Überreicht vom Verfasser

Sonderdruck aus **Oel und Kohle 39,** 269 [1943]

Industrieverlag von Hernhaussen, K.-G., Berlin W 15

Uber Anwendungen des seismischen Verfahrens im Erdölbergbau und ihre wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Auswirkungen

Von Dr. L. Mintrop, ord. Professor an der Technischen Hochschule und der Universität Breslau

Das seismische Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten hat seinen Einzug in alle Länder der Welt gehalten und auch in Großdeutschland zur Entdeckung von Erdölfeldern geführt. Im folgenden soll ein Überblick über die Entwicklung des Verfahrens und seine wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Auswirkungen gegeben werden.

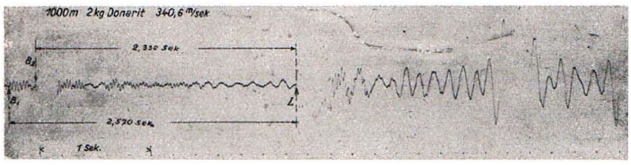

Abb. 1. Seismogramm (Vertikalkomponente) einer Sprengung von 2 kg Donarit in 1000 m Entfernung

Das Verfahren beruht auf der vom Verf. im August 1919 gemachten Entdeckung von Wellen[1]) im Seismogramm (*Abb. 1*) einer künstlich, z. B. durch eine Sprengung (*Abb. 2* links), erzeugten Bodenerschütterung, die einen Teil ihres Weges zum Seismographen[2]) (*Abb. 3* und *Abb. 2* rechts) durch die unter loseren Deckgebirgsschichten anstehenden festeren Gebirgsschichten genommen haben[3]) (*Abb. 4*). In dem Seismogramm der *Abb. 1*, das in einer Entfernung von 1000 m vom Sprengpunkt aufgenommen worden ist, treten 2,570 s und 2,330 s vor dem Luftschall L zwei Bodenwellen B_1 und B_2 auf, während in dem an einem anderen Orte in der gleichen Sprengentfernung aufgezeichneten Seismogramm der *Abb. 5* nur eine Bodenwelle B vorhanden ist. Die Geschwindigkeit des Luftschalles ist im Falle der *Abb. 1* zu 340,6 m/s ermittelt worden, so daß die Laufzeit der Luftwelle von der Sprengstelle zum Seismographen 1000 m : 340,6 m/s = 2,936 s und die Laufzeit der B_1-Welle 2,936 s — 2,570 s = 0,366 s, die der B_2-Welle 2,936 s — 2,330 s = 0,606 s beträgt. Die B_1-Welle hat sich demnach mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1000 m : 0,366 s = 2732 m/s, die B_2-Welle mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1000 m : 0,606 s = 1650 m/s fortgepflanzt. Nach dem Seismogramm der *Abb. 5* ergibt sich die Laufzeit der B-Welle zu 3,068 s — 2,460 s = 0,608 s, was einer durchschnittlichen Geschwindigkeit der B-Welle von 1000 m : 0,608 s = 1645 m/s entspricht. Die Geschwindigkeiten der B_2-Welle in *Abb. 1* und der B-Welle in *Abb. 5* stimmen demnach bis auf 5 m/s oder 0,3% überein, während die durchschnittliche Geschwindigkeit der B_1-Welle in *Abb. 1* um 1088 m/s oder 66% höher liegt als die durchschnittliche Geschwindigkeit der B_2-Welle.

Die gute Übereinstimmung der Geschwindigkeiten der B_2- und der B-Wellen erklärt sich leicht daraus, daß beide Seismogramme, *Abb. 1* und *Abb. 5*, auf gleichartigen geologischen Schichten (diluvialen und jungtertiären Sanden und Tonen) aufgenommen worden sind. Wie erklärt sich aber das Auftreten der B_1-Welle in *Abb. 1*?

Bei vergleichenden Studien an den vom Verf. seit dem Jahre 1908 an verschiedenen Orten Deutschlands aufgenommenen Seismogrammen künstlich, durch Sprengungen oder fallende Gewichte, erzeugter „Erdbeben"[4]), [38]),

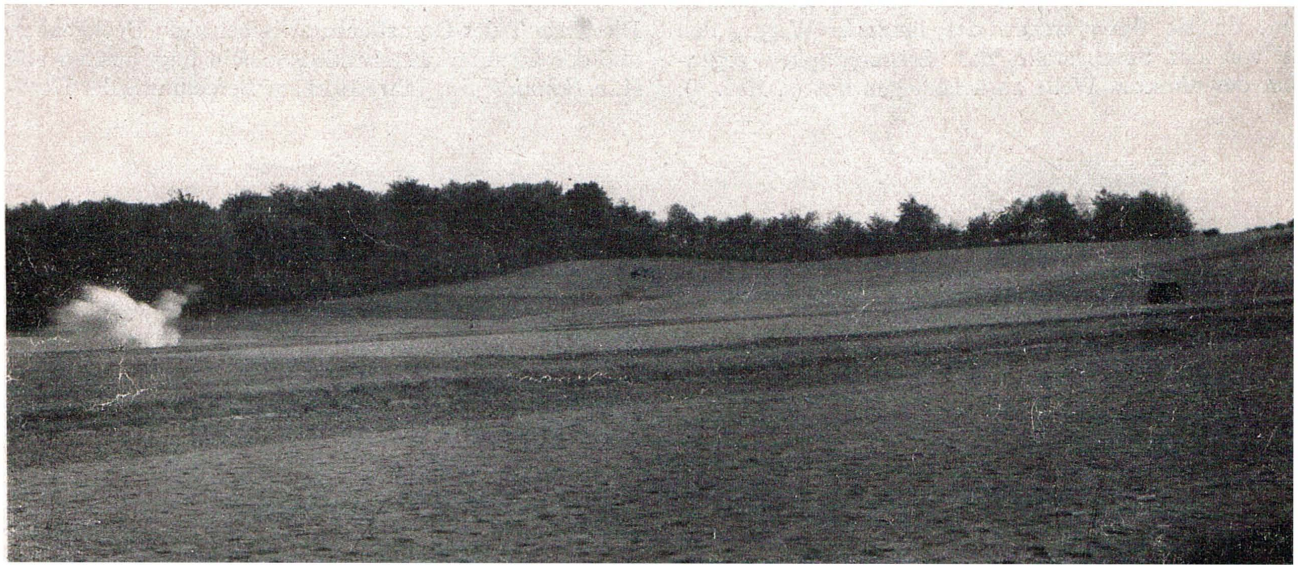

Abb. 2. Sprengung und seismisches Beobachtungszelt im Gelände

[1]) *W. Salm*, Über die Energie der *Mintrop*-Welle. Beitr. angew. Geophysik **4**, 364 [1934].

[2]) *L. Mintrop*, Geophysikalische Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten. Der Deutsche Steinkohlenbergbau, technisches Sammelwerk, Bd. I: Geologie, Geophysik, Gerechtsamswesen. Essen 1942, S. 495.

[3]) *L. Mintrop*, Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten nach dem seismischen Verfahren. Seismos, G. m. b. H., Hannover, Mitt. I [1922].

[4]) *L. Mintrop*, Über künstliche Erdbeben. Verh. Int. Kongr. f. Bergb., Hüttenw., angew. Mech. u. prakt. Geol. Ber. Abt. prakt. Geol. Düsseldorf 1910, S. 90 bis 112.

wobei in jedem einzelnen Falle die geologischen Aufschlüsse an der Beobachtungsstelle herangezogen wurden, kam dem Verf. der Gedanke, daß die B_1-Welle eine Tiefenwelle sein könnte. Eine an der Grenzfläche zwi-

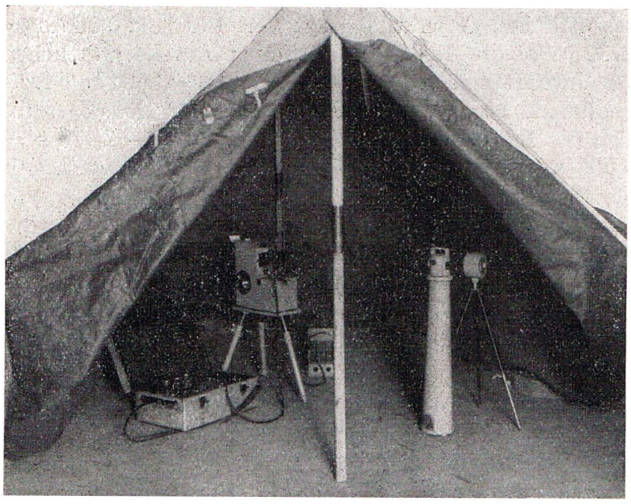

Abb. 3. Feldseismograph (Blick in das Beobachtungszelt mit den Apparaten)

schen zwei verschiedenen Gebirgsschichten reflektierte Welle, deren Auftreten in Seismogrammen künstlicher Erdbeben Verf. bereits im Jahre 1912 in einem Vortrage auf der Deutschen Naturforscherversammlung erwähnt hatte[5]), konnte die B_1-Welle nicht sein, da sie dann wegen des längeren Weges, den sie von der Sprengstelle zum Seismographen gegenüber der direkten Welle zurückzulegen hat (s. *Abb. 4*), nicht früher, sondern später als die B_2-Welle eintreffen müßte. Die Aufstellung von Laufzeitkurven auf Grund von in verschiedenen Sprengentfernungen aufgenommenen Seismogrammen brachte die Erkenntnis, daß die B_1-Welle dennoch aus der Tiefe kommt und einen Teil ihres Weges vom Sprengpunkt zum Seismographen durch eine unter dem lockeren Deckgebirge anstehende feste Gebirgsschicht genommen hat.

In *Abb. 6* sind die Laufzeitkurven der B_1- und der B_2-Wellen nach Messungen in den Sprengentfernungen 200, 400, 600, 800 und 1000 m über dem geologischen Profil dargestellt worden. Während die Laufzeitkurve der B_2-

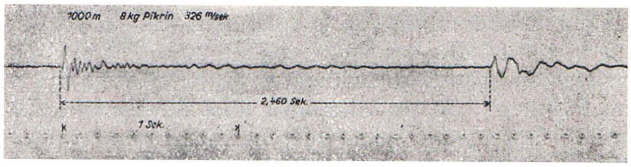

Abb. 5. Seismogramm (Vertikalkomponente) einer Sprengung von 8 kg Pikrin in 1000 m Entfernung

Welle im Nullpunkt der Sprengentfernung beginnt, schneidet die rückwärtige Verlängerung der B_1-Kurve die Zeitachse bei 0,07 s. Der Grund dafür liegt in dem in *Abb. 6* durch Pfeile bezeichneten Umwege, den die B_1-Welle (refraktierte oder indirekte Welle) gegenüber der B_2-Welle (direkten Welle) zu machen hat, um von der Sprengstelle zum Seismographen zu gelangen. Erst in der Sprengentfernung von 210 m kommen beide Wellen gleichzeitig am Beobachtungsorte an, und von dieser Entfernung (Knickentfernung in der Laufzeitkurve) an eilt die B_1-Welle der B_2-Welle immer mehr voraus, so daß sie in 1000 m Sprengentfernung bereits einen Vorsprung von 0,606 s — 0,366 s = 0,240 s hat. Aus den Laufzeitkurven ergeben sich die Geschwindigkeiten der B_1- und B_2-Wellen zu v_1 = 3400 m/s bzw. v_2 = 1650 m/s.

Die Tiefe T der Grenzfläche zwischen dem Deckgebirge und der darunter anstehenden Schicht folgt aus der von *A. v. Schmidt*[6]) im Jahre 1913 zur Berechnung der Herd-

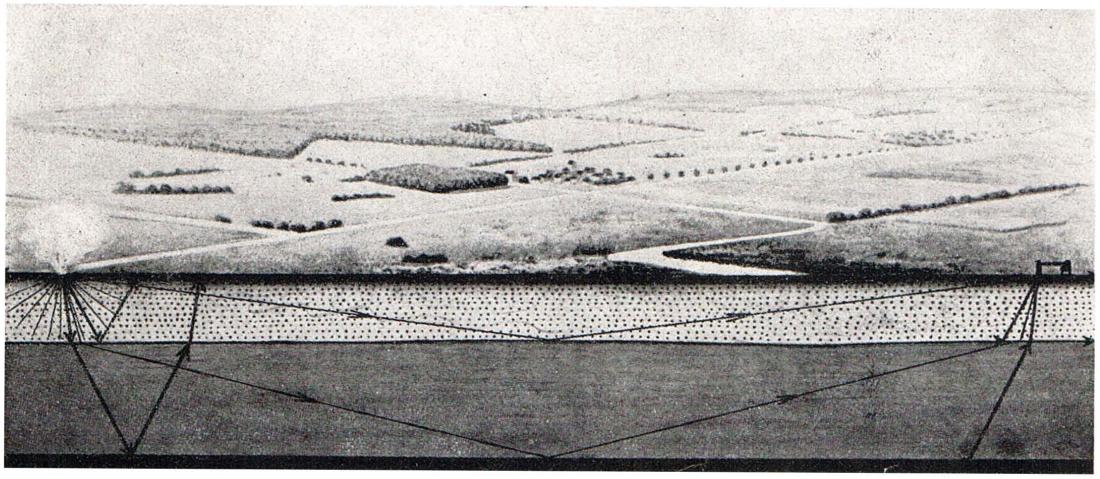

Abb. 4. Erregung, Ausbreitung und seismographische Aufzeichnung von elastischen Wellen

---

[5]) *L. Mintrop*, Über seismographische Aufzeichnungen von Bodenerschütterungen durch Verkehrseinrichtungen, Maschinen, Sprengungen und dergleichen künstliche Erdbeben. Verh. Ges. dtsch. Naturforscher Ärzte. Versammlung 84, 1912, Teil 2, 1, S. 201.

[6]) *A. v. Schmidt*, Zur Herdtiefe des süddeutschen Erdbebens vom 16. November 1911. Gerlands Beitr. Geophysik **12**, 1 [1913].

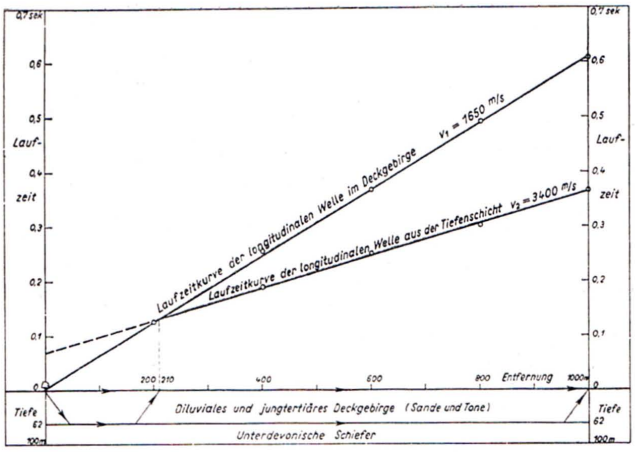

Abb. 6. Laufzeitkurven über zwei verschiedenen Gebirgsschichten mit parallel zur Erdoberfläche verlaufender Grenzfläche

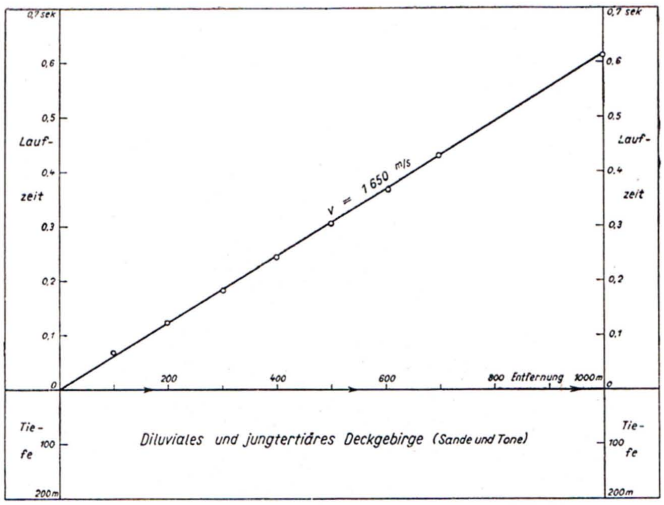

Abb. 7. Laufzeitkurve über einer Gebirgsschicht

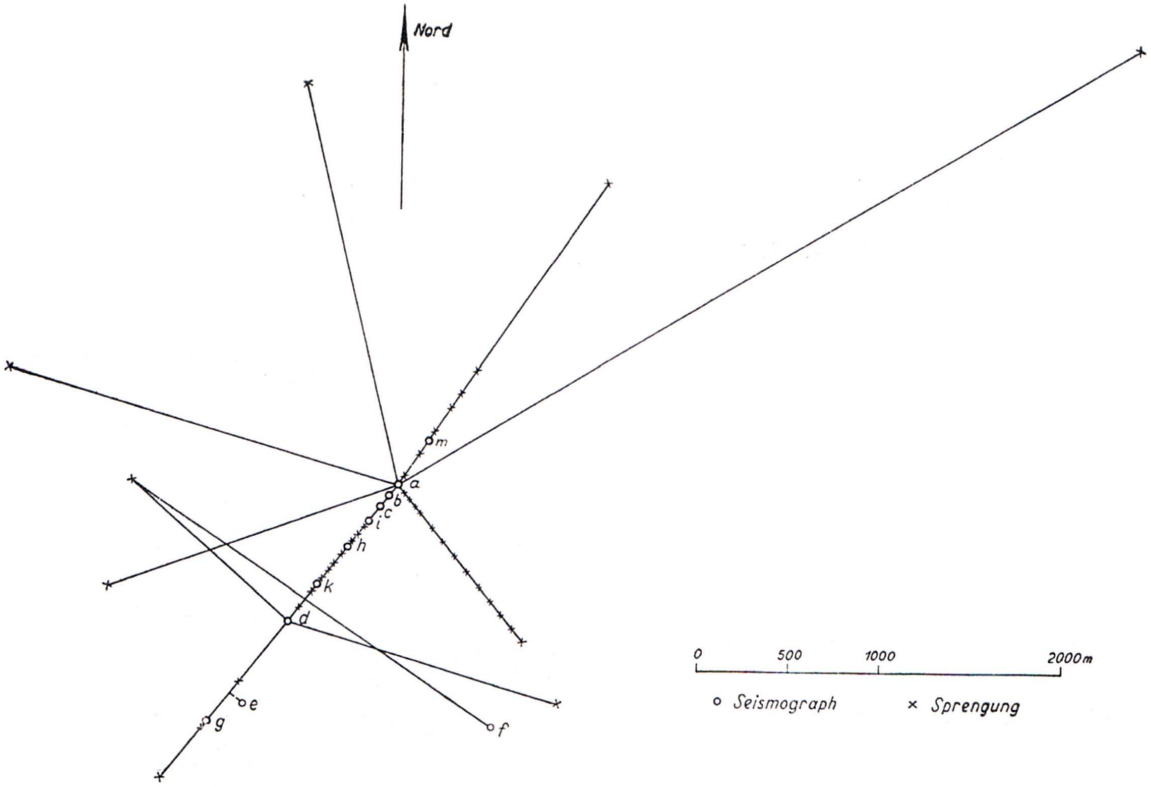

Abb. 8. Lageplan zum Linien- und Fächerschießen

tiefe von Erdbeben benutzten Formel $T = 0{,}5\ K \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}}$, worin K die Entfernung des Schnittpunktes der beiden Laufzeitkurven (Knickentfernung) ist, zu 62 m. In dieser Tiefe stehen unter diluvialen und jungtertiären Sanden und Tonen unterdevonische Schiefer an, während das geologische Profil zu dem Seismogramm der *Abb. 5* und zu der Laufzeitkurve der *Abb. 7* bis mehrere hundert Meter Tiefe nur Diluvium und Jungtertiär aufweist.

Bei der Berechnung der Tiefe ist angenommen worden, daß die Grenzfläche zwischen Deckgebirge und Tiefenschicht parallel zu der im vorliegenden Falle horizontalen Erdoberfläche verläuft. Im allgemeinen ist der Verlauf der Grenzfläche nicht bekannt, er läßt sich jedoch durch geeignete Versuchsanordnungen, z. B. durch Vertauschen von Spreng- und Beobachtungspunkten (Schießen und Gegenschießen) ermitteln, wobei sich außer den Wellengeschwindigkeiten und Tiefen auch die Neigung der Grenzfläche gegen die Erdoberfläche ergibt (s. *Abb. 18*). Nach den aus den Laufzeitkurven ermittelten Wellengeschwindigkeiten kann bis zu einem gewissen Grade auf die Art der unter dem Deckgebirge anstehenden Gebirgsschichten geschlossen werden, insbesondere durch Vergleich mit den Ergebnissen gleichartiger Messungen über einem bereits bekannten geologischen Profil. Das Verfahren gewährt demnach von der

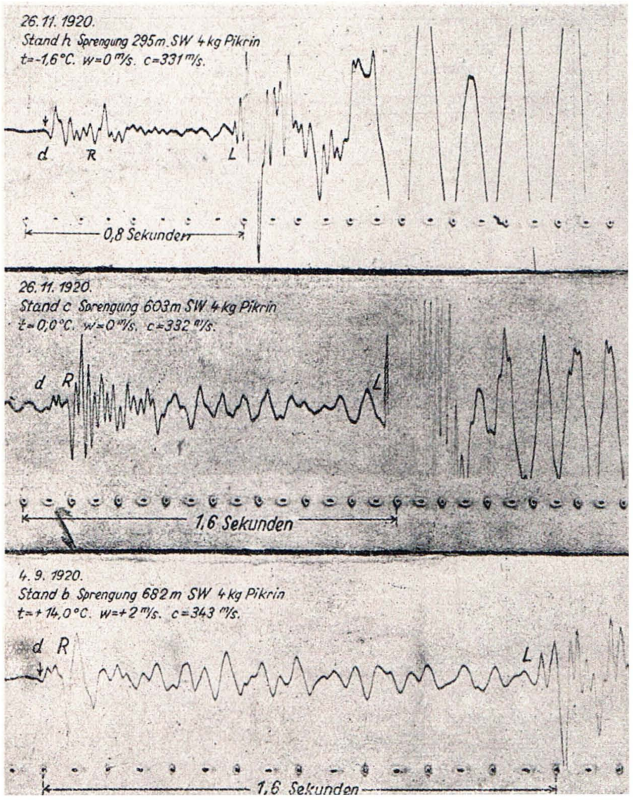

Abb. 9. Seismogramme zum Linien-Reflexionsschießen

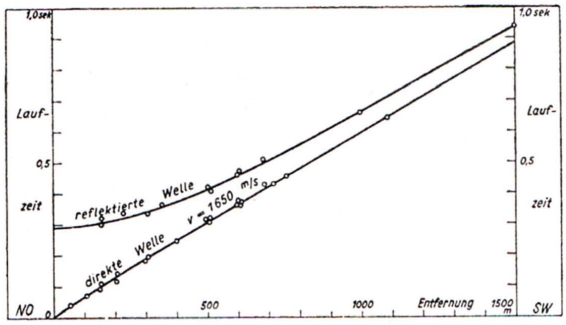

Abb. 10. Laufzeitkurven der direkten und reflektierten Wellen

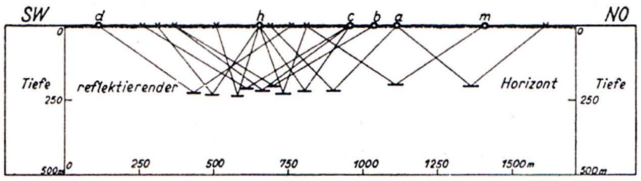

Abb. 11. Reflexionsprofil mit einem reflektierenden Horizont

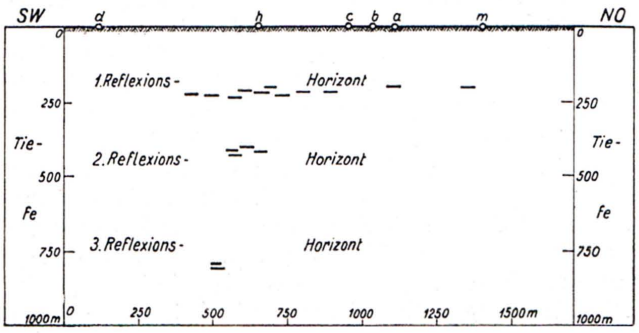

Abb. 12. Reflexionshorizonte in drei verschiedenen Tiefen

Erdoberfläche aus einen weitgehenden Einblick in die stratigraphischen und tektonischen Verhältnisse des Untergrundes, zumal auch mehrere untereinander folgende Schichten festgestellt werden können. Die Anordnung von Sprengung und Beobachtungsstellen erfolgt auf Linien und in Fächern. *Abb. 8* zeigt den Lageplan zu einem Linien- und Fächerschießen.

Im Zusammenhang mit der Deutung der indirekten Wellen gelang Verf. auch die Identifizierung und Nutzbarmachung der reflektierten Wellen. In dem Seismogramm der *Abb. 1* ist der Weg der reflektierten Welle bei der geringen Tiefe der Grenzfläche zwischen dem Deckgebirge und der darunter anstehenden Gebirgsschicht von nur 62 m gegenüber einer Sprengentfernung von 1000 m nur 8 m länger als der Weg der direkten, im oberen Deckgebirge gelaufenen Welle. Bei einer Wellengeschwindigkeit von 1650 m/s kommt die reflektierte Welle demnach nur 8 m:1650 m/s = 0,005 s später an als die direkte Welle, so daß die beiden Welleneinsätze im Seismogramm bei einer Registriergeschwindigkeit von 33 mm/s nur 0,16 mm auseinander liegen und deshalb nicht getrennt voneinander erscheinen. In den drei Seismogrammen der *Abb. 9* treten die direkte Welle d und die reflektierte Welle R aber deutlich getrennt voneinander auf. Ein Kriterium dafür, daß es sich bei R um eine reflektierte Welle handelt, besteht in der Abnahme des Zeitunterschiedes zwischen dem Eintreffen dieser Welle und der direkten Welle mit zunehmender Sprengentfernung, wie es die Laufzeitkurven der *Abb. 10* zeigen. Dagegen nimmt der Zeitunterschied zwischen der indirekten und der direkten Welle (B_1 und B_2 in *Abb. 1*) mit wachsender Sprengentfernung zu, wie aus *Abb. 6* ersichtlich ist.

Die Tiefe T der reflektierenden Schicht ergibt sich nach der Formel

$$T = 0{,}5v\sqrt{t_R^2 - t_d^2},$$

worin v die Geschwindigkeit der Deckgebirgswelle, t_R und t_d die Laufzeiten der reflektierten und der direkten Welle bedeuten. Während t und t_R dem Seismogramm entnommen werden können, liefert in günstigen Fällen die Laufzeitkurve der reflektierten Welle die Geschwindigkeit der letzteren nach der Formel

$$v = \sqrt{\frac{e_2^2 - e_1^2}{t_{R_2}^2 - t_{R_1}^2}},$$

worin e_1 und e_2 zwei Sprengentfernungen und t_{R_1} und t_{R_2} die Laufzeiten der reflektierten Wellen für diese Entfernungen bedeuten. Im allgemeinen muß indessen die Geschwindigkeit der reflektierten Welle aus Refraktionsmessungen oder durch Laufzeitmessungen in bereits niedergebrachten Bohrungen ermittelt werden. Die zu den Seismogrammen der *Abb. 9* und weiteren Seismogrammen gehörigen Tiefen der reflektierenden Schicht sind mit der aus der unteren Laufzeitkurve der *Abb. 10* entnommenen Geschwindigkeit v = 1650 m/s berechnet und in dem Reflexionsprofil der *Abb. 11* durch kleine waagerechte Striche bezeichnet worden. Die Tiefen nehmen von NO nach SW hin von 200 m auf 235 m zu. Außer diesen Reflexionen hat Verf. seinerzeit noch Reflexionen aus rd. 400 m und 800 m Tiefen beobachtet und in dem Profil der *Abb. 12* zusammen mit den Reflexionen im 200-m-Horizont zur Darstellung gebracht. Die *Abb. 13* gibt drei Seismogramme zu einem Fächer-

reflexionsschießen wieder, dessen Anordnung aus *Abb. 14* zu ersehen ist. Wesentlich bei der getroffenen Anordnung von Seismograph und Sprengungen ist die ungefähre Gleichheit der Länge der einzelnen Fächerstrahlen, weil dann, wenigstens bei der vorliegenden geringen Neigung der reflektierenden Grenzfläche gegen die Erdoberfläche, der Einfluß einer Geschwindigkeitszunahme im Deckgebirge nach der Tiefe hin für alle Strahlen nahezu gleich bleibt. In *Abb. 14* sind die in den einzelnen Fächerstrahlen ermittelten Tiefen angegeben. Sie zeigen zwischen den Strahlen l_4 und l_6 einen Abbruch, vermutlich eine Verwerfung der reflektierenden Gebirgsschicht von rd. 20 m, die sich an der gleichen Stelle auch in dem Reflexionsprofil der *Abb. 11* bemerkbar macht.

Bei den ersten Anwendungen des Verfahrens, die im Jahre 1920 u. a. im norddeutschen Flachlande zwecks Aufsuchung erdölhöffiger Strukturen stattfanden, ist Verf. durch seine damaligen Bochumer Mitarbeiter *Ludwig Grube* (†), Chefmechaniker der geophysikalischen Warten, und *Fr. Gries*, Bürovorsteher der Kartenabteilung der Westfälischen Berggewerkschaftskasse, tatkräftig unterstützt worden. Mit der am 4. April 1921 auf Anregung rheinisch-westfälischer Montankonzerne in Gemeinschaft mit dem Verf. erfolgten Gründung der Seismos G. m. b. H. in Hannover ging die Ausübung des Verfahrens auf zahlreiche Mitarbeiter, Bergingenieure, Feinmechaniker, Geologen, Geophysiker, Markscheider und Seismologen, über, die vom Verf. in das Verfahren eingeführt wurden. Bis zum Jahre 1930 einschließlich hat die Seismos unter Leitung des Verf. Untersuchungen in erdölführenden und erdölhöffigen Gebieten von Deutschland, Ägypten, Irak, Iran, Mexiko und den Vereinigten Staaten von Nordamerika ausgeführt. Dabei ist mit rd. 102000 Seismogrammen eine Fläche von rd. 200000 qkm bei einer gesamten Profillänge von rd. 240000 km, d. i. das Sechsfache des Erdumfanges, auf das Vorhandensein erdölhöffiger Strukturen abgetastet worden. In Deutschland hat die seismische Suche nach Salzdomen und anderen geologischen Strukturen seit der ersten Anwendung des Verfahrens im Jahre 1920 zu keiner Zeit geruht, wenngleich es Jahre gab, in denen das Interesse für geophysikalische Untersuchungen gering war. Bis zur Machtübernahme bildete den Höhepunkt der erzielten Erfolge die in Zusammenarbeit mit der Drehwaage erfolgte Entdeckung von zehn, z. T. sehr tiefen Salzdomen für die Aller-Schürfgesellschaft m. b. H., einer Gründung der Gesellschafter der Seismos. Über die Ergebnisse der im Jahre 1934 begonnenen geophysikalischen Reichsaufnahme[7][8]), bei der auch das seismische Verfahren in großem Umfange angewendet wird, ist in dieser Zeitschrift mehrfach berichtet worden, insbesondere von Professor Dr. *A. Bentz* und Dr. *H. Cloß* in dem *Barsch*-Heft[9]).

Im folgenden wird die wirtschaftliche Auswirkung des Verfahrens im Erdölbergbau auf Grund seiner Anwendung in den Vereinigten Staaten von Nordamerika geschildert, wo sie am umfangreichsten war und wo die einzelnen Funde durch Mitteilungen im amerikanischen Fachschrifttum bekannt geworden sind. Die ersten Untersuchungen begannen am 24. Juli 1923 auf Anregung des bekannten holländischen Geologen Dr. *W. A. J. Van Waterschoot Van der Gracht* durch einen aus dem Obersteiger *O. Weitershagen*, dem Feinmechani-

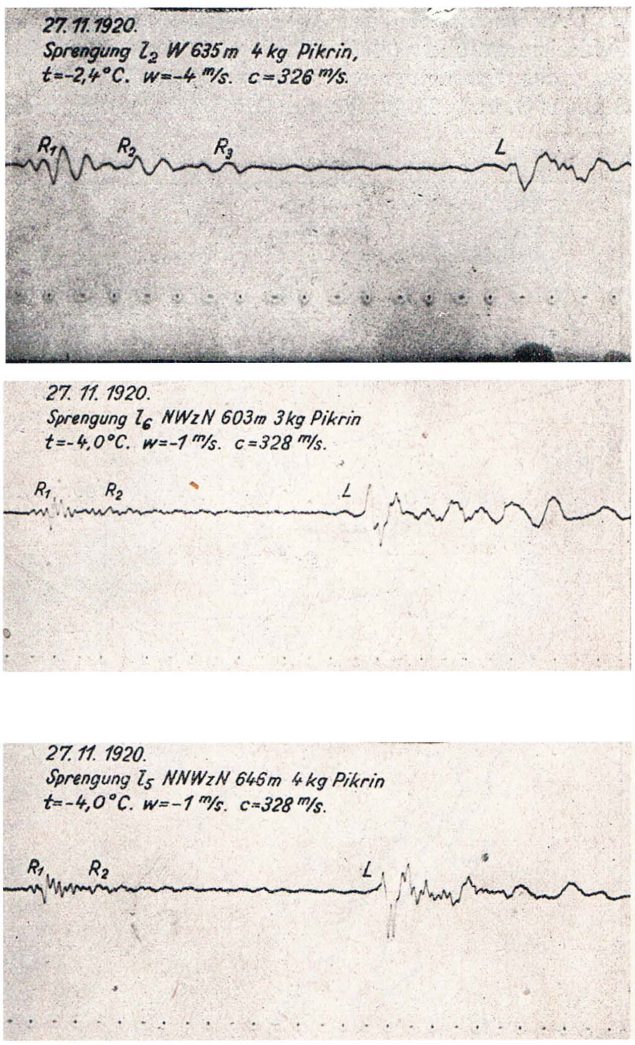

Abb. 13. Seismogramme zum Fächer-Reflexionsschießen

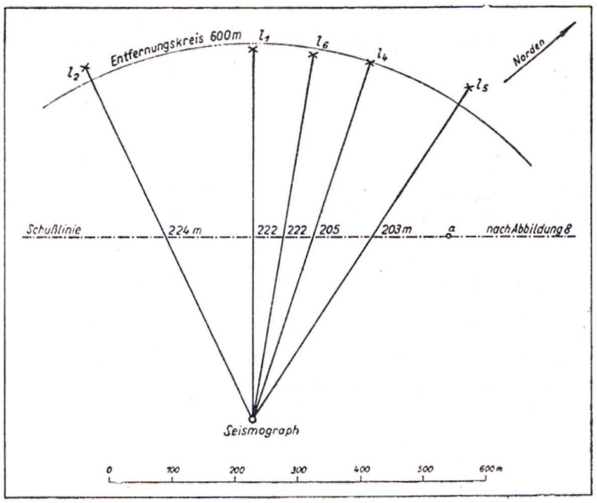

Abb. 14. Lageplan zum Fächer-Reflexionsschießen

[7]) *O. Barsch*, Die planmäßige geophysikalische Erforschung Deutschlands als Grundlage weiterer erdölgeologischer Aufschlußarbeiten. Oel u. Kohle **1**, 79 [1933].

[8]) *O. Barsch*, Die geophysikalische Reichsaufnahme als Grundlage für die Erschließung neuer Lagerstätten. Oel u. Kohle **12**, 1035 [1936].

[9]) *A. Bentz* u. *H. Cloß*, Erdöl und geophysikalische Reichsaufnahme in Großdeutschland. Oel u. Kohle **35**, 731 [1939].

ker *G. Schwiening* und dem Verf. bestehenden, mit einem Feldseismographen (*Abb. 3*) mit elektrischer Übertragung des Sprengmomentes ausgerüsteten Trupp der Seismos G. m. b. H. bei Ponca City in Oklahoma (siehe Dr. *H. Salfeld* als Vertreter des Verf., und Dr. *Georg Beck* (†), den Seismologen Dr. *K. Roepke* und den Feinmechaniker *Fr. Ermisch* verstärkt und mit drei Feldseismographen versehen.

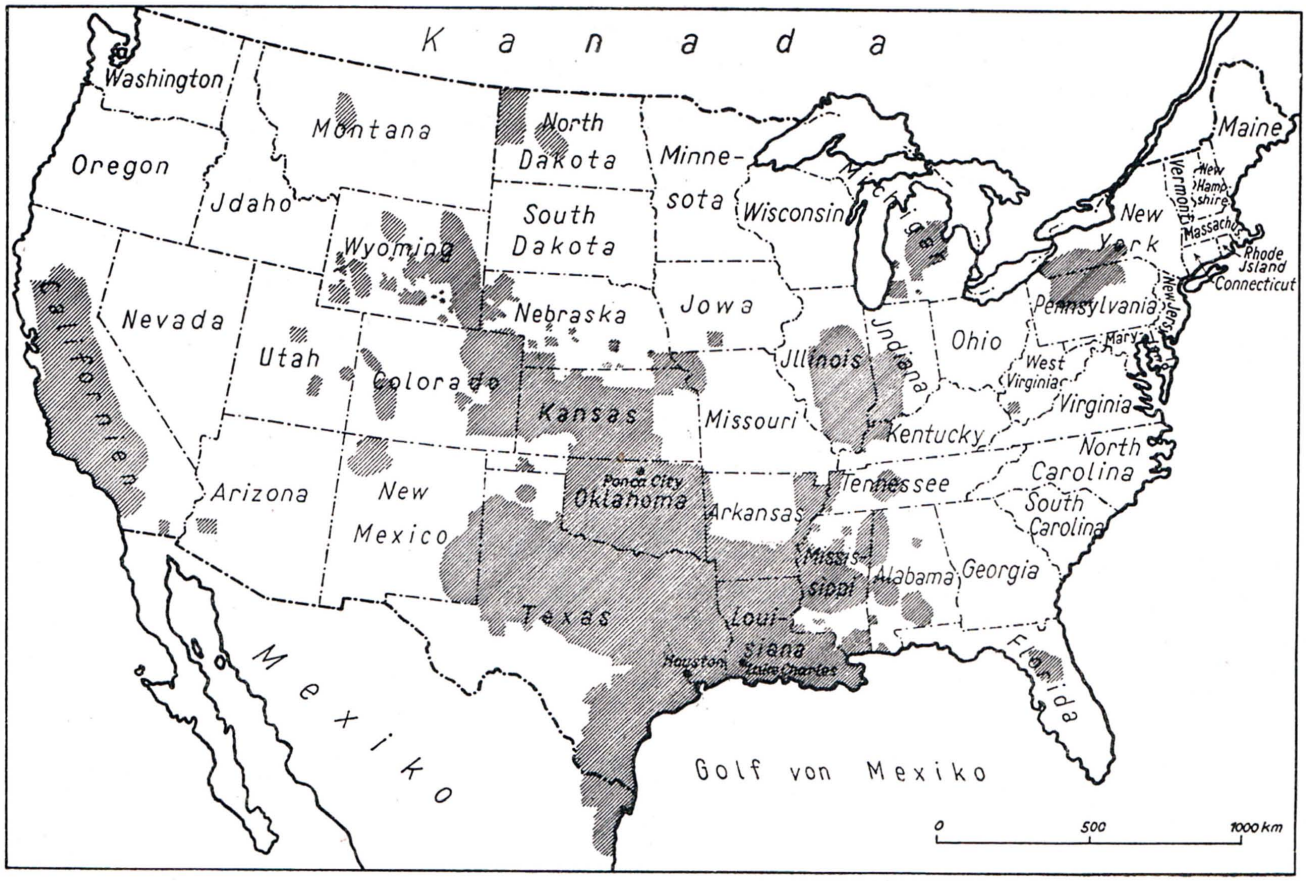

Abb. 15. Übersichtskarte über die Vereinigten Staaten von Nordamerika mit den seismisch untersuchten Flächen (schraffiert)
Nach *J. B. Macelwane*[31])

Übersichtskarte der *Abb. 15*). Die *Abb. 16* gibt zwei Seismogramme wieder, während *Abb. 17* und *18* Laufzeitkurven über mehreren, z. T. geneigten Grenzflächen zwi-

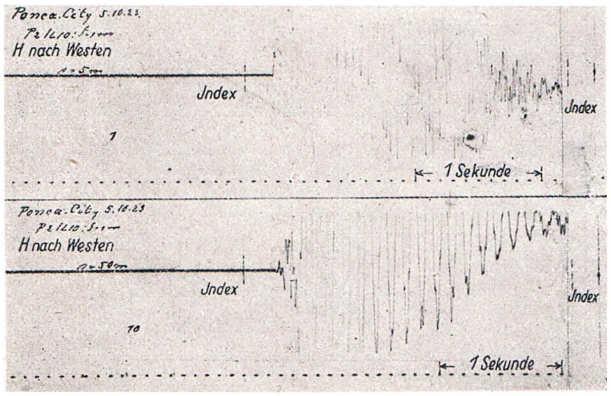

Abb. 16. Seismogramme zu den ersten seismischen Untersuchungen in den USA

schen verschiedenen Gebirgsschichten darstellen, die in Nordosttexas aufgenommen worden sind[10]). Im Verlaufe der seismo-stratigraphischen Arbeiten wurde der Trupp Anfang November 1923 durch die Geologen Professor

Im Frühjahr 1924 begannen die Untersuchungen in dem großen Salzdomgebiet von Texas und Louisiana. *Abb. 19* zeigt einige auf und an dem bekannten 24 km südwestlich von Houston (s. *Abb. 15*) in einer Teufe von kaum 50 m anstehenden Salzdom Blue Ridge gewonnene Laufzeitkurven über dem geologischen Profil. *Abb. 20* gibt zwei auf dem Punkte A aufgenommene Seismogramme dazu wieder, von denen das obere in 600 m Entfernung von dem südwärts von A außerhalb des Domes, das untere in der gleichen Entfernung von der nordwärts von A auf dem Salzdom vorgenommenen Sprengung herrührt. Der Unterschied der Laufzeiten der ersten Bodenwellen ergibt sich zu 0,15 s und die Geschwindigkeit der Wellen im jungtertiären Deckgebirge zu 1800 m/s, im Salzhorst zu 5000 m/s. Zur genaueren Ermittlung der Wellengeschwindigkeit in dem Gipshut bzw. cap rock sind gelegentlich der Abgrenzung des dem Blue Ridge benachbarten Boling-Salzdomes die in der *Abb. 21* wiedergegebenen Laufzeitkurven durch Schießen und Gegenschießen aufgestellt worden.

Nach diesem „Einschießen" des aus dem Seismologen Dr. *O. Geußenhainer*, dem Chefmechaniker *P. Liebrecht* und dem technischen Assistenten *Fr. Röltgen* bestehen-

[10]) *P. Wagner*, Location of subsurface fault planes with „Seismos" tried in Texas. National Petr. News, New York, 12. Dez. 1923, S. 51.

den, mit einem Feldseismographen (*Abb. 3*) ausgerüsteten Trupp erfolgte bald die Entdeckung des ersten unbekannten Salzdomes. *Abb. 22* enthält den Lageplan der bei Orchard, 60 km südwestlich von Houston gelegenen Moore Ranch (Brazos River Ranch) mit dem Schußlinienplan und dem entdeckten Salzdom. Laufzeitmessungen auf dem Punkte A ergaben in den Linien 1, 2 und 3, von denen die erste zwei alte, dem Trupp nicht bekanntgegebene, im Tertiär steckengebliebene Tiefbohrungen enthält, eine schwach nach SO hin ansteigende Grenzfläche in durchschnittlich 400 m Tiefe mit Geschwindigkeiten von 2300 m/s bis 2600 m/s (*Abb. 23*). Dagegen wies die in der südwestlichen Ecke des Konzessionsgebietes vom Punkte B aus nach SSO abgesprengte Linie 4 eine der am Salzdom von Blue Ridge vom Punkte B aus nach Süden hin gewonnenen Laufzeitkurve (*Abb. 19*) ähnliche Kurve auf, die in *Abb. 24* wiedergegeben ist. Da noch mehrere andere abgesprengte Linien gleichartige Laufzeitkurven ergaben, sprach der Trupp den auf diese Weise gefundenen verdeckten Gesteinskörper als Salzdom an. Am 20. September 1924 haben *Geußenhainer* und Verf. den in dem Lageplan der *Abb. 22* mit K bezeichneten Bohrpunkt angegeben, nachdem sie vorher zur Sicherung gegen Überraschungen noch die kurzen Profillinien 12 und 13 untersucht und in ihnen den Salzdom ebenfalls festgestellt hatten. Am 19. November 1924 traf die bis 375′ = 114 m Teufe niedergebrachte Bohrung J. Moore Nr. 1 den cap rock (Gipshut) in der von *Geußenhainer* und dem Verf. vorausgesagten Tiefe von 350′ = 103 m an[11]). Zwei Jahre später ist an der O-Flanke des Domes in 3759′ = 1150 m Teufe durch eine Bohrung mit einer Tagesproduktion von 2800 barrels = 400 t ein Erdölfeld erschlossen worden[12]).

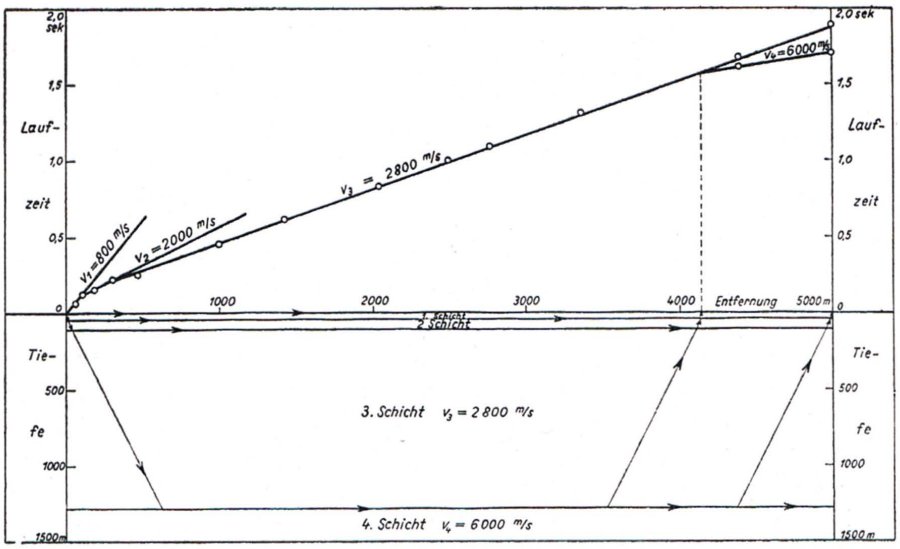

Abb. 17. Laufzeitkurven über vier verschiedenen Gebirgsschichten mit parallel zur Erdoberfläche verlaufenden Grenzflächen

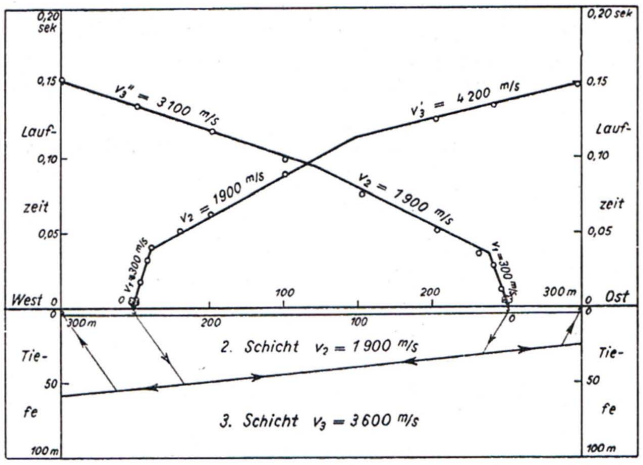

Abb. 18. Laufzeitkurven über drei verschiedenen Gebirgsschichten mit zum Teil gegen die Erdoberfläche geneigten Grenzflächen

Soweit die Geschichte der ersten seismischen Entdeckung einer erdölführenden Struktur in USA. Es würde zu weit führen, alle nachfolgenden Entdeckungen zu schildern, ein kurzer Überblick über die weitere Entwicklung in diesem Erdölgebiet erscheint indessen angebracht. Im gleichen Jahre 1924 ist durch einen andern Trupp der Seismos G.m.b.H. unter Führung der Geologen Dr. *C. Schmidt* und Dr. *E. Cloos* noch der ebenfalls flache Salzdom *Long Point*, 56 km südwestlich von Houston seismisch festgestellt worden an einer Stelle, die von der deutschen Gesellschaft „Exploration" auf Grund von Drehwaagemessungen als domverdächtig bezeichnet worden war.

Das Jahr 1925 brachte die seismische Entdeckung der flachen Salzdome Fanette, 100 km östlich und Hawkinsville, 100 km südsüdwestlich von Houston durch den Seismologen Dr. *O. Geußenhainer*, den Geologen Dr. *W. Heise* und den Markscheider Dr. *W. Kolb* der Seismos

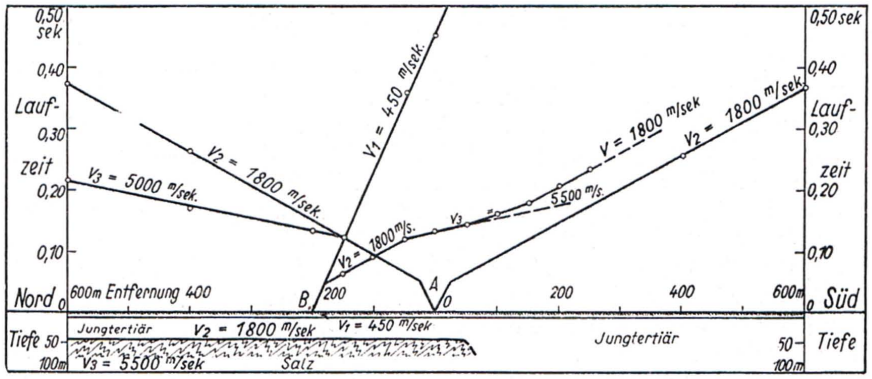

Abb. 19. Laufzeitkurven auf und an dem Salzdom Blue Ridge

[11]) *Gr. Triplett*, Seismograph proves successful on Coast, Oil Weekly **35**, 36 [1924].

[12]) *S. A. Judson* u. *R. A. Stamey*, Overhanging Salt Domes of Texas and Louisiana. Symposium Gulf Coast Oil Fields. London 1936, S. 166.

G. m. b. H., sowie Starks, 40 km westlich von Lake Charles in Louisiana durch *Heise* und *Kolb*. Sämtliche Funde sind durch Bohrungen bestätigt worden[13]).

genannt[15]). Mit Rücksicht darauf, daß zur Feststellung und Abgrenzung dieses Domes neben den Refraktions- auch Reflexionsmessungen ausgeführt worden sind sowie bei der Auswertung der Refraktionen das sog.

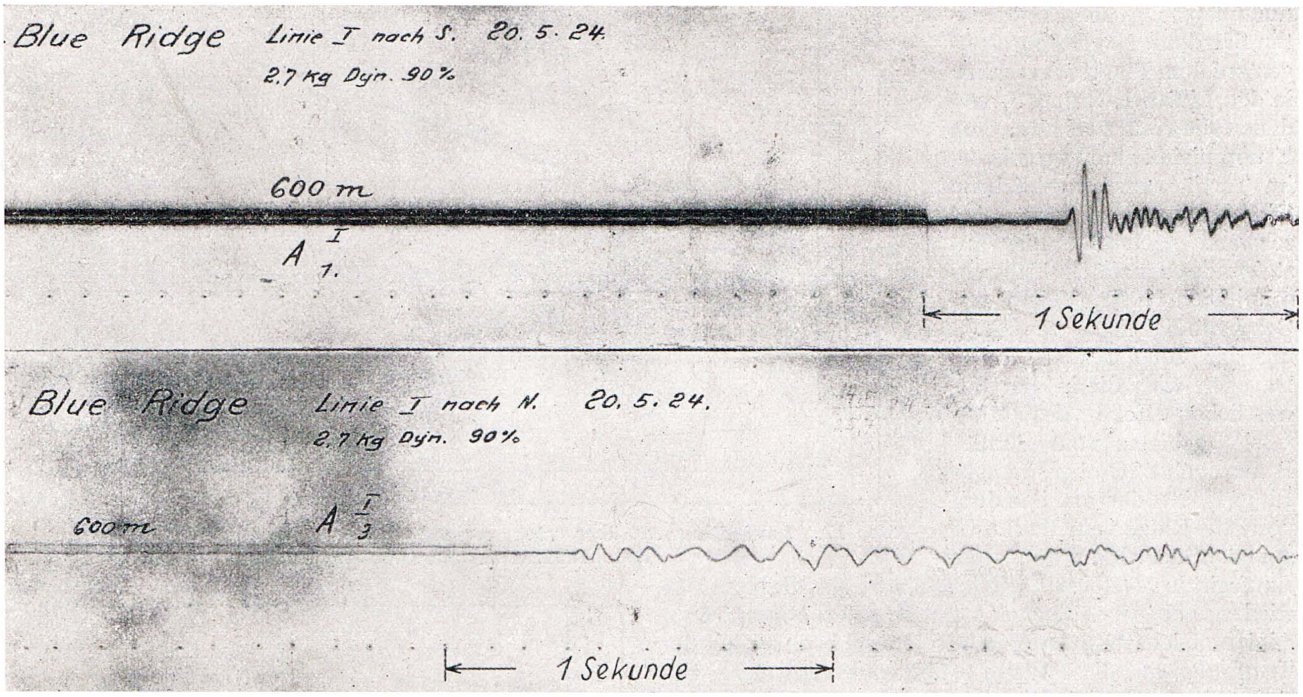

Abb. 20. Seismogramme zum Linien-Refraktionsschießen auf und an dem Salzdom Blue Ridge

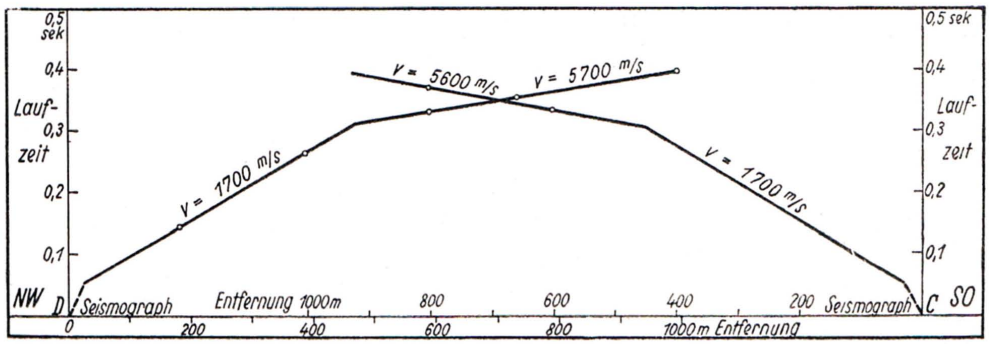

Abb. 21. Laufzeitkurven zum Refraktions-Linienschießen und -Gegenschießen auf dem Boling-Salzdom

Einen großen Auftrieb erhielten die Untersuchungen, als es der Seismos G. m. b. H. im folgenden Jahre gelang, neben der Entdeckung einer Anzahl flacher Salzdome auch die ersten bis mehrere tausend Meter tiefen Dome zu finden. Ein mitteltiefer Salzdom, White Castle im östlichen Louisiana (cap rock bei 1810′ = 550 m erbohrt) ist von dem Geophysiker Dr. *Fr. Trappe* und dem Markscheider *R. Hanning* gefunden worden. Im März 1926 berichteten Markscheider Dr. *O. Rellensmann* und Seismologe Dr. *K. Roepke* über die Entdeckung des 18 km östlich von Lake Charles anstehenden sehr tiefen Iowa-Doms, über dem fünf Jahre später in rd. 2100 m Tiefe ein Erdölfeld erschlossen worden ist[14]). *Rellensmann* und der Seismologe Dr. *W. Meyer* fanden am 22. September 1926 am W-Ufer des Calcasieu-Sees, 25 km südsüdwestlich von Lake Charles den rd. 1000 m tiefen Salzdom East Hackberry, auch Kelso Bayou

Wellenfrontenverfahren[16]) zur Anwendung gelangt ist, sei auf diese Entdeckung etwas näher eingegangen. *Abb. 25* enthält einen Teil des in dem betreffenden Gebiet durchgeführten Schußlinienplanes sowie die Fundbohrung Caldwell Nr. 1. Aus der Sammellaufzeitkurve der *Abb. 27* ist der Einfluß des Domes an der Voreilung der indirekten Welle zu erkennen, am deutlichsten beim

[13]) *L. H. Freedman*, Development in the Gulf Coastal Area during 1925. Trans. Amer. Mining and Metallurgical Institute, New York, February meeting 1926.

[14]) *O. P. Teas*, Cameron Meadows and Iowa, two Coastal Louisiana Fields. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists **16**, 255 [1932].

[15]) *J. Logan*, Kelso Bayou-(East Hackberry-)dome is outstanding seismograph discovery, Oil Weekly **48**, 43 [1928].

[16]) *E. A. Ansel*, Das Impulsfeld der praktischen Seismik in graphischer Behandlung. Gerlands Beitr. Geophysik, Erg. Hefte Angew. Geophysik **1**, 117 [1931].

Abb. 22. Lageplan zum Linien-Refraktionsschießen bei Orchard

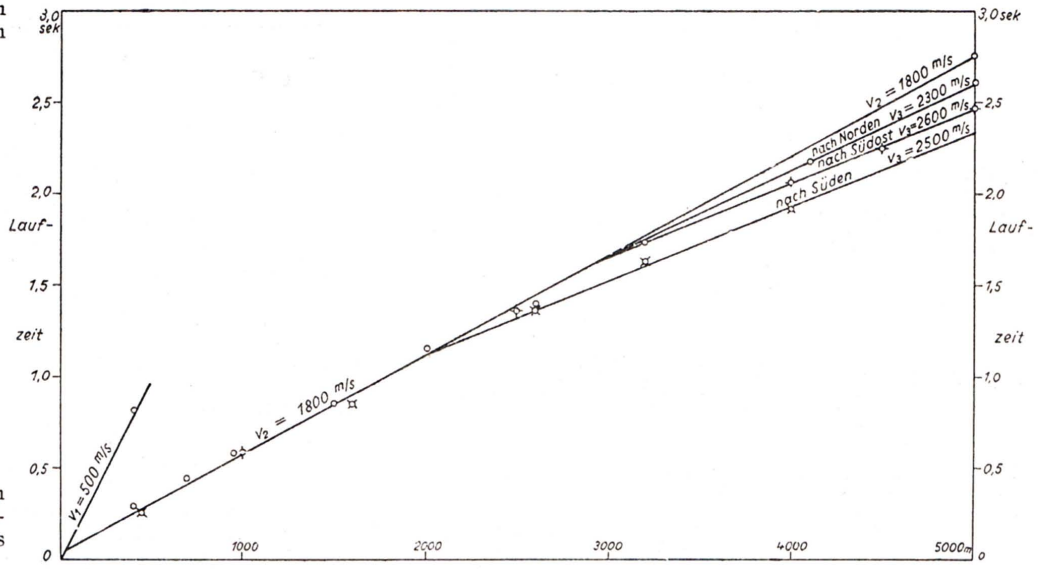

Abb. 23. Laufzeitkurven zum Linien-Refraktionsschießen außerhalb des Orchard-Salzdomes

Punkte B_{10}. Vor der Angabe des Bohrpunktes ist das Beobachtungsmaterial auch von dem Geophysiker Professor Dr. *E. A. Ansel* an Ort und Stelle durchgearbeitet

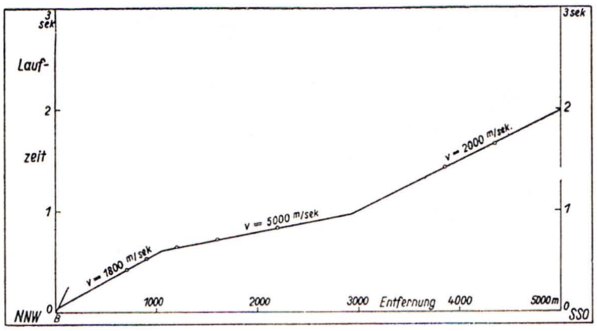

Abb. 24. Laufzeitkurve zum Linien-Refraktionsschießen über dem Orchard-Salzdom

worden. *Ansel* hatte bereits die Reflexionsmessungen des Verf. in Deutschland aus dem Jahre 1920 ausgewertet und am 17. März 1922 einen schriftlichen Bericht darüber an die Seismos G. m. b. H. erstattet. In *Abb. 28* ist ein an dem East Hackberry-Dom aufgenommenes Reflexionsseismogramm wiedergegeben, in dem zur Erleichterung der Identifizierung der Einsätze der verschiedenen Wellen die Schwingungen von drei nebeneinander aufgestellten Seismometern verzeichnet sind. Die Übertragung des Schußmomentes erfolgte durch drahtlose Wellen. In *Abb. 29* ist das Wellenfronten-

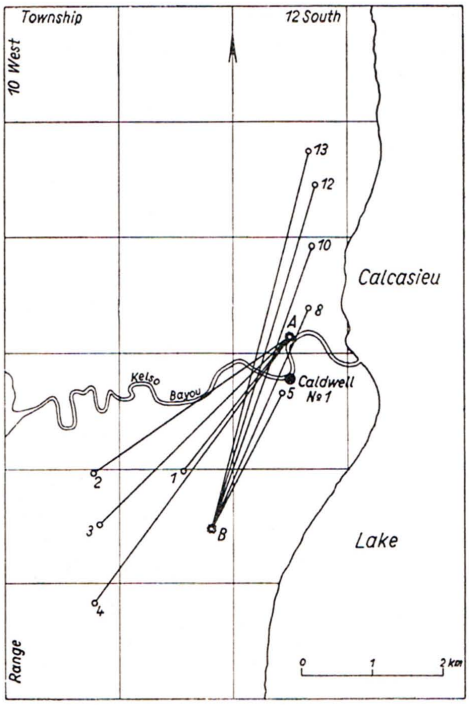

Abb. 25. Auszug aus dem Lageplan zum Refraktions- und Reflexions-Schießen am East Hackberry-(Kelso Bayou-)Salzdom

verfahren dargestellt, nach dem sich Tiefe und Form des verdeckten Gebirgskörpers ermitteln lassen. Die gute Übereinstimmung der seismisch festgestellten Lage und Tiefe des Domes ist aus *Abb. 26* und *30* zu ersehen, die ein Querprofil durch die Südflanke des Salzdomes und einen Lageplan von dem südlichen Teile des an und über dem Dom erschlossenen Erdölfeldes nach *A. J. Bauernschmidt*[17]) wiedergibt. Die erste im Mai 1927 auf Grund der seismischen Feststellungen angesetzte Bohrung, Caldwell Nr. 1, erbrachte am 18. August 1927 einen heftigen mit Kraterbildung verbundenen Gasausbruch aus 4016′ = 1220 m Tiefe. In der zweiten Bohrung, Caldwell Nr. 2, wurde am 7. November 1927 in 3972′ = 1205 m Teufe eine Tagesproduktion von 800 barrels = 114 t Erdöl erzielt[17]).

Soweit die Geschichte der Entdeckung und Erschließung des ersten tiefen Salzdomes in den USA.

Im einschlägigen Schrifttum wird irrtümlicherweise der 34 km südwestlich von Houston in der Nähe des bereits

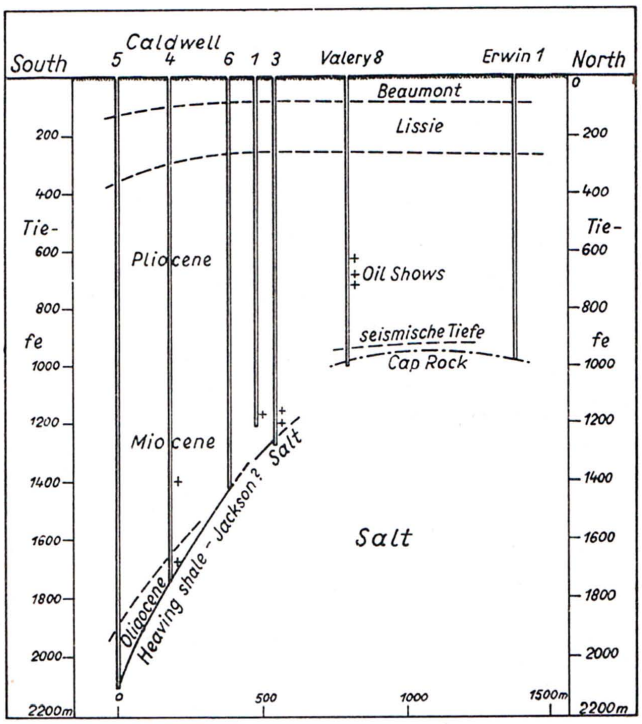

Abb. 26. Geologisches Profil durch die Südflanke des East-Hackberry-(Kelso Bayou-)Salzdomes
Nach *A. J. Bauernschmidt*[17])

erwähnten flachen Salzdomes Blue Ridge anstehende Sugarland-Dom als der erste geophysikalisch entdeckte bzw. überhaupt bekannt gewordene tiefe Salzdom bezeichnet. Seine Auffindung erfolgte im Jahre 1927 durch Drehwaagemessungen der deutschen Gesellschaft „Exploration". Im gleichen Jahre stellte ein von Markscheider Dr. *W. Kolb* geführter Trupp der Seismos G. m. b. H. den Dom durch Refraktionsschießen fest[18]). *Abb. 31* enthält die von *Kolb* aufgestellte Sammellaufzeitkurve, *Abb. 32* ein von *W. B. Carter* und *P. H. O'Bannon*[19]) entworfenes Querprofil nach der in dem dar-

[17]) *A. J. Bauernschmidt jr.*, East Hackberry-salt-dome, Cameron Parish, Louisiana, Bulletin Amer. Assoc. Petrol. Geologists **15**, 247 [1931].

[18]) *J. B. Eby* u. *R. P. Clark*, Relation of geophysics to salt-dome structures. Symposium Gulf Coast Oil Fields, London 1936, S. 170.

[19]) *W. B. McCarter* u. *P. H. O'Bannon*, Sugarland Oil Field, Fort Bend County, Texas. Symposium Gulf Coast Oil Fields, London 1936, S. 709.

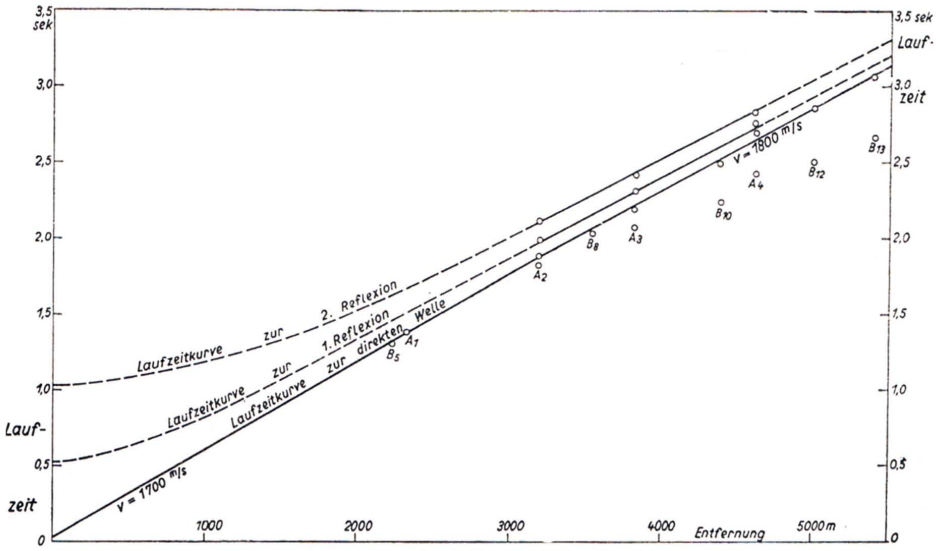

Abb. 27. Sammellaufzeitkurve zum Refraktions- und Reflexions-Schießen am East Hackberry- (Kelso Bayou-) Salzdom

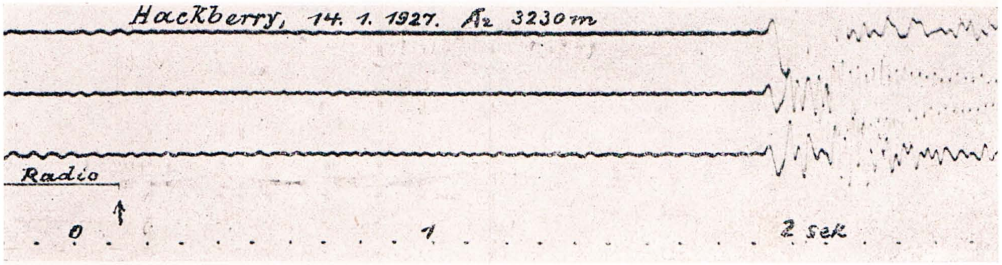

Abb. 28. Dreifaches Seismogramm (Vertikalkomponenten) zum Reflexionsschießen am East Hackberry- (Kelso Bayou-) Salzdom

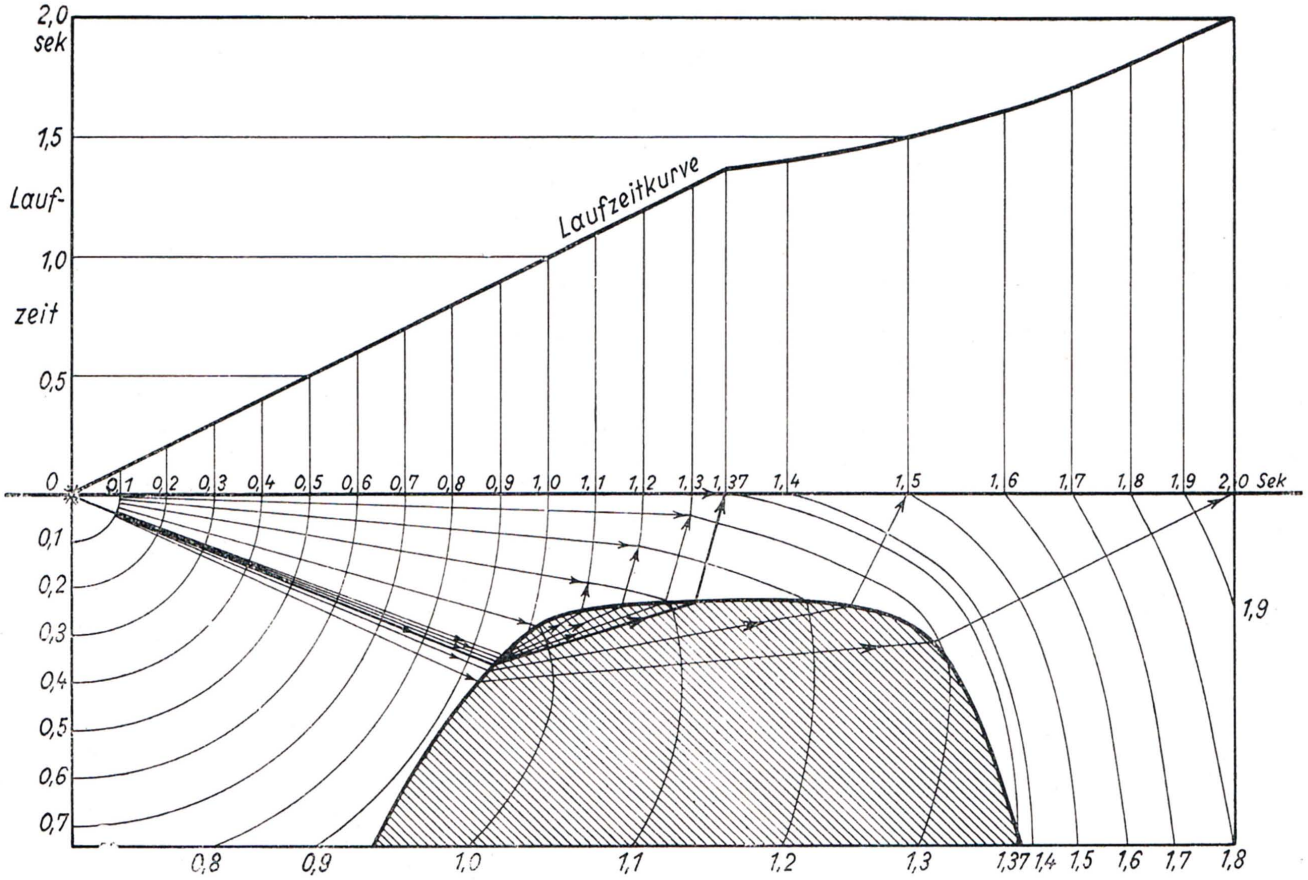

Abb. 29. Wellenfrontenverfahren zur Ermittlung der Tiefe und Form eines verdeckten Gebirgskörpers
Nach *E. A. Ansel*[16]) u. *Fr. Trappe*

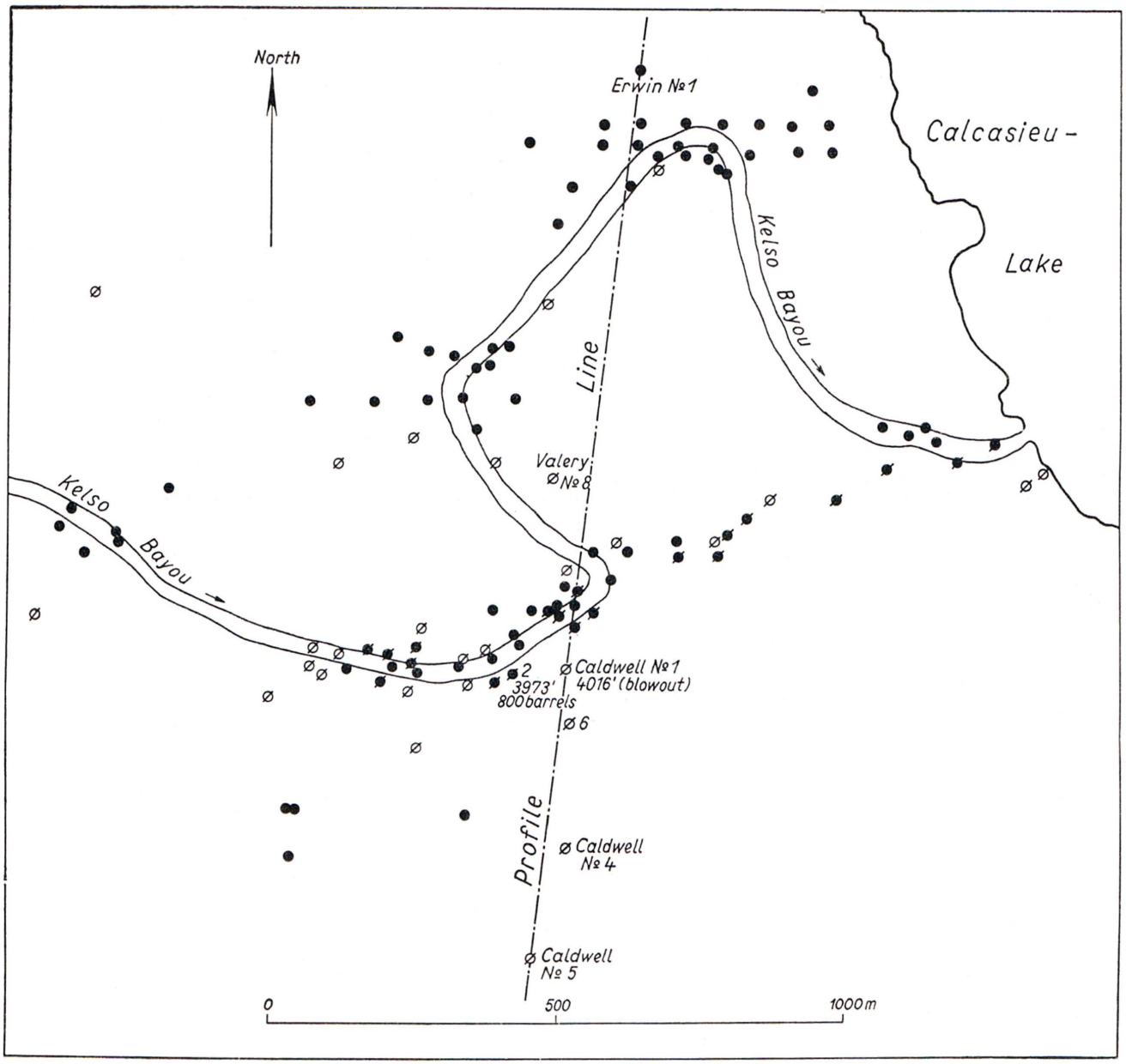

Abb. 30. Lageplan vom südlichen Teil des Erdölfeldes East Hackberry (Kelso Bayou)
Nach *A. J. Bauernschmidt*[17])

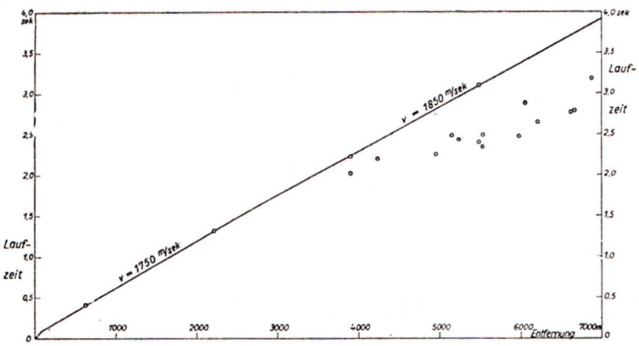

Abb. 31. Sammellaufzeitkurve zum Refraktionsschießen am Sugarland-Salzdom

unter dargestellten Grundriß angegebenen Linie A—B. Die erste Bohrung, Sugarland Industries Nr. 1, ist am 27. März 1938, sieben bzw. fünf Monate nach der Erschließung des East-Hackberry-Domes, in 3561′ = 1087 m Teufe mit ebenfalls 800 barrels = 114 t Erdöl fündig geworden. Bald darauf wurde auch das Salz bzw. cap rock in dem von *Kolb* vorausgesagten Tiefenbereich von 3000 bis 3500′ = 915 bis 1070 m angebohrt[19]).

Insgesamt sind von der Seismos G. m. b. H. bis Mitte 1930 an der Golfküste 22 Salzdome und zahlreiche Aufwölbungen in den Deckgebirgsschichten gefunden worden. Nach einer Mitteilung an den Verf. vom 23. Oktober 1924 vermutete Dr. *Van Waterschoot Van der Gracht* schon damals unter diesen seismischen Hochgebieten sehr tiefe Salzdome. Die deutschen Geologen Professor Dr. *J. Weigelt* und Professor Dr. *W. Klüpfel* fanden als damalige Truppführer der Seismos G. m. b. H. in den Jahren 1924 und 1925 mehrere solcher Aufwölbungen, unter denen sie ebenfalls tiefe Salzdome annahmen. Die überwiegende Zahl der von der Seismos G. m. b. H. gefundenen Hochgebiete hat sich bei den späteren Aufschlußbohrungen, denen eingehende Re-

flexionsmessungen der Amerikaner vorausgegangen sind, als erdölführend erwiesen. In mehreren Fällen ist auch das Salz durch Bohrungen erreicht worden.

Zur Ermittlung seismischer Hochgebiete haben die Truppführer der Seismos G. m. b. H., die Seismologen Dr. *Fr. Gerecke*, Dr. *A. Ramspeck* und Dr. *W. Meyer* unter gleichzeitiger Verwendung von fünf Feldseismographen der *Abb. 3* im inneren Salzdomgebiet von NO-Texas sowie in den Erdgasgebieten von SW-Texas Pläne mit Linien gleicher Laufzeit (Isochronen) der indirekten Welle für zwei konstant gehaltene Entfernungen, sog. Laufzeitpläne, aufgestellt. Bei diesen Arbeiten, die unter der Gruppenleitung von Dr. *Fr. Trappe* vor sich gingen, sind auch einige Salzdome gefunden worden. Als Abschluß der Arbeiten der Seismos G. m. b. H. hat *Trappe* im Jahre 1930 für weite Gebiete der Golfküste solche Isochronen entworfen. Über Wesen und geologische Bedeutung von Laufzeitplänen sowie ihre Verwendung bei der Deutung refraktionsseismischer Messungen im Zuge der geophysikalischen Reichsaufnahme hat Professor Dr. *H. Reich* in dieser Zeitschrift berichtet[20] [21].

Während das seismische Verfahren in den ersten Jahren ausschließlich in deutschen Händen lag, traten vom Jahre 1926 an in steigendem Umfange die Amerikaner auf den Plan. Ihr erster Erfolg war die Entdeckung des 65 km östlich von Houston anstehenden flachen (650′ = 198 m) Salzdomes Moss Bluff[19], dem bald zahlreiche andere folgten. Vom Jahre 1927 ab erzielten die Amerikaner in Oklahoma unter günstigen geologischen Verhältnissen die ersten brauchbaren Ergebnisse mit Reflexionsmessungen, die schnell auf einen hohen technischen Stand gebracht wurden und vom Jahre 1931 ab auch an der Golfküste von wachsendem Erfolge begleitet waren[22] [23] [24]. Das dabei benutzte Beobachtungsverfahren ist aus dem schematischen Profil der *Abb. 33* zu ersehen, in dem entlang einer geraden Linie an der Erdoberfläche in gleichen Abständen voneinander eine Anzahl elektrischer Seismometer (Geophone) und an den Enden der Linie zwei Schußbohrlöcher angebracht sind[25]. Die Sprengungen erfolgen auf der Sohle dieser Löcher zwecks besserer Ausnutzung der Sprengenergie und zur tunlichen Vermei-

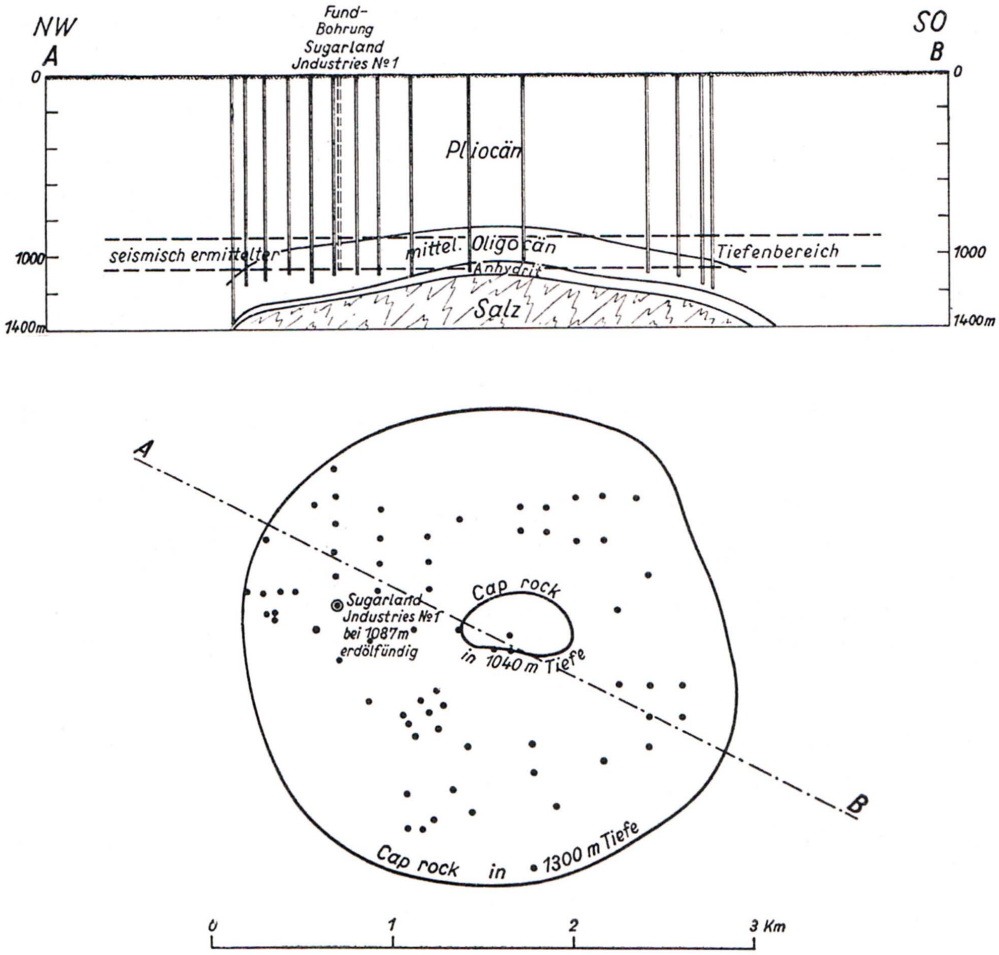

Abb. 32. Geologisches Profil und Grundriß zum Sugarland-Salzdom und -Erdölfeld
Nach *W. B. McCarter* u. *P. H. O'Bannon*[19]

[20] *H. Reich*, Über die geologische Deutung von seismischen Refraktionsmessungen, Oel u. Kohle **13**, 53 [1937].

[21] *H. Reich*, Laufzeitpläne und Geologie in Ostpommern und im Alpenvorland, Oel u. Kohle **35**, 740 [1939].

[22] *E. E. Rosaire*, Exploration by the reflection seismograph. Oil Weekly **86**, 70 [1937].

[23] *S. J. Pirson*, Dip Shooting calculations, Oil Weekly **85**, 22 [1937].

[24] *S. J. Pirson*, The correlation method of seismographing for oil. Oil Weekly **87**, 24 [1937].

[25] *G. H. Westby*, The discovery by reflection seismograph a small producing structure in Omulgee County, Oklahoma. J. Assoc. Petrol. Geophysicists **6**, 44 [1935].

dung der Überlagerung der reflektierten Wellen durch die bei einer Sprengung an der Erdoberfläche auftretenden starken Schwingungen in der losen Deckschicht. Die

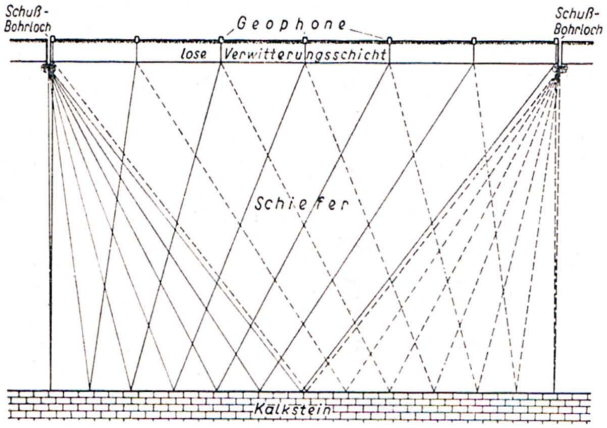

Abb. 33. Anordnung der Sprengungen und der Seismometer (Geophone) beim Linien-Reflexionsschießen
Nach *G. H. Westby*[25])

Aufnahme der Seismogramme geschieht an einer Zentralstelle auf elektro-photographischem Wege. *Abb. 34* gibt neben Zeitmarken im Abstande von je 0,01 s Aufzeichnungen der Schwingungen von sechs in gleichen Abständen von je 135′ = 40 m zwischen 40 und 240 m Entfernung von einem 53′ = 16 m tiefen Schußbohrloch

treten nach ihrem Abklingen sehr deutlich reflektierte Wellen hervor, deren Laufzeiten von 0,545 s in der Entfernung 135′ auf 0,555 s in 800′ Entfernung anwachsen.

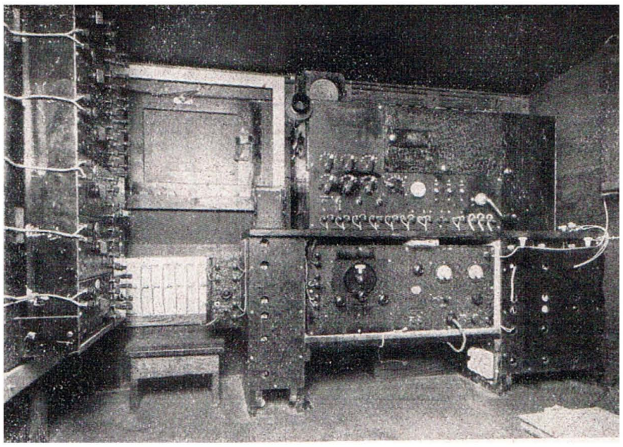

Abb. 36. Blick in einen amerikanischen seismischen Registrierwagen

Die Verbindungslinie der einzelnen Einsätze stellt die Laufzeitkurve der reflektierten Welle dar, während die Verbindungslinie der Einsätze der direkten Welle, die 0,023 s bis 0,095 s nach dem Schußmoment erfolgt sind, die Laufzeitkurve dieser Welle ergibt. Aus der Neigung der Laufzeitkurve der direkten Welle gegen die Ab-

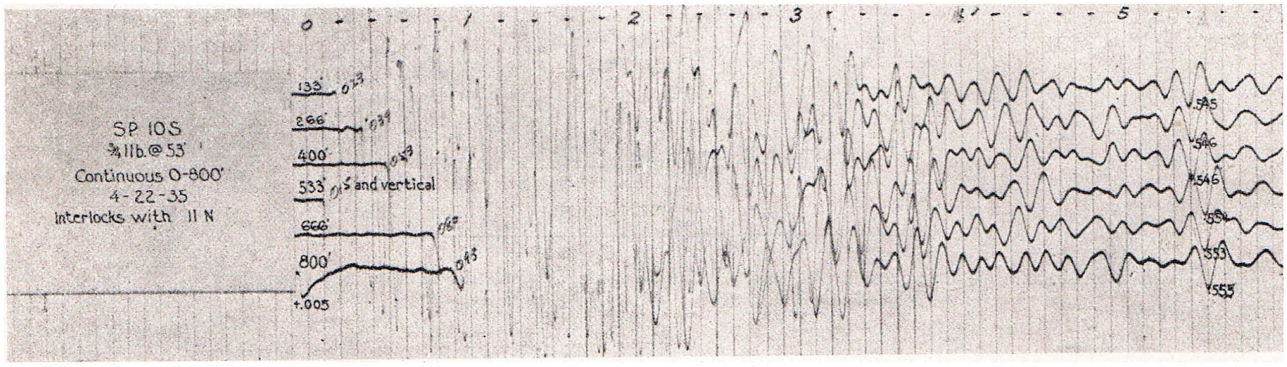

Abb. 34. Sechs Seismogramme (Vertikalkomponenten) zum Linien-Reflexionsschießen mit je einer Reflexion
Nach *G. H. Westby*[25])

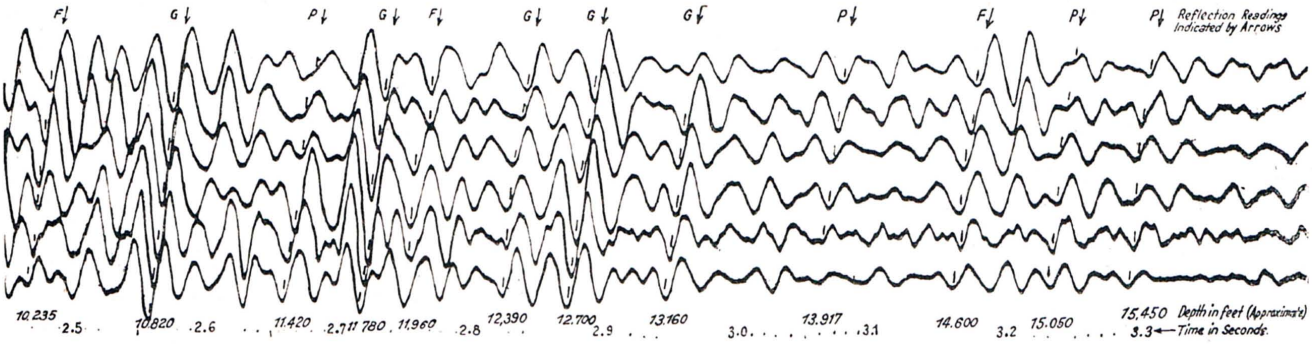

Abb. 35. Sechs Seismogramme aus den USA (Vertikalkomponenten) zum Linien-Reflexionsschießen mit je zwölf Reflexionen

aufgestellten Geophonen wieder. Die Sprengladung betrug $^3/_4$ lbs = 350 g. Während in der ersten halben Sekunde die direkten Wellen das Bild vollständig beherrschen,

szissenachse (in dem Seismogramm senkrecht zum Papierstreifen) ergibt sich die Geschwindigkeit dieser Welle, während die Neigung der Laufzeitkurve der

reflektierten Welle gegen die Abszissenachse in Beziehung zur Neigung der reflektierenden Schicht gegen die Erdoberfläche steht.

Zeitschrift und a. a. O. berichtet. Für die Leistungsfähigkeit des Reflexionsschießens liefert das Profil der *Abb. 38* mit elf Reflexionshorizonten ein Beispiel[30]).

Abb. 37. Ansicht des Wagenparkes eines amerikanischen seismischen Trupps

In den Reflexionsseismogrammen der *Abb. 35* treten nacheinander je 12 Reflexionen aus Tiefen von 10235′ bis 15450′ = 3100 bis 4700 m auf. Davon sind fünf als gut (G), drei als ziemlich gut (F) und vier als schwach (P) bezeichnet. Im Laufe der Zeit ist die Anzahl der auf einem Papierstreifen registrierten Seismogramme noch vervielfältigt worden. *Abb. 36* gewährt einen Blick in einen Registrierwagen, und *Abb. 37* zeigt den Wagenpark eines amerikanischen seismischen

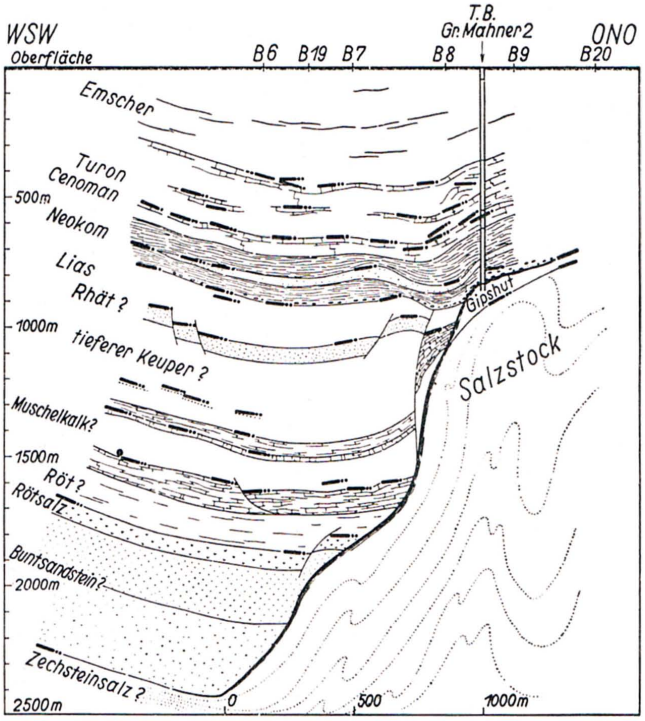

Abb. 38. Reflexionsprofil an der Flanke eines norddeutschen Salzhorstes
Nach *Fr. Trappe* u. *L. Rupprecht*[30])

Trupps. Über die Entwicklung und den Stand der Technik der Reflexionsseismik in Deutschland haben Dr. *Fr. Trappe*[26])[27])[28]) und Dr. *H. Lückerath*[29]) in dieser

Der große Umfang der Anwendung des seismischen Verfahrens in USA geht aus der Übersichtskarte von *J. B. Macelwane*[31]) *(Abb. 15)* hervor. Bis Mitte 1940 sind die in der Karte schraffierten Gebiete von 1,7 Millionen qkm abgesprengt worden, z. T. nach Maßgabe der technischen Vervollkommnung der Instrumente und Beobachtungsverfahren, der Erweiterung der Erkenntnisse über die Erdölhöffigkeit in größeren Tiefen und nicht zuletzt der wachsenden Tiefenreichweite der Bohreinrichtungen in mehrfacher Wiederholung, so daß die Gesamtzahl der untersuchten Quadratkilometer rd. 3 Millionen beträgt. *B. B. Weatherby*[32]) beziffert die für die seismischen Arbeiten aufgewendeten Kosten auf 175 bis 200 Millionen Dollars und schätzt die in den dabei gefundenen verdeckten geologischen Strukturen anstehenden Erdölmengen auf 700 Millionen t.

Der grundsätzliche Wandel in der Suche nach Erdölfeldern, der sich seit der Einführung der Geophysik, insbesondere auch der Seismik, vollzogen hat, ist am deutlichsten aus der die Golfküste von Texas und Louisiana betreffenden graphischen Darstellung der *Abb. 39* zu ersehen, die vom Jahre 1924 ab ein Heraufschnellen der Zahl der entdeckten erdölhöffigen Strukturen zeigt. Die Entdeckung des ersten Salzdom-Erdölfeldes in den USA. (Spindletop in SO-Texas im Jahre 1901) erfolgte durch den aus Deutschland stammenden Geologen Dr. *A. F. Lukas*, der die geologische Untersuchung der Golf-

[26]) *Fr. Trappe*, Neuere Anwendungen des seismischen Verfahrens der Lagerstättenforschung. Oel u. Kohle **12**, 384 [1936].

[27]) *Fr. Trappe*, Beiträge zur Anwendung der Reflexionsmethode in Deutschland. Oel u. Kohle **13**, 757 [1937].

[28]) *Fr. Trappe*, Die Anwendung des seismischen Reflexionsverfahrens im Kohlenbergbau. Glückauf **71**, 577 [1935].

[29]) *H. Lückerath*, Fortschritte der Reflexionsseismik. Oel u. Kohle **37**, 73 [1941].

[30]) *Fr. Trappe* u. *L. Rupprecht*, Die Anwendung der seismischen Reflexionsmethode zur Untersuchung von Salzstöcken im Harzvorland. Geophysik **15**, 37 [1939].

[31]) *J. B. Macelwane*, Fifteen years of geophysics. A chapter in the exploration of the United States and Canada 1924 bis 1939. J. Geophysics **5**, Teil 1, 250 [1940].

[32]) *B. B. Weatherby*, The history and development of seismic prospecting. J. Geophysics **5**, Teil 1, 215 [1940].

küste sehr stark förderte[33]). Mit der Erschöpfung der geologischen Prospektions-Möglichkeiten über dem durch mächtige Deckgebirgsschichten abgeblendeten Untergrund trat ein fast zwanzigjähriger Stillstand in der Auf-

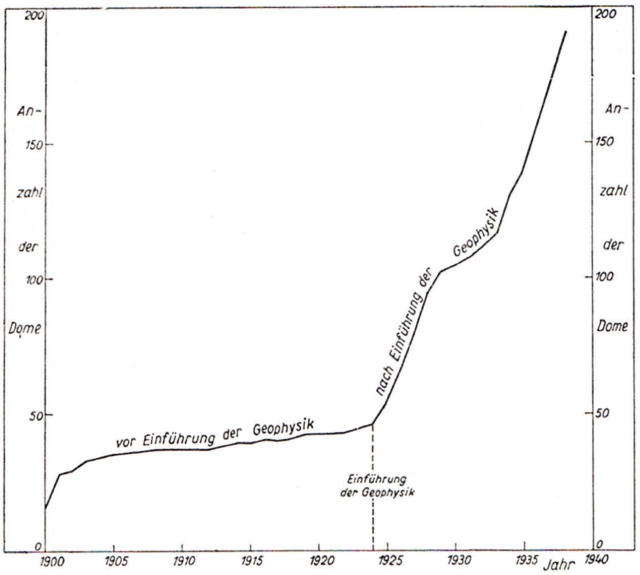

Abb. 39. Graphische Darstellung der Salzdomfunde an der Golfküste von Texas und Louisiana

findung weiterer Salzdome ein[34]). Nach *W. F. Henniger*[35]) sind von 1917 bis 1924 mit einem Kostenaufwand von 20 Millionen Dollars 675 Suchbohrungen nach unbekannten Salzdomen ausgeführt worden, wobei indessen nur ein Dom gefunden worden ist. Diesem einen Salzdom in sieben Jahren stehen nach einer in dieser Zeitschrift erschienenen Aufstellung von Dr. *St. v. Thyssen-Bornemisza*[36]), die im wesentlichen auf Mitteilungen der Zeitschrift Petroleum World beruht, 159 in den fünfzehn Jahren von 1924 bis 1939 allein an der Golfküste geophysikalisch entdeckte Dome gegenüber, was einem Verhältnis von 70:1 entspricht. Bis zum Jahre 1939 waren an 120 dieser geologischen Strukturen Erdölfelder mit einer Produktion von 65 Mill. t erschlossen worden. 71 Dome sind allein durch das seismische Verfahren festgestellt worden, an der Entdeckung weiterer 55 Strukturen ist das Verfahren beteiligt gewesen.

Die Auffindung der an den geophysikalisch entdeckten Domen vorhandenen Erdöllagerstätten ist durch das seismische Verfahren dadurch sehr gefördert worden, daß vor dem Beginn der Aufschlußbohrungen an flachen Domen die Flanken festgelegt und auf ihre Beschaffenheit untersucht, bei tiefen Domen die zur Konstruktion von Tiefenkurven auf seismischen Leithorizonten im Deckgebirge erforderlichen Teufen ermittelt worden sind. Ein Beispiel dafür bringen *Abb. 40* und *41*, von denen die erstere ein Reflexionsprofil über dem im Jahre 1926 von der Seismos G. m. b. H. durch Reflexionsmessungen entdeckten Iowa-Dom und letztere die auf Grund mehrerer Profilaufnahmen vor der Inangriffnahme der Aufschlußbohrungen konstruierten Tiefenkurven sowie die niedergebrachten Bohrungen enthält[22]). Von den 60 Bohrungen sind 54 produktiv, von den 6 nicht produktiven Bohrungen stehen 4 am äußersten Rande der seismisch ermittelten Aufwölbung der Deckgebirgsschichten. In zahlreichen Fällen ist an solchen „bohrreif" gemachten Domen die erste abgeteufte Bohrung erdölfündig geworden, erstmalig auf Grund von Untersuchungen der Seismos G. m. b. H. im Jahre 1927 am East Hackberry-Salzdom (Kelso Bayou-Dom) in Louisiana[15]) [17]).

Eine umfangreiche technisch-wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens findet in der seismischen Baugrund-Untersuchung statt, die im Jahre 1908 vom Verf. am Geophysikalischen Institut in Göttingen mit der photographischen Aufzeichnung und der harmonischen Analyse von periodischen, durch den Erdboden fortgepflanzten Maschinenschwingungen sowie der Ermittlung der Abnahme der Amplitude der Schwingungen mit zunehmender Entfernung von der Maschine in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des geologischen Untergrundes begonnen[37]) und in Bochum fortgesetzt worden ist[38]). Nach Entdeckung der Grenzwelle (*Abb. 4* und *6*) durch den Verf. ist die Göttinger Tradition auf dem Gebiete der Untersuchung periodischer Bodenschwingungen von Professor Dr. *G. Angenheister* wieder aufgenommen und in einer Arbeitsgemeinschaft zwischen dem Göttinger Geophysikalischen Institut und der von Geheimrat Professor Dr. *A. Hertwig* geleiteten Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik an der Technischen Hochschule Berlin, sind dynamische Baugrund-Untersuchungsverfahren entwickelt worden[39]). *R. Köhler* und *A. Ramspeck* haben die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Phasengeschwindigkeit der periodischen Wellen an Hand von über verschiedenem geologischen Untergrund aufgenommenen Laufzeitkurven ermittelt[40]), die sich als ein brauchbares Maß für die Tragfähigkeit der Bodenschichten erwiesen hat[41]). Die zuerst von der Seismos G. m. b. H. betriebene Einführung der seismischen Baugrunduntersuchung[42]) in die Baupraxis ist im Jahre 1937 auf die Baugrund G. m. b. H. in Berlin übergegangen, die sie in großem Umfange zur Anwendung bringt.

---

[33]) *K. Bax*, Der deutsche Bergmann im Wandel der Geschichte. Berlin 1941 (vgl. die Buchbesprechung in Oel u. Kohle **37**, 741 [1941]).

[34]) *L. Mintrop*, Zur wirtschaftlichen Bedeutung der geophysikalischen Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten. Mitt. a. d. Markscheidewesen **48**, 109 [1937], Heft 2.

[35]) *W. F. Henniger*, Occurence of sulphur waters in the Gulf Coast of Texas and Louisiana and their signification in locating new domes. Symposium: Geology of Salt Dome Oil Fields, 1926, S. 774.

[36]) *St. v. Thyssen-Bornemisza*, Die Bedeutung der Geophysik beim Auffinden von Erdöllagerstätten in den Vereinigten Staaten von Nordamerika. Oel u. Kohle **35**, 113 [1939].

[37]) *L. Mintrop*, Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen. Diss. Göttingen 1911.

[38]) *L. Mintrop*, Die Erdbebenstation der Westfälischen Berggewerkschaftskasse in Bochum. Glückauf **45**, 357 [1909].

[39]) *A. Hertwig* u. *G. Angenheister*, Die Anwendung dynamischer Baugrunduntersuchungen. Veröffentlichungen des Instituts der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Debego) an der Technischen Hochschule Berlin, Heft 4, 1936.

[40]) *R. Köhler* u. *A. Ramspeck*, Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen im Boden. Veröffentlichungen des Instituts der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik an der Technischen Hochschule Berlin, Heft 4, S. 9 [1935].

[41]) *R. Köhler*, Der Stand der Forschung auf dem Gebiete der Bodenschallausbreitung. Schalltechnik Nr. 3/4, S. 1 [1936].

[42]) Dynamische Baugrund-Untersuchungen für den Industriebau. Seismos, Hannover; Abt. f. Baugrund-Untersuchungen, Berlin.

Zu der wirtschaftlichen Auswirkung des seismischen Verfahrens gehört auch die namentlich in den USA. erfolgreiche Verwertung der von deutschen Wissenschaftlern zehn Jahre lang, schließlich vergeblich, be-

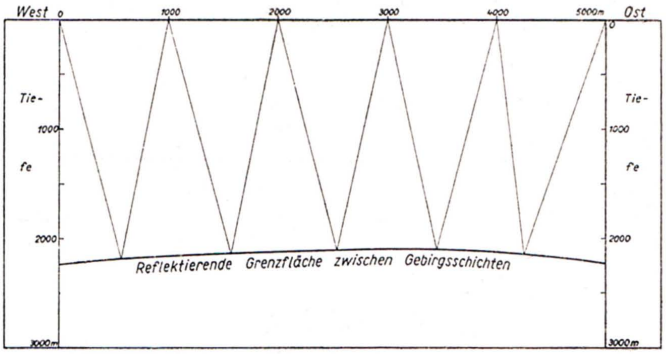

Abb. 40. Reflexionsprofil über dem tiefen Iowa-Salzdom
Nach *E. E. Rosaire*[22])

kämpften Patente[43]), die in allen dreißig Ländern, in denen Verf. sie seinerzeit angemeldet hat, auch erteilt worden sind — mit Ausnahme von England[44]). In den USA sind sämtliche Erdölgesellschaften Lizenznehmer[45]) [46]).

Die wissenschaftliche Auswirkung der Entdeckung der Grenzwelle (Tiefenwelle B_1 in *Abb. 1*) sowie der reflektierten Welle (*Abb. 9*) und ihre Nutzbarmachung für die Erforschung des geologischen Untergrundes bis zu den durch Bohrungen erreichbaren Teufen sei an einigen Beispielen erläutert. *E. Wiechert* und seine Schüler waren in den Jahren 1907 bis 1919 auf Grund von Studien über die Ausbreitung der von Erdbebenherden ausgehenden elastischen Wellen[47]) zu dem Ergebnis gelangt, daß die Erde aus konzentrischen Kugelschalen aufgebaut sei. Die Tiefen der Grenzflächen zwischen den einzelnen Schalen wurden zu etwa 1200, 1700 und 2900 km angegeben. Nachdem es *A. Mohorovicic*[48]) im Jahre

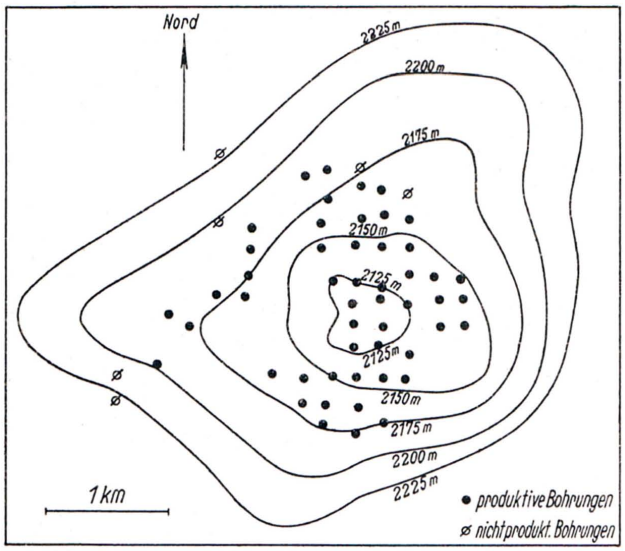

Abb. 41. Reflexionsseismisch ermittelter Tiefenlinienplan über dem Iowa-Salzdom
Nach *E. E. Rosaire*[22])

1909 gelungen war, an Laufzeitkurven zu Erdbebenregistrierungen in Entfernungen von 39 bis 2547 km eine seismische Grenzfläche in rd. 50 km Tiefe festzustellen, an der die Geschwindigkeit der ersten (longitudinalen) Tiefenwelle von 5,6 auf 7,8 km/s springt, ergab sich im wesentlichen das in *Abb. 42* dargestellte Bild von dem kugelschalenförmigen Aufbau des Erdinnern.

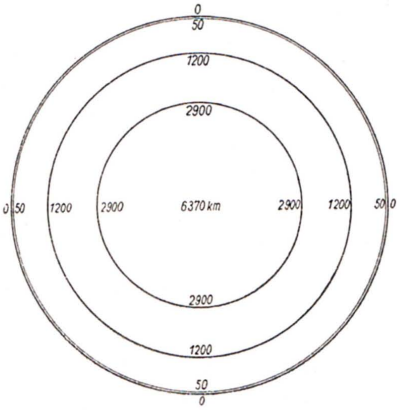

Abb. 42. Vertikalschnitt durch die Erde mit seismisch ermittelten Grenzflächen

Des Verf. und der Seismos G. m. b. H. Erfolge mit „künstlichen Erdbeben" veranlaßten *E. Wiechert* im Jahre 1921 zur Wiederaufnahme seiner alten Idee, die Tiefenlage des Magmas seismisch zu ermitteln, wobei Sprengentfernungen bis zu 1000 km vorgesehen wurden. Nach einer in Begleitung des Göttinger Geologen Professor Dr. *H. Stille* vorgenommenen Besichtigung der seismischen Feldarbeiten des Verf. suchte *Wiechert* den Verf. am 21. Oktober 1921 bei der Seismos G. m. b. H. auf, entwickelte seinen Plan und erbat die Unterstützung seiner Arbeiten. Die Seismos G. m. b. H. und Verf. haben die Versuche durch Mitteilung von Erfahrungen, Bereitstellung von Feldseismographen (*Abb. 3*) sowie durch Zuwendung von Geldmitteln gefördert. Nach einem Schreiben von *Wiecherts* Mitarbeiter *G. Angenheister* vom 15. September 1926 ist durch die Beihilfe der Seismos G. m. b. H. für den Bau des neuen Erdbebenhauses die wichtigste Vorbedingung für die Weiterentwicklung der sprengseismischen Arbeiten des Göttinger Geophysikalischen Instituts geschaffen worden. Anträge des Instituts auf Bewilligung von Staatsmitteln begleitete *E. Wiechert* mit dem Nachweis über Erfolge der Seismos G. m. b. H. für die deutsche Wirtschaft.

Über die Ergebnisse der Göttinger sprengseismischen Untersuchungen hat *E. Wiechert* selbst mehrfach be-

---

43) *L. Mintrop*, Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten. D. R. P. Nr. 371963 vom 7. 12. 1919 und Nr. 410010 vom 2. 11. 1920. Reichsgerichtsentscheidung vom 28. 6. 1930, I. 281/27.

44) *L. Mintrop*, Zur Geschichte des seismischen Verfahrens zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten. Mitt. Seismos, Hannover **2**, 1 [1930].

45) *L. Mintrop*, Geological Testing Method. USA. Patent Nr. 1599538 vom 14. September 1926.

46) Seismograph Infringment Patent Suit Terminated. Oil Weekly **34**, Nr. 8, S. 11 [1937].

47) Über Erdbebenwellen. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, math. phys. Klasse [1907 u. f.].

48) *A. Mohorovicic*, Das Beben vom 8. Oktober 1909, Jahrb. d. Meteorolog. Obs. Zagreb (Agram) **9**, Teil IV, Abschnitt 1, [1909].

richtet[49][50][51]); nach seinem Tode hat sein Mitarbeiter Dr. *B. Brockamp* im Auftrage der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft, die im späteren Verlauf der Versuche den wesentlichen Teil der Geldmittel

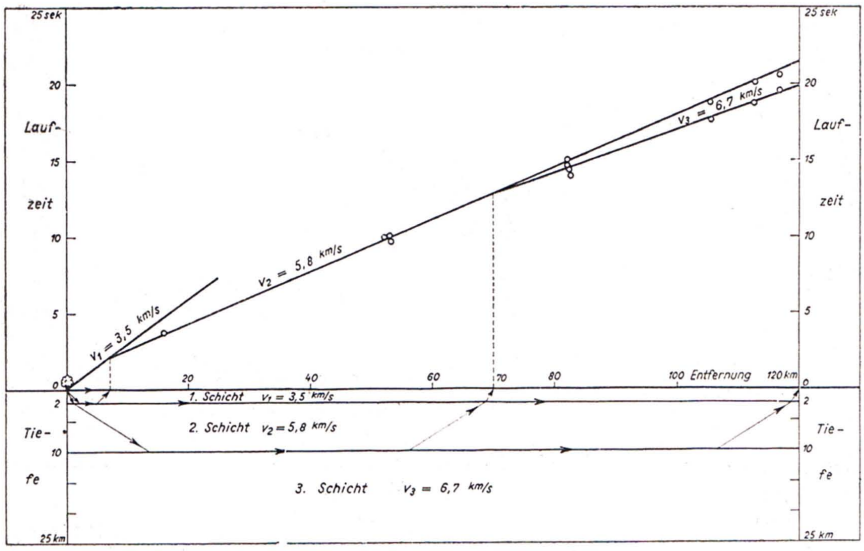

Abb. 43. Laufzeitkurven und Profil von der äußeren Erdrinde

zur Verfügung gestellt hatte, eine zusammenfassende Bearbeitung vorgenommen und veröffentlicht[52]). *Brockamp* entwirft folgendes Bild von der Gliederung der äußeren Erdrinde: „Bis zu einer Tiefe von 2 bis 3 km beteiligt sich Deckgebirge (P_1-Schicht) mit örtlich variierender Wellengeschwindigkeit (1,7 bis 5,6 km/s) und Mächtigkeit am Aufbau. Unter dem Deckgebirge beginnt die P_2-Schicht mit einer mittleren Geschwindigkeit von 5,9 km/s. Ihre Mächtigkeit beträgt zwischen 5 und 7 km. Unterlagert ist die P_2-Schicht von der P_3-Schicht, deren Geschwindigkeit 6,7 km/s beträgt. Die P_2-Schicht wird als varistisches Grundgebirge gedeutet, ihre untere Grenze fällt von Göttingen aus nach Süden bis auf 12 km Tiefe ab und steigt nach SW und SO auf 7,5 km an."

Abb. 43 bringt den ersten Teil der von *Wiecherts* Nachfolger, *G. Angenheister*[53]), bis zu einer Sprengentfernung von 230 km aufgestellten Laufzeitkurven der longitudinalen Wellen. Verf. hat das Profil darunter gezeichnet und dabei von den bei *Brockamp* erwähnten Neigungen der Grenzflächen gegen die Erdoberfläche abgesehen. Die Erdkrümmung tritt bei dem kleinen Maßstab der Zeichnung nicht in die Erscheinung. Ein Vergleich der *Abb. 44* mit *Abb. 6, 17* und *18* zeigt, daß die Schichtung der äußersten Erdrinde, wie sie in der Nähe der Erdoberfläche beobachtet wird, im großen und ganzen auch nach der Tiefe zu anhält. Wenn das von *Wiechert* in seinem Schreiben an den Verf. vom 20. Oktober 1924 bezeichnete Hauptziel, die sprengseismische Erforschung der Erdrinde bis zu 150 km Tiefe, auch bei weitem nicht erreicht worden ist, so sind doch schon wertvolle Anhaltspunkte für die Beurteilung der Art und Lagerung der durch Bohrungen nicht mehr erreichbaren Tiefenschichten gewonnen worden. Auch die bei den Fernsprengungen gleichzeitig mit der seismischen Aufnahme der Bodenwellen erfolgte Registrierung des Luftschalles hat zu bemerkenswerten Ergebnissen der Schallausbreitung bis zu Höhen von etwa 40 km geführt. Hierüber hat u. a. *G. Angenheister* berichtet[54]).

Ein weiteres Beispiel für die Auswirkung des seismischen Verfahrens auf Aufgaben der reinen Wissenschaft bieten die vom Göttinger Geophysikalischen Institut ausgegangenen seismischen Messungen der Dicke von Alpengletschern sowie der Mächtigkeit des Grönlandeises. Die ersten seismischen Messungen auf Eis fanden im Winter 1922/23 auf zugefrorenen Seen im Erzgebiet von Boliden in Nordschweden durch einen aus dem Seismologen Dr. *K. Roepke*, dem Obersteiger *O. Weitershagen* und dem Verf. bestehenden Trupp der Seismos G. m. b. H. statt (vgl. [57])). *Abb. 44* und *45* bringen ein Seismogramm und Laufzeitkurven dazu. In dem Seismogramm bedeuten L die longitudinale (Schall-)Welle, T die transversale (Scherungs-)Welle im Eis und W die longitudinale (Schall-)Welle im Wasser, während die später eintreffende Luftwelle auf dem Seismogramm nicht mehr erscheint. Die Wellengeschwindigkeiten ergeben sich aus dem Seismogramm bzw. den Laufzeitkurven zu 3400 m/s, 1800 m/s und 1500 m/s. Diese Messungen, deren Ergebnisse Verf. *E. Wiechert* seinerzeit zur Verfügung gestellt hat, waren der Ausgangspunkt für die ersten, von Dr. *A. Mothes*[55]) im Jahre 1926 auf dem Hintereisferner mittels Reflexionen erfolgten Eisdickenmessungen, die von der Seismos G. m. b. H. durch Bereitstellung von Apparaten gefördert worden sind. *Abb. 46* gibt von *Mothes*[56]) aufgestellte Laufzeitkurven direkter und reflektierter Wellen wieder, wie sie erstmalig im Jahre 1922 durch den damaligen Mitarbeiter der Seismos G. m. b. H., Professor Dr. *G. Angenheister* und vom Verf. auf Grund seiner weiter oben besprochenen seismischen Untersuchungen aus dem

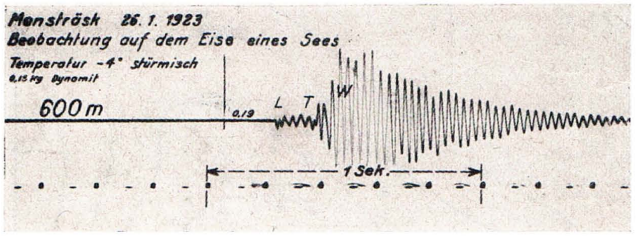

Abb. 44. Seismogramm (Vertikalkomponente) einer Sprengung auf dem Eise eines Sees in Nordschweden

[49]) *E. Wiechert*, Untersuchungen der Erdrinde mit dem Seismometer unter Benutzung künstlicher Erdbeben. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, math.-physik. Klasse 1 [1923].

[50]) *E. Wiechert*, Seismische Untersuchungen, Geophysik **1**, 14 [1924/25].

[51]) *E. Wiechert*, Untersuchungen der Erdrinde mit Hilfe von Sprengungen. Geolog. Rundschau **17**, 339 [1926].

[52]) *B. Brockamp*, Seismische Beobachtungen bei Steinbruchsprengungen. Diss. Göttingen, Geophysik **7**, 295 [1931].

[53]) *G. Angenheister*, Bodenschwingungen, Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften. Bd. XV., S. 310 [1936].

[54]) *G. Angenheister*, Die Laufzeit des Schalles für große Entfernungen. Geophysik **1**, 314 [1924/25].

[55]) *H. Mothes*, Seismische Eisdickenmessungen von Gletschereis. Geophysik **3**, 121 [1927].

[56]) *H. Mothes*, Neue Ergebnisse der Sprengseismik. Geophysik **5**, 120 [1929].

Jahre 1920 in einem erdölhöffigen Gebiete Norddeutschlands aufgestellt worden sind (s. *Abb. 10*). Die Dicke des Gletschereises ergibt sich nach den Laufzeitkurven der *Abb. 46* zu rd. 200 m, ein Betrag, der zufällig in großer

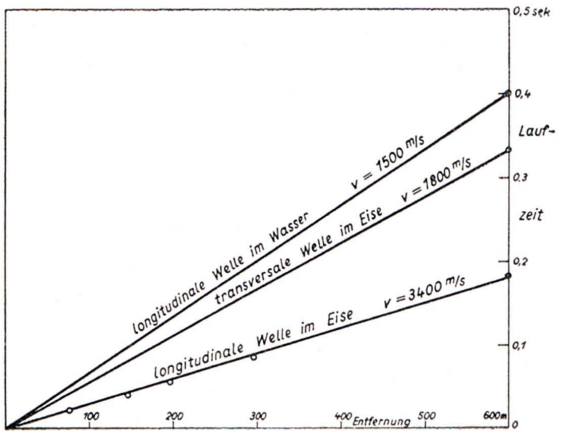

Abb. 45. Laufzeitkurven zu den seismischen Messungen auf einem zugefrorenen See in Nordschweden

Annäherung gleich der Tiefe des reflektierenden Horizontes im Profil der *Abb. 11* ist.

Über die Ergebnisse der seismischen Eisdickenmessungen auf Grönland, denen mehrfache Messungen auf verschiedenen Alpengletschern vorausgegangen sind, haben *B. Brockamp, E. Sorge* und *K. Wölcken* ausführlich berichtet[57]. Aus den Aufzeichnungen reflektierter Wellen sind Eisdicken bis zu 1870 m ermittelt worden.

Professor Dr. *O. v. Schmidt*, Direktor des Instituts für technische Physik an der Luftkriegsakademie, der auch über eigene, im In- und Ausland erworbene Erfahrungen auf dem Gebiete der seismischen Lagerstättenforschung verfügt[58], hat die vom Verf. bei der Sprengseismik entdeckte Grenzwelle (indirekte Welle) u. a. zum Ausgangspunkt seiner Überlegungen und Versuche zur Erklärung des

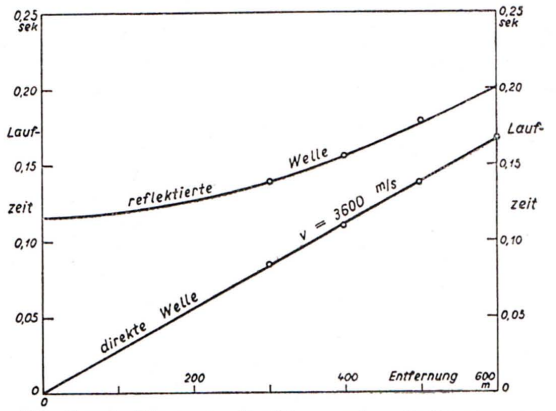

Abb. 46. Laufzeitkurven direkter und reflektierter Wellen nach seismischen Messungen auf einem Alpengletscher
Nach *H. Mothes*[55]

Umlaufes der Radiokurzwellen um die Erde gemacht[59]. *Abb. 47*, die den Weg der drahtlosen Wellen nach *v. Schmidt* schematisch darstellt, ist eine Umkehr der *Abb. 4* bzw. *6*, da die schneller leitende Schicht über statt unter der Erdoberfläche liegt. Angeregt durch die schönen Schlierenaufnahmen von *O. v. Schmidt* bei Untersuchungen über die Knallausbreitung in Flüssigkeiten und festen Körpern[60] führt *H. Ott*, Professor der theoretischen Physik an der Universität Würzburg, in einer vor kurzem erschienenen Abhandlung[61] einen mathematischen Beweis für das Auftreten einer „der Beobachtung bisher offenbar entgangenen Nebenwelle", Flankenwelle, bei der Reflexion und Brechung von Kugelwellen. *O. v. Schmidt* schreibt darüber[59]: „Es ist ganz interessant, sich daran zu erinnern, daß die seinerzeitige Erfindung der Sprengseismik von *Mintrop*[43], auf der alle obigen Experimente und Überlegungen beruhen, damals jahrelang als mit den Gesetzen der Brechung unvereinbar und daher als unmöglich erachtet wurde. Dann aber, als hunderte von Untersuchungen der Wirtschaft enorme praktische Gewinne gebracht hatten, wurde das Verfahren als eine „Selbstverständlichkeit" hingestellt".

In den Entscheidungsgründen des Reichsgerichtes zu der Abweisung einer Nichtigkeitsklage gegen das Verfahrenpatent wird ausgeführt[43], daß nach Mitteilung von Professor Dr. *Angenheister* auch *E. Wiechert* glaubte, das Auftreten der Grenzwelle (indirekten Welle) zunächst stark anzweifeln zu müssen und sich erst durch die Versuchsergebnisse des Verf. habe überzeugen lassen.

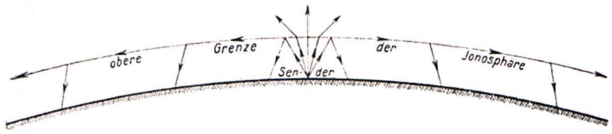

Abb. 47. Schematische Darstellung des Umlaufs der Radio-Kurzwellen um die Erde
Nach *O. v. Schmidt*[59]

Rückblickend kann Verf. feststellen, daß sich die am Schluß seines ersten öffentlichen Vortrages über das seismische Verfahren auf der Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft am 15. August 1920 in Hannover[62][63] gestellte Prognose als richtig erwiesen hat: „Ich bin mir bewußt, daß das Verfahren nicht alles leisten kann. Die Grenzen seiner Anwendungsmöglichkeiten müssen in der Praxis gefunden werden. Aber eines läßt sich nach den bisherigen Erfahrungen sagen: Geologisch-bergmännisch-geophysikalisch vernünftig angesetzt, sachverständig durchgeführt und ausgewertet, wird das seismische Verfahren ein wertvolles Hilfsmittel für die Erkundung und Untersuchung nutzbarer Lagerstätten sein. Auch die Wissenschaft wird ihre Schlüsse zu ziehen wissen."

Bei diesem Rückblick erinnert Verf. sich dankbar seiner früheren Mitarbeiter, besonders aus der Pionierzeit des Verfahrens.

---

[57]) *B. Brockamp, E. Sorge, K. Wölcken*, Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Grönland-Expedition *Alfred Wegener*, 1929 u. 1930/31. Bd. II, Seismik, 1933.

[58]) *O. v. Schmidt*, Angewandte Seismik. Geophysik **4**, 134 [1928].

[59]) *O. v. Schmidt*, Neue Erklärung des Kurzwellenumlaufes um die Erde. Z. techn. Physik **17**, 443 [1936].

[60]) *O. v. Schmidt*, Über Knallausbreitung in Flüssigkeiten und festen Körpern. Z. techn. Physik **19**, 554 [1938].

[61]) *H. Ott*, Reflexion und Brechung von Kugelwellen. Effekte 2. Ordnung. Ann. Physik, 5. Folge, **41**, 443 [1942].

[62]) *K. Keilhack*, Die Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Hannover. Glückauf **55**, 750 [1920]

[63]) *L. Mintrop*, Die Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten aus seismischen Beobachtungen. Z. Dtsch. geol. Ges. **73**, Monatsber. 369 [1920].

Nachdruck — auch auszugsweise — ist nur mit Genehmigung der Schriftleitung gestattet / Druck: Märkische Druckanstalt W. Hentschel o. H.-G., Berlin N 65

IH