meisser und Martin im Jahre 1927 seismisch-akustische Methode genannte Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten ist Mintrop bereits im Jahre 1925, mit Priorität vom 2. November 1920, das nachstehende Reichspatent Nr. 417010 erteilt worden.

DEUTSCHES REICH. REICHSPATENTAMT.

Patentschrift Nr. 417010, Klasse 42l, Gruppe 13.

Dr. Ludger Mintrop in Hannover. Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten.

Zusatz zum Patent 371963. Patentiert im Deutschen Reiche vom 2. Nov. 1920 ab. Längste Dauer: 6. Dez. 1937.

Die Erfindung betrifft eine weitere Ausbildung des Verfahrens zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten gemäß Patent 371963, bei welcher die in dem Untersuchungsgebiet künstlich erzeugten elastischen Wellen von einem Mikrophon aufgenommen werden, das diese unter Vermittlung des elektrischen Stromes in einem Telephon o. dgl. Gerät hörbar macht; dabei werden aus der Tonhöhe und aus bezeichnenden Nebengeräuschen die erforderlichen Rückschlüsse auf den Aufbau der Schichten des Untersuchungsgebietes gemacht. Diese Einrichtung eignet sich auf Grund ihrer Einfachheit besonders für die Nachprüfung der nach dem Hauptpatent anzustellenden Untersuchungen bzw. zu vorläufigen Untersuchungen, um den erforderlichen Überblick für die sich anschließenden Einzeluntersuchungen mit Hilfe der Arbeitsweise nach dem Hauptpatent zu gewinnen.

Die im Mikrophon erzeugten Stromschwankungen können auch mittels eines Oszillographen oder ähnlichen Gerätes photographisch aufgezeichnet werden, während das Telephon nur zum Abhören dient.

Die Verwendung eines Mikrophons gestattet auch gleichzeitig die Feststellung des Zeitpunktes der künstlichen Erschütterungen, der z. B. aus den durch die Luft übertragenen Schallwellen errechnet wird. Verwendet man nämlich ein Mikrophon, das sowohl auf den Bodenschall als auf den Luftschall anspricht, so erhält man nacheinander zwei Einsätze in der aufgezeichneten Kurve, aus der sich der Zeitpunkt leicht errechnen läßt. Es können natürlich auch zwei Mikrophone, das eine für den Bodenschall, das andere für den Luftschall, an den Oszillographen bzw. die Aufschreibevorrichtung angeschlossen werden. Mit Hilfe dieser Einrichtung erhält man eine bezüglich der Genauigkeit der Messungen dem Verfahren des Patentes 371963 gleichwertige Arbeitsweise, während aber die hierfür gebrauchte Einrichtung noch einfacher und leichter ausfällt.

PATENT-ANSPRÜCHE:

1. Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten nach Patent 371963, dadurch gekennzeichnet, daß die künstlich erzeugten elastischen Wellen von einem Mikrophon aufgenommen und unter Vermittlung eines Telephons hörbar gemacht werden, wobei aus der Tonhöhe und aus bezeichnenden Nebengeräuschen die erforderlichen Rückschlüsse gemacht werden.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die von dem Mikrophon aufgenommenen, künstlich erzeugten elastischen Wellen als Stromschwankungen von einem Oszillographen o. dgl. Gerät photographisch aufgezeichnet werden.

3. Verfahren nach Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß gleichzeitig mit der Aufzeichnung des Bodenschalles auch der vom Zerknallen der Sprengladung herrührende Luftschall in der Kurve aufgezeichnet wird, und zwar indem entweder ein sowohl auf den Bodenschall als auf den Luftschall ansprechendes Mikrophon oder zwei mit dem gleichen Oszillographen geschaltete Mikrophone, das eine für den Bodenschall, das andere für den Luftschall benutzt werden.

Deubel 1924

Der in der Hecker-Meißer-Martin-Veröffentlichung genannte geologische Mitarbeiter F. Deubel erkennt in seiner im Jahre 1924 erschienenen und weiter oben bereits genannten

Veröffentlichung über „Neue Methoden der Erduntersuchung und ihre Bedeutung für die Provinz Pommern" (Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der Universität Greifswald) die Priorität Mintrop's voll an.

Neuerdings hebt auch Meißer die Priorität Mintrop's hervor, und zwar in seiner Arbeit „Beiträge zu einer experimentellen Seismik" (Veröffentlichungen der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena, 1929). Auf Seite 62 schreibt Meißer: „Ein anderes, der Arbeitsweise der Erdseismik nachgebildetes und zuerst für experimentelle Untersuchungen systematisch von Mintrop[1]) angewandtes Verfahren ist das Schießen von Laufzeitkurven". Meißer 1929

Regierungsrat Professor Dr. A. Sieberg schreibt in der Zeitschrift „Steinbruch und Sandgrube" vom 15. Juni 1928 in der Abhandlung: „Lagerstättenforschung mittels geophysikalischer, insbesondere des seismischen Verfahrens" u. a. „Die seismische Erforschung der örtlichen Tiefengeologie in den oberflächennahen Teilen der Erdrinde beruht auf der sinngemäßen Anwendung der in der instrumentellen Erdbebenforschung üblichen Arbeitsmethoden. — Den ganzen Gedankengang hat schon Anfang 1901 A. Belar in Laibach klar entwickelt, soweit es nach den damaligen theoretischen Kenntnissen überhaupt möglich war, und mittels selbst konstruierter Sonderinstrumente die ersten tastenden Versuche einer praktischen Durchführung gemacht. Erfolgreich in die Tat umgesetzt wurde der Gedanke aber erst 1914 durch das amerikanische Patent für R. Fessenden. Hierbei dienen als Erreger Unterwasserschallsender, als Aufnahmegerät verschiedene elektro-akustische Empfänger in Verbindung mit photographisch registrierendem Saitengalvanometer oder dergleichen Sender wie Empfänger befinden sich in mehr oder weniger tiefen Bohrlöchern, die mit Wasser gefüllt werden. Aus der Verfolgung der Schallwellen, die hinsichtlich des Zeitpunktes ihrer Erregung genau festzulegen sind und aus etwaigen Reflexionen, Brechungen und Absorptionen werden Schlüsse auf die Lagerung und Beschaffenheit des leitenden Mediums gezogen. 1915 begannen O. Hecker's späterhin erfolgreiche Versuche, für die Messung von Bodenerschütterungen eine akustisch-seismische Apparatur statt der üblichen Erschütterungsmesser zu verwenden. Besonders bekanntgeworden durch seine Erfolge in fast allen Weltteilen ist das durch Deutsches Patent vom Jahre 1919 geschützte Verfahren von L. Mintrop (Seismos, Hannover). Hierbei werden im Ausbau von E. Wiechert's (Göttingen) Arbeiten über den inneren Aufbau des Erdkörpers, künstliche Erdbeben durch Sprengungen, fallende Gewichte und dgl. erzeugt. Als Empfänger dienen Erschütterungsmesser. Gemessen werden, wie bei Fessenden, die Laufzeiten elastischer Wellen im Erdboden, woraus sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten ergeben. Die Laufzeitkurven für einige Sonderfälle hat B. Gutenberg gezeichnet. Entwicklung und Diskussion der Formeln findet sich vor allem bei O. Meißer-H. Martin und bei W. Schweydar-H. Reich, die ebenso wie E. Wiechert mit seinen Schülern, Sprengversuche planmäßig durchführen. Meißer-Martin arbeiten an der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena am Ausbau von E. Hecker's akustisch-seismischer Methode, Schweydar-Reich untersuchen auch die Emergenzwinkel der Strahlen. Übrigens sind schon 1912 durch mikroseismische Methoden im Anschluß an die von Sieberg-Lais durchgeführte Untersuchung des mitteldeutschen Erdbebens vom 16. November 1911 bis dahin unbekannte Verwerfungen festgestellt worden; es erscheint nicht aussichtslos, auch dieses Prinzip durch Schaffung geeigneter instrumenteller Hilfsmittel für Lagerstättenuntersuchungen nutzbar zu machen. Die praktische Ausnutzung des seismischen Verfahrens für Lagerstättenforschung ist L. Mintrop (Seismos, Hannover) durch Patent geschützt. Jedoch arbeiten eine Reihe von Instituten und Forschern gleichfalls mit diesen Methoden, weil von ihnen auch für die Theorie der Erdbeben und verwandter Naturerscheinungen Aufschlüsse von ganz besonderer Tragweite zu erwarten sind." Sieberg 1928

Im Juli-Heft 1928 der Zeitschrift „Metall und Erz" schreibt Dr. H. Reich in der Abhand- Reich 1928

([1]) Mintrop, L., D. R. P. 304317 vom 17. Mai 1917. Derselbe: „Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten nach dem seismischen Verfahren. Hannover, 1922"). Anmerkung: Meißer zitiert die gleichfalsche Patentschrift wie Gutenberg in seinem Lehrbuche der Geophysik.

lung „Bemerkungen zur Fortentwicklung der angewandten Geophysik": „Über seismische Untersuchungen im Erzbergbau ist uns im vergangenen Jahre nichts weiter bekannt geworden, als daß man erneut Versuche über bestimmte bekannte Erzkörper ausgeführt hat, ohne daß über die Ergebnisse etwas in die Öffentlichkeit gelangt wäre.

Die Lagerungsverhältnisse sowohl wie das physikalische Verhalten der meisten Erze sind der Anwendung dieser Methode nicht günstig, so daß sie vorläufig dem Erzbergmann im wesentlichen nur zur Feststellung der Mächtigkeit lockerer Deckschichten über festem Gestein dienen kann. In dieser Beziehung ist die Methode bisher unübertroffen. Sie hat ihre von Weigelt, Barton und anderen entsprechend gewürdigten, bisher einzig dastehenden Erfolge in Erdölgebieten gehabt, und das wird bis auf weiteres ihr Hauptbetätigungsgebiet bleiben. Interessant ist die Fortentwicklung dieser Methode auf theoretischem und instrumentellem Gebiete. Während bisher die Gesellschaft Seismos, Hannover, eine Monopolstellung in diesem Zweige der Geophysik hatte, sind im vergangenen Jahre in Deutschland und in Amerika eine ganze Reihe von neuen Apparaten und Verfahren ausgearbeitet und zum Teil auch publiziert worden. Über die amerikanischen Neuerungen berichtet kurz Barton: Die dort erfundenen Apparate sollen den Mintrop'schen der Seismos in nichts nachstehen. Neue Apparate in Deutschland beschreiben Meißer in Jena und Schweydar in Potsdam. Beide geben ebenso wie Angenheister auch prinzipielle Erläuterungen zur Ausführung dieser Methode. In der letzten Zeit tritt auch Ambronn mit einer neuen seismischen Apparatur an die Öffentlichkeit. Die Praxis wird zeigen, welche diese Apparaturen sich den Markt erobern wird. Die Vorteile und Nachteile der einzelnen Systeme hier auseinanderzusetzen, würde zu weit führen."

Der Kronzeuge für die Priorität Mintrop's auf dem Gebiete der seismischen Bodenerforschung, Geheimrat Wiechert, ist im März 1928 gestorben. An seiner Stelle bekunden seine Schüler Angenheister, Gutenberg und Linke die Geschichte des seismischen Verfahrens.

Angenheister 1928

In dem Nachruf auf Emil Wiechert schreibt Angenheister in der Zeitschrift für Geophysik, 1928, Heft 3: „Schon 1905 begann Wiechert mit experimentellen seismischen Untersuchungen, mit Erschütterungsmessern. Transportable hochempfindliche Seismographen für photographische Registrierungen wurden gebaut. Doch erst nach dem Kriege wurde die Seismik eine experimentelle Wissenschaft. Künstliche Erdbeben wurden durch Sprengungen erzeugt, die Boden- und Lufterschütterungen sollten bis in großer Entfernung gemessen werden. Das stellte neue instrumentelle Anforderungen; ein zweimillionenfach vergrößernder Vertikalseismograph für photographische Registrierung wird aufgestellt, leichte transportable Seismographen wurden konstruiert; Schallempfänger gebaut für Ruß- und photographische Registrierung; hochempfindlich für Schalldruck, unempfindlich gegen Windstöße; „fliegende" Beobachtungsstationen für seismische und für Schallbeobachtungen eingerichtet und mit „drahtloser" Zeitkontrolle ausgerüstet. Ermöglicht durch großzügige Unterstützung der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft entsteht eine systematische Untersuchung von großem Ausmaß.

Auch diesen experimentellen Arbeiten der letzten Jahre waren große Erfolge beschieden. Über 200 km weit konnten die Bodenbewegungen bei Sprengungen verfolgt werden, über 400 km weit der Luftschall. Auch hier wurden Laufzeitkurven abgeleitet, Scheitelgeschwindigkeit und Scheitelhöhe bestimmt, Diskontinuitäten entdeckt, im Boden und in der Luft. Neue Anschauungen über den Aufbau der oberen Atmosphäre, über die Massenlagerungen im Untergrund folgen daraus. Zwischen 30 und 40 km Höhe beginnt eine warme Schicht, die den Schall zum Boden zurückführt. Vielleicht beginnt dort ein neuer selbständiger Kreislauf. Ein neues Hilfsmittel für Meteorologie und Geologie ist geschaffen von großer praktischer Bedeutung, wie die Erfolge von Mintrop zeigen."

Linke 1928

Professor F. Linke, Direktor des Geophysikalischen Instituts der Universität Frankfurt a. M., schreibt in seinem Nachruf auf Wiechert in Gerland's Beiträgen zur Geophysik, Band XIX, Heft 4, 1928: „Man vergegenwärtige sich den Stand der Seismik im Ausgange des vergangenen Jahrhunderts, wo man sich bemühte, in den Wirrwarr der seismischen Registrierungen durch

statistische Untersuchungen einige Klarheit zu bringen. Die Seismik war eine vorwiegend geographische Disziplin. Und welche wichtigen Entdeckungen über die Konstitution des Erdinnern und — was Wiechert am meisten interessierte — die elastischen Eigenschaften der Materie unter dem hohen Druck und den hohen Temperaturen des Erdinnern gelangen Wiechert und den von ihm inspirierten Schülern: Seine Theorie des automatischen Seismographen schuf die instrumentellen Grundlagen. Neue Registriermethoden, deren Entwicklung er viel Zeit und Überlegung widmete, gingen aus seinem Institute hervor. Durch Errichtung des Samoa-Observatoriums seitens der Göttinger Gesellschaft der Wissenschaft, deren Mitglied Wiechert war, verschaffte er sich wichtiges Beobachtungsmaterial aus dem seismisch besonders interessanten Gebiete der Südsee und konnte seine Arbeiten krönen durch Aufdeckung des Weges, den die elastischen Erdbebenwellen im Erdinnern nehmen. Frühere Untersuchungen über die Gestalt der Erde, deren Unterteilung er zunächst hypothetisch gefolgert hatte, wurden bestätigt. Danach verlegte er seine Haupttätigkeit auf die Bewegungen der äußeren Erdrinde, indem er künstliche Erdbeben erzeugte und somit der Vater der zur Auffindung von Bodenschätzen heute unentbehrlich gewordenen angewandten Seismik wurde, die sein Schüler Mintrop auszubilden berufen war."

In B. Gutenberg's Nachruf auf Wiechert in der Meteorologischen Zeitschrift vom Mai 1928 heißt es: „Es würde zu weit führen, hier auf alle Erfolge einzugehen, die er ⟨Wiechert⟩ auf dem Gebiete der Seismologie erzielt oder angeregt hat. Von Bedeutung wurde vor allem noch sein Gedanke, durch künstliche Erschütterungen die Schwingungen der obersten Erdschichten zu studieren, den Mintrop unter seiner Leitung im Göttinger Institut in die Paxis umzusetzen begann und aus dem sich später die seismische Aufschlußmethode entwickelte, an deren Vervollkommnung Wiechert ebenfalls mitarbeitete." Gutenberg 1928

Wie im Inlande, so wird Mintrop auch im Auslande allgemein als der Urheber des seismischen Verfahrens zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten angesehen. In Deutschland ist kein Fall bekannt geworden, in dem Mintrop die Priorität abgesprochen wird, auch nicht seitens der Geophysiker Mainka, Gutenberg und Reich, wenigstens nicht in der Literatur. Diese Autoren sprechen sich vielmehr in ihren Veröffentlichungen für die Mintrop'sche Priorität aus bzw. sie teilen die Priorität zwischen Wiechert und Mintrop auf. Die Geologen und Bergleute anerkennen ausnahmslos an, daß Mintrop der erste gewesen ist, welcher das Verfahren entwickelt und angewendet hat. Ganz neuerdings schreibt noch Professor Dr. J. Stoller, Landesgeologe bei der Preußischen Geologischen Landesanstalt im Jahrbuch des Deutschen Nationalen Komitees für die Internationalen Bohrkongresse, 1929, in der Abhandlung „Erschließung der deutschen Erdöllagerstätten durch Tiefbohrungen": „Hier kann die seismische Methode von Dr. Mintrop, die künstlich erzeugte Erderschütterungen zur Ermittlung der Tiefe, Art und Mächtigkeit der Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten benützt, hilfreich bzw. ergänzend einspringen. Dieses Verfahren hat übrigens auch für sich allein in der Feststellung und Umgrenzung von Salzstöcken gute Erfolge aufzuweisen." Stoller 1929

Im Auslande hat das Mintrop-Verfahren ebenfalls eine große praktische Bedeutung erlangt, besonders in den Vereinigten Staaten von Nordamerika. In der amerikanischen Literatur und im amerikanischen Patentamte wird die Priorität Mintrop's uneingeschränkt anerkannt.

Die erste Mitteilung über das neue Verfahren erschien in Amerika in der Zeitschrift "National Petroleum News" vom 11. April 1923 aus der Feder des Berichterstatters der Zeitschrift P. Wagner, über "Seismographic System for Exploration of Unterground Formation", in der es heißt: „Petroleum" 1923

"Germans using Seismograph. In the last ten years, extensive experiments have been made in Europa especially by the industrial branches of geology in Germany, for the determination and location of coal, oil and other mineral deposits without going to the expense of drilling test holes. For the purpose of an accurate survey of the subterranean folds and formations, the seismographic method has been developed by Dr. Mintrop, an

eminent scientist, this "seismograph" records photographically the wave lengths caused by artificial disturbances of the earth crust and from these wave lengths the nature, density and distance of the different formations reached by the waves are accurately determined through the use of formulas developed for this purpose."

The Oil Weekly vom 29. Dezember 1923 schrieb unter dem Titel "Extensive Explorations Made in Eastern Texas":

"The Marland Oil Company, through its operating subsidiary, the Alcorn Oil Company, hat been the most aggressive in the geological work that has taken place in the above mentioned counties during the past five months and has used the core drill extensively, besides having a squad of eight Germans imported from Germany on a year's contract to do subsurface work with an instrument somewhat like a seismograph. Prior to coming to Texas, these Germans were engaged by Marland in doing subsurface work in Oklahoma, and are contracted for until May, 1924. These Germans are considered authorities on the use of the seismograph's recording waves in determining the approximate depth, thickness and nature of formations underlaying the earth surface when a large charge of dynamite or other explosive is fired off near the location of the instrument."

Literary Digest 1925

In the Literary Digest for April 25, 1925, heißt es in dem Aufsatz: "Finding Oil with Earthquakes": "Dr. L. Mintrop, a German seismologist, in the originator of the method."

Scientific American 1925

"Scientific American" vom Dezember 1925 schreibt in der Abhandlung "Buried Treassure" "Apparatus for Locating Underground Minerals" in bezug auf das seismische Verfahren: "This method was originated by Dr. L. Mintrop, a German seismologist."

Engineering and Mining Journal 1926

In "Engineering and Mining Journal Press" vom 9. Januar 1926 schreibt Dr. C. A. Heiland, Berlin, jetzt Professor of Colorado School of Mines unter dem Titel: "Instruments and Methods for the Discovery of Useful Mineral Deposits": "Acoustic waves can be used, as suggested by Fessenden, or else seismic waves, as recommended by Mintrop. Mintrop's method partakes more of the practice which is usual in seismology and does not necessitate boring in the area prospected." "Mintrop's method has a wide field of application, almost every kind of stratified deposit occuring an practical geology can be defined by its means."

Wroblewski 1926

In Oil Weekly vom 11. Juni 1926 schreibt Adam Wroblewski unter dem Titel: "Geophysical Methods Used in Locations of Oil and Other Minerals: "Fessenden's acoustic method requires sinking or boring of shafts in the area to be investigated, therefore it is expensive and not in general use. The photo-type of the seismoscope was built in China 1790 years ago, the first to apply it in prospecting was Dr. L. Mintrop, director of the Seismos Company Ltd., Hannover, Germany."

Weinzierl 1927

In der Zeitschrift „The Oil Weekly" vom 2. September 1927 wird von John F. Weinzierl die Einführung der deutschen geophysikalischen Methoden in den großen Erdölgebieten von Texas und Louisiana behandelt unter der Überschrift "Development of Geophysical Science in Gulf Coast Exploration". In dem Abschnitt "The Seismic and later Geophon Methods" heißt es: "Notwithstanding the fact that torsion balance preceded the seismograph on the Gulf Coast, the seismograph and the geophone were really the instruments to bring the greatest results. Contrary to the general belief, the seismograph was first applied on very difficult structural country instead of the more or less easily found shallow salt domes. Also in about 1922 microphon experiments were being tried out by Dr. Haseman for the Marland Oil Company and were successful on the Hewington limestone in Mervine field in Oklahoma, but not so in the Wellington shales in this vicinity.

It was probably due to Dr. van der Gracht's activities more than anyone else that the Marland employed a scientific crew brought over from the "Seismos Company in Hannover, Germany, by Dr. Mintrop, its director. This company has had success on different kinds of structural work in Europa and especially on salt domes in Poland. In July 1923, upon arrival of Dr. Mintrop, the writer, at that time an employee of the Marland, was put in

charge of this work. After various moves about the Mid-Continent from northern Oklahoma down into North Central Texas and various results encouraging and otherwise had been obtained it was finally decided to try the seismic method on the Gulf Coast in the search of Salt Domes."

In dem Aufsatz: "Science Taking Hold of Oil Finding" von F. C. Brown vom Bureau of Standard (siehe Oil and Gas Journal vom 7. Januar 1926) heißt es bei der Besprechung eines akustischen Verfahrens: "This method is rather an improvement over the Mintrop seismic system (Germany)." Brown 1926

Über die großen Erfolge mit dem Mintrop'schen seismischen Verfahren an der Gulfküste von Texas und Louisiana unterrichten die zahlreichen Aufsätze in "Oil Weekly" and "Oil and Gas Journal", von denen übrigens kein einziger von Mintrop oder ihm nahestehenden Kreisen veranlaßt worden ist. Der erste Dom wurde im September 1924 bei Orchard in Texas durch die Seismos gefunden und im November des gleichen Jahres durch eine Kontrollbohrung bestätigt. The Oil Weekly vom 21. November 1924 schreibt darüber in dem Artikel "Seismograph Profes Successful on Coast" "Previous to drilling this hole (on Orchard) existence of the dome was indicated through experiments with the seismograph, which has acquired the popular title of "blasting" throughout the coastal counties. Oil Weekly 1924

Der Orchard-Dom ist der erste Salzdom, der in Amerika jemals seismisch ermittelt worden ist, ihm sind in den ersten drei Jahren etwa 20 andere neue Dome gefolgt. Im einzelnen unterrichtet darüber ein Aufsatz von Logan in Oil Weekly vom 21. Oktober 1927, betitelt: "Coastal Operations Center on Determined Domes." Volume of drilling now under way is result of discoveries made by geophysical exploration." Logan 1927

In der Zeitschrift Oil Weekly vom 4. September 1925 heißt es: "The first salt dome located in the Gulf coast by the seismograph was Orchard dome, in Fort Bend County, which was discovered by the Gulf Production Company's Moore Nr. 1, Dezember 21, 1924." Oil Weekly 1925

Bereits ein Jahr nach der Auffindung des Orchard-Domes erschien in Oil Weekly ein Aufsatz: "Finding Salt Domes that formerly took ~~y~~years of drilling", in dem es heißt: "All in all the coming of recent geophysical methods of ~~citing~~ finding salt domes has practically brought about a reawakening in the (oil) industry." Ferner schreibt das American Institute of Mining and Metallurgical Engineers im Jahre 1926 unter "Development of the Gulf Coastal Area during 1925: "Geophysical exploratory work has practically displaced wildcat-well drilling in the search for new salt domes in this area. The new scientific methods have proved much more efficient there than the slow process of drilling." Mining and Metallurgical Engineers 1926

Wie sehr das im Jahre 1923 durch Mintrop nach den Vereinigten Staaten gebrachte seismische Verfahren die dortigen Fachleute überrascht hat, geht unter anderem aus einem Artikel des sehr bekannten Geologen der Standard Oil, Wallace E. Pratt im Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists im Jahre 1926 hervor, in dem es heißt: "Two new salt domes in Texas. There is something new under the sun." For the first time in the history of the Gulf Coast Oil industry it is possible to announce, with absolutely no risk that any informed student of the salt-dome area will question the accuracy of the announcement, that a new salt dome has actually been discovered, without any well having been drilled to prove the discovery or even to test the area. This is tantamount to the assertion that our confidence in the seismograph (by means of which this discovery was made) in geophysical exploration has already come to be perfect. In other words, wherever the seismograph registers the presence of a buried salt dome Gulf coast operators generally are now willing to accept the verdict just as confidently as though a well had actually been drilled into dome material." Pratt 1926

Die außerordentlich große Bedeutung des seismischen Verfahrens bei der Aufsuchung neuer Salzdome geht auch aus der "Oil weekly" vom 15. April 1927 hervor, in der Wallace Davis unter dem Titel "Seismograph Dome Discoveries come with rush" schreibt: Davis 1927

"Through a recent campaign of seismograph exploration, four major companies got results which stand unparelled in the history of the search for new potential productive spots by bringing to light six new salt domes and indications of two others within a radius of 60 miles on Southern Louisiana during a period of a few weeks. By this unprecedented rush of discoveries the potential oil reserve of Coastal Louisiana is augmented 36 per cent, considering nonproductive domes already known on proven fields, while the new domes raise the percentage of previously discovered domes which are yet non — productive, 72 per cent. The statement concerning the territory's possible oil reserve is of course an estimate arrived at on a basis of all domes having the same production possibilities.

The area of the new discoveries borders in an general trend along the Mississippi River, five of them being on the west, one on the east side and are probable additional domes on each side. One point of great significance in the new finds is that they extend the possibility of major production further eastward, marking the first coastal salt dome discovery east of the Mississippi. Another ~~value of~~ point outstanding in the discovery is the value of geophysical instruments in locating productions spots, knowledge of the presence of domes[1] were found and outlined only after vast expenditures in rank wildcatting over periods of several years."

Barton 1927

Im Novemberheft der Zeitschrift "Economic Geology" im Jahre 1927 schreibt der bekannte amerikanische Geologe Donald C. Barton unter dem Titel „Applied Geophysical Methods in America" (Seite 650):

„Seismic Method. — The application of the seismic (or sonic) method to the determination of local geologic structure was first worked out in 1913 by Fessenden, who in a series of field experiments near Framingham, Mass., developed the instruments and technique to the point where he was able to make practical application of the method. He tried to interest some mining companies in the method, but being unsuccessful, he dropped work with the seismic (or sonic) method for other lines of invention, and no practical application of his results seems to have been made. Eckhart, Haseman, Karcher, and Mc Collom in 1921 experimented in Oklahoma with a seismic method. Their results at the time seemed rather negative but very recent work shows that the apparent failure at that time was due largely to lack of encouragement and to limited financial resources. The initial impetus to the present extensive use of the seismic (or sonic) method is due very largely to L. Mintrop, and his "Seismos" Company of Hannover, Germany. Working as a junior colleague of Wiechert of Göttingen, he developed his instruments and technique during the war, and by 1921 had demonstrated the potentiality of the method, but apparently had not done much actual surveying of geologic structure. Late in 1923 his method was introduced into Mexico by the Royal Dutch Shell, and about the same time he got the Marland Oil Company to try out his method in the Mid-Continent area, and slightly later, the Gulf Production Company to try outh the method on the Gulf Coast salt domes. The success of the method in the Gulf Coast is due in very considerable part to the encouragement and support given to it from the start by L. P. Garret of the Gulf Production Company, who previously had imaginatively foreseen the possibilities of the method in reconnaissance for new salt domes. The discovery by the seismograph of several salt domes late in 1924 gave great impetus to the use of the method. By the spring of 1926, Ricker, Eckhart, Mc Collom, Rieber and Karcher, all Americans, had perfected seismographs, some of them radically different from Mintrop's seismograph, and had radically improved some of the instrumental technique of the method, and during the year several additional seismographs of American design were tried out in the field. The best American method is probably somewhat superior to Mintrop's. Up to 1926, the "refraction" method was the only in practical use, although there had been some experimentation in attempt to perfect a method of using waves directly reflected back at a high angle. During 1926 the Geophysical

1) which before the coming of geophysics

Research Corporation perfected the instruments and technique of a reflection method to the point of practical applicability."

The Saturday Evening Post vom 3. März 1928 enthält eine lange Abhandlung von Isaac F. Marcosson über das Thema: "After Petroleum — What?", in der die gesamte Ölindustrie beschrieben wird. In dem Abschnitt über die Aufsuchung neuer Öllager heißt es unter der Überschrift: "Artificial Earthquakes": "Baron Mintrop, a German nobleman, is largely responsible for the development of the standard oil-fields apparatus now in use. His war experiences equipped him to employ it in geological formation. He made the first survey in this country, with his own staff of operators and instruments. Thus indirectly the great conflict has made a valuable contribution tho the petroleum industry." Marcosson 1928

In the Oil Weekly vom 18. Januar 1929 schreibt Mark C. Malamphy in einer ausführlichen Abhandlung "The Seismograph in the Gulf Coast": "While the Seismograph has been used for many years in the study of eartquakes, only recently has the portable type of field instrument been built and adapted to the study of subsurface strata in the search for potential oil producing structures. In 1923, Mintrop, a German scientist, first introduced the instrument to the oil fraternity on the American continent. There had been a considerable amount of preliminary work done by American scientists prior to this time but no commercial work had been attempted. Working under contract with the Gulf Production Company, Mintrop was successful in locating several salt domes in the Gulf Coast in the ensuring year. These discoveries gave considerable impetus to the development of seismograph equipment, and in a few years many of the major companies had developed instruments of their own." Malamphy 1929

In einer Besprechung dieses Aufsatzes schreibt das "Department of Commerce-Bureau of Mines", in dem "Information Circular, Geophysical Abstracts No. 1 vom Mai 1929:" "A brief review of the history of seismographic exploration in Texas is followed by an elementary description of the fundamental ideas involved in the method, the principles on which the different types of seismographs are based, on a statement of the main physical facts which determine the velocity and path of an explosion wave through the ground. This is followed by an outline of the method of working and of interpreting the results, illustrated by a diagram and graphs of the time — distance curve. These graphs are entirely imaginary and represent what the writer thinks should happen under the assumed conditions according to the still popular "Mintrop theory"; no other method of interpretation is mentioned, so that the reader is left to infer that these ideas are universally accepted." Mit dem letzten Satz spielt das Bureau of Mines auf neuere Fortschritte in der seismischen Methode an. Bureaux of Mines 1929

In "The Oil Weekly" vom 26. Juni 1929 gibt Jack Logan unter dem Titel "Discovery of Deep Domes Revises Gulf Coast Potentialities" eine sehr ausführliche Schilderung der geschichtlichen und wirtschaftlichen Entwicklung der Erdölfelder von Texas und Louisiana, dank der Anwendung von geophysikalischen Untersuchungsmethoden, insbesondere des seismischen Verfahrens. In bezug auf letzteres schreibt Logan: "The first seismograph crew was brought to the Gulf Coast for the Marland Oil Company. Soon afterwards Gulf Production Company had three troops working in the Gulf Coast. A monopoly on the seismic work was held at that time by the "Seismos" G. m. b. H. of Hannover, Germany, directed by Dr. L. Mintrop. The Marland Oil Company and Gulf Production Company employed the "Seismos" troops for the early work. Moore's field (Orchard dome) found the latter part of 1924, is the first discovery credited to the seismograph. Long Point and Moore's field were the only geophysical discoveries in 1924 in the Gulf Coast." Logan 1929

Es sei hier bemerkt, daß die Seismos das Monopol nicht etwa wegen eines Patentes hatte, denn dieses wurde erst 1926 erteilt. Sie hatte das Monopol deshalb, weil die seismische Methode neu war.

Barton 1929

In dem 1929 von dem American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New-york, herausgegebenen Buche "Geophysical Prospecting" beschreibt Donald C. Barton "The Seismic Method of Mapping Geologic Structure" und berichtet über die Geschichte des seismischen Verfahrens. Er bemerkt ausdrücklich, daß er hierbei im wesentlichen einer Darstellung der Geschichte durch Schweydar und Reich folge. Die Stelle bei Barton lautet: "The first proposal for the use of articial earthquakes in the study of velocity of elastic waves in the surface formations of the earth's crust were made before 1888 by the English seismologists Mallet and Abbot. Partly on the basis of their work A. Schmidt in 1888 proposed the use of time distance graphs of artificial earthquakes to study the variation of velocity with depth. Belar in 1902 proposed the practical application of such investigation in connection with boring tunnels. Galitzin repeatedly ‹1912, 1913› proposed the use of explosions to study the velocity of the longitudinal and transverse waves in the uppermost formations and pointed out that the velocity depended in a high degree on the physical character of the beds and that from changes in the velocity, conclusions could be drawn in regard to the composition of the beds. Somewhat the same thought was proposed by von dem Borne ‹1908›, by Benndorf, Udden and others. The first application of the use of artificially excited elastic earth waves to the determination of local structure was worked out by Fessenden, who in 1913 in a series of field experiments near Framingham, Mass., developed the instruments and technique to a point of practical applicability and patended his method. He used an adaptation of sonic sounding for depth in water; a sonic sounder, immersed in water in a bore hole, was used to set up a controlled series of compression waves in the water, which in turn set up elastic earth waves in the surrounding ground; sonic receivers were immersed in water in other bore holes and connected with photographically recording galvanometers; from the reflection, refraction, and absorption of the waves, conclusions were drawn in regard to the character of the intervening ground.

L. Mintrop and O. Hecker started experimenting early during the Great War, Mintrop with a mechanical seismograph and Hecker with a microphone and recording galvanometer. Working as a junior collegue of Wiechert of Göttingen, Mintrop perfected his instruments and technique to the point of practicability and in 1919 received a basic patent, since revoked (Anmerkung: Barton meint hier das deutsche Verfahren-Patent), on the application of the seismic method to the working of local geologic structure. By 1921, he had demonstrated the potentiality of the method but apparently hat not done much actual field surveying of geologic structure.

In this country, Eckhart, Hasemann, Karcher, and Mc Collom experimented with a seismic method in Oklahoma in 1921. Their results then seemed rather negativ but the apparent failure at that time was due largely to lack of encouragement, to limited financial resources, and to the attempted application of the method in an area of slightly too complicated geology.

In the early summer of 1923, Mintrop's method was introduced in Mexico by the Royal Dutch Shell. In the late summer or autumn of the same year, his method was introduced by the Marland Oil Company in Oklahoma and in the fault line district north of Powell, Texas, and in the spring of the following year on the Gulf Salt dome district of Texas. The discovery of several salt domes late in 1924 by a troop of Mintrop's "Seismos" Company, working for the Gulf Production Co., gave great impetus to the use of the method.

By the spring of 1926, Andersen, Eckhart, Karcher, Mc Collum, Ricker, Rieber and Trueman in this country hat perfected seismographs of varying degrees of fieldworthiness and of varying types, some of them radically different from Mintrop's seismograph, and some of the instrumental technique of the method being radically improved."

Über den Erfolg des von Mintrop eingeführten seismischen Verfahrens schreibt Barton in der gleichen Abhandlung: "In the discovery of salt domes in the Gulf Coastal Plain

region of Texas and Louisiana, the seismic method has scored the most brillant success. The general effect of the introduction of the seismic method into the salt dome area of Texas and Louisiana has been to speed up the discovery of salt domes about 75 years."

Der italienische Professor Arnaldo Belluigi schreibt im Echi e comenti vom 5. Juli 1927 über das Mintrop-Verfahren folgendes: Belluigi 1927

„Es ist bekannt, wie das Erdöl heute gesucht wird, indirekt mit der Drehwaage und in einigen Fällen mit speziellen besonders empfindlichen Seismographen. Die seismische Untersuchung hat schon bemerkenswerte Fortschritte gemacht auf dem Gebiete der Zeitregistrierung von Mintrop. Nur daß es, um Erfolge zu haben, notwendig ist, daß die Tektonik des Untergrundes einfach genug ist, da es sonst schwer sein würde, um nicht zu sagen, unmöglich, sich nach den Seismogrammen, welche uns ein kompliziertes Verhalten der elastischen Wellen des Untergrundes bezeigen, zu orientieren."

An der gleichen Stelle schreibt Belluigi am 5. Oktober 1927: „Die mechanischen Wellen, hervorgerufen von künstlichen Explosionen im Gelände, Wellen, die auch pseudoseismisch genannt werden, werden wie bekannt, für Untersuchungen im Dienste des Bergbaues verwandt. Und die seismische Methode hat schon Erfolg gehabt (doch nicht so sehr wie die gravimetrische), aber sie hat Erfolge gehabt, und zwar unter Dr. Mintrop bei der Festlegung von großen Salzdomen. Wir möchten darauf hinweisen, daß die Methode unter Dr. Mintrop, dem Direktor der „Seismos" und Seismologen von Ruf, nur deswegen Erfolg gehabt hat, weil Mintrop seit mehr als 10 Jahren mit dem Seismographen arbeitet und eine Erfahrung hat, die man nicht so aus dem Ärmel schüttelt. Doch die Erfolge, die bekannt sind, beziehen sich nur auf die Festlegung von Salzdomen oder von irgendwelchen Schichtflächen, die die mechanischen Wellen einfach zurückwerfen. Man kann nicht von Erfolgen in anderen Fällen sprechen, also bei Untersuchungen von diskordanten oder irgendwie gestörten Gebieten."

Auch die Engländer anerkennen Mintrop's Priorität. So schreibt M. H. Haddock, F. G. S., A. M. I. M. E. in "The Colliery Guardian" in der Abhandlung "The Development and Present Status of Geophysical Methods of Prospecting" vom 5. August 1927: "Dr. Mintrop has undertaken observations collecting and developing usable methods of investigation through the firm "Seismos" Ltd., in Hannover". All workers in this field are indebted to the pioneering work of Wiechert and his able pupil Gutenberg, the result of whose labours, combined with the very extensive experimental material of many earthquake observations, have brought about practical conclusions upon which modern methods of location "by means of time travel curves or course time curves depend." Haddock 1927

Das Problem, um dessen Lösung es sich bei dem Mintrop-Verfahren handelt, wird in sehr klarer Weise von dem englischen Professor A. O. Rankine, O. B. E. D. Sc., in der Zeitschrift „Nature" vom 4/11. Mai 1929 gekennzeichnet. Rankine schreibt: "The phenomenon with which we are dealing is the same as that which has recently been recognised as operative in natural earthquakes. Even in near earthquakes, where the curvature of the earth plays not important part, the records of seismographs show preliminary displacements which apparently correspond to "rays" from the earthquake source which pass from an upper stratum ‹of low propagation velocity› at the critical angle into a lower stratum ‹of higher propagation velocity› run parallel to the interface and eventually emerge again at the critical angle to reach the seismograph on the surface. This is, of course, an „optical path" of an extreme character according to the ordinary laws of refraction, but since the initial incidence is at the critical angle, total reflection would occur according to the same laws, and no energy at all would be associated with the path in question. Dr. Jeffreys ‹"On Compressional Waves in Two Superposed Layers", Publications Cambridge Philosophical Society vol. 23. p. 472, 1926› has however, shown that if the problem be treated as one of diffraction instead of simple refraction, the rather curious result emerges that a finite fraction of the initial energy may be expected to reach the seismograph ‹as in fact found in practice› at a time Rankine 1929

which is the same as that obtained by considering the extreme optical path above described. This applies to longitudinal disturbances. There are in solid, of course, transverse disturbances as well, but these travel more slowly, and need not concern us here, since, as has been already stressed, the question is one of first arrivals.

Prof. Mintrop was the first to recognise the applicability of this phenomenon to the smale scale problem of the relatively shallow formations in the earth, using artificial explosions instead of natural earthquakes. As a result he has initiated a practical system which has been widely and successfully used to determine the depths of such formations."

Die Anerkennung des Mintrop-Verfahrens ist allgemein. In der gesamten in- und ausländischen Literatur findet sich keine Stelle, die Mintrop die Priorität für das seismische Verfahren abspricht. Das im Vorwort erwähnte und auf den Seiten 30—33 beschriebene Verfahren von Fessenden wird in der ganzen Literatur nicht genannt, mit Ausnahme in "Economic Geology" und "Geophysical Prospecting", wo Barton schreibt, daß Fessenden vergebens versucht habe, Bergwerksgesellschaften für das Verfahren zu interessieren. Angesichts der Tatsache, daß das Fessenden-Verfahren an Bohrlöcher benutzt, ist die Ablehnung seines Verfahrens durch die Wirtschaft zu verstehen.

Mintrop 1926

Das amerikanische Patentamt anerkennt den grundsätzlichen Unterschied zwischen den Verfahren von Fessenden und Mintrop, indem es letzterem am 14. September 1926 mit Priorität der deutschen Anmeldung vom 6. Dezember 1919 das seismische Patent No. 1,599,538 "Geological Testing Method" erteilt hat, welches hier im Wortlaut folgt:

Patented Sept. 14, 1926. **1,599,538.**

UNITED STATES PATENT OFFICE.

Ludger Mintrop, of Bochum, Germany.

Geological Testing Method.

Application filed December 13, 1920, Serial No. 430,432, and in Germany December 6, 1919.

(Granted under the provisions of the Act of March 3, 1921, 41 Stat. L., 1313.)

My invention relates to a method of ascertaining the geological structure of the strata appertaining to a particular region such method being useful in particular for mining operations when developing a lode or opening a seam. Up till now in all those cases where the natural formation of the ground does not throw light upon the subject, recourse must be had to borings. However, the sinking of bore holes regularly constitutes a tedious and expensive operation which moreover cannot even be employed in all cases. Again, whenever it has been merely a question of primarily obtaining an idea of the approximate composition of the strata, the divining-rod has been, as may be well known, experimented with. Notwithstanding, as is well known to those skilled in the art, it has been so far impossible to establish an indisputable connection between the action of the divining rod and the geological peculiarities of the subsoil. A second method of working and serving the same end of securing merely approximate data, consists in the application of electric waves from the action of which certain definite inferences are then drawn as to the arrangement and the peculiar nature of the strata.

Now in accordance with my invention it is likewise intended that waves per se shall be employed for the purpose of ascertaining the arrangement of the strata, however, not electric waves but elastic waves, produced by mechanical means. I employ these waves in appreciation of the fact that the connection of such mechanically generated waves with the properties of the strata, such as density and elasticity, will be far more direct and therewith far more intimate than the correlation to electric wawes. To this end, there are generated in accordance with my invention within the measuring area and at a suitable point thereof, artificial mechanical waves, say, for instance, by the detonation of a certain quantity of explosives, the elastic propagation of these mechanical wawes through the different beds being recorded by a seismograph set up at a suitable distance remote therefrom. The records thus obtained are then made use of in exactly the same manner customary in seismology for the purpose of setting up the so-called "travelling time curve" and in order to compute the velocity of the waves at the various depths. I am aware that in seismology, attempts have already been made to arrive at certain conclusions relatively to the general geological formation of the earth as a whole.

For general information on this comparatively recent art reference is made, especially with regard to the use of "travelling time curves" or sometimes shortly called "time curves", to "Modern Seismology" by G. W. Walker, published in 1913 by Longmans, Green & Company, New York and London, where on page 53 and following, the function and use of travelling time curves in seismology is dealt with in detail. For the present purposes the use of these curves will be shortly explained hereinafter.

Thus far, however, the investigators were able by such observations to only draw approximate and general conclusions as to the structure of the entire earth, and at that with observations based only on accidental natural earth shocks of uncontrollable duration and origin.

On the other hand, in the present instance, the noteworthy feature is that the observations to be effected does not rely upon the uncertain occurence of natural earthquakes, but that there are produced, purposely and by special means, artificial earth shocks, in consequence of which alone the possibility is created of carrying out observations of this character for a particular locality and for a definite period of time. Of essential importance in this connection is moreover the fact that by means of my improved method there is now also provided a convenient form of comparative measurement for the purpose of determining the propagation of the elastic waves within the strata and of their time of arrival at the seismometer, respectively, by employing, for the purpose of ascertaining the moment when the elastic oscillations are excited, either the sound waves created in any case on the detonation of the explosive charge, or else by effecting a transmission by means of light, electric current or electric waves, respectively.

From the surface speed and the three dimensional speed of the waves, as also from the depths down to which the waves have penetrated the strata, but in particular, from the mutual relation of the velocities of the longitudinal and transversal waves, inferences may be drawn respecting the elastic properties of the strata traversed by the waves. It will thus be found that especially from the points of inflection and the bends in the "travelling time curve", there may always be inferred that there exist fissures in the elastic properties of the strata, as also inflections, refractions, and reflections at the marginal levels thereof.

The manner in which my novel method is employed is illustrated in the accompanying diagrams in which:

Figure 1 diagrammatically represents the set-up of the apparatus preparatory to making the observation;

Figure 2 represents a portion of the recording tape on which an observation of the artificially produced earth shock and its traveling time has been recorded;

Figure 3 is a straight line traveling time curve composed from a plurality of individual observations such as are recorded on the tape shown in Figure 2;

Figure 4 represents a straight line velocity curve resulting from the traveling time curve in Figure 3;

Figure 5 represents a bent traveling time curve as a resultant of increasing density of the ground under observation;

Figure 6 represents a velocity and a depth curve obtained from the traveling time curve in Figure 5;

Figure 7 represents diagrammatically a traveling time curve with bends in it as a result of a sudden change in the character of the underlying strata; and

Figure 8 represents the velocity and depth curves obtained from the observations plotted in the traveling time curve Figure 7.

Referring to Figure 1, 1 represents a recording field seismograph for the purposes of the present invention and of a construction and character described and illustrated in my U. S. Patent No. 1451,080, dated April 10th, 1923. The recording seismograph shown in Figure 6 of that patent consists of a pendulum device and a photographic recorder, both of which instrumentalities may be assumed to cooperate in the present case as described in the aforementioned patent, the pendulum device being denoted in the present Figure 1 with 2 and the photographic recording device being diagrammatically indicated at 3. At a suitable distance from the seismograph 1 a cartridge 4 filled with suitable explosives is located and an electric circuit 6 is established between the cartridge and the recording devise 3, including the battery 5, of such character that when the cartridge is exploded the circuit is interrupted and thus, by suitable means described in the aforementioned patent, a mark 9 is made on the recording tape illustrated in present Figure 2.

Referring to Figure 2 a tape portion is shown at 7 and assumed to continuously travel at a certain rate of speed, means being provided in the recording apparatus to make recording marks at stated equal time intervals, for instance in seconds, as shown at the lower tape edge in Figure 2. So long as no shocks arrive at the seismograph a straight central line 8 is recorded on the tape by the means provided in the aforementioned apparatus. As soon as a shock disturbs the equilibrium of the seismograph pendulum, the mirror of the instrument oscillates and instead of making a straight line record on the tape, oscillations such as are shown at *a* or *b* or *c* are recorded.

By other suitable means shown and described in aforementioned patent, the interruption of the circuit 6 on the explosion of the cartridge records the vertical mark 9, above referred to, on the tape shown in present Figure 2. The time which has elapsed between the initial mark 9 and the appearance of the first oscillation *a* is called the "traveling time" of the elastic wave. A number of separate subsequent waves or oscillations are generally recorded on the tape due to the same explosion or shock. The first oscillations *a* are due to the

Sept. 14, 1926. 1,599,538.

L. MINTROP

GEOLOGICAL TESTING METHOD

Filed Dec. 13, 1920 2 Sheets-Sheet 1

Fig. 1.

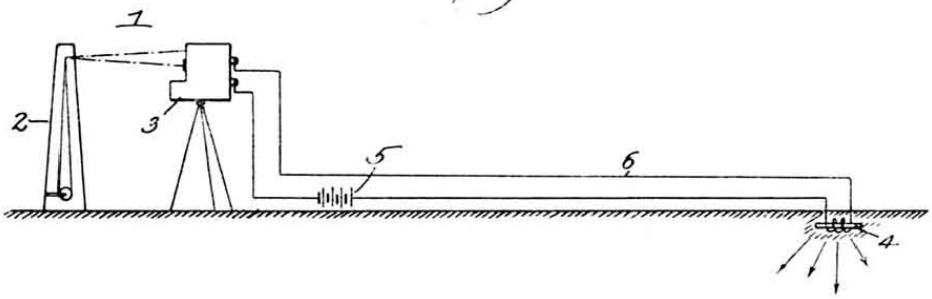


Fig. 2.

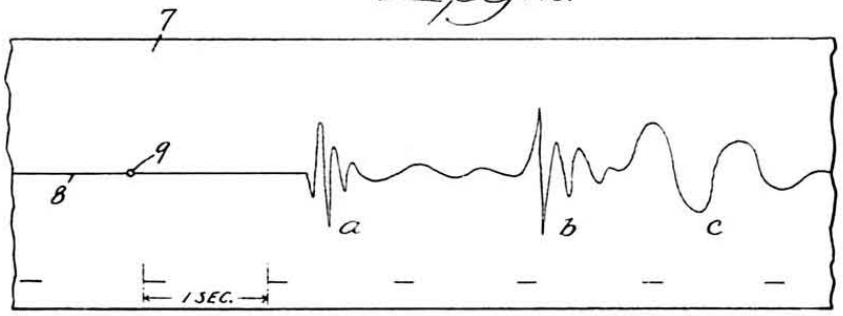


Fig. 3.

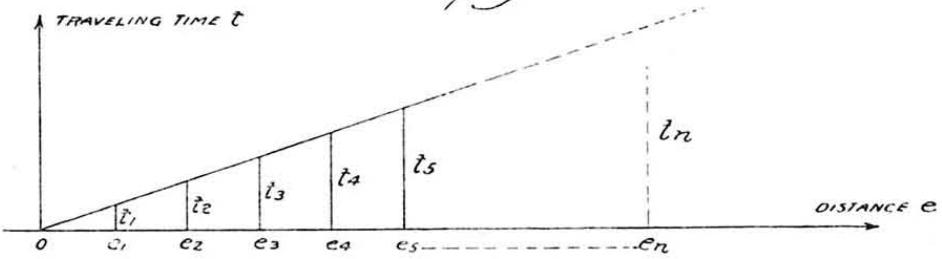
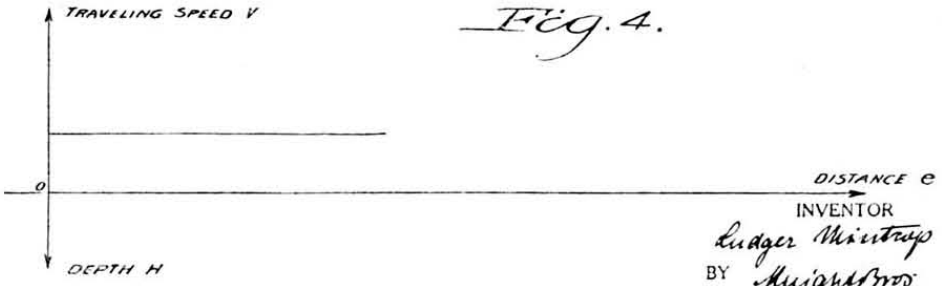


Fig. 4.



INVENTOR
Ludger Mintrop
BY Knight Bros
his ATTORNEYS.

L. MINTROP

GEOLOGICAL TESTING METHOD

Filed Dec. 13, 1920 2 Sheets-Sheet 2

Fig. 5.

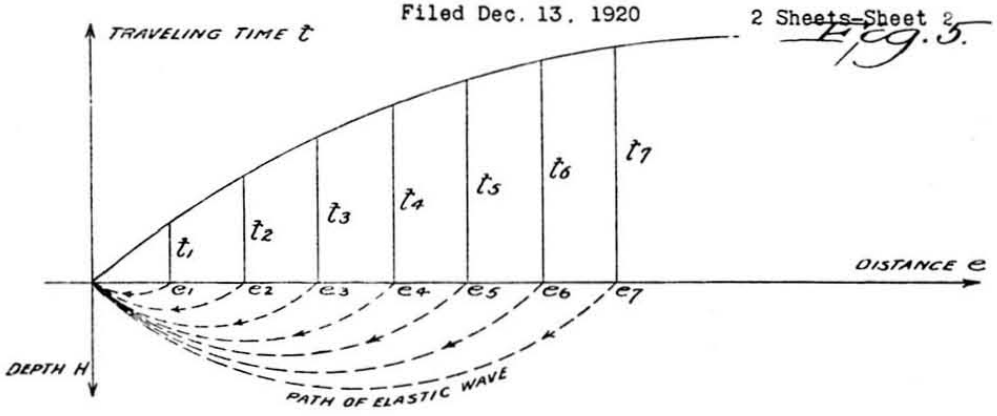


Fig. 6.

Fig. 7.

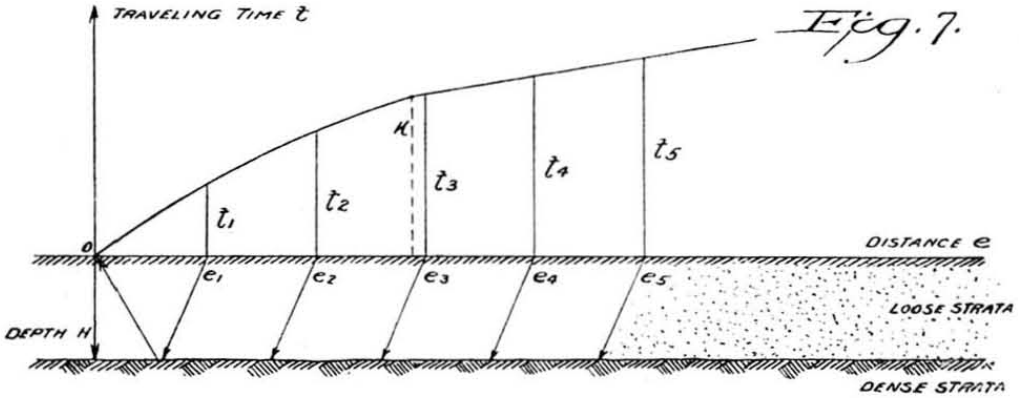
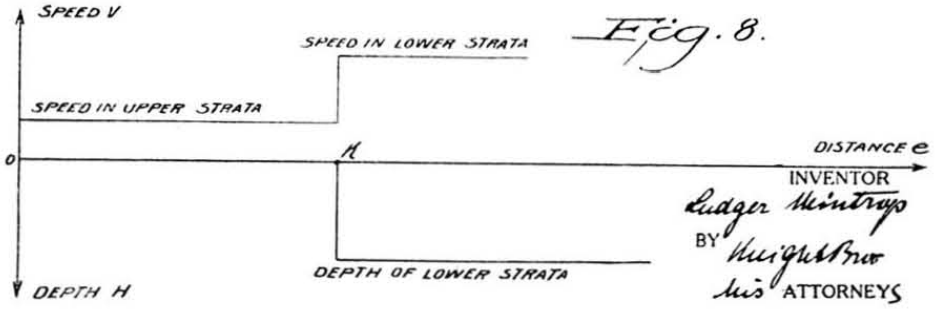


Fig. 8.



INVENTOR
Ludger Mintrop
BY Wright Brothers
his ATTORNEYS

elastic waves traveling through the ground, the second oscillation b are air waves and the third oscillations c are usually due to very long ground waves.

For the present explanation it is sufficient to receive the first sharply defined short ground waves noted by the oscillations a. The traveling time t thus recorded constitutes the time which these waves consumed in traveling from the point of origin to the seismograph.

This time will be the greater the further the seismograph is removed from the origin of the shock. Thus if the recording apparatus be assumed to remain stationary in one certain place and if successively a number of cartridges are exploded along a straight line further away from the seismograph, but at equal distances from each other, the traveling time increases in homogeneous ground proportionate to these distances. Such a straight line traveling time curve is shown in Figure 3 in which the ordinates represent the traveling times t and the abscissæ represent the distances e from the seismograph, at which the shocks have been produced. In the example given the shocks are produced at the distances e_1, e_2, e_3 **** e_n, and accordingly the values of the traveling times t_1, t_2, t_3 **** t_n have been observed at the seismograph, the soil conditions in the present example being assumed to be of such character that a straight line traveling time graph is obtained. From the measured distances and the observed traveling times the speeds of velocities of the wave for the different distances are obtained as:

$$v_1=\frac{e_1}{t_1},\ v_2=\frac{e_2}{t_2},\ v_3=\frac{e_3}{t_3},\ ****\ v_n=\frac{e_n}{t_n}$$

Being assumed that:

$$\frac{e_1}{t_2}=\frac{e_2}{t_2}=\frac{e_3}{t_3},\ ****\ =\frac{e_n}{t_n}$$

It follows that:

$$v_1=v_2=v_3\ ****\ =v_n$$

In other words, the speed of the waves is constant, and therefore, this explains why the traveling time curve is a straight line. Thus in the graph shown in Figure 4 in which the speed of the waves is plotted against the increasing distances e, the speed curve is a straight line in parallel to abscissæ line of the graph. Since the speed curve shows a constant speed, the corresponding depth curve would also show a constant depth and would accordingly be represented as a straight line coinciding with the abscissæ line, which shows that the depth is zero. In other words, this indicates that the waves have traveled along the surface of the ground in the example assumed in Figures 3 and 4.

In Figures 5 and 6 are illustrated graphs which more closely resemble actual observations, even though it is assumed in this example, that only on strata is observed. The observations represented in Figure 5 are again assumed to have been made with shocks produced at different distances e_1, e_2 **** e_n from the point of observation. It will be noted, however, from the uniformly curved character of the traveling time curve that the traveling time does not increase proportionately with the distance. In this graph the approximate paths of the elastic waves are indicated by lines provided with arrows, and it will be noted that the deeper the shocks penetrate into the ground the shorter becomes their traveling time, i. e., the more their speed inc.eases. The corresponding traveling speed curve is shown in Figure 6. Such an increase in speed with increase in distance between the point of shock origin and the point of observation would be caused for instance in sandy soil by the fact that quite naturally the sand is comparatively loose at and near the surface, whereas it increases in density with the depth owing to the increased pressure of the upper layers of sand. Thus the curved paths of the elastic waves shown in Figure 5 are produced, penetrating deeper and deeper into the ground as the distance is increased, whereas in Figure 4, which assumes theoretically uniformly loose soil, the shocks would only travel along the surface of the ground. It thus follows that the traveling time curve will be curved the more, the more the density of the sub-surface increases, in other words, the more the traveling speed of the waves increases with the depth.

Inversely a definite increase in speed observed corresponds with a difinite increase in depth which the traveling waves have attained on their way from the point of origin to the point of observation. Figure 6 illustrates the depth curve corresponding with the speed curve plotted from the observations. The different speeds observed at the different distances are easily calculated from the traveling time curve originally obtained from the observations and shown in Figure 5 as follows:

$$v_1=\frac{e_1}{t_1},\ v_2=\frac{e_2-e_1}{t_2-t_1},\ ****\ v_n=\frac{e_n-e_{n-1}}{t_n-t_{n-1}}\ \text{or}\ v_1=\frac{\Delta e_1}{\Delta t_1},\ v_2=\frac{\Delta e_2}{\Delta t},\ ****\ v_n=\frac{\Delta e_n}{\Delta t_n}$$

In the examples represented by the combined graph and subsoil diagram Figure 7 and the graph Figure 8, the case is assumed that a strata of considerable density, for instance limestone, underlies a comparatively soft upper strata, for instance loose sand. When observations are made in such a case the traveling speeds, instead of gradually and uniformly increasing with the distance as shown in Figure 5, increase abruptly from the point at which the elastic waves, heretofore traveling in loose sand, enter the dense limestone. At such

a point the traveling time curve suddenly shows a sharp bend (at k in Figure 7). While thus the speed derived from the first part of the curve shows the traveling speed in the upper loose strata, the portion of the curve following the bend gives an indication of the propagation speed in the lower denser strata. Such observations result then in a speed curve as shown in Figure 8 which shows a sudden increase in speed when the waves enter the denser strata, and correspondingly the depth curve assumes a sudden downward path at this point.)

These simple examples given, plainly demonstrate that by thus observing on the surface of the ground the varying speeds of the elastic waves in underlying strata, the desired information as to the condition of the subsoil may be ascertained without physically examining the different strata, such for instance as by bore holes. Such seismic observations give the very definite information that in a certain depth a strata of different character underlies the strata visible at the surface. As explained hereinbefore, the character of such an underlying strata, whether dense or loose, is ascertained from the traveling speed, obtained indirectly from the traveling time curve, since the speed is the greater the greater the density of the strata. For instance limestone propagates elastic waves at a much greater speed than sandstone and in turn, sandstone propagates at a much greater speed than for instance clay.

In turn, the foregoing clearly shows that thus also the depth of the strata can be indirectly ascertained from the observed traveling time curve.

For example, referring to Figures 7 and 8, let v_1 and v_2 represent respectively the speeds of the elastic waves in the upper and in the lower strata and let k be the distance of the bend in the traveling time curve from the starting point of the traveling time curve (O), then the depth H of the lower strata is calculated from the equation:

$$H = \frac{v_1}{v_2} \cdot k \cdot c$$

wherein c represents a function depending upon the relation $\frac{v_1}{v_2}$ and which is known to all those skilled from the well known mathematical development of the earthquake theories.

For instance if v_1 is calculated from the observation as $= 1000$ m/sec, $v_2 = 2500$ m/sec, and thus

$$\frac{v_1}{v_2} = 0.4$$

the value of c would be calculated as 0.32 according to well known formulæ. If now the point k at which the traveling time curve bends is measured as 100 meters, the depth of the denser strata would be 32 meters.

For general information to those skilled in the art attention has already been called hereinbefore to the book entitled "Modern Seismology" by G. W. Walker, which contains all information necessary to make the required calculations referred to hereinbefore, the present method being a novel embodiment and novel practical use of the seismic theories earlier developed.

However, the factor c may in practice also be determined emperically by recording traveling time curves in a territory which has been completely explored as to its geological character by actual drilling operations. Such emperical methods would obviate making use of many of the formulæ used in natural seismological observations and calculations.

Observations of the above mentioned character also enable the ascertaining of the presence of a number of different layers of different density. In the same manner as explained hereinbefore the character and depth of the individual layers may be ascertained by observing the different bends in the traveling time curve.

Even though by these means it will not in all cases be always possible to exactly determine the particular species of mineral per se, yet it will in general suffice to ascertain to what depth the strata visibly appearing on the surface extend and what is the thickness of the more solid or looser layers following thereunder, respectively, whether the manner in which the layers succeed each other corresponds to the normal geological formation of the region or not. This point is of paramount importance in filling—in geological maps or when it becomes a question of fixing the spots in a certain region where bore-holes and shafts are to be sunk. Then again, for instance, deposits of lignite and rock-salt evince such a characteristic elastic reaction that deposits of this nature may be directly ascertained—while making due use of other observations—by means of my improved method. At the same time, the said improved method itself is extraordinarily cheap and simple, since only a few pounds of explosives are all that is required for each observation, while the seismometer employed in connection therewith is so constructed as to constitute a simple, light and handy instrument. Besides, the persons required to carry out the field operations need by no means be scientifically trained, as the computation of the results obtained by the observations may be carried out along scientific lines subsequently. In this manner the sub-surface conditions of several square miles of territory may be ascertained in a few weeks, in other words, at an extremely small fraction of time and cost required for the sinking of a single bore hole. The improved method may also be made use of, when sinking shafts in quicksand, by means of the freezing process, thus enabling the observers to ascertain to what extent the soil has already become solidly frozen.

In the place of the seismometer proper, which mechanically indicates the shocks produced and records them by the aid of a heliograph, use may likewise be made of a microphone adapted to render the shocks audible by means of an electric current in a telephone or in a galvanometer. This is based on an appreciation of the fact that, according to the elastic properties of the subsoil, the pitch of the waves produced by artificial shocks will vary, for instance more nearly resembling a "ring" than a "thud" in which case frequently characteristic accessory sounds will in addition make themselves heard. By comparison with the data obtained by means of a seismograph, or by direct reference to spots the geological structure of which is known, the true inferences may then be drawn.

To this end, acoustic appliances known as terrestrial listening devices and which have been widely employed during the late war for the purpose of determining mining operations on the part of the enemy, may be directly made use of, since devices of this kind are already suitably designed or else may be easily adapted to the purpose had in view. It will thus be understood that in the place of the pendulum use is made of a microphone, placed face down on the ground or slightly buried therein, and, instead of a photographic recorder, a telephone or galvanometer or the like is employed. I may however also record the "travelling time curve" by photographically recording the fluctuations of current arising within the microphone by means of an oscillograph or a like apparatus, the telephone being merely employed for the reception by sound. The use of a microphone further permits of ascertaining the moment at which the artificial concussions take place. By employing a microphone influenced both by the terrestrial and by the air waves one obtains two marks, one succeeding the other, in the curve recorded and which allow of easily computing the said moment. I may however also employ two separate microphones, one for the terrestrial and one for the air sounds and connect them with the oscillograph or the photographic recorder.

A device of this sort is fully equivalent, as far as accuracy of measurement is concerned, to the seismographic apparatus, but exceeds this latter in point of simplicity and light weight.

The methods hereinbefore described may however also be employed in combination, the acoustic receiver being for intance made use of in carrying out certain preliminary tests furnishing general data as to the geological character of a region, whereupon more exact special investigations are carried out with the aid of the seismometer.

I claim:

1. The method of ascertaining geological tectonic formations which comprises generating artificial seismic waves so as to cause them to be transmitted through the ground from a point selected at will and detecting the characteristics of said waves at a determinable distance from said point.

2. The method of ascertaining geological tectonic formations comprising generating artificial seismic waves so as to cause them to be transmitted through the ground from a point selected at will, detecting the characteristics of said waves and from said detected characteristics determining subsurface strata.

3. The method of ascertaining geological tectonic formations which comprises causing an explosive charge to detonate substantially at the surface of the earth so as to transmit artifically generated seismic waves through the ground from a point selected at will and detecting the characteristics of said waves.

4. The method of ascertaining geological tectonic formations which comprises generating artificial seismic waves so as to cause them to be transmitted through the ground from a point selected at will and ascertaining the travelling speed of said waves by observations at several distances from said point.

5. The method of ascertaining geological tectonic formations which comprises generating from a point selected at will and substantially at the surface of the earth artificial seismic waves through the ground and ascertaining the travelling speed of said waves so as to cause them to be transmitted by means of a seismograph set up at a distance from said point.

6. The method of ascertaining geological formations which comprises causing an explosive charge to detonate at a point substantially at the surface of the earth so as to transmit seismic waves through the ground and ascertaining the travelling speed of said waves by means of a seismograph set up at a distance from said generating point.

7. The method of ascertaining geological formations which comprises causing an explosive charge to detonate at a point substantially at the surface of the earth so as to transmit seismic waves through the ground and receiving at a measurable distance from said point those seismic waves which precede the sound waves due to said detonation.

8. The method of ascertaining geological formations which comprises causing an explosive charge to detonate so as to transmit seismic waves through the ground from a point selected at will and detecting the characteristics of said seismic waves as well as of the sound waves generated by said detonation.

9. The method of ascertaining geological formations which comprises causing an explosive charge to detonate so as to transmit seismic and sound waves through the ground from a point selected at will and detecting the characteristics of said seismic waves as well as of the sound waves generated in the ground by said detonation.

10. The method of ascertaining geological formations which comprises causing an explosive charge to

detonate so as to transmit seismic und sound waves through the ground from a point selected at will and ascertaining the travelling speed of said seismic waves as well as the character of the sound waves generated in the ground by said detonation.

11. The method of determining subsurface strata which comprises generating artificial seismic waves so as to cause them to be transmitted through the ground from a point selected at will and ascertaining the travelling speed of said waves in the different underground beds.

12. The method of determining subsurface strata which comprises generating artificial seismic waves so as to cause them to be transmitted through the ground from a point selected at will and ascertaining the travelling speeds of said waves in the different underground beds by noting the distance between the generating point and the point of observation and by observing the running time of said waves between said points.

13. The method of determining subsurface strata which comprises generating artificial seismic waves so as to cause them to be transmitted through the ground and observing the travelling speed of said waves for a plurality of known distances of travel measured at the surface.

14. The method of determining subsurface strata which comprises generating artificial seismic waves so as to cause them to be transmitted through the ground and observing the travelling speed of said waves over graduated known distances of travel measured at the surface.

15. The method of determining subsurface strata which comprises causing a plurality of explosive charges to detonate so as to transmit artificial seismic waves through the ground from points selected at will at a plurality of distances from the detecting point and ascertaining the travelling speed of said waves by recording the running times of said waves on a seismograph at detecting point.

16. The method of determining the depth of subsurface strata which comprises causing an explosive charge to detonate so as to transmit artificial seismic waves through the ground from a point selected at will and ascertaining the running time and the travelling speed of said waves by recording on a seismograph.

In testimony whereof I affix my signature.

DR. LUDGER MINTROP.

McCollum 1928

Am 5. Juni 1928 erhielt der Amerikaner Burton McCollum das folgende Patent No. 1,672,495 mit Priorität vom 14. August 1922.

Patented June 5, 1928. **1,672,495.**

UNITED STATES PATENT OFFICE.

Burton McCollum, of Chevy Chase, Maryland.

Method and Apparatus for Determining the Contour of Subterranean Strata.

Application filed August 14, 1922, Serial No. 581,866. Renewed March 5, 1928.

My invention relates to methods of determining the contour of subterranean strata or boundaries of geologic formations, and has among its objects the study of the geological conditions at depths that cannot be conveniently and economically reached by ordinary means. In particular, I have found that by the use of my invention it is possible to determine the location of deposits of various ores, mineral oils, and other valuable materials. My invention depends on the well known principle that if a sound wave be transmitted through the earth partial reflection of the wave takes place at the boundary between any two masses which differ in respect to certain of their physical properties. By properly utilizing the transmitted and reflected waves I am able to determine accurately the location, shape, and extent of such boundaries, which information is of great value for the purposes stated above. My invention is further described in the following specification, reference being made to the accompanying drawings.

Of the drawings:

Fig. 1 is a diagram showing the relation between the contour of subsurface strata and the occurence of certain valuable mineral deposits.

Fig. 2 shows the principle of methods that have heretofore been unsuccessfully tried to accomplish the object here sought.

Figs. 3 and 4 are typical examples of records showing difficulties confronting previous attempts to accomplish the results obtained by my invention.

Fig. 5 shows in diagrammatic form a practical embodiment of my invention.

Fig. 6 shows a typical record obtainable through the use of my invention.

Fig. 7 shows in diagrammatic form the principle of an acoustic shield which I use to improve the character of the graphic records obtained in connection with the application of my invention.

Fig. 8 shows a combination of sound receiving devices which I have found particularly valuable.

Fig. 9 shows an arrangement of portions of the apparatus for determining the velocity of sound in the earth.

Fig. 10 shows a preferred method of fixing the sound receiving device in contact with the earth.

Fig. 11 shows an improved form of a sound receiving device which is useful in connection with my invention.

Figs. 12 and 13 show diagrammatic arrangements of microphonic devices which I have found useful in connection with my invention.

For the sake of clearness and brevity my invention is described below with particular reference to but one of its practical applications, namely, the location of deposits of mineral oils and natural gases. It will readily be seen however, that the method may be applied to determining the location of many other kinds of mineral deposits.

It is well known that in regions where deposits of oil or gas may be encountered the deposits are not distributed generally throughout the area, but are highly localized in pools occupying a relatively small portion of the total potential oil bearing area. The location of these pools is governed by a well known principle illustrated in Fig. 1. In this figure, ⟨1⟩ is the surface of the ground and ⟨2⟩ a dense subterranean stratum of irregular contour concave upward at ⟨3⟩ giving a synclinal fold, and convex upward at ⟨4⟩ giving an anticlinal fold. It is well known that in a potential oil bearing region the oil and gas accumulate locally at ⟨5⟩ under the anticlinal fold ⟨4⟩, it being forced upward into this position by the heavier salt water stratum ⟨5ᵃ⟩ beneath it. The problem of locating a pool of oil in a potential oil bearing region is therefore, one of determining the location of these anticlinal folds in the subterranean rocks. This latter, as stated above, is one of the objects of my invention.

Heretofore, numerous investigators have endeavored to determine the contour of subterranean strata by the use of sound waves reflected from them, but up to the present time none of these methods has been successful. Fig. 2 illustrates some of the fundamental difficulties that have confronted all these previous attempts and prevented their succesful application.

In their fundamental principles these methods have all comprised a source of sound ⟨7⟩ which has heretofore always been placed either on or below the surface of the earth. The theory is that sound travels out radially in all directions and is in part reflected from the boundary 2, 3, 4, 8, 10, and 12, the part of the wave incident at the point ⟨8⟩ being reflected to the point ⟨9⟩, that part incident at ⟨10⟩ being reflected to the point ⟨11⟩,

B. McCOLLUM

METHOD AND APPARATUS FOR DETERMINING THE CONTOUR OF SUBTERRANEAN STRATA.

Original Filed Aug. 14, 1922.

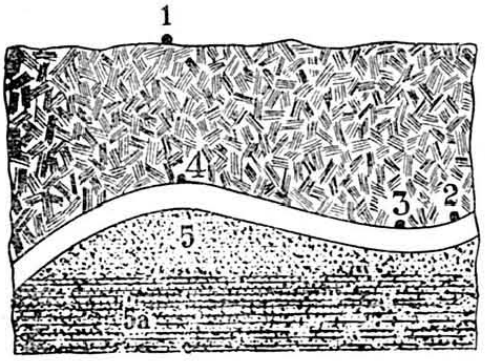


FIG. 1.

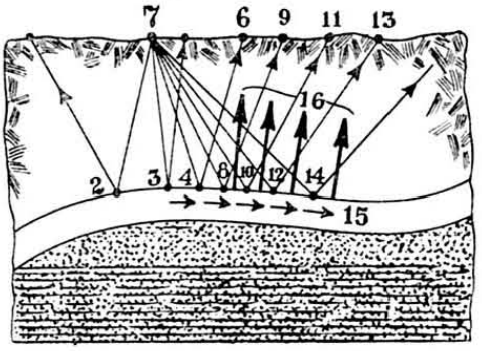


FIG. 2.

FIG. 3.

FIG. 4.

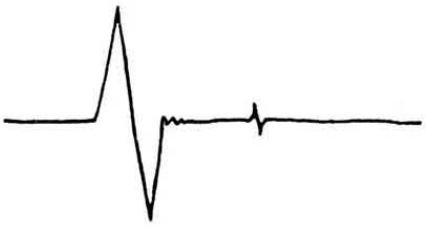


FIG. 6.

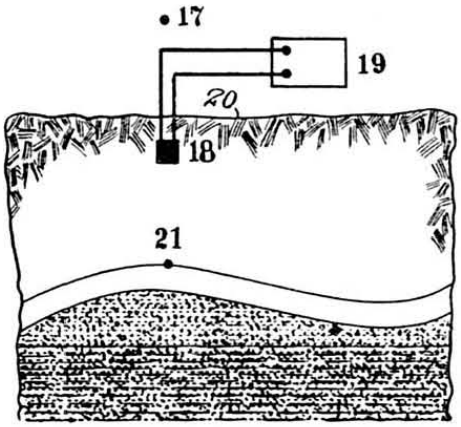


FIG. 5.

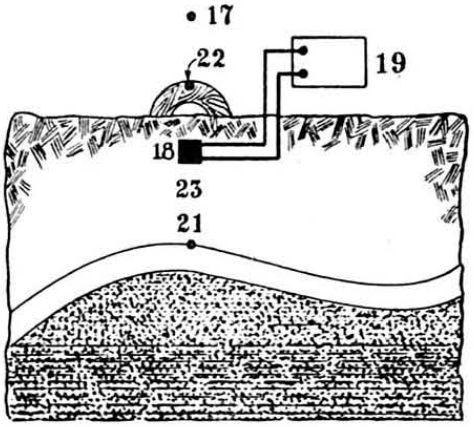


FIG. 7.

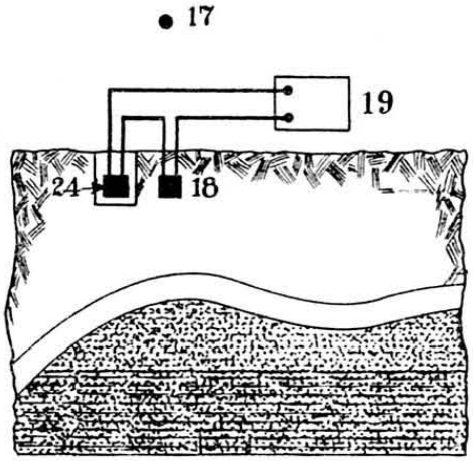


FIG. 8.

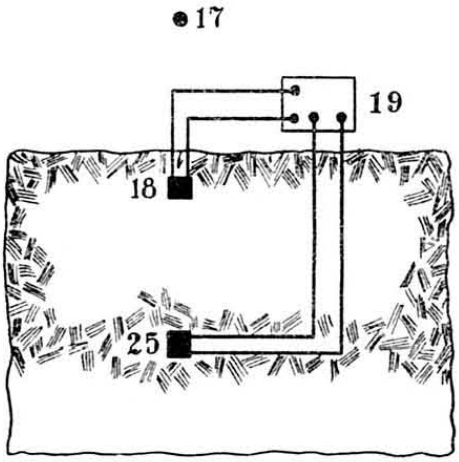


FIG. 9.

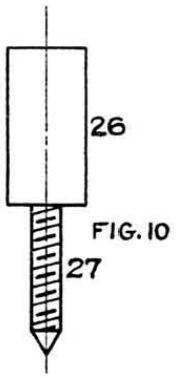


FIG. 10

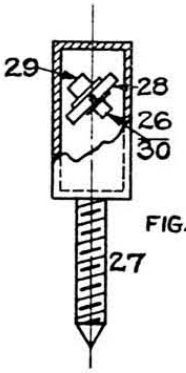


FIG. 11

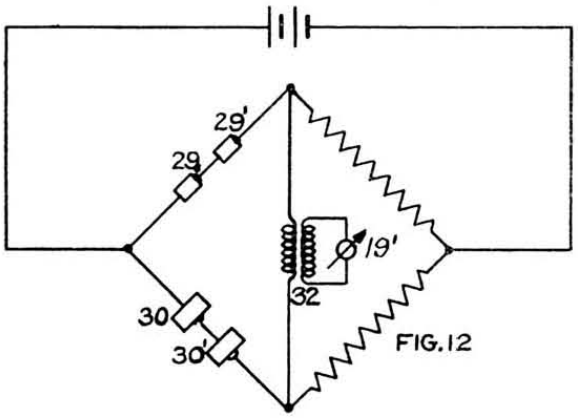


FIG. 12

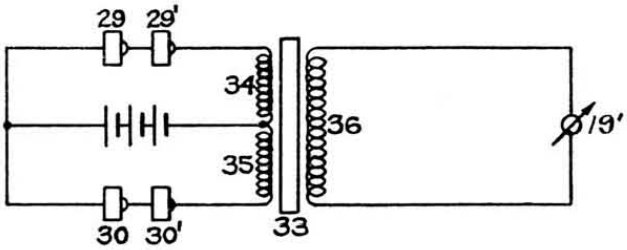


FIG. 13

Inventor
Burton McCollum

and so on, the angle of reflection being equal to the angle of incidence. It is evident that if only this simple condition existed and if we could clearly distinguish at any point of known position such as at ⟨11⟩ for example, between the direct transmitted wave ⟨14⟩ which goes either directly or through shallow subsurface strata to the point ⟨11⟩, and the wave reflected to the point ⟨11⟩ from the point ⟨10⟩, we could by well known means calculate the depth of the point ⟨10⟩ on the reflecting surface. Serious difficulties of a practical nature prevent the realization of this simple set of conditions. In the first place, the velocity of sound in the rock layer ⟨2⟩ is practically always much greater than in the surface strata. On this account when the slowly travelling sound wave reaches the nearest point, as at ⟨3⟩, of the reflecting rock layer, a sound wave of relatively high velocity moves along the rock layer as shown by the arrows ⟨15⟩, and all the while a portion of the energy of the wave is being diffracted upward into the overlying strata as indicated by the arrows ⟨16⟩, and this diffracted energy moves upward and may reach the point ⟨11⟩ before the arrival of the true reflected wave from the point ⟨10⟩, since this latter, although travelling by a somewhat shorter path, must travel all the way through the medium of low velocity. Furthermore, it will be seen that this initial diffracted disturbance arriving at ⟨11⟩ will be immediately followed by others caused by the transmitted wave striking portions of the rock layer ⟨2⟩ at ⟨8⟩ and other points intermediate between ⟨12⟩ and ⟨10⟩, to that a continuous train of diffracted disturbances will be detected at ⟨11⟩ which will completely obscure the arrival of the true reflected wave.

Fig. 3 shows a typical record which reveals clearly the seriousness of this difficulty in practice. This is a record of disturbances received at the detector placed at a point corresponding to the point ⟨11⟩ due to a single quick pulse of sound sent out from the source at the point ⟨7⟩. In consequence of the combined effect of the direct transmitted waves, of which there are three distinct types, namely, a compression wave, a transverse wave, and a surface or Rayleigh wave, all of which travel at different velocities and therefore reach the detector at different times, and further, the innumerable diffracted waves due to the reaction on the two former by the subterranean reflecting surfaces as described above, the record becomes so complex that the effect of the arrival of any pure reflected wave is entirely obscured so that the record is entirely worthless for the purpose desired.

It will be evident that this difficulty will be the greater the more remote is the detector at the point ⟨11⟩ from the source ⟨7⟩, and that it can be diminished by placing the detector close to the source. This is shown by comparing Figs. 3 and 4. These two records are the result of the same source of sound at ⟨7⟩ but in Fig. 3 the receiver was 150 feet from the source, while in Fig. 4 it was but 50 feet away. Interchanging receivers give identical effects showing that the difference in form is not due to the influence of the receivers. The sensitivity of the recording instrument was, of course, adjusted to give suitable sensitivity in the two cases.

Although these diffraction effects may be thus diminished by bringing the detector closer to the source, the disturbances produced by the direct transmitted waves mentioned above become much more violent in comparison with the reflected waves so that if the distance is made short enough to substantially eliminate diffraction effects the transmitted waves completely obscure the advent of any reflected waves. It is evident, therefore, that no location of the detector can be found that will permit it to distinguish definitely between the true reflected wave and disturbances due to diffraction and direct transmission. Similar disturbances result in the case wave trains are used in lieu of single pulses.

I have now invented a very simple expedient whereby the foregoing troubles can be entirely obviated. I accomplish this end by placing the detector or the source, preferably the latter, high up in the air and so arrange the two that the direction of the reflected waves reaching the detector makes only a very small angle with the direction of the transmitted waves, preferably not more than a few degrees. This angle is made small, as in the arrangements hereinafter described, by causing the distance, measured vertically between the shot or sound wave source and the detector, great as compared with the horizontal distance between the detector and the sound wave source our shot. By keeping this angle small the diffraction disturbances are avoided and by placing the source at a considerable elevation above the surface of the earth the difficulties due to the direct transmitted wave are not only eliminated, but this wave becomes very useful as will appear from the following detailed description of the essential features of my invention.

My invention will be clearly understood by reference to Fig. 5. The source of sound ⟨17⟩ is placed high up in the air. This source may be of any suitable kind, but I prefer to use a short abrupt sound such as that produced by firing a charge of explosive or by the sudden release of gas under pressure. Approximately below the source ⟨17⟩ and either on or slightly below the surface of the earth, I place a detector ⟨18⟩ which may be of any type, such as a microphone, piezo-electric crystal, or electromagnetic detector. Wires extend from this detector to a recording device ⟨19⟩ of a type to record the difference in time between two or more events. The well known oscillograph having constants adapting it to this particular work is typical of the recording devices which I have found suitable. It will be evident that if a sudden sound be produced at the source ⟨17⟩ the wave will travel downward and strike the surface of the earth ⟨20⟩ where a considerable part of the energy will be reflected and pass of into space. A part, however, will be transmitted to the earth and this portion immediately produces an effect on the detector ⟨18⟩ which is near the surface and this effect is recorded on the recorder ⟨19⟩. This point on the record is then used as the zero of time to which subsequent recorded events are referred.

The wave then travels downward until it strikes the first reflecting surface ⟨21⟩ where a part of its energy is reflected upward to the surface, where it again affects the detector, and the time elapsing between the arrival of the reflected wave and the arrival of the transmitted wave will be determined. The velocity of sound in the overlying stratum can be determined and the depth of the surface from which reflection takes place can be readily calculated from this velocity and the measured time interval between the arrival of the direct transmitted wave and the reflected wave. It will be evident that if the depth of the reflecting surface be determined at a sufficient number of points the contour of this surface will be known.

It will be quite evident that with this arrangement of apparatus the effects on the detector of both the Rayleigh wave and the transverse wave in the earth will be eliminated, and only those effects due to the compression wave will be recorded in either the transmitted or reflected wave, thereby greatly simplifying the record. It will also be very evident that all diffraction effects, such as those described above, will not affect the detector. In consequence of this a very simple form of record, like that shown in Fig. 6 is obtained where the different events can be clearly distinguished and the time intervals accurately measured.

A further consideration of very great practical importance has to do with the relative intensity as shown by the record of the direct wave, actuating the receiving device, and of the reflected wave coming back from the surface under investigation. It will be seen that the sound wave emanating from the source ⟨17⟩ travels out spherically in all directions, and the intensity of the wave at any point is governed by the inverse square law. Suppose, for example, that the height of the source ⟨17⟩ above the detector ⟨18⟩ is equal to the depth of the reflecting surface ⟨21⟩. In that event when the sound wave reaches the detector ⟨18⟩ it has a certain intensity. Suppose now that 100 % of the energy of the wave is reflected from the surface ⟨21⟩. It will be evident that when the reflected wave front has travelled back again to the detector ⟨18⟩ the total distance which it will have traversed from the source ⟨17⟩ will be three times as great as the distance traversed by the direct wave in going from the source ⟨17⟩ to the detector ⟨18⟩. The intensity of the reflected wave when it reaches the detector would therefore be only one-ninth of the intensity of the direct wave. If, as is usually the case in practice, only a fraction of the energy is reflected from the surface ⟨21⟩, the intensity of the reflected wave becomes still further reduced. If now the sensitivity of the arrangement is made great enough to give a sufficiently large effect due to the reflected wave, the disturbances due to the direct wave will be so great that they may interfere seriously with the proper interpretation of the records. It will be evident, therefore, that in general it will be necessary to take steps to increase the amplitude of the reflected wave, relative to that of the direct wave. I have devised several means of accomplishing this result, each and all of which comprise a part of my invention.

One of the means whereby I increase the intensity of the reflected wave relative to that of the direct wave, is by putting a source of sound very high up in the air as compared to the depth of the stratum under investigation. As seen from the example given above, if the depth of the stratum is substantially equal to the height of the source, then assuming 100 % reflection the intensity of the reflected wave at the receiver will be only one-ninth of the intensity of the direct wave. Suppose, however, that the source be put to a height above the detector of say five times the depth of the reflecting stratum under study. In that case the reflected wave travelling back to the detector will have travelled about 40 % farther from the source than the direct wave, when the two pass the detector. Applying the inverse square law it will be seen that in this case, assuming 100 % reflection, as before, the intensity of the reflected wave at the detector will be 1/1.96, or approximately one-half of that of the direct wave, as compared with the ratio one-ninth, when the source is placed at the lesser elevation. It will therefore be seen that by putting the source very high in the air in comparison with the depth of the stratum under investigation, it is possible, because of the inverse square law of propagation of sound waves, to greatly increase the intensity of the reflected wave in comparison with that of the direct wave. In practice I prefer to elevate the source to a height at least as great as the depth of the reflecting stratum, and preferably to several times this height.

It is not to be understood that there is a critical height of the source 17 of the sound energy utilized which under all circumstances is to be exceeded, nor is it necessary to know either the height of the source 17 nor the depth of the reflecting stratum. In actual practice the procedure is substantially as follows:

A sound wave is produced at any convenient height, as by a charge exploded, say, 1,000 or 2,000 feet above the earth's surface, and a suitable record, as photographic, is taken of the waves actuating or influencing the detector. If upon examination of the record so taken there is revealed a reflected event clearly distinguishable from the after effects of the direct wave, it shows that the explosion occurred at a sufficient height. The significant fact is the time interval between the arrival at the detector of the direct and reflected waves, and it is only necessary to know this time interval, which, when multiplied by the velocity of sound in the overlying medium, gives a distance which is twice the depth of the reflecting stratum. If, on the other hand, the record shows no reflected event clearly distinguishable from the after effects of the direct wave, it is proof that the source of the sound energy was not sufficiently high above the detector, and in such case it is only necessary to take another record with the source of sound at a greater elevation.

A second means whereby I secure an increased ratio of the intensity of the reflected and direct waves, is by the use of an acoustic shield interposed between a source and the detector. One form of this is shown

in Fig. 7. The acoustic shield ⟨22⟩ which can be made up in any form to be substantially sound proof, is placed between the source ⟨17⟩ and the detector ⟨18⟩ and preferably close to the latter. In practice I prefer to put the shield ⟨22⟩ near or on the surface of the earth, as shown in Fig. 7. It will now be seen that the sound energy travelling downward from the source ⟨17⟩ strikes the shield and the earth all around it. The shield ⟨22⟩ may be designed either to reflect or absorb the energy striking it, in which event it will be seen that no sound energy travels directly into the earth at the detector ⟨18⟩. However, in the region all around the shield, the energy passes downward into the earth as will readily be seen, and is gradually diffracted inward underneath the shield into the region ⟨23⟩. By the time the reflected wave from the surface ⟨21⟩ reaches the detector ⟨18⟩ the diffraction will have been sufficient to give nearly a uniform distribution of energy in the reflected wave, and the detector will therefore be actuated by the reflected wave with nearly as much intensity as if the acoustic shield ⟨22⟩ did not exist. At the same time there will be very little effect due to the direct wave, since only a very small amount of the energy of the direct wave will be diffracted directly from the edges of the acoustic shield to the source ⟨18⟩. I have found that in this way I can reduce the intensity of the direct wave at the receiver to a small fraction of what it would be without the shield, and at the same time secure nearly as much effect on the detector from the reflected wave as if the shield did not exist.

A third method which I have devised for reducing the amplitude of the direct wave in comparison with that of the reflected wave is shown in Fig. 8. It is well known that because of the very great difference in the acoustic properties of the earth and air, a sound wave travelling either in the air or in the earth reaching the surface of the earth will be nearly all reflected back into the medium in which it is travelling, thus, as pointed out above, the wave coming from the source ⟨17⟩ up in the air, has most of its energy reflected at the surface of the earth back again into the air and off into the atmosphere. Similarly, that part of the energy which goes into the earth and is reflected back toward the surface from the reflecting surface ⟨21⟩, will on arrival at the surface be again reflected downward, only a small fraction of its energy returning again to the air. By taking advantage of this principle I am able to reduce the intensity of the effect of the direct wave an the detector to any desired degree without materially reducing the intensity of the reflected disturbance which it is desired to record. This is accomplished by the use of two receiving devices as shown in Fig. 8. Here one receiving device ⟨18⟩ is placed in the earth as previously described, in which case it is actuated only by that part of the sound energy passing into the earth. The second receiving device ⟨24⟩ is placed to be responsive to the direct air wave to a much greater degree than to the reflected ground wave, and very close to the detector ⟨18⟩. In order to make clear the method of functioning of this agreement, let us assume that the sensitivity of the detector ⟨24⟩ bears to the sensitivity of the detector ⟨18⟩ the same numerical ratio as the sound energy transmitted to the earth bears to the total sound energy incident on the surface of the earth from the source ⟨17⟩. In that case it is obvious that the total effect produced on the detector ⟨24⟩ will be just equal to the total effect produced on the detector ⟨18⟩, due to the direct wave coming from the source ⟨17⟩. Consider now what happens when the reflected wave arrives again at the surface after having been reflected from the subsurface ⟨21⟩. This wave travelling in the earth gives full effect on the detector ⟨18⟩ embedded in the earth, but on reaching the surface nearly all of its energy is again turned back in a downward direction, only a small fraction of it being transmitted to the air where it can affect the detector ⟨24⟩. It will be seen, therefore, that the effect of the reflected wave will be enormously greater on the detector ⟨18⟩ than it is on the detector ⟨24⟩, whereas the effect of the direct wave on the two detectors will be substantially equal. If now the two detectors ⟨18⟩ and ⟨24⟩ are coupled together in such manner that they tend to neutralize each other as regards their effect on the recording device, then the direct wave will produce no effect on the records provided the two detectors are adjusted to give equal and opposite impulses, whereas the reflected wave will be recorded through the detector ⟨18⟩ at almost its full value. In practice I prefer not to completely eliminate the direct wave on the record so that I do not adjust the detectors ⟨18⟩ and ⟨24⟩ so that they exactly neutralize each other. I prefer to adjust them so that the resultant effect of the two, due to the direct wave, is only a small fraction of the effect produced on either instrument alone, as this gives an indication on the record showing the time of arrival of the direct wave, which is useful as a basis of reference for the time scale. It will be seen, therefore, that by proper adjustment of the relative sensitivity of the two detectors in Fig. 8, the relative intensity as shown on the record of the direct and reflected waves can be controlled to any desired extent. In practice any one of the above described means for controlling the relative intensity of the effects of the direct and reflected waves may be used, or any two or all of them may be used in combination if desired.

In order to measure the velocity of sound in the stratum between the surface of the earth and the reflecting surface under investigation I place two receiving devices in the earth as shown in Fig. 9, one ⟨18⟩ at a suitable distance below the surface, and the second ⟨25⟩ a known distance below it, substantially in line with the direction of propagation of the sound wave. The difference in time of arrival of the sound wave at the two receivers is measured by means of a recorder from which, and the known distance between the receivers, the velocity is readily obtainable. In some cases where there is reason to believe that the velocity of sound in the overlying stratum may vary with depth, several indicating devices may be placed at various depths in order that the law of variation of velocity with depth may be determined.

I have found that in order to secure a good sensitivity in the indicating devices and also in order to eliminate spurious disturbances due to vibrations of receiving devices themselves, it is desirable to have the microphones very firmly fixed in contact with the earth. This can be done by making a hole, placing the microphone in it filled either with earth or other suitable binding material and thoroughly tamping the filling material in place around and above the detector. This procedure, however, is difficult and time consuming and renders very difficult the recovery of the indicating device, especially when buried to a considerable depth, after the records have been taken.

I have devised a very simple and convenient means of firmly attaching the receiving device to the earth which eliminates these troubles. This is shown in Fig. 10, where the receiving device is mounted inside of a rigid case ⟨26⟩ which may be of metal or other suitable material. In the base of this case is firmly attached a large screw ⟨27⟩, suitable for screwing into the earth. To place a receiving device in position I first bore a small hole, large enough to accommodate the receiver and extending to the desired depth, after which the receiver is placed down in the hole with the screw downward and by means of a suitable long handled wrench the receiver case is turned so as to drive the screw firmly into the earth. After the records have been taken the receiver can readily be unscrewed from its position and brought to the surface. As stated above, any one of the usual types of receiving devices may be used. I have found, however, that instead of using a single receiving element it is often desirable to use a considerable number of such elements grouped in a single unit in order to increase the sensitivity and reliability of the receiving apparatus. This is particularly true in case carbon microphones are used as receiving devices. These microphones, when used singly exhibit certain inherent instabilities frequently called frying, which gives rise to more or less erratic pulsations of current flowing in the microphone, which in turn produces disturbances on the record, especially where a very sensitive recorder is used. This trouble is especially serious if one attempts to use a very large current in the microphone in order to increase the sensitivity. This difficulty can be greatly minimized by using a large number of microphone elements connected in parallel, but such a simple arrangement cannot be used in practice. It is well known that in order to use a microphone successfully and secure good sensitivity in detecting disturbances of relatively low frequencies, it is necessary to use it in conjunction with a mutual inductance having an iron core, and further, that the current flowing through the primary of this mutual inductance, which of course is the current flowing through the microphone, must be kept small enough so as not to produce saturation in the iron core. This fact places a limit on the number of microphones that can be used in parallel on a single mutual inductance, and with the usual forms of inductance practically nothing is gained by the use of more than one or two microphones in this way. I have, however, devised an arrangement whereby the ordinary forms of iron core mutual inductance may be used effectively with a large number of microphone elements in proper combination.

The essential elements are shown in Fig. 11. Inside the receiver case ⟨26⟩ is mounted a rigid plate ⟨28⟩, preferably tilted at an angle with respect to the axis of the case ⟨26⟩. I prefer to make this angle between 30° and 60°, but larger or smaller angles may be used if desired. A terminal of each of the microphone elements ⟨29⟩ and ⟨30⟩ is generally attached to the plate ⟨28⟩, and interposed between this plate and the other terminal of each microphone is placed a cushion of suitable fabric, such as cloth or other material, to serve as a damping agent to prevent vibrations in the microphone when it is actuated. Any desired number of such pairs of microphone elements may be mounted inside the case ⟨26⟩. The receiver case is fixed to the ground with its axis in the direction of the earth displacement which it is sought to record, in this case being vertical. It will be evident that when the earth vibrates due to the passage of a sound wave or pulse, the receiver case is moved up and down with the earth while the heavy case of the microphone elements ⟨29⟩ and ⟨30⟩ tend to stand practically stationary. In consequence of this, it will be seen that the pressure on the microphone elements ⟨29⟩ and ⟨30⟩ will vary as the wave passes, thus causing vibrations in their resistance. It will be noted that when the pressure on the microphone element ⟨29⟩ is increased due to the downward movement of the case ⟨26⟩, the microphone ⟨30⟩ will decrease so that the pulsations of resistance on the two microphone elements will be opposite. In order to make the effects of the two groups cumulative on the recording instrument, either of two arrangements may be used, one of which is shown in Fig. 12. Here all of the microphone elements ⟨29⟩, ⟨29'⟩ etc., which are similarly mounted with respect to the plate ⟨28⟩, are placed in one arm of a Wheatstone bridge while all those ⟨30⟩, ⟨30'⟩, etc., which are so mounted as to give resistance variations opposite to the ones in group ⟨29⟩, ⟨29'⟩, etc., are placed in the adjacent arm of the bridge. It will be obvious that as the resistance of one group increases and that of the other decreases, the two effects are cumulative in disturbing the balance of the bridge, and therefore in effecting the indications of the oscillograph or other instrument ⟨19'⟩ coupled across the diagonal of the bridge. The mutual inductance ⟨32⟩ may or may not be used, as desired. The second arrangement and the one which I prefer to use, is shown in Fig. 13. Here a mutual inductance is used, preferably one having an iron core ⟨33⟩ provided with two primary windings ⟨34⟩ and ⟨35⟩ differentially connected, the winding ⟨34⟩ being in series with the group of microphone elements ⟨29⟩, ⟨29'⟩, etc., and the winding ⟨35⟩ being in series with the group ⟨30⟩, ⟨30'⟩, etc. With this arrangement a large number of microphone elements may be used in each group, and correspondingly

large currents sent through the two differentially wound primary coils ⟨34⟩ and ⟨35⟩ without danger of saturating the magnetic circuit. When the current in one circuit increases while that in the other decreases, the effects are cumulative in causing changes in the magnetization of the iron core ⟨33⟩, and hence in actuating the oscillograph ⟨19'⟩, which is connected to the single secondary coil ⟨36⟩. As here shown, the microphone elements ⟨29⟩, ⟨29'⟩, etc., are grouped in series. It will be evident that parallel or series multiple grouping may be used with equal effect, provided the number of turns in the primary coils ⟨34⟩ and ⟨35⟩ of the mutual inductance are made to correspond to the number of microphone elements in series.

A careful consideration of the foregoing discussion reveals that one of the fundamental features of my invention comprises the placing of a source of sound and a receiver in such relation to each other and to the reflecting surface, the depth or contour of which is to be studied, that the angle between the direct transmitted and the reflected waves affecting the receiver is small, whereby the disturbance due to the surface waves, transverse waves, and the innumerable diffraction effects above discussed, are made to disappear. This might, of course, be done by placing both source and receiver in the earth, provided one is placed at a considerable depth, in order to have the receiver remote from the source. It is, however, very difficult, expensive, and time consuming to place the instruments at a great enough depth to be effective. Furthermore, experience has shown that if the source be placed in the earth the available sources of a quick, sharp pulse, such as the firing of a charge of explosive, produce a violent disruptive effect in the earth immediately surrounding it, which in turn tends to change the character of the disturbance from a quick, simple pulse to a complex and greatly prolonged disturbance, thus defeating the object of the arrangement. I have found, however, that if the source of sound be placed high up in the air, preferably high enough so that the wave front striking the earth will be practically a plane wave, this difficulty will be entirely avoided. If the wave front striking the earth be nearly plane, the subsequent diminution of intensity with distance, both before and after reflection, will be relatively slight so that the ratio of the intensity of the transmitted and of the reflected waves will be much smaller than if the wave front striking the earth has a small radius of curvature. For this reason if the the source be placed high up in the air, the intensity of the shock imparted to the earth at any point may be very slight, and nowhere sufficient to cause permanent deformation of the medium, and still give a reflected wave of ample intensity for detection. On the other hand, if the source be placed on the surface or imbedded within the earth, the intensity of the shock at points very close to the source must be very great in order that the reflected wave may be of sufficient intensity, and in practice it is found that permanent deformation of the earth very close to the source always occurs, thus giving rise to the increased complexity and prolongation of the wave above described. It will therefore be apparent that the placing of the source up in the air at a considerable distance from the earth, as hereinabove described, is of fundamental importance in eliminating certain of the practical difficulties that have heretofore been encountered in attempting to explore subterranean strata through the medium of sound waves. Any suitable means may be used for placing the source at a proper elevation. Where circumstances are such that a height of not more than about 100 feet is sufficient, a light telescoping pole or tower can be used successfully. As a rule, however, I have found that it is desirable to place the source at a considerably greater elevation, and when this is desired some other means can be conveniently used for putting the source up in the air. Any one of a number of devices may be used if desired, such as a captive balloon, a kite, an air plane, or recourse may be had to projecting a charge of explosive into the air, the same being fired by a time fuse in accordance with principles well known to military ballistics.

For the sake of brevity in the appended claims, the term "aperiodic" as applied to the sound produced by the source includes an abrupt sound wave or a sound wave impulse or rapidly decadent sound waves, produced by a shot, explosion or equivalent means herein described, as distinguished from sustained, continuous or undamped sound waves.

I claim:

1. The method of determining the contour of a subterranean stratum which consists of sending out a sound wave from a source of sound, causing the said sound wave to be transmitted through the earth to the said subterranean stratum and reflected therefrom, measuring the time interval elapsing between the passage of the said sound wave over a known point at a distance from said source and the passage of the reflected wave over the same point, measuring the velocity of sound in the medium beetwen the said known point and the said subterranean stratum and calculating the distance between the said known point and the said subterranean stratum from the said time interval and the said velocity, the said source and the said known point being so placed with respect to the said subterranean stratum that the path traversed by the direct wave is substantially identical with the path traversed by the reflected wave.

2. The method of locating a subterranean stratum, which comprises producing an aperiodic sound wave, causing said wave to be transmitted through the earth to the subterranean stratum and to be reflected therefrom, measuring the time interval elapsing between the passage of said wave past a known point and the passage of the reflected wave past the same point, determining the velocity of sound in the medium between said known point and said stratum, and determining the distance between said known point and said stratum

from said time interval and said velocity, the place of production of said sound wave and said known point being so positioned with respect to said stratum that the paths traversed by the direct and reflected waves are substantially identical.

3. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing sound at a distance above the surface of the earth, and detecting, and whose distance horizontally from the source of said sound is small compared with its distance vertically there from the sound reflected from a subterranean formation.

4. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing sound at a substantial distance above the surface of the earth, and detecting the sound reflected from a subterranean formation at a point through which both the direct and reflected waves pass.

5. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing sound at a distance above the surface of the earth, and detecting, at a point adjacent the earth's surface and whose distance horizontally from the source of said sound is small compared with its distance vertically therefrom the sound reflected from a subterranean formation.

6. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing sound at a distance above the surface of the earth, and detecting at a point adjacent the earth's surface the sound reflected from a subterranean formation, said point being located adjacent substantially identical paths in which the direct and reflected waves are transmitted.

7. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing an aperiodic sound wave at a distance above the surface of the earth, and detecting, and whose distance horizontally from the source of said sound is small compared with its distance vertically therefrom the sound reflected from a subterranean formation.

8. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing an aperiodic sound wave at a distance above the surface of the earth, and detecting, at a point adjacent the earth's surface and whose distance horizontally from the source of said sound is small compared with its distance vertically therefrom the sound reflected from a subterranean formation.

9. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing sound at a distance above the surface of the earth, and detecting, and whose distance horizontally from the source of said sound is small compared with its distance vertically therefrom the sound transmitted to and reflected from a subterranean formation.

10. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing sound at a distance above the surface of the earth, and detecting the sound transmitted to and reflected from ab subterranean formation at a point adjacent substantially identical paths over which the direct and reflected waves are transmitted.

11. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing an aperiodic sound wave at a distance above the surface of the earth, and detecting, and whose distance horizontally from the source of said sound is small compared with its distance vertically therefrom the sound transmitted to and reflected from a subterranean formation.

12. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises producing an aperiodic sound wave at a distance above the surface of the earth, and detecting the sound transmitted to and reflected from a subterranean formation at a point adjacent substantially identical paths over which the direct and reflected waves are transmitted.

13. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises transmitting sound from a source to a subterranean formation and reflecting it therefrom, producing an effect by the direct sound wave, producing a second effect by the reflected sound wave at a point whose distance horizontally from said source is small compared with its distance vertically therefrom, and producing a composite indication by said effects.

14. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises transmitting sound originating at a distance above the earth to a subterranean formation to be reflected therefrom, producing a plurality of effects by the direct and reflected sounds, and producing a composite indication by said effects, said effects being produced at points adjacent substantially identical paths over which the direct and reflected sounds are transmitted.

15. In a system of the character described, means for transmitting sound through the earth to a subterranean formation to be reflected therefrom, a plurality of detectors affected to greater extents, respectively, by direct and reflected sound, indicating means, and means for causing said detectors to affect said indicating means in opposite senses.

16. In a system of the character described, means for transmitting sound through the earth to a subterranean formation to be reflected therefrom, a plurality of detectors affected to greater extents, respectively, by direct and reflected sound, indicating means, and means for causing said detectors to affect said indicating means in opposite senses, said detectors disposed adjacent substantially identical paths over which the direct and reflected sound is transmitted.

17. In a system of the character described, means for transmitting sound through the earth to a subterranean formation to be reflected therefrom, a plurality of detectors affected to greater extents, respectively, by the direct and reflected sound, and indicating means controlled by said detectors, the source of said sound disposed at a distance above the surface of the earth.

18. In a system of the character described, means for transmitting sound trough the earth to a subterranean formation to be reflected therefrom, a plurality of detectors affected to greater extents, respectively, by direct and reflected sound, indicating means, and means for causing said detectors to affect said indicating means in opposite senses, the source of said sound disposed at a distance above the surface of the earth.

19. In a system of the character described, means for transmitting sound through the earth to a subterranean formation to be reflected therefrom, a plurality of detectors affected to greater extents, respectively, by the direct and reflected sound, and indicating means controlled by said detectors, the sound produced by said means consisting of an aperiodic sound wave.

20. In a system of the character described, means for transmitting sound through the earth to a subterranean formation to be reflected therefrom, a plurality of detectors affected to greater extents, respectively, by the direct and reflected sound, indicating means, and means for causing said detectors to affect said indicating means in opposite senses, the sound produced by said means consisting of an aperiodic sound wave.

21. In a system of the character described, means for transmitting sound through the earth to and causing reflection of sound from a subterranean formation, a plurality of sound detectors respectively influenced principally by the direct and reflected sound, a time-indicating device, a transformer in whose secondary circuit said device is connected, and said detectors connected in circuit with the primary windings of said transformer, said primaries being differentially related.

22. In a system comprising a device for determining the contour of a subterranean stratum and comprising a source of sound, sound detectors, and a sound measuring device, the method which comprises placing said source in the air above the surface of the earth, disposing certain of the sound detectors in contact with the earth at points intermediate said sound source and the subterranean stratum, and substantially in line with the normal extending from the subterranean stratum through said source, and placing other of the sound detectors so as to be actuated substantially only by an air wave, and so associated that its effect is opposed to that of sound detectors in contact with the earth, and coupling the time measuring device to said detectors in such manner as to measure the time interval elapsing between the arrival of a direct sound wave at the detectors in earth and air, and of one or more reflected sound waves at the detectors in earth.

23. In a system for determining the contour of a subterranean stratum and comprising a source of sound, sound detectors, and a time measuring device, the method which comprises placing the source of sound in the air above the surface of the earth at a distance greater than the depth of the subterranean stratum, placing the detectors in contact with the earth substantially in line with the normal extending from the subterranean stratum through said source, and coupling the time measuring device to said detectors to measure the time interval elapsing between the arrival of successive sound waves at said detectors.

24. A system for determining the contour of a subterranean stratum comprising a source of sound, a time recording device, microphonic devices, and means for mounting said microphonic devices to effect opposite phase relation of pulsating change of their resistances in their effect upon said recording device.

25. A system for determining the contour of a subterranean stratum comprising a source of sound, a time recording device, microphonic devices electrically connected in parallel, a differentially wound transformer having primary coils connected respectively in series with said microphonic devices and a secondary connected to the time recording device, and means for mounting said microphonic devices to effect opposite phase relation of the pulsations of their resistances in their effect upon said recording device.

26. In the art of exploring subterranean regions, the method which comprises transmitting sound to a subterranean formation to effect reflection therefrom, producing a plurality of effects at points adjacent substantially identical paths over which the direct and reflected sounds are transmitted, and producing a composite indication by said effects.

In testimony whereof, I affix my signature.

BURTON McCOLLUM.

Karcher 1929

Das amerikanische Patentamt erteilte ferner unter dem 19. März 1929 John Clarence Karcher das nachstehende Patent No. 1,706,066 mit Priorität vom 30. März 1926.

Patented Mar. 19, 1929. **1,706,066.**

UNITED STATES PATENT OFFICE.

John Clarence Karcher, of Montclair, New Jersey, Assignor to Geophysical Research Corporation, of New York, N. Y., a Corporation of New Jersey.

Method and Apparatus for Locating Geological Formations.

Application filed March. 30, 1926. Serial No. 29,428.

This invention relates to methods of and apparatus for determining the character, location and depth of geological formations beneath the surface of the earth and particularly to the locating of formations having sound transmitting characteristics differing from those of the surrounding terrain. The invention has special application to the location of salt domes, anticlines and other structures favorable to the accumulation of petroleum under the earth's surface.

It has heretofore been recognized that subsurface formations may be investigated by observing the velocity of sound waves transmitted through the same from sending to receiving stations where one or more of the stations are located in deep borings in the earth and the stations are approximately on opposite sides of the formation under examination. In my present invention I make use of sound waves transmitted through the earth, but I have discovered that by a novel arrangement and combination of sending and receiving devices I am able to take advantage of principles of sound propagation not heretofore used in this or similar connections, so far as I am aware, with the result that I obviate the necessity of deep borings and by a series of observations made at stations located substantially at the surface of the earth I am able to determine accurately the location, size, character and depth of the geological formations under the surface of the earth, provided only that the sub-surface formations have the characteristic of transmitting sound more rapidly than the surrounding terrain and that the surrounding terrain be one through which sound will travel with substantially uniform velocity. Such conditions are often found in geological explorations. Thus by means of my invention I am able to locate valuable mineral deposits associated with such geological formations which could not otherwise be located.

In practicing my invention I make use of the fact that sounds which are of long wave length (25 feet or more) are capable of being readily diffracted. Because of the nature of diffraction, I have found that it is possible for such sounds, originating at the surface of the earth, to travel diagonally downward through a stratum of earth having the characteristic of transmitting sound with comparatively low velocity, thence along a stratum of high sound velocity in a direction substantially parallel to the surface of contact between the two strata and then diagonally upward again through the upper stratum to the surface where it may be detected at a receiving station some distance from the point of origin. Where the sending and receiving stations are sufficiently far apart in relation to the depth of the underlying stratum and there is sufficient difference between the sound transmitting characteristics of the upper and lower strata, it is apparent that a sound wave following the indirect path indicated may arrive at the receiving station ahead of a sound wave travelling directly from the sending to the receiving station through the upper stratum. The sound wave which proceeds by the indirect path downward to and through the lower stratum and then upward through the upper stratum to the receiving station I call the "diffracted wave". The sound wave which passes directly between the two stations through the upper stratum I call the "direct wave". By providing means for accurately measuring the time of arrival of these waves I am able to make accurate deductions as to the character and location of the underlying stratum. And by changing the location of the sending and receiving stations and repeating the tests and comparing the results I provide data from which the depth, contour, slope and characteristics of the lower stratum may be accurately determined.

The principal objects of the invention are to utilize my discovery as a method for ascertaining matters of the character indicated and to provide simple and efficient apparatus for carrying it out.

Other objects and advantages of the invention will be made apparent by the following description of a preferred mode of operation of my invention taken in connection with the accompanying drawings, wherein

Fig. 1 is a wiring diagram of transmitting and receiving stations adapted for carrying on the invention.

Fig. 2 illustrates a preferred form of geophone for use at the receiving station.

Fig. 3 illustrates a convenient method of recording relative times of arrival of sound waves, being a section of photographic film bearing graphic indications of the operation of the receiving devices shown in Fig. 1.

Figs. 4 and 5 are illustrative diagrams of the paths of sound waves through the earth, illustrating successive tests whereby the character, location and shape of the sub-surface formation may be determined.

Referring to Fig. 1, an explosive charge 10 is buried just far enough below the surface of the ground so that its detonation will produce suitable sound waves through the earth. In general it is sufficient to locate

METHOD AND APPARATUS FOR LOCATING GEOLOGICAL FORMATIONS

Filed March 30, 1926

Fig. 1.

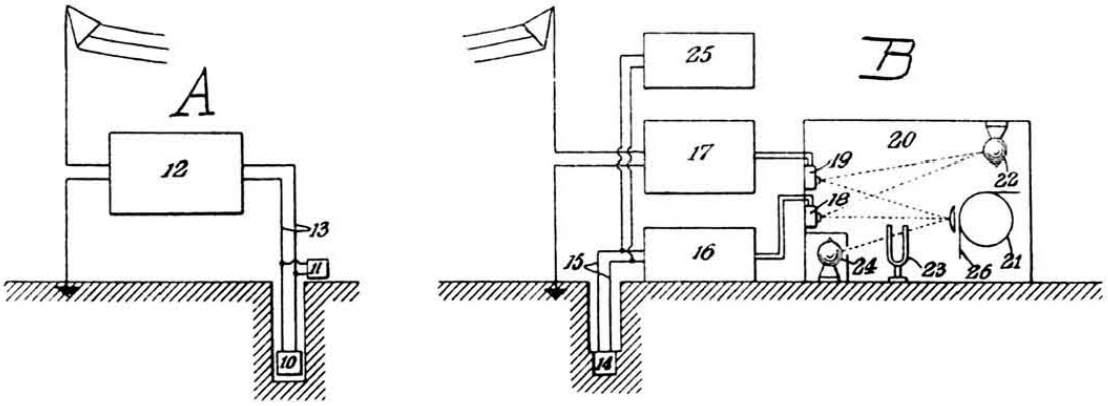


Fig. 2.

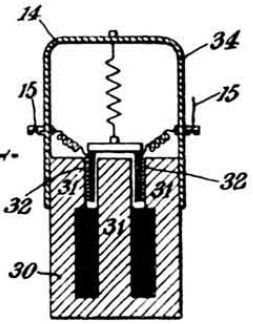


Fig. 3.

Fig. 4.

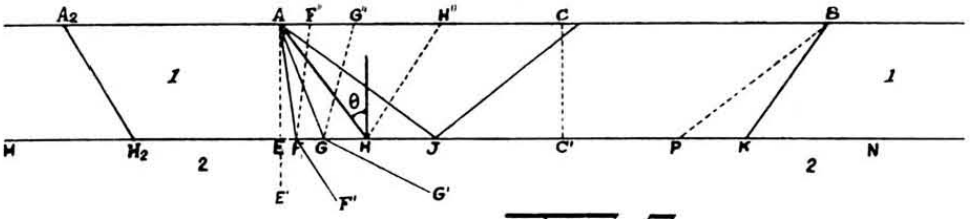
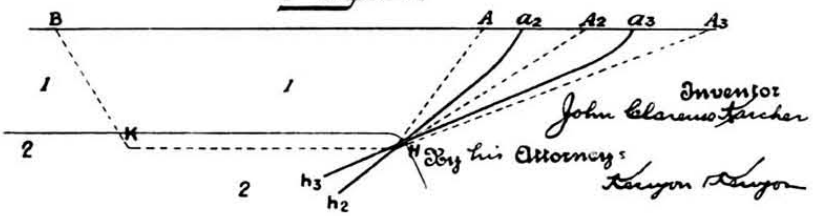


Fig. 5.



Inventor
John Clarence Karcher
By his Attorneys
Kenyon & Kenyon

the charge at a depth of 10 to 20 feet below the surface for this purpose. A second explosive charge 11 ist preferably placed for detonation at the surface of the earth immediately above the charge 10. Nearby may be located a wireless transmitter 12. All of the above-described devices are located at the sending station hereinafter referred to as A. The explosive charges 10 and 11 and the wireless transmitter 12 are preferably connected by electric wires 13 with a suitable source of electrical energy, not shown, and any appropriate means is provded for simultaneously detonating the charges and operating the wireless transmitter circuit so that three sets of waves may be simultaneously propagated from the sending station, being (1) sound waves of long wave length, characteristic of the detonation of an explosive charge, from the charge 10 through the earth, (2) a second set of sound waves from the charge 11 through the air, and (3) a set of radio frequency waves from the transmitter 12.

At the receiving station, hereinafter referred to as B, are located means for detecting sound waves through the earth, sound waves through the air and radio frequency waves. The earth impulses may be detected by means of a geophone 14 or other appropriate apparatus, the sound waves through the air may be detected by a microphone 25, and the radio frequency waves may be detected by any appropriate form of radio receiver 17 Any one of the well known forms of microphone may be employed which is sensitive to sounds of long wave length such as those produced by the detonations of explosive charges. The geophone 14 and the microphone 25 may be electrically connected by wires 15 to the input of an amplifier 16, which in turn is suitably connected to operate the oscillograph element 18. If desired, separate oscillographs may be employed for the geophone and for the microphone respectively. The wireless receiver 17 is connected to operate an oscillograph element 19. These oscillograph elements are installed in and constitute a part of the oscillograph recorder 20. The arrangement of the source of light 22, the oscillograph elements 18 and 19 and the mechanism 21 for moving the film 26 is well known to those versed in the use of such instruments. The oscillograph recorder is also provided with a suitable device for recording equal time intervals, such as a tuning fork 23 provided with slits through which light may pass from a lamp 24 to the film 26, which has been found to work successfully, though any other appropriate means may be employed.

A special form of geophone, well adapted to use for practicing this invention, is shown in Fig. 2. It consists of an element possessing inertia and which is free to move relatively to a second element which is imbedded in the earth. The two elements are coupled electromagnetically or electrostatically in such manner that an electrical potential is generated in an electric circuit by relative movement between the two elements. In the form of geophone illustrated in this figure the fixed element 30 constitutes a magnet having pole pieces 31, 31, 31. The magnet may either be a permanent magnet or may be an electro-magnet, The inertia element is a coil 32 freely suspended from the fixed bracket 34 and adapted to move up and down relative to the pole pieces 31 when the latter are oscillated by earth vibrations. This relative movement generates an electrical potential at the terminals of the coils 32 which is conveyed by wires 15 to the amplifier 16 and oscillograph element 18 above described. This form of geophone is not essential to the invention but is advantageous for use in connection therewith.

The operation of the invention may be illustrated by reference to Fig. 4 in which the line A—B represents the surface of the earth. 1—1 represents a stratum of the earth having relatively low speed sound transmitting characteristics and 2—2 represents an underlying stratum having relatively high speed sound transmitting characteristics. The surface of contact between the upper and lower strata is indicated by the line M—N.

In order to determine the presence of a sub-surface formation having relatively high speed sound transmitting characteristics, sending and receiving stations such as those illustrated in Fig. 1 may be set up on the surface of the ground at points A and B respectively. When the various recording devices at B are in readiness the electric circuit 13 at A may be energized to simultaneously propagate the sound waves from charges 10 and 11 and radio frequency waves from transmitter 12 as above described.

The points A and B may be located a mile or more apart and preferably at a distance greater than four times the estimated depth of the sub-surface formation 2—2 to be examined.

Upon energizing the circuit 13—13 at A three sets of waves are propagated. First a radio frequency wave which instantly energizes the wireless receiver 17 at B and causes a record to be made on film 26 through oscillograph element 19. The time of travel of the wireless impulse being negligible, a record is thus made on film 26 at the instant of detonation of charges 10 and 11.

Second, a sound wave through the air from explosive charge 11 which in due course is received at microphone 25 and recorded on film 26.

Third, a sound wave through the earth from charge 10 to geophone 14.

If a high-speed sound transmitting stratum underlies the surface stratum where the tests are being made, this sound wave through the earth will be divided and will reach B in the form of two or more sets of vibrations as I will now explain.

The wave set up by detonation of charge 10 spreads in all directions from A on a substantially spherical wave front. The portion of it that proceeds directly to B on the line AB in stratum 1—1 I have called the "direct wave". Its time of arrival at B will depend on the distance AB and the velocity, V_1 of sound through, the medium 1—1. Another portion of the wave from charge 10 will proceed straight downward on the line AE,

other portions diagonally downward on the lines AF, AG, AH, AJ etc., with velocities depending on the character of the medium through which they travel, and if it is homogeneous in character they will all proceed with substantially the same velocity V_1, through the stratum 1—1 and with a substantially spherical wave front.

But an important change in the wave front occurs at the plane of contact MN between the strata 1—1 and 2—2. The wave proceeding on the line AE perpendicular to plane MN will be broken up at E, the major portion proceeding in the same line toward E' and other portions proceeding radially in all directions from E by diffraction in accordance with the theory of propagation of impulses known as "Huygen's principle" (p. 159 "Theory of Optics" — Drude, translated by Mann & Milleken). One of these diffracted waves will proceed from E on the line EK substantially along the plane of contact MN between the upper and lower strata 1—1 and 2—2.

Meanwhile another portion of the original sound wave from A proceeding on line AF will reach plane MN at F. The major portion of it will be refracted, on well known principles, so that it will proceed with increased velocity on line FF' through stratum 2—2, another portion will be reflected back through stratum 1—1 to point F'' at the surface, and other portions will be diffracted radially from F through 2—2, a portion of the diffracted wave proceeding on line EFK in plane MN.

Another portion of the original sound wave from A will strike plane MN at G. Its refracted portion will continue through stratum 2—2 on line GG', its reflected portion will travel back through stratum 1—1 on line GG'', and a diffracted portion will travel toward K in the plane MN.

It is well known in the science of opties and sound propagation that there is a critical angle of refraction between media of different density such that when the angle of incidence of the wave impulse exceeds this critical angle, no refraction occurs. This angle depends on the relation of the velocities of transmission of the impulses through the two media and is expressed as follows:

$$\Theta = \sin^{-1}\frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

where.

Θ is the critical angle of refraction,

V_1 is the velocity with which the impulse travels through low speed sound transmitting medium, and

V_2 is the velocity with which it travels through the higher speed sound transmitting medium.

According to this theory, the portion of the original sound wave from A proceeding on the line AH, where the line AH makes the critical angle of reflection with plane MN, will have no refracted portion through stratum 2—2, but there will be reflection on line HH'' and diffraction radially from H, a portion of the diffracted wave proceeding on line EHK.

Thus it appears that the original sound wave at A will transmit sound energy in line EK by diffraction due to the length of the original sound waves and the difference in sound velocities of the media on either side of the separating plane MN.

By further operation of Huygen's principle, diffraction of the sound energy in line EK occurs at each point in its travel, as, for example at points P and K and from each of these points a diffracted impulse proceeds toward B to effect vibration of the geophone 14 and make a resulting record on film 26.

The diffusion of the sound through this repeated diffraction would result in very feeble vibrations at B were it not for the fact that they tend to reinforce each other with a maximum intensity just following the instant of reception of the diffracted sound wave which has followed the shortest time path through plane MN from A to B so that with the instruments I have provided a very clear record of the arrival of the diffracted wave at B appears in film 26 if there be no substantial interference by other sounds.

I have found that the order of arrival of these diffracted wave portions from A to B via plane MN depends on their course of travel through the media 1—1 and 2—2 of different sound velocities and that that diffracted portion reaches B first which travels from A to MN and from MN to B on the lines AH and KB which form with MN angles complementary to the critical angle of refraction above referred to. For

$$t = \frac{(L - 2D\tan\Theta)}{V_2} + \frac{2D}{V_1\cos\Theta} \quad (2)$$

where

t = the time of travel of the diffracted wave,

L = the distance between A and B, and

D = the depth of MN below the surface, i. e., the length of line AE.

When t is a minimum, that is, when the angle Θ is such that the path AHKB is the shortest time path,

then

$$\frac{dt}{d\Theta} = O \quad (3)$$

Differentiating the equation (2) with respect to Θ,

$$\frac{dt}{d\Theta} = \frac{2D}{V_2\cos^2\Theta} = \frac{2D\sin\Theta}{V_1\cos^2\Theta} = O \quad (4) \qquad \sin\Theta = \frac{V_1}{V_2} \quad (5)$$

I presume that the reinforcing of the diffracted wave referred to above is due to the fact that although the energy which follows the shortest time path AHKB arrives first, the energy travelling by line AGKB will tend to reinforce the energy travelling by line AHKB for its path though longer in the aggregate is shorter

through the low velocity stratum, and likewise the energy travelling by lines AJKB and AHPB will tend to reinforce the energy travelling by line AHKB for their paths though shorter in the aggregate are longer through the low velocity medium. Thus the diffracted wave is built up to such magnitude that if it arrives ahead of the direct wave from A to B through stratum 1—1 it is clearly distinguishable on film 26 from the vibrations recording the normal unrest of the ground. The first vibration of the group of vibrations caused by the diffracted waves may therefore be read as indicating the arrival of the diffracted wave which has come by the shortest time path, AHKB.

The record of arrival of these four sets of waves (i. e. the radio frequency wave, the sound wave through the air, and the direct wave and the diffracted wave through the earth) at station B will appear on the film 26, when the same has been developed, somewhat as shown in Fig. 3. Referring to that figure the line Q—Q is the record made by the oscillograph element 19 under control of the wireless receiver 17. The line R—R is the reeord made by the oscillograph element 18 under combined control of the microphone 25 and the geophone 14 through amplifier 16. The lines S—S represent time intervals recorded by tuning fork 23. (One hundredth second intervals have been found to be satisfactory.) The sharp break in line Q—Q at point O indicates the instant of arrival of the radio frequency wave and therefore the instant of explosion of charges 10 and 11. This marks the zero instant of the test and all other time intervals may be read by counting the number of line S—S between O and the point in question. The vibrations in line R—R up to the point X represent the normal earth tremors detected by geophone 14. The vibrations of line R—R between points X and X' represent the record of diffracted sound waves received through geophone 14. The vibrations between points Y and Y' represent the record of direct sound waves received through geophone 14. The vibrations of line R—R following point Z represent the record of sound waves from explosion 11 received through the air by microphone 25.

By counting the time interval lines S—S between point O on line Q—Q and point Z on line R—R the exact elapse of time between the propagation of the sound wave from charge 11 at A and its receipt at B may be determined. The distance between A and B may then be accurately calculated from the known velocity of sound through the air with corrections for temperature, altitude, wind, etc. Other appropriate means may be employed for determining the distance A—B but I have found it more convenient to proceed as above indicated rather than by surveying or measuring the distance and there is the further advantage in the present method that it makes the distance reading a part of a single record strip opon which all of the data for calculations are based.

Inasmuch as the direct wave from A to B through stratum 1—1 produces vibrations of line R—R of greater amplitude than those produced by the diffracted wave, I am able to identify and distinguish the respective vibrations which come through the earth. As a rough check on this method of distinguishing the two sound records it is desirable by preliminary test to determine the velocity of transmission of sound through the surface stratum 1—1. With this velocity known and the distance A—B known it is possible to estimate the expected time of arrival of the direct wave vibrations. If this estimation shows that the direct wave vibrations should not normally arrive at B until the beginning of vibrations Y—Y' of line R—R then there is no explanation for the vibrations of line R—R recorded between points X and X' other than that they are sound vibrations which have come more rapidly either than the direct wave from charge 10 or than the sound wave through the air from charge 11. The record of the vibrations between points X and X' therefore indicates without question the presence of a high-speed sound transmitting stratum in the earth somewhere below and between points A and B.

When the presence of the high-speed stratum 2—2 has thus been ascertained accurate data as to its character, location and depth may be collected by repeating the tests and making new records for different locations of points A and B. For example, the sending station A may be moved to a new location A_2 further away from B on line AB and new charges 10 and 11 set and detonated as above described. From the film strip 26 made in this second test, it will be possible to calculate as above the distance between the sending and receiving stations A_2 and B and the time of travel of the diffracted wave by the shortest time path A_2H_2KB. Since the distance $A_2A=H_2H$, the time of travel of the diffracted wave from H_2 to H may be calculated. This gives the velocity of sound travel, V_2, through the high-speed medium 2—2, and permits the solution of equations (1) and (5) above and the determination of the angle Θ. With this angle known, equation (2) may be resolved to determine the depth of the plane MN below the ground.

A direct equation for determining the depth D of the lower stratum below the surface of the ground is as follows:

$$D=\frac{V_1}{2\cos\Theta}\left(t-\frac{L}{V_2}\right) \quad (6)$$

This assumes that the line HK in plane MN is parallel to the line AB at the surface. The equation (6) may be more generally written

$$D_a+D_b=\frac{V_1}{\cos\Theta}\left(t-\frac{L}{V_2}\right) \quad (7)$$

where D_a is the depth of plane MN below the surface at A and D_b is the depth of plane MN below the surface at B.

The slope of the plane MN may be determined by making tests and observations as above at three surface station A, B and U located in triangular relation. If the tests and observations be made in the following order A to B, B to U, U to A, then

$$D_a+D_b=\frac{V_1}{\cos\Theta}\left(t_a-\frac{L_a}{V_2}\right) \quad D_b+D_u=\frac{V_1}{\cos\Theta}\left(t_b-\frac{L_b}{V_2}\right) \quad D_u+D_a=\frac{V_1}{\cos\Theta}\left(t_u-\frac{L_u}{V_2}\right) \quad (8)$$

where t_a, t_b, t_u indicate the times of travel of the diffracted waves by the shortest time path from A to B, B to U, and U to A respectively, and L_a, L_b, L_u indicate the respective distances between AB, BU and UA. By solving these equations simultaneously the depths to plane MN may be determined and the three points thus located serve to indicate the sloping boundary plane between strata 1—1 and 2—2.

In this manner anticlines and other high-speed sound transmitting formations may be definitely located, their depth and upper boundaries determined, and their physical characteristics may be judged from the speed with which they transmit sound.

In addition, the edges and contour of subsurface formations such as salt domes and the like may determined by the application of this invention in the manner now to be explained.

After generally locating the formation by random tests, the receiving station B (see Fig. 5) is set up at a point on the surface AB and as nearly as can be centrally over the supposed position of the sub-surface formation to be examined. The sending station is then set up successively at positions A_1, A_2, A_3 etc., on line BA such that A is successively at greater distances beyond the supposed position of the edge to be located. By making and recording tests from these different positions of the sending station it is possible to make determinations as follows:

Let t_1, t_2, t_3 equal the times required for travel of the diffracted wave from A_1, A_2, A_3 respectively to B, and let $\Delta t_1=t_2-t_1 \quad \Delta t_2=t_3-t_2 \quad L_1=\overline{A_2B}-\overline{A_1B} \quad L_2=\overline{A_3B}-\overline{A_2B}$

Then draw the lower left hand limb of the hyperbola

$$\frac{4V_1^2X^2}{\Delta t_1^2}-\frac{Y^2}{4L_1^2-\frac{\Delta t_1^2}{4V_1^2}}=1 \quad (9)$$

where X's are abscissas and Y's are ordinates with the origin at A_2. This hyperbola appears on Fig. 5 as a_3h_3. Also draw the lower left hand limb of the hyperbola

$$\frac{4V_1^2X^2}{\Delta t_2^2}-\frac{Y^2}{4L_2^2-\frac{\Delta t_2^2}{4V_1^2}}=1 \quad (10)$$

where X's are abscissas and Y's are ordinates with the origin at A_3. This hyperbola appears on Fig. 5 as a_3h_3. The intersection, H, of these two hyperbolas indicates the point sought, i. e., the edge of the formation under examination.

This point may also be found by solution of the simultaneous equations:

$$\frac{4V_1^2X^2}{\Delta t_1^2}-\frac{Y^2}{4L_1^2-\frac{\Delta t_1^2}{4V_1^2}}=1 \text{ and } \frac{4V_1^2(X+L_2)^2}{\Delta t_2^2}-\frac{Y^2}{4L_2^2-\frac{\Delta t_2^2}{4V_1^2}}=1 \quad (11)$$

using the point A_2 as the origin.

Similarly the opposite edge of the sub-surface formation may be located, and then, by placing the sending station at various points on other lines radiating from B, the location of the edge of the formation unter these lines may be determined. It will generally be found necessary to change the location of the receiving station, B, from time to time in order to get the clearest results. It may be found, for example, that B is so close to one edge of the formation that the direct wave through 1—1 reaches B before the diffracted wave. Since the vibrations recorded on film 26 by the direct wave are generally of much greater amplitude and duration than those recorded by the diffracted wave, the latter are not easily distinguishable from the former unless they reach B first. Accordingly, if vibrations from the direct wave appear first on the record, it is because the path HK of the diffracted wave through plane MN is too short. This is likely to be the case if B is too near the edge of the formation and in such case it is desirable to draw B back to a new position more nearly over the supposed center of the formation. Where the formation is extensive it may be necessary to make many changes in the position of B as well as of A.

No confusion is likely to occur between the record of the sound waves through the air and those through the ground for the latter travel with many times the velocity of the former. Thus the zone of vibrations YY′ on film 26 due to the ground waves set up by explosion of charge 10 will have long since subsided and passed before the first sound of the explosion of charge 11 reaches microphone 25 through the air. For this reason I perfer to provide a single oscillograph 18, but separate oscillographs or other recording devices for the microphone 25 and geophone 14 may be provided as desired.

I am aware that it has been proposed to investigate sub-surface ores by means of observations as to the velocity and inflection of sound waves of short ware length electrically produced and transmitted between instruments located in borings as deep in the earth as the formation under examination. But my invention

is quite distinct from such proposal in that I make use of the principle of diffraction of sound waves by employing sounds having long wave length so that, instead of observing the refracted or reflected waves as in the earlier proposal, I make use of the diffracted waves. I thereby obviate the necessity of deep borings and provide means as well for determining with accuracy the size, shape, depth, slope and other characteristics of the formation which have not previously been ascertainable by any means within my knowledge other than actual excavation or sinking of shafts.

My invention results from the discovery that certain sounds may be diffracted under the conditions described and that despite diffusion of the diffracted sound the momentary reinforcement of the sound immediately following the arrival at the receiving station of the diffracted wave by the shortest time path is sufficient to energize sensitive receiving and recording apparatus of the character described so that the record of the time of arrival of the diffracted wave by the shortest time path may be distinguished from the record of normal unrest of the ground. The time of travel of this diffracted wave may thus be made available for use in the many calculations and deductions referred to.

The devices and combinations which I have described and prefer to employ as constituting the sending station are well adapted for propagation of sounds of the character required to secure diffraction under the stated conditions of use. The devices described as constituting the receiving station are peculiarly adapted for receiving and accurately recording impulses of the character employed. But it will be obvious to those skilled in the art from the foregoing description that many changes, omissions and additions may be made in the apparatus and combinations of devices described without departing from my invention.

The preferred form of geophone described and illustrated herein is not essential to my broad invention but is novel in itself and is especially adapted for the use described because of its high sensitivity to sounds of long wave length and because it permits amplification and recording of the vibrations of electric potential set up in circuit 15—15 by the ground impulses without substantially distorting the record as in the case of other devices.

By my preferred combination of sending, receiving and recording devices I am able to make accurate time measurements, to calculate distances accurately without the use of surveying instruments or measures to provide data with negligible factors of error, to provide simple and efficient apparatus for carrying on the process, and to accomplish results in the investigation and determination of characteristics of sub-surface geological formations which are novel and important and capable of a wide variety of uses.

Whiie I have described my invention in connection with preferred forms and combinations of devices, it will be understood that I do not thereby intend to restrict myself to such illustrative means as I intend to include in my invention all possible modifications and variations in method and apparatus which fall within the scope of the appended claims.

What I claim as new and desire to secure by Letters Patent of the United States is:—

1. In a system for locating subsurface formations, the combination of means for simultaneously transmitting a sound of long wave length and a radio frequency wave, means for receiving said radio frequency wave, means for receiving the diffracted wave by the shortest time path resulting from said sound wave and means for recording said waves as they are received.

2. In a system for locating subsurface formations, the combinations of means for simultaneously trans mitting sound waves through the earth and through the air and transmitting a radio frequency wave, means for receiving said radio frequency wave, means for receiving said waves transmitted through the earth, means for receiving the waves transmitted through the air and means for recording said waves as they are received.

3. In a system for locating subsurface formations, the combination of a transmitting station having a source of radio frequency waves and a source of mechanical impulses, and a receiving station having means for receiving said radio frequency waves, means for receiving said mechanical impulses and means for recording said waves and said impulses as they are received.

4. In a system for locating subsurface formations, a source of radio frequency waves, a source of mechanical impulses, means for receiving said radio frequency waves, means for receiving said mechanical impulses, means for determining the time of travel of said impulses through the subsurface formation and means for determining the time of travel of said impulses through the media overlying said formation.

5. In a system for locating subsurface formations, a source of radio frequency waves, means for producing mechanical impulses through the air and through the ground, means for causing the simultaneous transmission of said radio frequency waves and said mechanical impulses, means for receiving and recording said radio frequency waves at a point distant from that of transmission means for receiving said mechanical impulses at the same point, and means for separately recording the time of arrival of said mechanical impulses through the air and the direct and diffracted impulses resulting from said mechanical impulse through the ground.

6. The method of locating subsurface formations which comprises transmitting radio frequency waves, transmitting sound waves through the earth simultaneously therewith, receiving said radio frequency waves at a point distant from the transmitting station, automatically recording the time of arrival of said waves at

the receiving point, receiving said impulses travelling through the earth and automatically recording the time of their arrival at the same point.

7. The method of locating subsurface formations which comprises transmitting radio frequency waves, transmitting mechanical impulses through the earth simultaneously therewith, receiving and recording said radio frequency waves at a point distant from the transmitting station, receiving said mechanical impulses at the same point, and recording the time required for said impulses to travel through the formation under observation and to travel directly through the earth from the transmitting station to the point of reception.

8. The method of locating subsurface formations which comprises transmitting radio frequency waves, transmitting mechanical impulses through the earth and through the air simultaneously therewith, receiving and recording said radio frequency waves at a point distant from the transmitting station, receiving said mechanical impulses at the same point, and receiving and recording the time of arrival of said impulses through the earth and through the air and the time intervals between the arrival of such impulses.

9. The method of locating subsurface formations which comprises transmitting radio frequency waves, transmitting mechanical impulses through the earth and through the air simultaneously therewith. receiving and recording said radio frequency waves at a point distant from that of transmission, receiving said impulses at the same point and automatically recording the time required for said impulses to travel through the formation under observation, the time required for said impulses to travel directly through the earth and the time required for said impulses to travel through the air.

10. Mechanism of the character described including in combination means for producing a sound of long wave length through the earth and simultaneously making a time record at a distant receiving station and means at said station for making a time record at the instant of arrival of the diffracted sound by the shortest time parh through the earth and for recording the time interval between the two time records.

11. Mechanism of the character described including in combination means for simultaneously producing sounds of long wave length through the air and earth from a common sending station and making a time record at a distant receiving station at the instant of such propagation, and receiving devices at the receiving station sensitive to such sounds and adapted to make a time record of the arrival of the same and to record the time interval between such time records.

In testimony whereof, I have signed my name to this specification.

JOHN CLARENCE KARCHER.

EDLER & KRISCHE, HANNOVER.

SCHLUSSWORT.

Die in dem Vorwort erwähnten Angriffe auf das Deutsche Reichspatent Nr. 371963 betreffs „Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten" sind durch die im Nachstehenden abgedruckte Entscheidung des Reichsgerichts vom 28. Juni 1930 zurückgewiesen worden.

I. 281/27.

IM NAMEN DES REICHS.

In der Patentstreitsache

des Dr. Ludger Mintrop in Bochum, Herner Straße 45,

Beklagten und Berufungsklägers,

gegen

Professor Dr. Karl Mainka in Ratibor O.-S., Bahnhofstr. 41,

Kläger und Berufungsbeklagten,

hat das Reichsgericht, I. Zivilsenat, in der Sitzung vom 28. Juni 1930, an welcher teilgenommen haben:

der Präsident Katluhn

und die Reichsgerichtsräte Dr. Nieland, Triebel,

Dr. Georg Müller, Dr. Conze,

für Recht erkannt:

Die Entscheidung des Reichspatentamts vom 12. Mai 1927 wird aufgehoben.

Die Nichtigkeitsklage wird abgewiesen.

Die Kosten des Verfahrens beider Rechtszüge werden dem Kläger auferlegt.

Von Rechts wegen.

TATBESTAND.

Dem Beklagten ist durch das vom 7. Dezember 1919 ab wirksame Patent Nr. 371963 ein Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten geschützt, daß im Patentanspruch wie folgt gekennzeichnet wird: In dem zu untersuchenden Gebiete sollen künstlich, z. B. durch Zerknallen einer Sprengladung, elastische Wellen erzeugt werden. Diese werden dann von einem in entsprechender Entfernung aufgestellten Erdbebenmesser aufgenommen, aus dessen Aufzeichnungen sich die Geschwindigkeiten der verschiedenen Wellen und die Tiefe, die sie erreicht haben, feststellen lassen. Damit soll es — besonders auf Grund von Vergleichen mit Messungen an Stellen bekannten geologischen Aufbaues — möglich werden,

Rückschlüsse auf die Folge, Stärke und Dichte sowie das Streichen und Fallen der Gesteinschichten zu ziehen. Der Kläger hat beantragt, dieses Patent für nichtig zu erklären, da das in der Patentschrift beschriebene Verfahren sich bereits aus früheren Veröffentlichungen entnehmen lasse. Der Beklagte hat um Klageabweisung gebeten. Er macht geltend, die Vorveröffentlichungen enthielten nur wissenschaftliche Erörterungen, während er mit seinem Patente als erster das seismische Verfahren in der praktischen Geologie und im Bergbau ausgebildet hätte.

Das Reichspatentamt hat durch seine Entscheidung vom 12. Mai 1927 das angegriffene Patent für nichtig erklärt, weil die Patentschrift von der praktischen Ausgestaltung des in der technischen Literatur schon früher Behandelten nichts offenbare.

Der Beklagte hat Berufung eingelegt mit dem Antrage, unter Aufhebung der Entscheidung des Reichspatentamts die Klage abzuweisen.

Der Kläger hat um Zurückweisung der Berufung gebeten.

Der Senat hat als Sachverständigen zunächst den Professor Dr. Harbort in Berlin zugezogen, der jedoch nach Erstattung eines schriftlichen Gutachtens vom 8. April 1929 verstorben ist. Der sodann als Sachverständiger zugezogene Geheime Bergrat, Professor Dr. Kühn in Berlin hat ein schriftliches Gutachten vom 26. April 1930 erstattet und in der Verhandlung erläutert.

ENTSCHEIDUNGSGRÜNDE.

Der Beklagte hat sich in dem angefochtenen Patente die Aufgabe gestellt, die Zusammensetzung der Gesteinschichten in den oberen Lagen der Erde aus der Geschwindigkeit von mechanischen Wellen zu bestimmen. Er erwähnt in der Patentschrift einleitend, daß man über die unzulänglichen Mittel der Bohrungen und der Wünschelrute hinaus sich bereits elektrischer Wellen zur Erforschung des Aufbaues und der Eigenart von Gesteinschichten bedient habe, und bezeichnet dann ‹S. 1 Z. 24 ff.› als Ausgangspunkt für den von ihm beschrittenen Weg die Erkenntnis, daß der Zusammenhang der mechanisch erzeugten, elastischen Wellen mit den Eigenarten der Gesteinschichten, wie Dichte und Elastizität, unmittelbar und viel inniger als deren Wechselbeziehung zu elektrischen Wellen sei.

Die Lösung der Aufgabe wird in der Patentschrift von S. 1 Z. 33 ab beschrieben und im Anspruch noch einmal zusammengefaßt. Das Verfahren beginnt damit, daß — z. B. durch Zerknallen von Sprengstoff — Wellen erzeugt werden, deren elastische Fortpflanzung von einem in angemessener Entfernung aufgestellten Erdbebenmesser verzeichnet wird. Wenn es dann weiter heißt, diese Aufnahmen würden benutzt, um die sog. Laufzeitkurve aufzustellen und die Geschwindigkeiten der Wellen in den verschiedenen Tiefen zu errechnen, und in Verbindung hiermit auf ähnliche Untersuchungen in der Erdbebenforschung hingewiesen wird, so entnimmt der Fachmann, d. h. der mit der Seismik vertraute Geologe, hieraus zweierlei ‹wie Professor Angenheister als technischer Beistand des Beklagten überzeugend dargelegt hat›. Wissenschaftlich wird er an die grundlegenden und — wie er sofort erkennt — auch hier zugrundeliegenden Arbeiten von Wiechert erinnert, der als Erster ‹mit seinen Schülern› im Jahre 1907 eine brauchbare Methode aufgestellt hat, aus einer Laufzeitkurve, d. h. aus der Zusammenstellung der Laufzeiten elastischer Wellen, die Scheiteltiefen von Erdbeben zu berechnen. Für die praktische Arbeit aber sagt er sich ohne weiteres, daß er entweder, wenn er nur an einer Stelle mißt, an verschiedenen ‹u. U. vielen› anderen Stellen Sprengstoff zerknallen muß, oder, wenn er das Zerknallen auf eine Stelle zu beschränken wünscht, verschiedene ‹u. U. viele› Erdbebenmesser braucht, wenn er nicht, was selbstverständlich auch möglich ist, denselben Erdbebenmesser bei wiederholten Sprengungen immer wieder an einer neuen Stelle verwenden will. Wesentlich für das Verfahren — und deshalb nicht nur S. 2 Z. 46 ff.

in der Beschreibung, sondern auch im Patentanspruch selbst hervorgehoben — sind endlich Vergleichsmessungen an Stellen schon bekannten geologischen Aufbaues. Nach all diesen Merkmalen weiß der Fachmann, wie er zu arbeiten hat.

Die Patentschrift gibt ihm dann weiter noch wichtige Fingerzeige für die Auswertung des Verfahrens (S. 2 Z. 26 ff.). Sie weißt darauf hin, daß sich aus den Geschwindigkeiten und Tiefen der Wellen, insbesondere aus dem gegenseitigen Verhältnis der longitudinalen (d. h. in ihrer Fortpflanzungsrichtung verlaufenden) und transversalen (d. h. senkrecht zu dieser gehenden) Wellen Schlüsse auf die elastischen Eigenschaften der von den Wellen durchlaufenen Gesteinschichten ziehen lassen. Aus Wendepunkten und Knicken in der Laufzeitkurve soll auf Sprünge in den elastischen Eigenschaften der Gesteinschichten sowie Beugungen und Brechungen an Grenzflächen zu schließen sein. Hier handelt es sich praktisch, wie der Sachverständige Kühn ausgeführt hat, vor allem um die Ermittlung der in der Tiefe auftretenden Unstetigkeitsflächen, d. h. der Trennungsflächen zwischen zwei Gesteinsmassen, wobei sich beispielsweise die Mächtigkeit einer Gesteinschicht nach der Tiefe hin berechnen läßt. In diesem Zusammenhange verweist die Beschreibung auf die Zeichnung. Die Bedenken, die der Sachverständige Kühn (im Gegensatz zum verstorbenen Sachverständigen Harbort) zunächst gegen die beiden Abbildungen der Patentzeichnung geäußert hat, sind durch die Verhandlung, insbesondere durch die Darlegungen des Professors Angenheister, zerstreut worden. Die Abbildungen entsprechen der Wiechertschen Tiefenbestimmungsmethode, auf die der Fachmann (vgl. oben) schon an anderer Stelle der Patentschrift hingewiesen worden war, und dienen, ohne irrezuführen, der Veranschaulichung der Mintropschen Methode, wobei es auf geologische Einzelheiten nicht ankommt.

So, wie der Fachmann das Mintropsche Verfahren aus der Patentschrift in ihrem ganzen Zusammenhange entnahm, war es zur Zeit der Anmeldung des Patents neu. Anregungen in der Richtung, künstlich erzeugte seismische Wellen für die Erforschung von Gesteinschichten zu verwerten, waren zwar schon früher gegeben worden. Vor allen anderen könnten in dieser Beziehung als Vorwegnahme der Erfindung die beiden Veröffentlichungen in Betracht kommen, die allein noch näher in der Verhandlung erörtert worden sind: der Artikel von Belar „Über eine neue praktische Verwendung der Erdbebenmesser", in der „Erdbebenwarte", 1. Jahrgang 1901, S. 59, und die Schrift von Wilip, „Über ein in Polkowo registriertes künstliches Erdbeben", 1914.

Es ist nicht zu verkennen, daß die im Hinblick auf die Zwecke des Tunnelbaues von Belar geäußerten Gedanken im allgemeinen und in Einzelheiten, von dem künstlich erzeugten Erdbeben an über dessen Aufzeichnung hinweg bis zu den daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen, das heute dem Beklagten patentierte Verfahren erkennen lassen. Dabei darf aber der entscheidende Gesichtspunkt nicht außer acht gelassen werden, daß im Jahre 1901 sich aus solchen Darlegungen ein praktisch brauchbares Verfahren noch nicht entnehmen ließ, weil hierfür erst im Jahre 1907 die Wiechertschen Arbeiten mit der Berechnung der Scheiteltiefen und Geschwindigkeiten der Erdbebenwellen die unerläßliche Grundlage schufen. Belars Artikel kann hiernach dem Patente des Beklagten nicht entgegengehalten werden.

Als Wilips Schrift — 1914 — veröffentlicht wurde, lagen Wiecherts Ergebnisse bereits vor. Aber alles, worauf Wilip hinzuweisen wagt, ist die Möglichkeit, vielleicht einmal durch kostspielige Versuche die Laufzeitkurve für seismische Strahlen der obersten Erdschichten festzustellen und daraus etwa Schlüsse auf die für Bergwerke in Betracht kommenden Erdschichten zu ziehen. Über diese Erwägung ist Wilip nicht hinausgekommen. Von dem dem Beklagten patentierten Verfahren hat er nichts vorweggenommen.

Der Schritt, den zuerst der Beklagte getan hat, die Wiechertsche Erdbebenberechnung für die dem Bergwerk zugänglichen Gesteinschichten zu verwerten, lag auch unter Berücksichtigung der Belarschen Veröffentlichung für den Durchschnittsfachmann durchaus nicht nahe, ist vielmehr als erfinderische Leistung zu bewerten. Es gehörte nämlich dazu, wie der Sach-

verständige Kühn dargelegt hat, die zur Zeit der Patentanmeldung allgemein überraschende Erkenntnis, daß der Erdbebenmesser nicht nur die unmittelbar unter der Oberfläche entlang gehenden Wellen aufzeichnet, daß vielmehr zu ihm hin, also zur Erdoberfläche zurück auch die Strahlen gehen, die von der Sprengstelle aus in die Tiefe dringen. Selbst Wiechert glaubte diese Tatsache, wie Professor Angenheister in der Verhandlung mitgeteilt hat und wie auch aus dem bei den Akten befindlichen Bericht über die Sitzung des Erzausschusses vom 15. Dezember 1921 hervorgeht, zunächst stark anzweifeln zu müssen und hat sich dann erst durch die Versuchsergebnisse des Beklagten überzeugen lassen. Diese Erkenntnis war die unerläßliche Grundlage für das Verfahren, das der Beklagte dann in seinem Patente vorgeschlagen hat, denn sie erst eröffnete überraschend die Möglichkeit der Berechnung von Gesteinschichten in größeren Tiefen. Daß der Beklagte sie für den Bergbau nutzbar gemacht hat, darin liegt sein Verdienst. In der dadurch erzielten wesentlichen Erleichterung der Vorbereitungen für den Bergbau ist eine erhebliche Bereicherung der Technik zu erblicken.

Hiernach mußte, unter Aufhebung der Entscheidung des Reichspatentamts, die Nichtigkeitsklage abgewiesen werden.

Urkundlich unter Siegel und Unterschrift.

Das Reichsgericht, I. Zivilsenat.

I. V.

gez. Katluhn,

Senatspräsident.