SEISMOS

HANNOVER

SEISMOS

Hannover

Gegründet 1921

Unsere Leistung betrug bis 1. Juni 1935

(einschl. der Arbeiten der „Exploration", gegr. 1919):

124587	Seismogramme
41 771	Drehwaage-Stationen
599	Pendelstationen
	Seit Oktober 1934:
600	Gravimeter-Stationen

Unsere Tätigkeit erstreckte sich bisher auf:

Deutschland, Österreich, Griechenland, Italien, Spanien, Holland, England, Dänemark, Schweden, Polen, Rußland (Ural und Altai), Persien, Irak, Ägypten, Kanada, Vereinigte Staaten von Nordamerika, Mexiko.

Für die Mintrop-Patente besitzen wir das ausschließliche Recht in Deutschland.

Unsere Thyssen-Gravimeter machen Pendelmessungen überflüssig.

(Patente in allen Kulturstaaten angemeldet.)

In der Umgebung von Sülze im Landkreis Celle sind auf der Suche nach Salz eine ganze Reihe von Bohrungen mit Teufen von 150 bis 750 m niedergebracht, ohne irgendwelche Anzeichen für das Vorhandensein eines Salzdomes zu erbringen. Im Jahre 1933 wurde die Gegend mit dem seismischen Verfahren bearbeitet und schon in den ersten Tagen der Untersuchung wurde einwandfrei ein Dom festgestellt.

Da in Hinblick auf die erwähnten Fehlbohrungen Zweifel an der Richtigkeit der seismischen Untersuchungen auftauchten, wurde an einem Punkte, an dem die seismischen Feststellungen die Teufe des Domes mit 160 m angaben, gebohrt. Genau in einer Teufe von 160 m wurde das Salzgebirge angetroffen. Dieser glänzende Erfolg des seismischen Verfahrens ist ein eindringlicher Beweis für die wirtschaftliche Bedeutung der angewandten Geophysik, wie er drastischer nicht gedacht werden kann. Weitere Belege für die Leistungsfähigkeit der geophysikalischen Untersuchungsmethoden zu erbringen und auch diejenigen Kreise, die ihr bisher noch nicht die gebührende Beachtung geschenkt haben, darüber aufzuklären, ist der Zweck der vorliegenden Schrift.

Wenn man für die Geophysik werben und darlegen will, was sie leisten kann, so empfiehlt es sich, vorauszuschicken, was sie nicht leisten kann: sie kann weder Öl finden, noch Kohle nachweisen, noch Gold entdecken, kurz sie vermag direkt keine qualitativen Feststellungen zu machen. Ihre Bedeutung und ihre Aufgabe liegt vielmehr nur darin, die geologischen Möglichkeiten zu beschränken.

Wie es für den Laien zunächst gar keine Grenzen für das Vorkommen eines nutzbaren Minerals gibt, und wie der Geologe diese „grenzenlosen" Vorstellungen des Laien durch regionale Erkenntnisse und Analogieschlüsse wesentlich einschränkt, so ist es Aufgabe des Geophysikers, die dann immer noch bleibenden zahlreichen Möglichkeiten durch exakte lokale Messungen weiter bis zu einem höheren Grad der Wahrscheinlichkeit einzuengen, während es bis zur eindeutigen Sicherheit schließlich nur durch den Bohrmeißel geschehen kann.

Setzt man sich über Geologie und Geophysik hinweg und sucht seine Erkenntnisse lediglich mit dem Bohrmeißel zu gewinnen, so ähnelt dieses Vorgehen dem Versuche eines Blinden, der auf einem großen Felde mit seinem Krückstock ein Geldstück finden will, wobei jedes tastende Aufsetzen seines Krückstocks einer Fehlbohrung beim Ölsuchen entspricht. Wie es nur noch viel weniger Abtastungen mit dem Krückstock bedarf, wenn man den Blinden darauf aufmerksam macht, daß er nur auf einer beschränkten Fläche zu suchen braucht, so werden auch sehr viel weniger Abtastungen, d. h. Fehlbohrungen bei der Untersuchung eines Ölterrains nötig sein, wenn man die tektonisch aussichtsvollen Gebiete vorher geophysikalisch herausgesucht hat. Daß schon die Ersparnis einer einzigen Fehlbohrung die Kosten für die geophysikalische Untersuchung eines großen Gebietes deckt, ergibt sich aus folgenden überschlägigen Zahlen.

Wenn die Kosten einer Fehlbohrung von etwa 1000 m nur mit RM. 100 000.– veranschlagt werden, so kann für den gleichen Betrag einschließlich aller Spreng- und sonstigen Nebenkosten 7 volle Monate seismisch gearbeitet werden, und damit

können bei sehr eingehender Untersuchung mindestens 350 qkm abgeschossen werden. Mit der Drehwaage lassen sich für den gleichen Betrag von RM. 100 000.– = 2500 Stationen vermessen, mit denen bei der reichlichen Stationsdichte von 8 Stationen pro qkm über 300 qkm untersucht werden können.

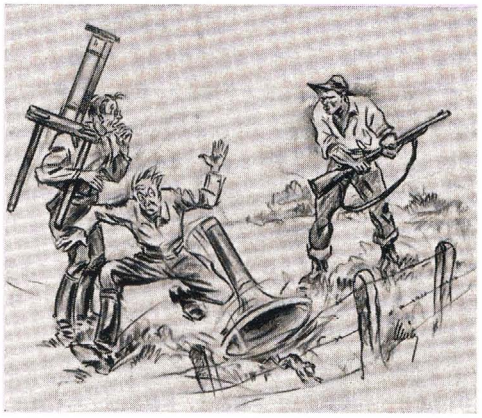
Hat man aber solche Untersuchungen gemacht, so ist man dann über die Tektonik des interessierenden Gebietes ziemlich weitgehend orientiert und hat wertvolle Unterlagen sowohl für eine planmäßige Untersuchung des Gebietes mittels Aufschlußbohrungen als auch noch für die spätere Ansetzung von Produktionsbohrungen. Während eine Fehlbohrung nur besagt, daß an der betreffenden Stelle ganz sicher kein Öl ist, alles andere aber im Dunkeln und dem Risiko weiterer nichtssagender Fehlbohrungen überlassen bleibt, weiß man auf Grund einer sachgemäßen geophysikalischen Untersuchung, ob in einem Gebiet tektonische Verhältnisse vorhanden sind, die das Auftreten von Erdöl begünstigen oder nicht, und ob ein Gebiet weiteres Interesse verdient oder ob eine weitere Zahlung von Wartegeldern und Konzessionsgebühren ungerechtfertigt erscheint, wobei hervorzuheben ist, daß sich unter Umständen schon bei einer Ersparnis des Wartegeldes für 1 Jahr die ganze geophysikalische Untersuchung in der angegebenen Gründlichkeit bezahlt macht. Der Wert der geophysikalischen Untersuchung eines Gebietes bleibt stets bestehen und bleibt ein Dokument, das noch an Wert gewinnt, je mehr Anhalte im Laufe der späteren Aufschlußtätigkeit für die Deutung der Ergebnisse vorliegen.

Aber nicht allein für die Erdölindustrie haben geophysikalische Untersuchungen eine grundlegende Bedeutung, sondern auch für alle diejenigen Zweige des Bergbaues, der Bergwirtschaft, der Landesaufnahme und der Lagerstätteninventur, für welche tektonische Fragen für weitere Entschlüsse, Folgerungen und Bewertungen von Wichtigkeit sind.

Für die Ausrichtung von Grubenfeldern des Steinkohlenbergbaues ist eine geophysikalische Kartierung der Karbonoberfläche nach Streichen und Fallen, die Feststellung harter Deckgebirgsbänke und die Aufsuchung und Verfolgung von postkarbonen Störungen und von Deckgebirgsabstürzen entlang solcher Verwerfungen von großer bergtechnischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Auf Grund neuerer Arbeiten kommt dafür insbesondere die Auswertung seismischer Reflexionen in Betracht, wie in einem späteren Kapitel dargelegt werden wird.

Die bergtechnische Auswertung solcher seismischen Feststellungen ermöglicht Einsparungen in der unterirdischen Aufschließung, die den vorhergegangenen seismischen Beobachtungen angepaßt werden kann. Im Deckgebirge können Tragschichten für Mauerfüße und Tübbingskeilkränze verfolgt werden. Die Sicherheitspfeiler gegen das wasserführende Deckgebirge können enger und genauer bemessen werden. Die Vorsichtsmaßnahmen gegen Deckgebirgsverwürfe, wie Vorbohren, erübrigen sich vielfach oder sind auf ein Minimum beschränkbar, wertvolle Kohlenvorräte können damit dem Abbau sicher zugeführt werden. Die Kosten solcher der Aufschließung unverritzter Grubenfelder vorausgehenden seismischen Untersuchungen sind im Verhältnis zu den dadurch möglichen Einsparungen als gering anzusehen.

Ein weiteres Gebiet, auf dem z. B. das seismische Verfahren eine zunehmende Bedeutung gewinnt, ist das der systematischen Baugrunduntersuchungen durch Ermittlung der für das Bauwesen wichtigsten Eigenschaften des Bodens mittels erzwungener Schwingungen.



Kein Verständnis . . . .

Die Anerkennung der angewandten Geophysik hat neuerdings einen beredten Ausdruck in dem Gesetz über die Durchforschung des Reichsgebietes nach nutzbaren Lagerstätten gefunden, aus dessen Bestimmungen hervorgeht, welche Bedeutung behördlicherseits den geophysikalischen Untersuchungsergebnissen beigemessen wird.

Von den Methoden der angewandten Geophysik werden von uns diejenigen Verfahren bevorzugt, die sich auf Grund langjähriger Erfolge in der Praxis als die wichtigsten und zuverlässigsten erwiesen haben. Wir verwenden in erster Linie das seismische Verfahren, das von Prof. Dr. Mintrop erfunden wurde und zu dessen Ausübung wir die ausschließliche Lizenz für Deutschland besitzen, und zwar benutzen wir zur Auswertung sowohl die Refraktionswellen als auch die Reflexionswellen. Weiter bevorzugen wir die gravimetrischen Verfahren unter Benutzung der Eötvös'schen Drehwaage bewährtester Modelle und des in unserer Gesellschaft entwickelten Thyssen-Gravimeters, dem an Genauigkeit und Erfolgen z. Z. kaum ein ähnliches Instrument nahekommt und das die umständlichen, komplizierten, sehr kostspieligen und in ihren Ergebnissen unzuverlässigen Pendelmessungen endlich überflüssig gemacht hat. Das Thyssen-Gravimeter ist von uns in allen Kulturstaaten zum Patent angemeldet worden. Eine Beschreibung der genannten Verfahren findet sich in besonderen Abschnitten dieses Heftes.

Mit den nachstehend im einzelnen behandelten geophysikalischen Methoden werden bestimmte physikalische Meßgrößen ermittelt, die in Beziehungen zu dem Untergrunde stehen. Dem praktischen Ziel und der eigentlichen Aufgabe der angewandten Geophysik entsprechend, nämlich Lagerstätten bestimmter Mineralien aufzusuchen, zu begrenzen und ihre Lagerungsverhältnisse zu klären, müssen die nach den Meßbildern errechneten geophysikalischen Daten wie Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der elastischen Wellen und deren Änderungen, Gradienten der Schwere und Krümmungswerte der Niveauflächen in Beziehungen zu rein geologisch strukturellen Faktoren gebracht werden. Das geophysikalische Meßbild muß so ausgewertet und übersetzt werden, daß man daraus Schlüsse auf die Lagerung und Begrenzung von geologischen Strukturelementen ziehen kann. Diese wichtige Arbeit der Auswertung kann aber nur durch Spezialwissenschaftler nach jahrelanger systematischer Schulung erfolgen und nach Rückblick auf langjährige Erfahrungen in den verschiedenartigsten Arbeitsgebieten der Welt. Unsere Gesellschaft als älteste ihrer Art hatte in ihrer Tätigkeit seit 1922 bzw. 1919 Gelegenheit, solche Erfahrungen in vielen Ländern zu sammeln. Da bei vielen Untersuchungen der Bohrmeißel dem geophysikalischen Apparat unmittelbar auf dem Fuße folgte und so sehr wertvolles empirisches Vergleichsmaterial gewonnen werden konnte, war es mehr und mehr möglich, die Grenzen in der Anwendung der einzelnen Methoden zu erkennen und sie so anzusetzen, daß sie sich ergänzen.

Die Probleme, die an die angewandte Geophysik zur Lösung herantreten, sind außerordentlich vielseitig. Nur einige der Hauptaufgaben sollen hier kurz besprochen werden. In vielen Fällen handelt es sich darum, das Vorhandensein oder auch Fehlen bestimmter Mineral- oder Gesteinslagerstätten im Untergrund festzustellen und ihre Grenzen und Tiefenlage zu bestimmen. In bestimmten Gebieten, so an der Golfküste der Vereinigten Staaten, in Norddeutschland, Inner-Rußland usw. sucht man z. B. Salzdome und Salzstrukturen, die unter jungen Deckschichten verhüllt liegen. Diese Aufgabe ist bedeutungsvoll für die Ölgeologie, da Öllagerstätten häufig an die durch Salzdome hervorgerufenen Schichtenaufwölbungen gebunden sind. Das Aufsuchen von Salzdomen geschieht am schnellsten und wirtschaftlichsten mittels der seismischen Refraktionsmethode oder mittels Gravimeter-Messungen.

. . . . für Geophysik.

Die Abgrenzung und Bestimmung der Tiefenlage der Dome geschieht zweckmäßig unter Auswertung der seismischen Refraktionen oder Reflexionen. Zur Lösung von speziellen Fragen, z. B. wo am Rande eines Salzdomes günstige Bohrstellen für Erdölbohrungen anzusetzen sind, wo hochgeschleppte Rand- und Mantelschichten oder schollenartige Hochgebiete usw. zu finden sind, bedient man sich am besten der Drehwaage, mit deren Hilfe man über die Lage und die Art des Einfallens der Salzdomflanken Angaben machen kann.

Zahlreich sind auch die Fälle, wo geophysikalische Methoden angewandt werden können, um unter junger Bedeckung Hochwölbungsstrukturen (Rücken, Antiklinalen oder horstartige Strukturen) aufzusuchen, zu verfolgen und die Schichtenlagerung zu klären. In der Ölgeologie, im Bergbau oder in der praktischen Geologie wird es sich häufig darum handeln, die Stellen des Untergrundes festzulegen, die am stärksten hochgehoben sind, um günstige Ansatzpunkte für Bohrungen, Schächte usw. zu erhalten.

Auch die Lage und Streichrichtung von Verwerfungen und Bruchzonen ist häufig zu klären. Hier liegen oft Fragenkomplexe vor, die sehr vielseitig sein können und Beziehungen zu den verschiedensten Zweigen des Bergbaues, des Wasserbaues, des Tiefbaues usw. haben. Verwerfungen können z. B. als Wasserführer in bestimmten Fällen gesucht, in anderen gemieden werden. Die Bestimmung ihrer Lage ist häufig bei der Verfolgung nutzbarer Lagerstätten von großer Wichtigkeit. Zur Lösung all dieser Aufgaben wird man je nach den regionalen geologischen Verhältnissen Gravimeter-, seismische und Drehwaage-Messungen heranziehen. Wenn es sich dabei um tektonisch etwas kompliziertere und lokalere Probleme handelt, so wird sich oft ein Zusammenarbeiten von Reflexions- und Drehwaage-Messungen empfehlen, wie es sich in neuerer Zeit immer mehr durchsetzt.

Neben der Aufsuchung und Begrenzung ausgeprägter Strukturelemente, wie sie soeben skizziert sind, kann der Geophysik als eine weiter gefaßte Aufgabe zugewiesen werden, die Tiefenlage und das Verhalten eines bergwirtschaftlich oder geologisch wichtigen Horizontes festzulegen und über weitere Flächen zu kartieren.

Nachstehend sind einige Einzelheiten über die verschiedenen von uns hauptsächlich betriebenen Methoden behandelt, einige Beispiele an Hand typischer Meßbilder beschrieben und schließlich wird über die Bearbeitung einiger größerer Objekte, die in der Öffentlichkeit vielfach von sich reden gemacht haben, berichtet.

Aufbruch eines seismischen Trupps in Texas.

Untersuchungen mit Refraktionen seismischer Wellen.

Die seismische Refraktionsmethode, die in vielen Ländern große Erfolge aufzuweisen hat, wird überall da anzuwenden sein, wo es sich darum handelt, die geologische Struktur des Untergrundes zu erforschen. Sie gibt uns Aufschluß über die Lagerung der einzelnen Gesteinsschichten, über ihre Tiefe, Mächtigkeit und in gewissen Grenzen über ihre ungefähre Ausbildung.

Die Methode gestattet, in relativ kurzer Zeit Salzstrukturen (Salzstöcke, Salzdome) und andere Aufwölbungsstrukturen im tiefen Untergrunde festzustellen und sie dann im einzelnen ihrer Tiefenlage und Gestalt nach genauer zu bestimmen und zu begrenzen.

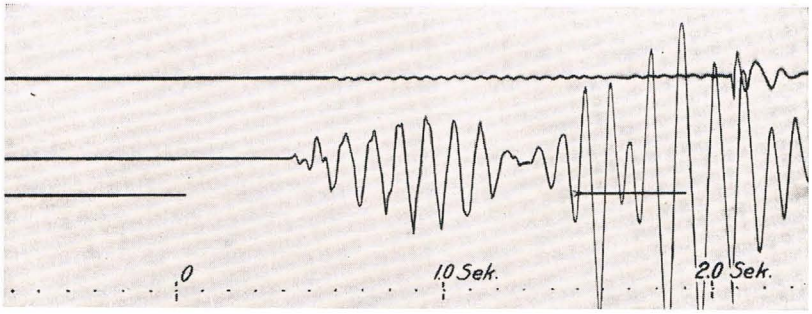
Zur Lösung dieser Aufgabe bedient sich die Seismik nach dem von Prof. Dr. Mintrop erfundenen Verfahren künstlich erzeugter Kleinerdbeben. Sprengstoff wird nahe der Erdoberfläche vergraben, wird zur Detonation gebracht, und die entstehenden Erschütterungswellen werden von Seismographen, die in gewissen Entfernungen vom Sprengpunkt stehen, aufgezeichnet. Dabei benutzt man vor allem die Tatsache, daß

Seismische Feld-Registrierstation mit Seismograph, Schall-Empfänger, Radio-Empfänger und photographischem Registriergerät.

die verschiedenen Gesteinsarten ein verschiedenes Leitvermögen für die seismischen Erschütterungswellen besitzen, daß sich diese also in den einzelnen Schichten ganz verschieden schnell fortpflanzen. Diese Geschwindigkeit, mit der die Wellen von einem Schußpunkt durch die Untergrundsschichten zu einem Beobachtungspunkt laufen, gilt es festzustellen, wenn man über den Aufbau des Untergrundes etwas erfahren will.

Zu diesem Zweck wird auf jedem Beobachtungspunkt ein Zelt aufgestellt, in dem ein Feld-Seismograph, ein Radio-Empfänger, ein Schall-Empfänger und ein Registriergerät zur Aufstellung gelangen. Die Aufzeichnungen dieser Instrumente werden auf einem photographischen Filmstreifen, der mit konstanter Geschwindigkeit in dem Registrierapparat läuft, in Form eines Seismogrammes festgehalten. Am Schußpunkt befindet sich ein Radio-Sender. Der Moment der Explosion wird dadurch auf den Film gebracht, daß das Radio-Sendegerät bei der Explosion durch Zerreißen eines

um die Sprengpatrone gewickelten elektrischen Zuleitungsdrahtes in Betrieb gesetzt wird, so daß ein Sendesignal auf dem Filmstreifen plötzlich einsetzt. Aus den Seismogrammen, auf denen sich auch eine genaue Zeitmarkierung befindet, kann man nun den



Seismogramm.
Die obere Linie zeigt den Schalleinsatz (bei ca. 2,0 sek.), die mittlere Linie die Erschütterungswelle und die untere Linie die Explosionszeit an. Darunter die Zeitmarkierung.

Zeitpunkt des Eintreffens der ersten seismischen Wellen bestimmen und damit auch die Laufzeit und die Geschwindigkeit der Wellen zwischen Schußpunkt und Beobachtungspunkten. Die Entfernung zwischen dem Schuß- und Beobachtungspunkt, die man zum Bestimmen der Wellengeschwindigkeit braucht, kann man aus dem Eintreffen der Schallwellen der Explosion am Beobachtungspunkt (vom Schall-Empfänger aufgezeichnet) unter Berücksichtigung von Lufttemperatur, Windrichtung und Windstärke berechnen. Auf diese Weise erhält man die Geschwindigkeit der seismischen Wellen im Erdboden, die in enger Beziehung stehen zu den elastischen Eigenschaften der verschiedenen Gesteine.

Die bei einem Sprengschuß entstehenden elastischen Wellen breiten sich nach allen Richtungen hin in der Erde gleichförmig aus. Sie werden beim Übergang von einer Gesteinsschicht in eine andere nach ähnlichen Gesetzen wie in der Optik gebrochen und schließlich wieder nach oben gebeugt, so daß sie an jedem Punkt der Erdoberfläche in der weiteren Umgebung des Schußpunktes registriert werden können. Sie sind gewissermaßen die Boten, die man ins Innere der Erde schickt und die bei ihrer Rückkehr berichten, mit welcher Geschwindigkeit sie durch die verschiedenen hier vorhandenen Gesteinsschichten hindurch laufen konnten. Treffen die elastischen Wellen in der Tiefe auf eine harte elastischere Schicht (z. B. Kalk- oder Salzlagen), so leitet diese Schicht die elastischen Wellen viel schneller fort, als die an der Erdoberfläche anstehende. Es gelangen deshalb von einer bestimmten Entfernung vom Schußpunkt ab die Wellen, die durch die elastischere, tiefere Schicht gelaufen sind, eher an die Erdoberfläche zurück als die Wellen, die mit langsamerer Geschwindigkeit nur das Deckgebirge durchlaufen.

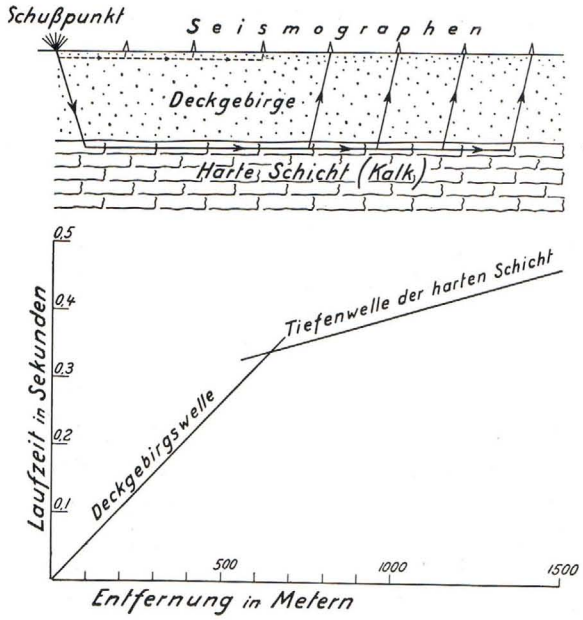


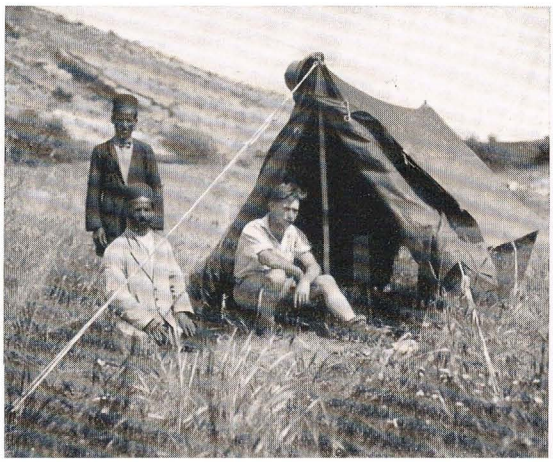
Abb. 1.

Diese Verhältnisse stellt man in der sog. „Laufzeitkurve" dar, wobei man für jeden Beobachtungspunkt die gemessene Laufzeit als Ordinate, die jeweilige Entfernung des Beobachtungspunktes vom Schußpunkt als Abszisse einträgt und die so erhaltenen Punkte durch Gerade verbindet (vergl. Abb. 1).

Die durch die tiefere Schicht laufenden Wellen haben eine größere Durchschnittsgeschwindigkeit als die in der obersten Schicht laufenden. Beide Geraden der Laufzeitkurve haben deshalb eine verschiedene Neigung. Der Schnittpunkt der beiden Geraden der Laufzeitkurve wird uns nun diejenige Entfernung und Laufzeit angeben, bei der die auf verschiedenen Wegen, d. h. durch die obere und durch die tiefere Schicht laufenden Wellen gleichzeitig am Beobachtungspunkt eintreffen. Dabei hängt die Schnittpunktsentfernung dieser beiden Geraden neben den Laufgeschwindigkeiten

Radio-Sendestation mit Schießmaschine und Gerät zum Bestimmen der Wind-Konstanten am Schußpunkt.

der Wellen in den beiden Schichten auch von der Größe des Umweges, also von dem Abstand der unteren Schicht von der Oberfläche, d. h. von ihrer Tiefe ab. Und da man diese Entfernung (Knickentfernung der Laufzeitkurve) sowie die Geschwindigkeiten ja aus der erhaltenen Laufzeitkurve entnehmen kann, hat man die Möglichkeit, die Tiefe dieser zweiten Schicht zu berechnen. Ganz analog verfährt man bei weiteren, tieferen Schichten. Dies ist, ganz einfach und schematisch dargestellt, das Prinzip, auf welchem die seismische Refraktionsmethode beruht. In der Praxis wird ein Gebiet, das genauer untersucht werden soll, mit zahlreichen Schußlinien bedeckt. Die Auswertung ihrer Laufzeitkurven ergibt dann eine Fülle von Einzelergebnissen und Erkenntnissen, die sich in Berichten mit Tiefenlinien-Karten der angetroffenen Schichten, Profilen usw. zusammenfassen lassen (vergl. dazu das Beispiel Seite 13).

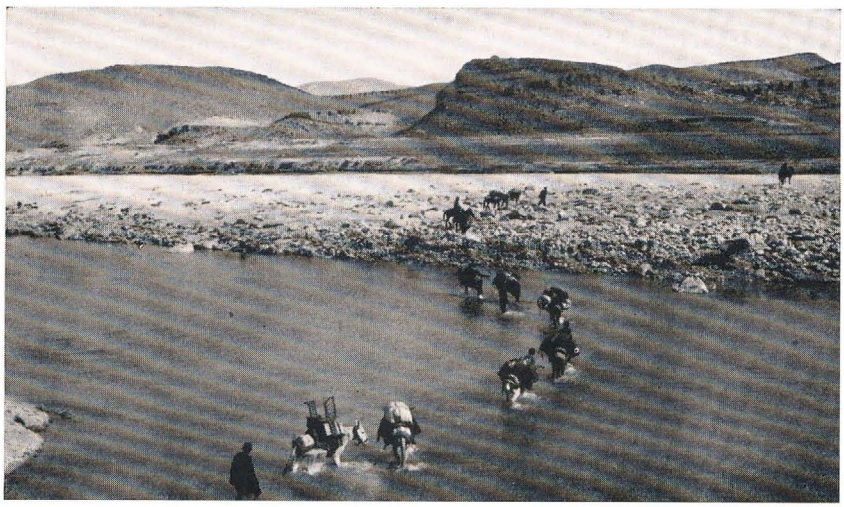


Seismisches Zelt in Persien.

Beispiel für das Aufsuchen und Begrenzen eines Salzdomes in Nordwestdeutschland mittels Refraktionsmessungen.

Der in Abb. 2 dargestellte Salzstock wurde vor wenigen Jahren in der Lüneburger Heide mittels des Refraktionsverfahrens entdeckt und dann durch systematisches Abschießen von Profillinien eingehend untersucht. Die Tiefe der Salzdomoberfläche, die Lage und Art des Abfallens der Flanken und die Lagerungsverhältnisse der dem Salzdom anlagernden Schichten wurden dabei bestimmt. Außerhalb des eigentlichen Domes wurde die Tiefenlage und das Verhalten eines seismischen Leithorizontes hoher Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Teufen bis zu 1800 m kartiert. Die bisher auf Grund dieser Messungen angesetzten Bohrungen haben die seismischen Angaben gut bestätigt.

Um einen Begriff über die Durchführung und die Organisation der Feldarbeit zu geben, sei nachstehend geschildert, wie eine seismische Untersuchung in Angriff genommen wird.



Flußüberquerung in Persien.

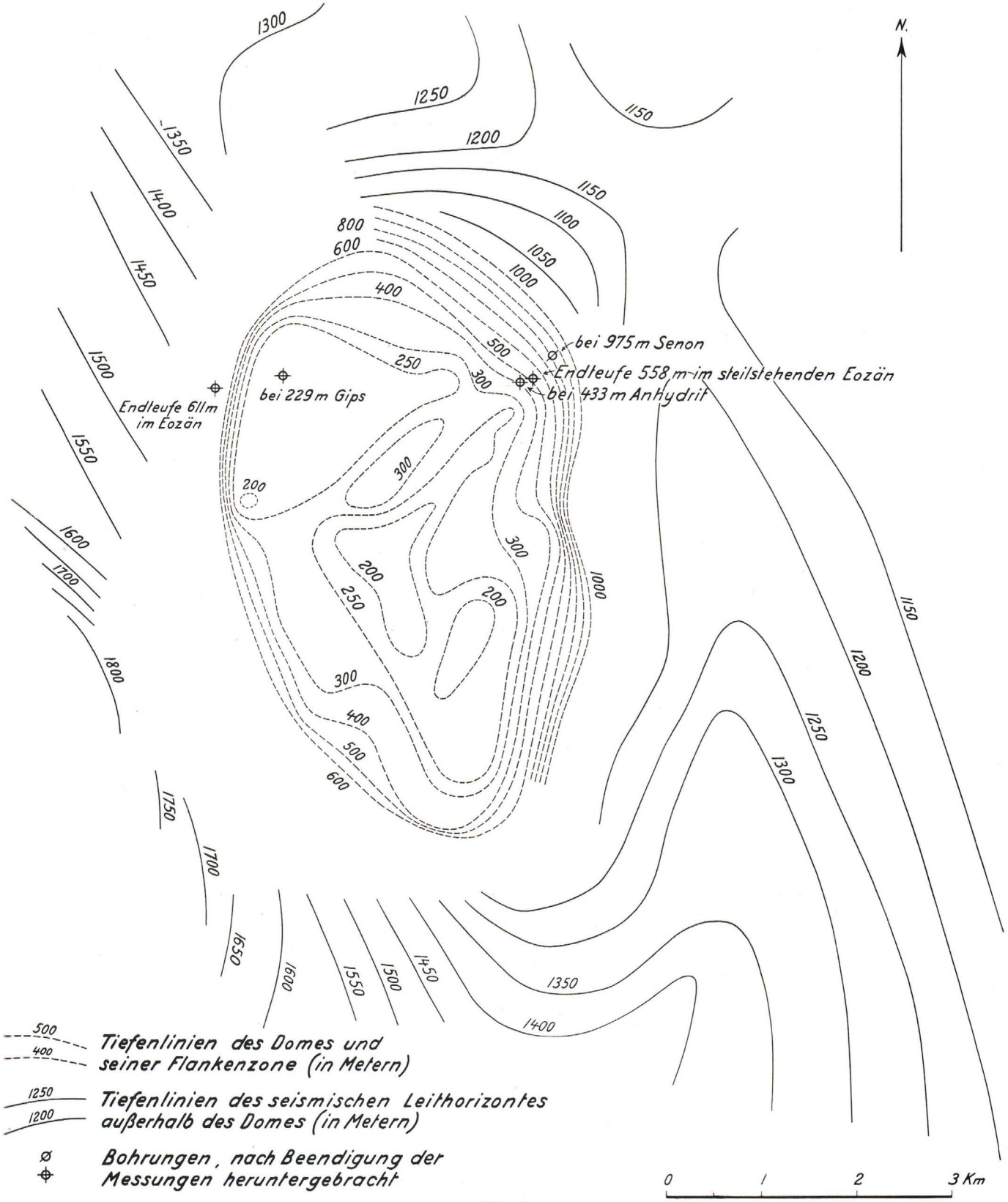
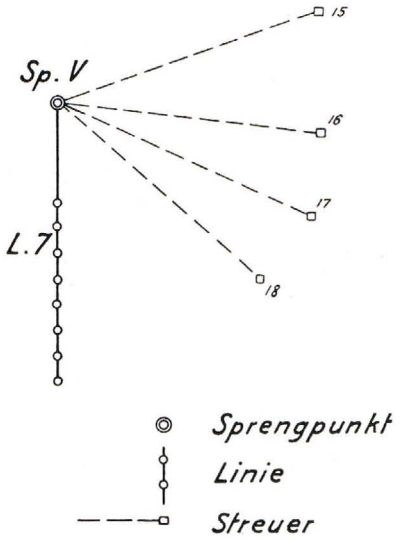

N.
bei 975 m Senon
Endteufe 558 m im steilstehenden Eozän
bei 433 m Anhydrit
bei 229 m Gips
Endteufe 611 m im Eozän
500 Tiefenlinien des Domes und
400 seiner Flankenzone (in Metern)
1250 Tiefenlinien des seismischen Leithorizontes
1200 außerhalb des Domes (in Metern)
Bohrungen, nach Beendigung der
Messungen heruntergebracht
0 1 2 3 Km

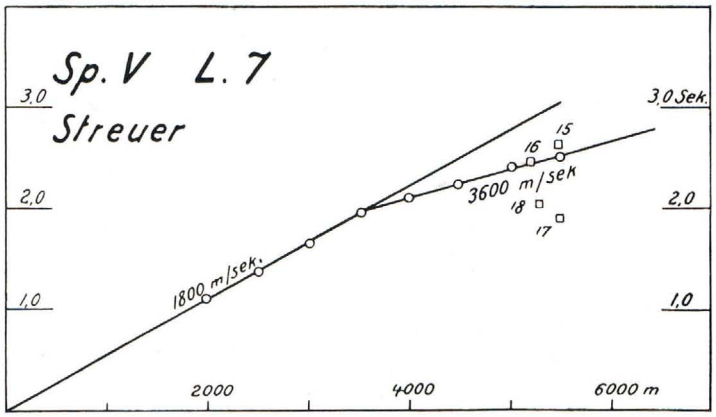
Abb. 2.

Drei Tage Feldseismik.

Erster Tag.

Es wird vom Sprengpunkt Sp V eine Linie (L 7) mit einer Anzahl von Beobachtungspunkten (Seismographen-Standpunkten) abgeschossen. Sie ergibt eine Anfangsgeschwindigkeit (in den Deckgebirgsschichten) von etwa 1800 m/sek. und eine Tiefengeschwindigkeit (Geschwindigkeit der nächstfolgenden tieferen seismischen Schicht) von etwa 3600 m/sek. Die von Sp V aus geschossenen „Streu"-Beobachtungspunkte 16 und 15 zeigen entsprechende Laufzeiten. Die Streuer 17 und 18 dagegen zeigen eine kürzere Laufzeit. Folgerung: In Richtung Streuer 17 und 18 liegt entweder hochelastisches Material lokal begrenzt oder die seismische 3600-m/sek.-Schicht wölbt sich im Untergrunde stark auf.

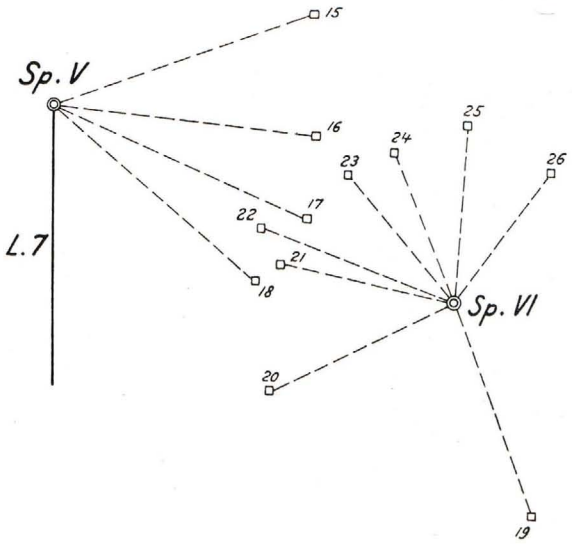


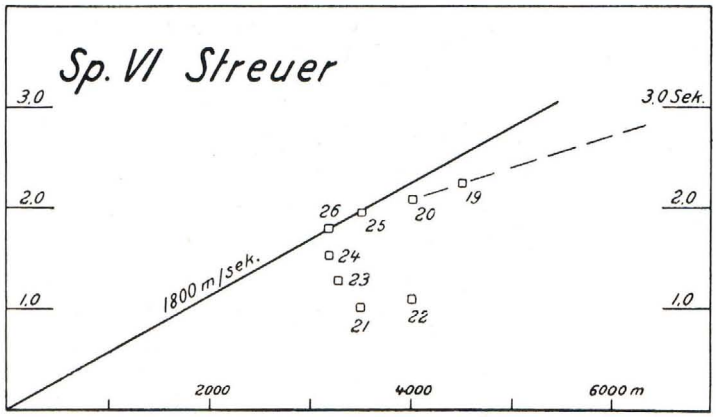


Programm für den zweiten Tag:
Klärung der Umgebung von Streuer 17 und 18 durch Streuschießen von Schußpunkt VI.

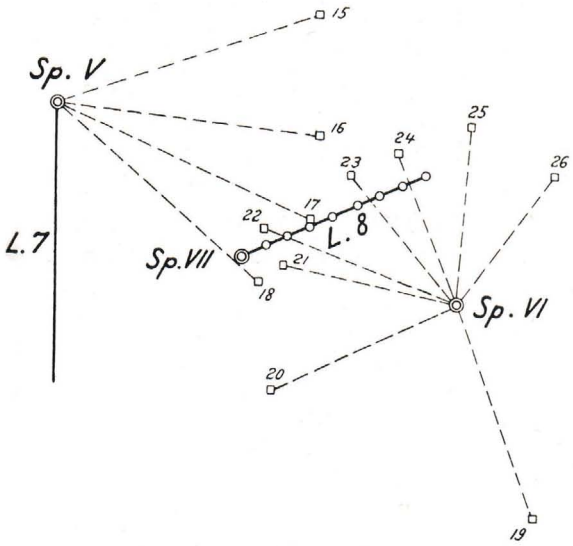
Zweiter Tag.

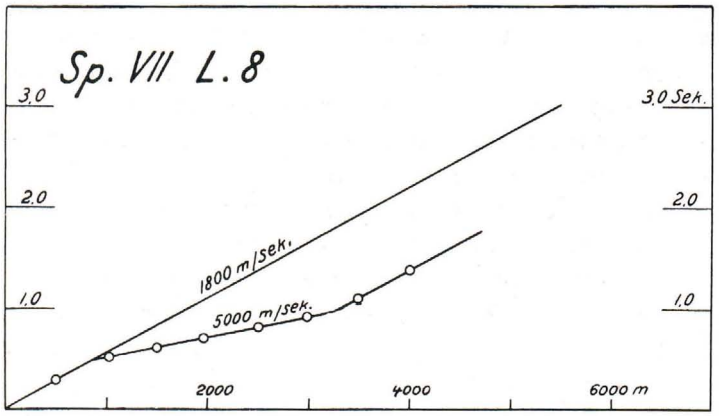
Resultat: Streuer 21 und 22 haben kürzeste, Streuer 23 etwas längere Laufzeit, Streuer 24 ist etwas beeinflußt, die übrigen Streuer liegen normal. Die Laufzeit von Streuer 21 und 22 ist sehr gering, entweder ist der elastische Stoß durch einen in nicht sehr großer Tiefe gelegenen Horst oder durch praktisch an der Oberfläche





liegende mittelelastische Schichten gelaufen. Die schnelle Zeitzunahme in Richtung der Streuer 24, 25 und 20 läßt mit großer Wahrscheinlichkeit auf einen Horst schließen.





Programm für den dritten Tag:

Eine Linie 8 wird von Sp VII aus dem Gebiet der Streuer 21 und 22 in Richtung auf Streuer 24 geschossen, um Tiefengeschwindigkeit, Tiefenlage des hochelastischen Materials und Größe (evtl. Flanken) zu bestimmen.

Dritter Tag.

Resultat: Linie L 8 von Sp VII erreicht bei einer Knickentfernung von 800 m eine Tiefengeschwindigkeit von 5000 m/sek. Diese hält bis 3300 m der Linie an und bricht dann ab zu einer Deckgebirgsgeschwindigkeit.

Es muß aus all diesen Daten auf horstähnliches Vorkommen des Materials mit 5000 m/sek. Geschwindigkeit geschlossen werden. Die Grenzen dieses Vorkommens verlaufen etwa nach Abb. 3. Genauere Spezialmessungen können nun die Lagerstätte hinsichtlich Tiefe, Flanken und Flankenschichten exakt untersuchen.

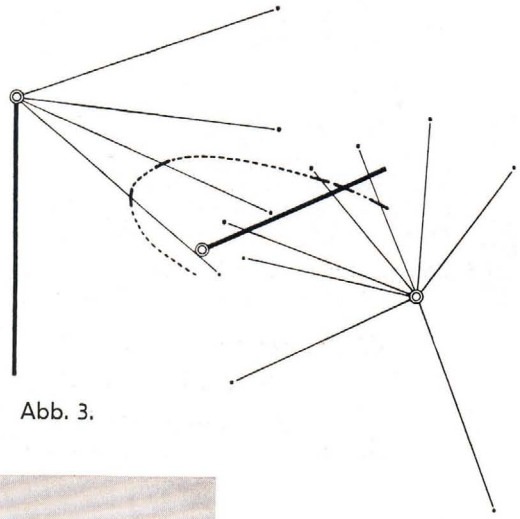
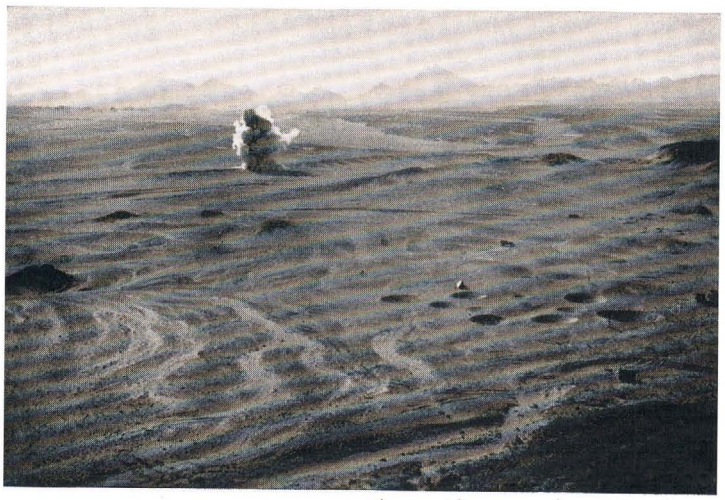


Abb. 3.

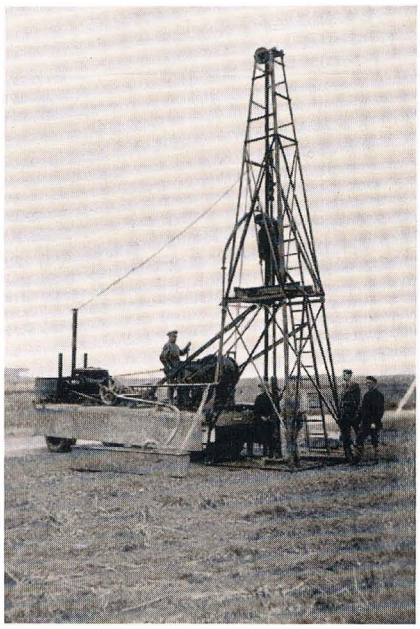


Seismische Arbeiten in Ägypten. Seismographenzelte.

Untersuchungen mit Reflexionen seismischer Wellen.

Das im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Refraktionsverfahren läßt auf dem Wege über die Laufzeitkurve die charakteristischen Eigenschaften der im Untergrunde anstehenden Gesteine dadurch erkennen, daß deren Geschwindigkeit für die Fortleitung seismischer Wellen ermittelt wird. Das jetzt zu schildernde Reflexionsverfahren arbeitet nicht mit an Schichtgrenzen fortschreitenden seismischen Wellen, sondern benutzt nur die direkten Reflexionen der von einem Sprengherd ausgehenden Wellen an Schichtgrenzen im Untergrunde. Das Reflexionsverfahren erlaubt, sehr große Tiefen zu erreichen. Die notwendige Bedingung für das Zustandekommen einer Reflexion ist ein Wechsel in der Elastizität des Untergrundes. Je größer die elastischen Unterschiede sind und je plötzlicher sie in vertikaler Richtung einsetzen, um so besser wird auch die Qualität der Reflexion sein. Abb. 4 zeigt schematisch

Bohrgerät zum Herstellen der Schußbohrlöcher beim Transport.



Das Gerät bohrt.

den Wellenverlauf bei Reflexionen. In den Grenzflächen A, B, C und D stoßen Gesteine verschiedener Elastizität aneinander, hier liegen daher auch reflektierende Horizonte. Diese brauchen nicht allen stratigraphisch-geologischen Horizonten zu entsprechen, vor allem dann nicht, wenn der Übergang von einer Formation zur anderen ohne ausgeprägte petrographische Unterschiede geschieht. Hebt sich jedoch ein geologischer Horizont von seiner Bedeckung durch einen merkbaren petrographischen Unterschied ab, so ist er auch durch Reflexionen seismischer Wellen nachzuweisen.

Bei Reflexionsmessungen ist der horizontale Abstand des Sprengpunktes von der Aufstellung der Seismographen immer klein gegen die Tiefe der reflektierenden Horizonte. Man kann daher den Weg der vom Sprengpunkt zu den reflektierenden Horizonten B, C und D gezeichneten Wellen ohne Berücksichtigung des Brechungsgesetzes geradlinig durchzeichnen. Überdies wird bei der später zu besprechenden praktischen Bestimmung der Durchschnittsgeschwindigkeit auf diesem Wege die Krümmung der Strahlen berücksichtigt.

Die Aufzeichnung reflektierter Wellen mit einem mechanischen Seismographen geeigneter Abstimmung ist an sich durchaus möglich, sie wäre aber im praktischen Betrieb unwirtschaftlich. Damit nämlich die Reflexionseinsätze sich gegen die vielen anderen im Seismogramm vorhandenen Einsätze herausheben, hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die Aufzeichnungen von 4—6 längs eines Profils aufgestellten Seismographen

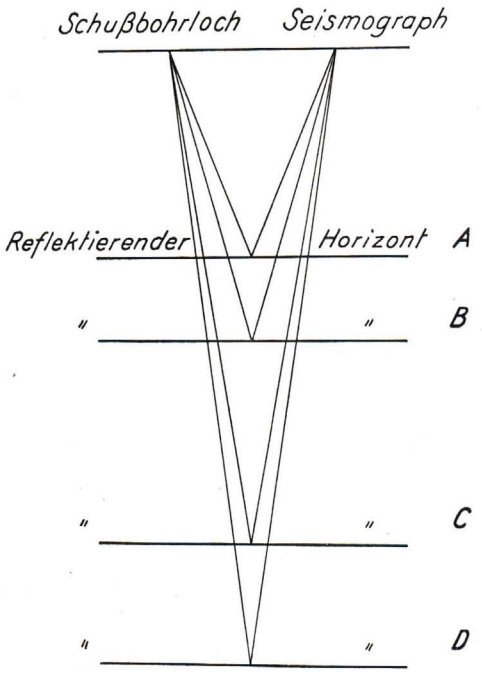


Abb. 4.

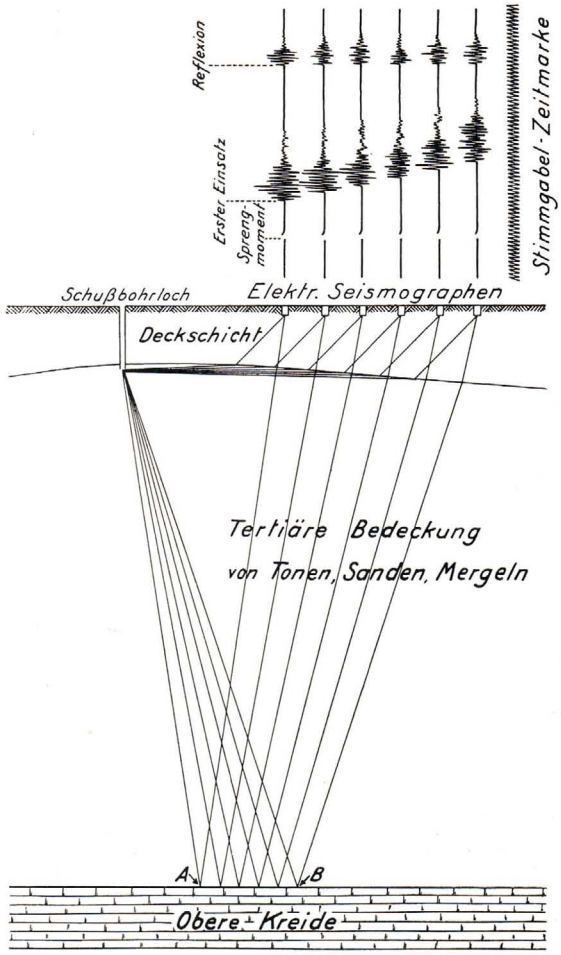


Abb. 5.

gleichzeitig auf einen Registrierstreifen zu bringen, was nur durch Verwendung elektrischer Seismographen möglich ist. Die Aufstellung im Gelände zeigt Abb. 5.

Durch die Sprengung in Schußbohrlöchern, die im allgemeinen 15—20 m tief sind, erreicht man wesentlich bessere Reflexionsseismogramme als bei nur oberflächlicher Verdämmung des Sprengstoffes. Der Grund liegt darin, daß wegen der Lage des Sprengortes in einem homogeneren, am besten unter dem Grundwasserspiegel liegenden Medium nicht so starke Schwingungen in der Deckschicht zur Ausbildung gelangen. Auch erreicht man so eine starke Reduktion der Sprengstoffmenge. Oberflächenschaden wird so gut wie gänzlich vermieden.

Von jedem der elektrischen Seismographen, die die mechanische Erschütterung des Bodens in elektrische Schwingungen umsetzen, führt eine Leitung zu einem elektrischen Filter, das auf die Frequenzen der reflektierten Wellen abgestimmt ist und andere Schwingungen nicht durchläßt. Das Filter steigert die Qualität des Reflexionsseismogrammes sehr wesentlich. An den Ausgang des Filters schließt sich ein mehrstufiger Verstärker an, und von diesem führt die Leitung weiter zu einer Oszillographenmeßschleife. Der Spiegel dieser Meßschleife wird von einem photographischen Registriergerät beleuchtet. Der reflektierte Lichtstrahl fällt auf fortlaufend transportiertes photographisches Papier und zeichnet somit das Seismogramm auf. Da jeder Seismograph im Gelände ein besonderes Seismogramm gibt, so erhält man von jeder Sprengung einen Streifen Registrierpapier mit 4—6 Seismogrammlinien, je nach der Zahl der verwandten Seismographen (vergl. Abb. 5). Zur Zeitmarkierung dient eine Stimmgabel, deren Oszillogramm am unteren Rande des Registrierpapiers erscheint.

Jedes einzelne Seismogramm beginnt mit der Aufzeichnung des Sprengmomentes, der durch eine Drahtleitung oder drahtlose Übermittlung vom Sprengort auf die Meßschleife übertragen wird. Einige Zehntel-Sekunden nach Aufzeichnung des Schußmomentes zeichnet sich der erste Einsatz der direkten Bodenwelle auf, dem eine große Zahl ungeordneter Schwingungen von in der Deckschicht ausgelösten Wellen folgt. Man bezeichnet diesen ersten Teil des Schwingungsbildes als den Bodenstoß. Die Ausbildung und die Zeitdauer dieses Bodenstoßes hängt ganz und gar von der Art der oberflächlichen Schichten ab. Der Bodenstoß kann die Aufzeichnung von Reflexionen aus Horizonten geringer Tiefe unter Umständen sehr stören.

Das nächste markante Ereignis im Seismogramm ist die Aufzeichnung einer Schwingung, die man als reflektierte Welle bezeichnen darf, da sie von sämtlichen Seismographen der Anordnung praktisch gleichzeitig registriert wird. Die Betrachtung des Weges der reflektierten Wellen in Abb. 5 zeigt ja, daß dieser für den schußfernsten Seismographen nur wenig länger ist als für den schußnächsten. Bei geeignetem Abstand der Seismographen muß daher eine Reflexion praktisch gleichzeitig auf allen Seismogrammlinien erscheinen. Verbindet man den Beginn der Aufzeichnung einer Reflexion in allen Seismogrammlinien, so erhält man eine zur Laufrichtung des Papiers fast senkrechte Linie.

Die Reflexionslaufzeiten werden bei der Auswertung zunächst vermindert um die in der oberflächlichen Deckschicht verbrauchten Zeiten, die gesondert bestimmt werden. Die Tiefenberechnung ist nun gebunden an die Kenntnis der Durchschnittsgeschwindigkeit der reflektierten Welle in dem Raume zwischen der Unterkante der oberflächlichen Deckschicht und dem reflektierenden Horizont. Für diese Durchschnittsgeschwindigkeit bestehen immer gewisse Anhaltspunkte, so aus Refraktionsmessungen oder aus der Kenntnis der Schichtenfolge in bekannten Bohrungen. Genau läßt sich die Durchschnittsgeschwindigkeit aus einer großen Zahl von guten Reflexionsseismogrammen auf mathematischem Wege ermitteln. Diese theoretische Ermittlung hat aber gewisse Nachteile. Wo es daher nur irgend möglich ist, sollte man Reflexionsuntersuchungen an Tiefbohrungen und Schächte anschließen. Wird dann ein Spezialseismograph in die Bohrung versenkt (vergl. Abb. 6) und in den verschiedenen durch die Bohrung erkannten geologischen Horizonten zur Aufzeichnung des ersten Einsatzes einer Sprengung benutzt, die in einem Schußbohrloch an der Oberfläche in unmittelbarer Nähe der Tiefbohrung vorgenommen wird, so läßt sich die Durchschnittsgeschwindigkeit von der Oberfläche bis zu jedem der geologischen Horizonte angeben. Aus der Differenz der Meßwerte in den verschiedenen Tiefen erhält man außerdem die für die geologischen Schichtfolgen charakteristischen Einzelgeschwindigkeiten. Jede der Sprengungen, die für die Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeiten der seismischen Wellen von der Oberfläche bis zu den verschiedenen Horizonten notwendig sind, kann auch gleichzeitig durch einen oder mehrere Reflexionsseismographen an der Oberfläche registriert werden. Man erhält so auf einem Seismogramm die Laufzeit von der Oberfläche bis zum versenkten Seismographen und gleichzeitig die Reflexionslaufzeit für einen auf der Oberfläche stehenden Seismographen. Befindet sich der

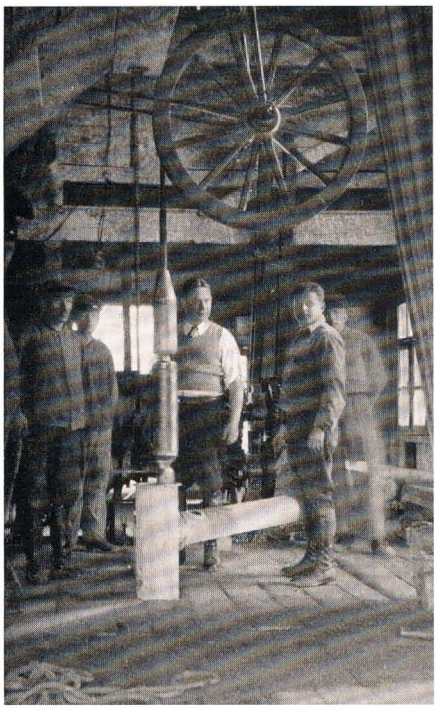


Abb. 6.
Versenkung eines Spezial-Seismographen in eine Tiefbohrung.

versenkte Seismograph in der Oberkante eines reflektierenden Horizontes, so müssen sich die Laufzeiten wie 1:2 verhalten.

In dem Seismogramm Abb. 7, das an einer Tiefbohrung aufgenommen wurde, gibt die untere Seismographenlinie die Aufzeichnung des versenkten Seismographen wieder. Der in der Dickspülung hängende Seismograph befindet sich in der Oberkante eines

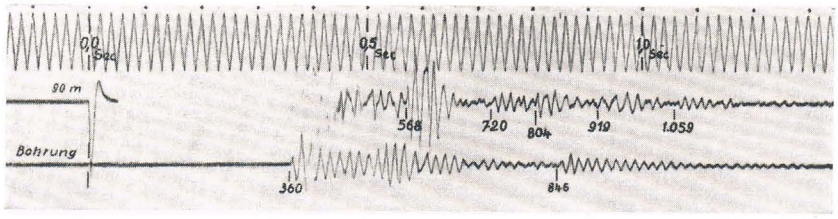


Abb. 7.

durch die Bohrung erkannten geologischen Horizontes. Der erste Einsatz trifft nach 0,360 sek. ein, die Kurve darüber, die von einem auf der Oberfläche stehenden Seismographen herrührt, zeigt nach 0,720 sek., also bei der doppelten Laufzeit des

Das Aufstellen der Reflexions-Seismographen im Gelände.

versenkten Seismographen, eine Reflexion an. (Diese Reflexion ist durch den an der Oberfläche stehenden Seismographen bei annähernd senkrechtem Einfall der Welle aufgezeichnet, in etwas größerer Entfernung vom Schußbohrloch tritt sie mit wesentlich

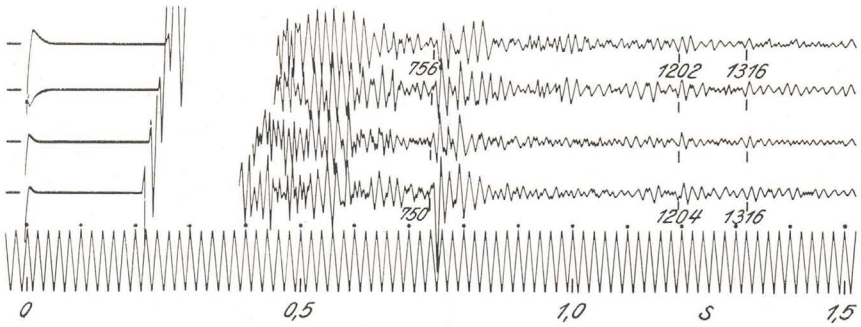


Abb. 8.

stärkerer Amplitude auf.) Diese Art der Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeit liefert auf einem Stück Registrierpapier den einwandfreien Nachweis der Identität des reflektierenden Horizontes. Die in Abb. 7 bei 0,568 sek. aufgezeichnete markante Reflexion entspricht der Oberkante der oberen Kreide.

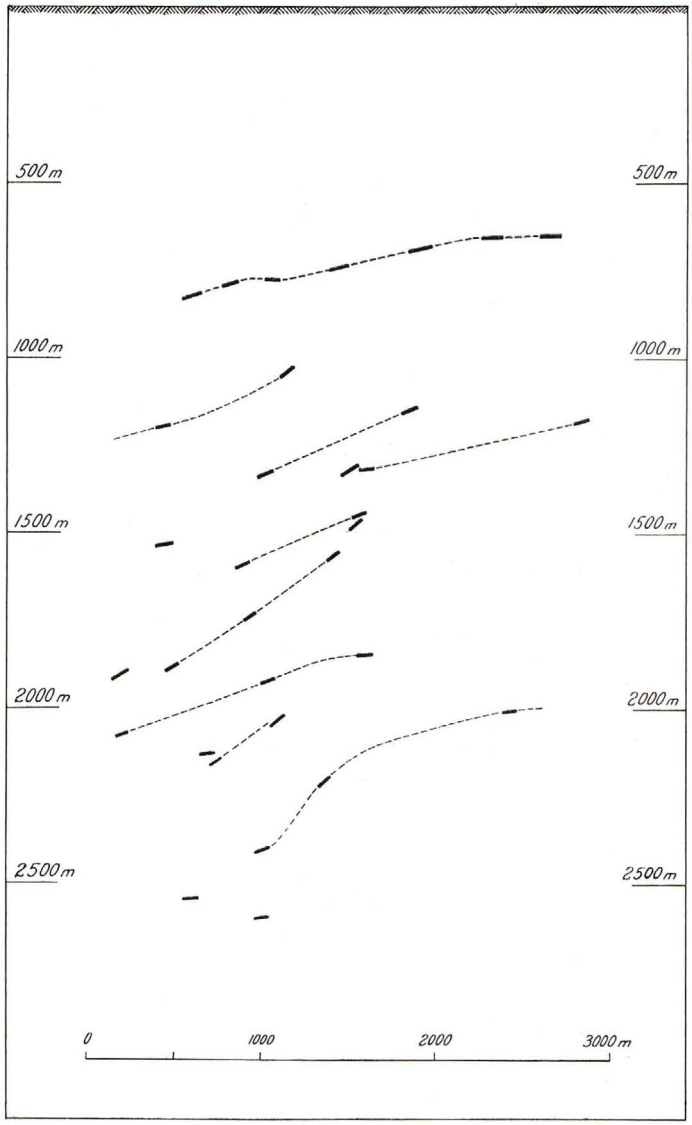


Abb. 9.

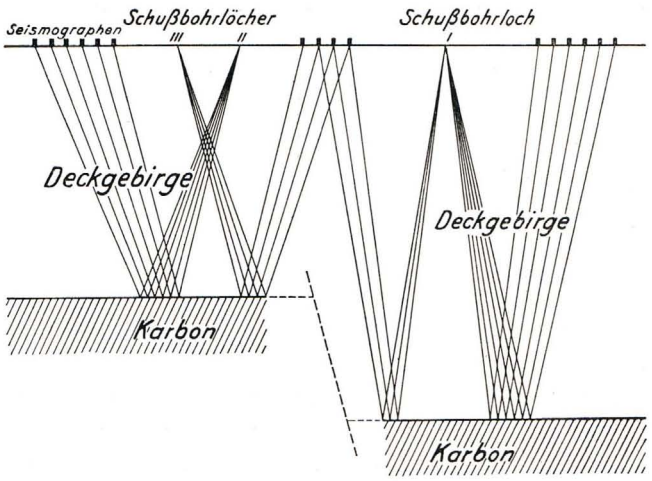
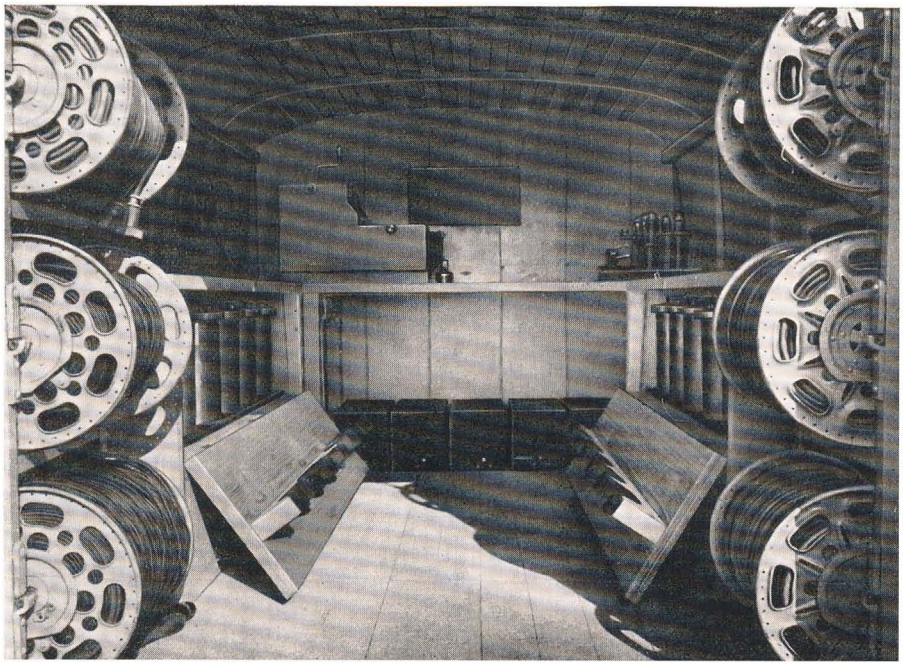


Abb. 10.

In Abb. 8 sind durch vier gleichzeitig registrierende elektrische Seismographen Reflexionen an der Oberkante der oberen Kreide mit der Laufzeit 0,750 bis 0,756 sek. aufgezeichnet. Die bei den Zeiten 1,202 - 1,204 und bei 1,316 sek. aufgezeichneten schwächeren Reflexionen entsprechen Horizonten in der unteren Kreide.

Ist die Durchschnittsgeschwindigkeit für reflektierte Wellen durch Anschluß an Tiefbohrungen einwandfrei bestimmt, so erreicht man mit der Reflexionsmethode eine recht gute Genauigkeit der Kartierung des Untergrundes. Aus jedem einzelnen Reflexionsseismogramm lassen sich durch Rechnung oder graphische Konstruktion Tiefe und Neigung des reflektierenden Horizontes, jedoch jeweils nur über eine kurze Strecke, angeben. Abb. 9 zeigt einen Ausschnitt aus dem Ergebnis von Reflexionsarbeiten in der Lüneburger Heide. Die punktiert gezeichnete Verbindung der ermittelten reflektierenden Elemente des Untergrundes gründet sich auf die ermittelte Neigung und wird unterstützt durch den Vergleich der Aufzeichnungen benachbarter Seismogramme. Die Reflexionsmethode ist nach den vorstehenden Darlegungen besonders für Detailuntersuchungen zur Klärung der Lagerungsverhältnisse bestimmter geologischer Horizonte geeignet. Als charakteristisches Anwendungsbeispiel sei nachstehend auf Spezialuntersuchungen im Ruhrrevier hingewiesen, wo es sich darum handelt, die Tiefenlage der Karbonoberfläche festzustellen und die Hauptverwürfe im Deckgebirge aufzusuchen und zu verfolgen. Der Abstand

der Beobachtungen wurde über dem durch die Messungen als ungestört nachgewiesenen Teil der Karbonoberfläche relativ weit genommen; wo aber, vgl. Abb. 10, die Reflexionslaufzeiten der Schußbohrlöcher I und II große Zeitdifferenzen aufwiesen, wurde zur Einengung der Deckgebirgsverwerfung noch ein weiteres Schußbohrloch III angesetzt.



Das Innere des Registrierwagens. Im Vordergrund die Kabelrollen, dahinter rechts und links die elektr. Seismographen und im Hintergrund das photographische Registriergerät.

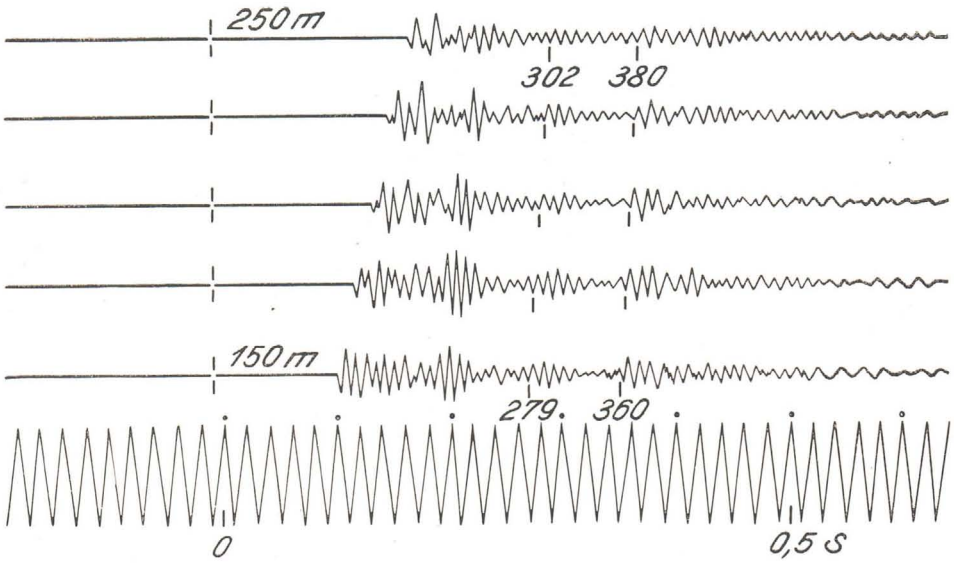


Abb. 11

Zwar geben die unmittelbar über der Verwurfszone angesetzten Reflexionsmessungen im allgemeinen kein gutes Reflexionsbild, oder sie zeigen es nur auf zwei oder drei benachbarten der insgesamt sechs Seismographen, doch sind gerade diese Beobachtungen wertvoll für die Einengung der Deckgebirgsverwerfung.

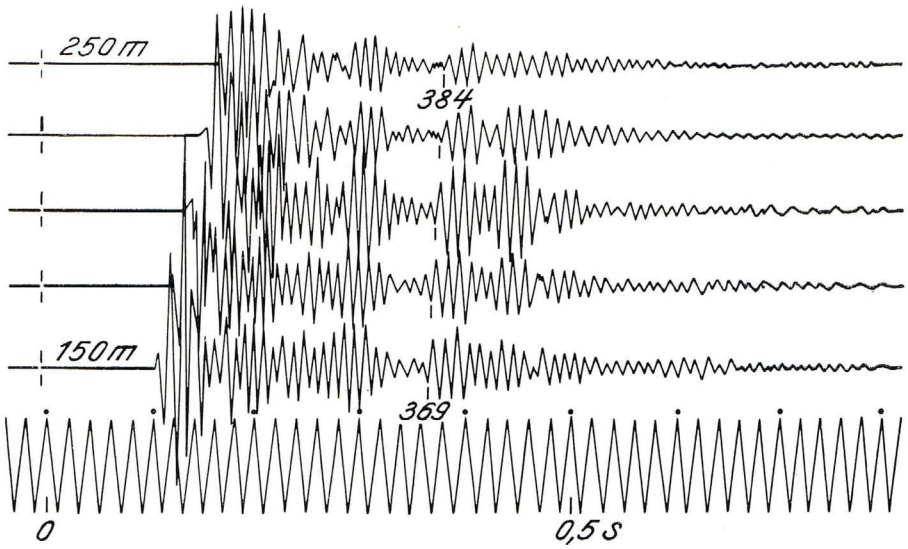


Abb. 12.

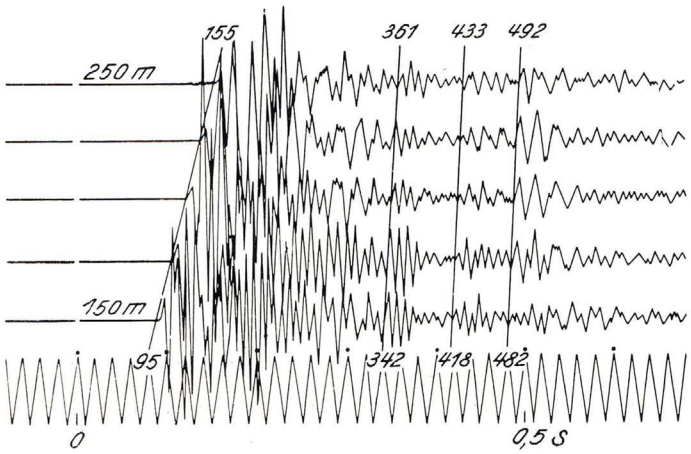


Abb. 13.

Nr. 9 Schußpunkte

320 Reflexionsbeobachtungen nebst Teufe der Karbonoberfläche

W7 310 Aufschlußbohrungen u. Schächte " " " "

Alle Teufen beziehen sich auf Normal Null

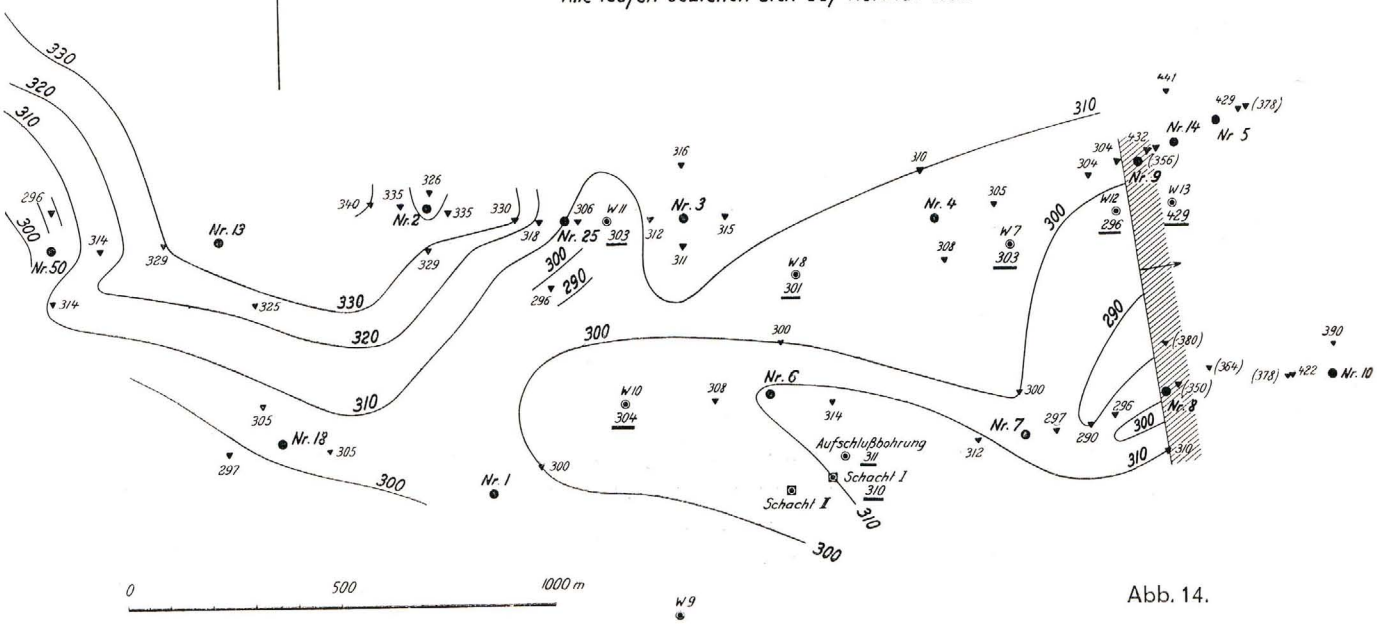


Abb. 14.

In den Abb. 11 und 12 sind Seismogramme von ungestörten Teilen der Karbonoberfläche wiedergegeben. In dem ersten Seismogramm zeigt die erste Reflexion eine Mergelbank im Deckgebirge an, die zweite entspricht der Karbonoberfläche. Die Ladung betrug nur 10 g Sprengstoff, der 15 m tief verdämmt war.

In dem zweiten Seismogramm ist bei der Zeit 0,369 — 0,384 sek. die Karbonreflexion allein aufgezeichnet. Die Ladung beträgt hier 40 g Sprengstoff bei gleicher Verdämmung.

Soweit das Karbon stellenweise von anderen Schichten (wie Buntsandstein, Zechstein) überlagert ist, treten in den Seismogrammen noch weitere Reflexionen auf.

Durch Vergleich aller Seismogramme ist es jedoch möglich, die der Karbonoberfläche zugehörige Reflexion zu erkennen. Abb. 13 gibt eine solche Aufzeichnung wieder. Die erste Reflexion (0,342 — 0,361 sek.) entspricht einem harten Deckgebirgshorizont, die zweite (0,418 — 0,433 sek.) einem Anhydrithorizont des Zechsteins, die dritte (0,482 bis 0,492 sek.) schließlich entspricht der Karbonoberfläche.

Die Ergebnisse der Arbeiten in einem Teilbezirk sind in einer Tiefenlinienkarte der Karbonoberfläche dargestellt (Abb. 14). Am Ostrande der Karte ist eine Verwerfung angegeben, die eingeklammerten Zahlen bezeichnen die Tiefe bis zu dem erwähnten Zechsteinhorizont. Westlich der Verwerfung ist das Karbon nicht von Zechstein überlagert.

Die Trennung der dem Zechstein zuzuschreibenden Reflexion von derjenigen der Karbonoberfläche ist im allgemeinen durchaus möglich. Nur bei geringerer Mächtigkeit des Zechsteins wird sie schwierig.

Hochdruck.

Über die Drehwaage und die geologische Bedeutung der Meßgrößen.

Das Verfahren zur Untersuchung mit der Drehwaage beruht auf der Messung gewisser Schwerkraftswerte, die durch wechselnde Verteilung der Dichte der Gesteine im Untergrund verursacht werden. Die Drehwaage ermittelt diejenigen kleinen Beträge, um welche sich die Schwerkraft in horizontaler Richtung innerhalb eines nur wenige Dezimeter großen Raumes ändert. Diese Änderungen sind zwar von außerordentlich geringer Größe, aber der wichtigste Teil der Drehwaage, ein feiner Platindraht von etwa $^1/_{25}$ mm Durchmesser, ist gegen Verdrehungen durch kleine Kräfte so empfindlich, daß letztere exakt gemessen werden können.

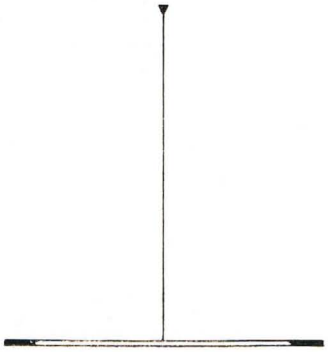


Abb. 15.

Wie ist nun eine Drehwaage eingerichtet? Im Prinzip ist sie eine verblüffend einfache Vorrichtung. Ein leichtes, rund 40 cm langes Metallrohr, der Balken, der an jedem seiner beiden Enden ein etwa 30 g schweres Gewicht trägt und der in seinem Schwerpunkt an dem oben genannten Draht aufgehängt wird, ist die einfachste Form der Drehwaage (Abb. 15), wie sie schon vor 150 Jahren für exakte physikalische Messungen benutzt wurde. Zur Untersuchung des Untergrundes auf geologische Strukturen ist diese Form aber noch wenig brauchbar. Dieses leistet besser die neue Form (Abb. 16), die nach dem ungarischen Physiker v. Eötvös aus der einfachen Form dadurch entsteht, daß eines der beiden Gewichte um einige Dezimeter tiefer gehängt wird.

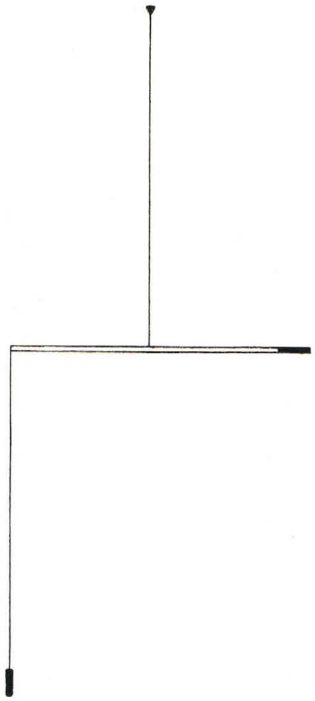


Abb. 16.

Würde man nun eine Drehwaage nach Abb. 16 einfach an einem Stativ aufhängen und im Gelände zur Ausführung von Messungen benutzen wollen, so brächte man damit doch nichts zustande, denn wegen der großen Empfindlichkeit des feinen Platindrahtes gegen Verdrehungen würde schon der leiseste Luftzug die ganze Vorrichtung nicht einmal zu ruhiger Einstellung kommen lassen. Es ist also notwendig, die Drehwaage in ein Gehäuse einzuschließen. Da aber auch schon geringe Temperaturänderungen die Einstellung des Instrumentes beeinflussen, ist es sogar erforderlich, die Vorrichtung in ein dreifaches massives Metallgehäuse einzuschließen. Bringt man dann zur Beschleunigung der Messungen zwei der Drehwaagegehänge darin unter, so hat man ein Instrument, das durch meteorologische Einflüsse nicht mehr gestört wird (Abb. 17). Dieses kurz „Drehwaage" genannte Instrument ist noch mit einer Reihe von Vorrichtungen versehen, die dazu dienen, die Einstellung der Gehänge automatisch auf einer Photoplatte zu verzeichnen, von welcher dann zur Berechnung der Schwerkraftswerte eines bestimmten Geländepunktes ausgegangen wird.

In welcher Beziehung stehen nun die Aufzeichnungen der Drehwaage zu den im Untergrund versteckten geologischen Strukturen? Zur Beantwortung dieser Frage gehen wir von folgendem physikalischen Versuch aus (Abb. 18). Wir haben an einer Stelle A eine Drehwaage aufgehängt. B sei der feine Platindraht, C das obere Gewicht und E das untere. In einigen Dezimetern Abstand werde nun in der Höhe des unteren Gewichtes eine rund 10 kg schwere Masse, etwa eine Bleikugel, aufgestellt. Die Kugel

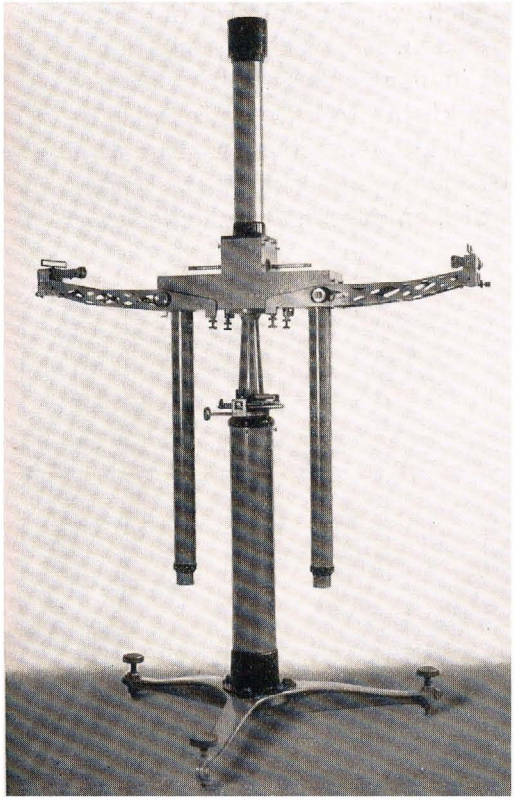
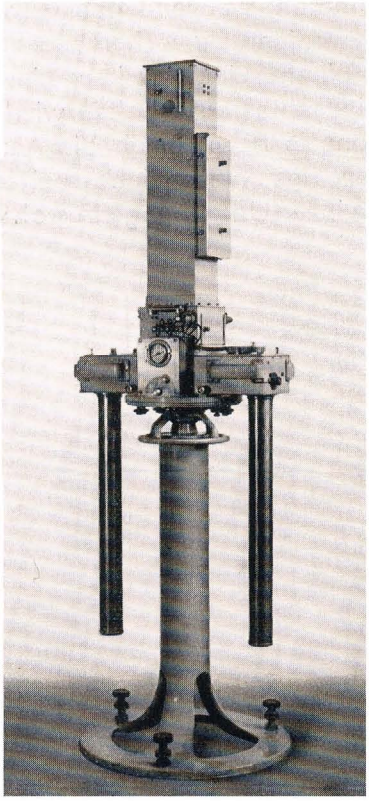
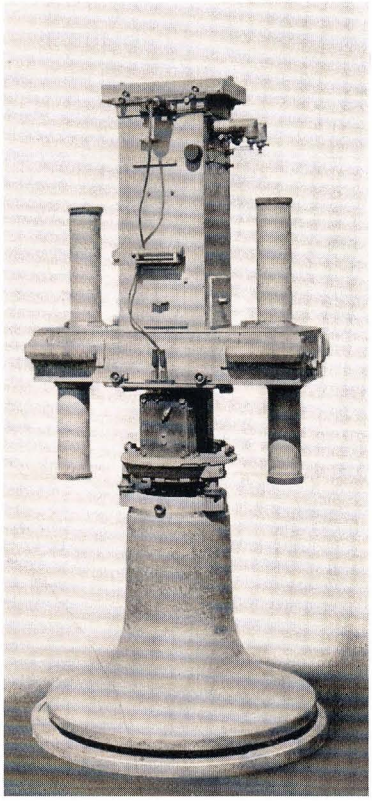


Abb. 17. Drehwaage Bauart Süß.



Drehwaage Bauart Exploration.



Drehwaage Bauart Askania.

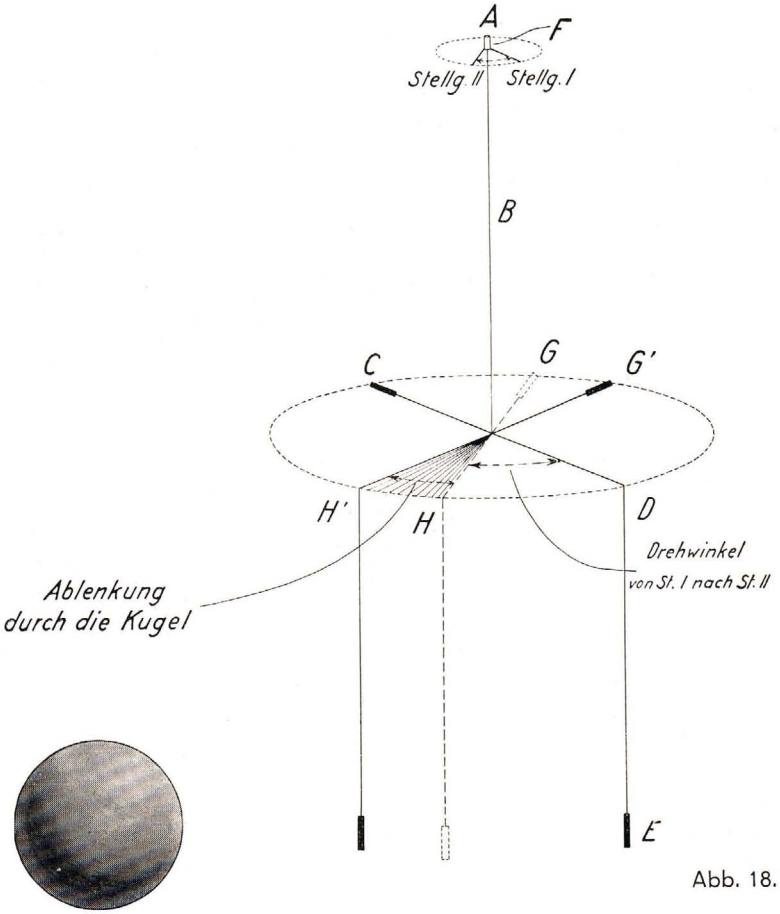


Abb. 18.

übt nun auf das Gewicht E eine stärkere Anziehungskraft aus als auf das Gewicht C, so daß sich das Balkenende D auf die Kugel zu bewegt. Dieses geschieht jedoch nur solange, bis die in dem verdrehten Platindraht B entstehenden Gegenkräfte der Bewegung Einhalt gebieten. Der Balken nehme am Ende die Stellung CD ein. Verdreht man darauf den Draht B mit Hilfe einer Schraube F von der bisherigen Stellung I in die neue Stellung II, so müßte sich auch der Balken um den gleichen Winkel bis GH um den Draht B als Achse drehen, wenn die Anziehungskräfte der Kugel auf die Gewichte dieselben geblieben wären. Das ist aber nicht der Fall, denn das Gewicht E

ist der Kugel nähergekommen, während das Gewicht C sich von ihr entfernt hat, so daß nun E mehr und C weniger als vorher angezogen werden. Daher dreht sich der Balken noch um einen kleinen Winkel weiter, bis er erst in der Stellung G'H' durch die Gegenkraft des Platindrahtes aufgehalten wird. Dieser kleine Winkel ist es also, der durch das Vorhandensein bzw. durch die Anziehungskraft der schweren Kugelmasse entsteht und der das Wesentliche bei der Drehwaagemessung ist. Die schwere Masse erzeugt in ihrer Umgebung ein Schwerefeld, an dessen verschiedenen

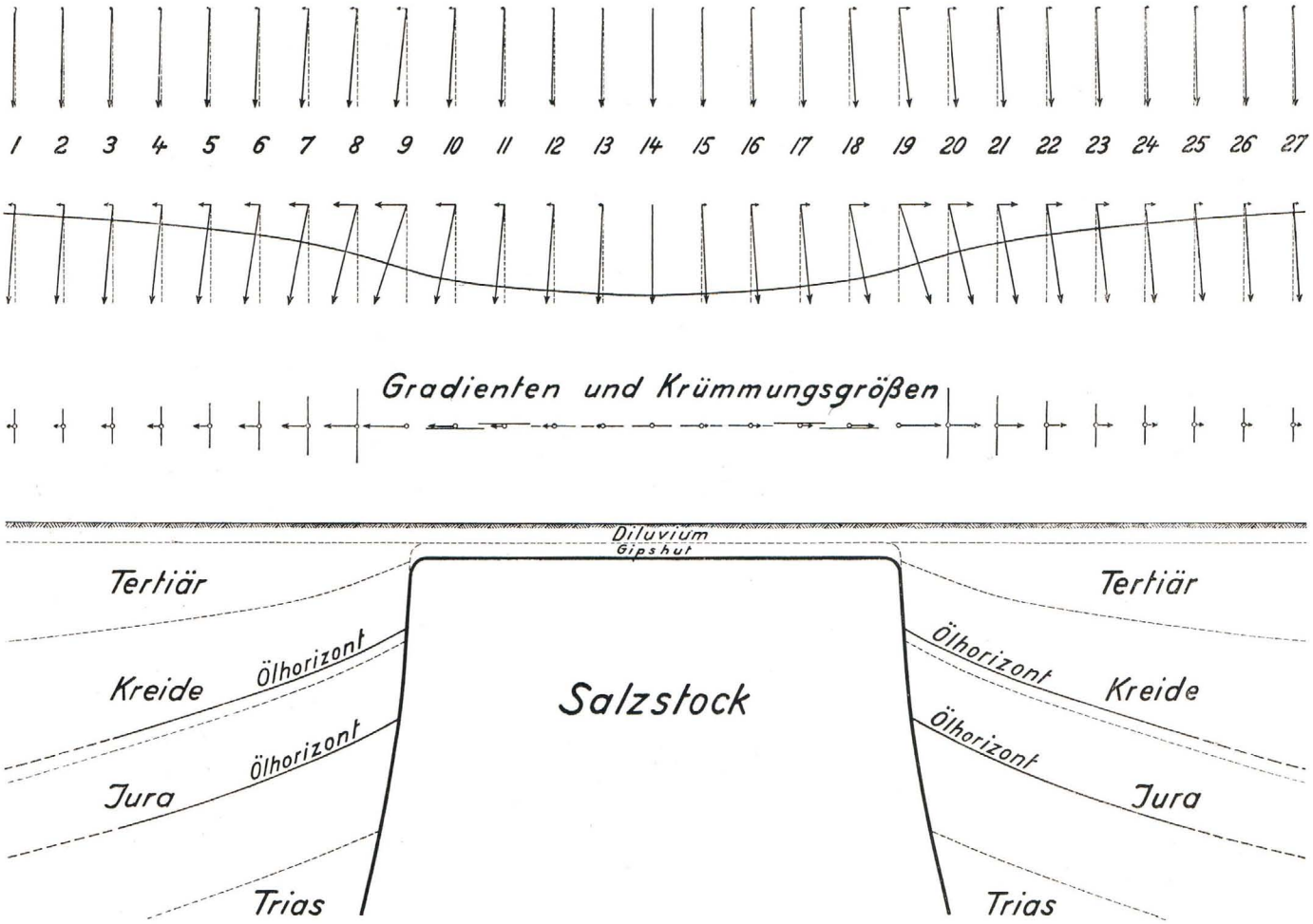


Abb. 19.

Punkten sich die Schwerkraft nach Größe und Richtung ändert, wodurch eine wechselnde Einstellung der Drehwaage hervorgerufen wird.

Auch im Untergrund verborgene geologische Strukturen bringen ein mit dem Orte veränderliches Schwerefeld hervor, wenn zwischen der Struktur und den sie umgebenden Gesteinen ein Dichteunterschied in horizontaler Richtung vorhanden ist. In Abb. 19 ist in der unteren Hälfte ein Salzstock von norddeutschem Typus mit den ihn umgebenden Flankenschichten dargestellt. Da Salz eine Dichte von 2,1 bis 2,2 hat, die Flankenschichten vom Tertiär an abwärts aber eine im Mittel größere und nach der Tiefe noch zunehmende Dichte aufweisen, so hebt sich der Salzstock im Sinne der Schwerkraftswirkung als eine Masse heraus, die eine geringere Schwerkraft hervorruft als die Flankenschichten, d. h. bei der Annäherung an den Salzstock nimmt die Schwerkraft ab. Der Salzstock bewirkt also zwar das Umgekehrte wie die Bleikugel, die als schwerere Masse eine Zunahme der Schwerkraft hervorruft, aber in

dem Schwerefeld des Salzstockes ist die Schwerkraft ebenfalls veränderlich und somit von Einfluß auf die Einstellung der Drehwaage. Es ist also möglich, im Untergrund versteckte geologische Strukturen durch die Drehwaage nachzuweisen.

Zum Verständnis des Zusammenhanges zwischen der Lage des Salzstocks und den Meßgrößen der Drehwaage ist in Abb. 19 noch das Verhalten der Schwerkraft in ihren Einzelheiten in zwei verschiedenen Niveaus dargestellt, in einem unteren stärker beeinflußten und einem höheren weniger beeinflußten Niveau. Bei Betrachtung der „Unteren Reihe" sieht man, wie die Schwerkraftspfeile gegen die gestrichelt dargestellte

Drehwaage im Zelt.

Parallelrichtung eine gewisse Ablenkung erfahren, welche durch die horizontalen Pfeile bezeichnet wird. In der „Oberen Reihe" tritt dieselbe Ablenkung, jedoch in verringertem Maße, in Erscheinung. Der Unterschied in der Größe der Horizontalpfeile in den beiden Niveaus ist über dem Salzstock wiederum durch Pfeile (in vergrößertem Maßstab) dargestellt. Diese Pfeile sind die Symbole der wichtigsten, aus Drehwaagemessungen berechneten Größen und werden als Gradienten bezeichnet, die also die Änderung der Horizontalwirkung der Schwerkraft darstellen, und zwar auf 1 cm Höhenunterschied. Die Gradienten weisen also bei Strukturen mit geringerer Dichte, z. B. bei Salzstöcken, von diesen weg, was man als Salzflucht bezeichnet, sie sind am größten über den Rändern der Struktur und verschwinden über der Mitte derselben. Es wird noch eine zweite Größe aus den Drehwaagemessungen berechnet, die aber nicht immer so klar in Erscheinung tritt wie der Gradient. In Abb. 19 ist durch die untere Reihe eine gekrümmte Linie gelegt, die überall auf den Schwerkraftspfeilen senkrecht steht. Diese Linie ist der Schnitt einer Fläche, die als Niveaufläche bezeichnet wird und ebenfalls in Beziehung zu der geologischen Struktur steht. In Abb. 19 ist sie

von Nr. 1—8 bzw. von Nr. 27—20 nach unten, von Nr. 10—18 dagegen nach oben gekrümmt, während auf Nr. 9 und 19, da wo die beiden Krümmungen ineinander übergehen, keine Krümmung vorhanden ist. Die Größe der Krümmung sei nun durch eine Strecke dargestellt, die von dem durch einen kleinen Kreis angedeuteten Geländepunkt halbiert wird. Diese Strecke sei als Krümmungsgröße bezeichnet unter Vernachlässigung der Tatsache, daß sie auch noch von der Größe der sich wenig ändernden Schwerkraft abhängig ist, und unter der vereinfachenden Annahme, daß senkrecht zu dem in Abb. 19 dargestellten Profil keine Niveauflächenkrümmung vorliegt.

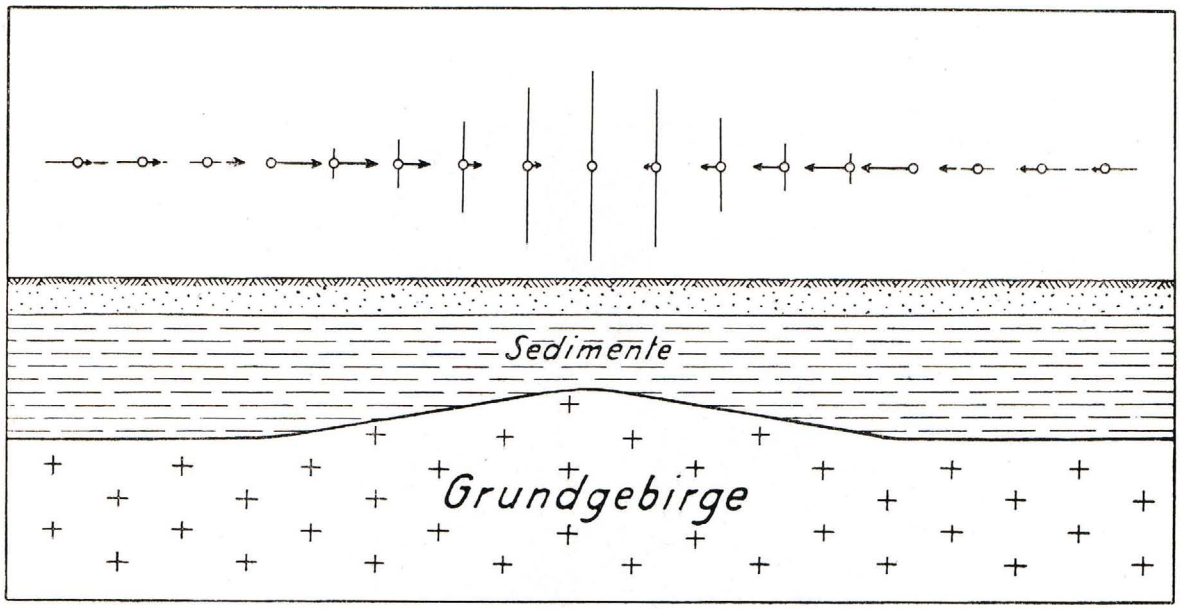


Abb. 20.

Die Krümmungsgröße ist außerhalb eines Salzstockes zu dessen Flanken parallel gerichtet, wobei der größte Wert etwas vor der Flanke liegt. An der Stelle des Übergangs in die entgegengesetzte Krümmung wird sie Null. Sie nimmt dann über dem Salzstock wieder zu, ist dort aber senkrecht auf die Flanken gerichtet. Aus dem Verlauf der Gradienten und Krümmungsgrößen ist es also möglich, die Lage der Salzstockflanken und damit die für Ölbohrungen günstige Zone anzugeben.

Die Anwendbarkeit der Drehwaage ist selbstverständlich nicht auf Salzstöcke beschränkt. Von den vielen anderen Möglichkeiten ihrer Anwendung sei noch diejenige über einer Antiklinale mit schwerem Kern erwähnt. Abb. 20 zeigt die Gradienten und Krümmungsgrößen über einer solchen Struktur. Das aus kristallinen Gesteinen bestehende Grundgebirge hat gegenüber den darauf lagernden Sedimenten eine größere Dichte, so daß die Schwerkraft in der Richtung auf die Antiklinale zunimmt, im Gegensatz zur Salzstockstruktur. Die Gradienten und Krümmungsgrößen zeigen daher das entgegengesetzte Verhalten wie bei Salzstöcken: Die Gradienten zeigen auf die schwere Masse zu; die Krümmungsgrößen stehen außerhalb rechtwinklig zum Streichen und über derselben parallel zur Streichrichtung.

Drehwaagearbeiten in Ägypten.

Ergebnisse von Detailuntersuchungen mit der Drehwaage an den Flanken von Salzdomen Norddeutschlands.

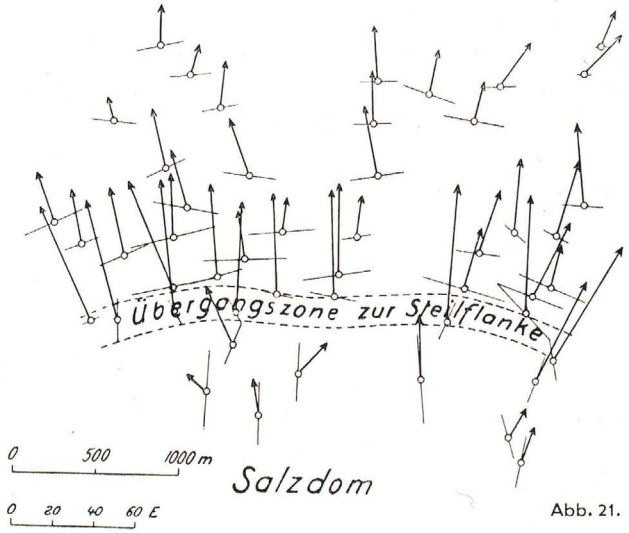


Abb. 21.

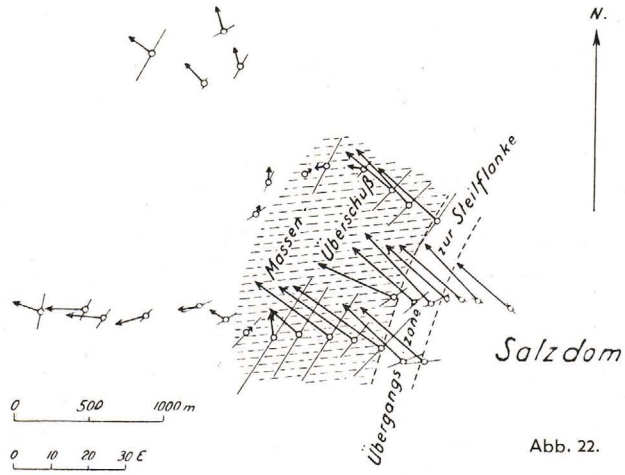


Abb. 22.

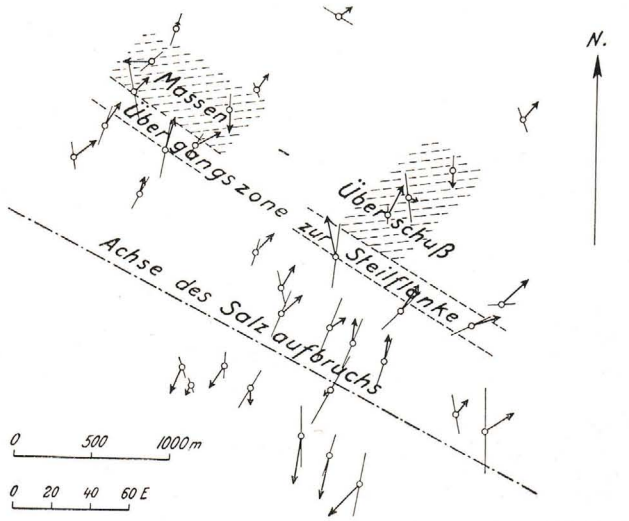


Abb. 23.

Die Übergangszone zur Steilflanke kennzeichnet die Salzdomgrenze, und zwar liegt der Kontakt zwischen Mantelgestein und Salz näher der äußeren Linie dieser Übergangszone.

Abb. 21. Außerhalb der Übergangszone zeigt sich eine Abnahme der Größen der Gradienten. Diese Abnahme ist Schwankungen unterworfen, welche mit der Aufschleppung der der Flanke anlagernden Schichten zu deuten sind. Das geringe Ausmaß dieser Schwankungen läßt eine stärkere Hochpressung älterer mesozoischer Schollen nicht vermuten.

Abb. 22. Gradienten und Krümmungswerte nehmen außerhalb der Übergangszone an Größe zu, dann plötzlich ab, ja, sie nehmen teilweise entgegengesetzte Richtung an. Diese Zone ist als Massenüberschuß gekennzeichnet und entspricht der Aufschleppung einer breiten Scholle tieferer mesozoischer Schichten mit wechselnder Dichte. Die dichtesten Partien liegen nicht unmittelbar an der Übergangszone zum Steilhang.

Abb. 23. Gegenüber den Abb. 21 und 22 handelt es sich hier um einen tiefliegenden Salzaufbruch. Die deutlich erkennbaren Massenüberschüsse am Nordrand sind wie in Abb. 22 zu deuten. Die relativ großen Krümmungswerte im Bereich der Achse deuten auf einen schmal angelegten Salzaufbruch hin (Salzlinie).

Ausschnitt aus Drehwaagemessungen in Süddeutschland.

In dem Profil a—b sind die Gradienten und die entsprechenden Isogammen der Untersuchungsmessung aufgezeichnet. Das im südlichen Teil durch den bogenförmigen Verlauf der — 3 bis — 5 Isogamme gegebene gravimetrische Hochgebiet könnte

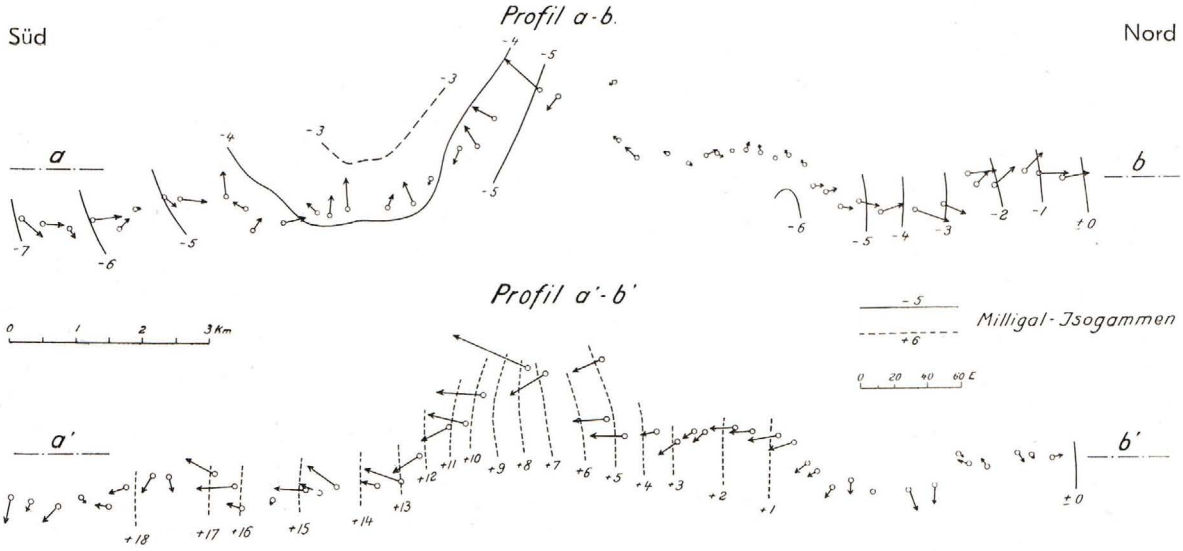


Abb. 24.

als antiklinalartige Struktur gedeutet werden. Eine genauere Prüfung des Meßbildes sowie der hier nicht zur Darstellung gebrachten Messungen anschließender Gebiete zeigt aber, daß über das ganze Gebiet eine gleichmäßige Grundtendenz der Schwerkraftszunahme nach NNW vorhanden ist (regionale Schwerkraftszunahme). Nach Berücksichtigung dieser Grundtendenz ergibt sich das in Profil a'—b' wiedergegebene Schwerkraftsbild.

Die Zu- und Wiederabnahme der Gradientenlängen von Norden nach Süden und das entsprechende dichte Zusammenrücken der Isogammen (+ 3 bis + 14) sind mit einer größeren Verwerfung im Bereich der + 3 und + 9 Isogamme zu erklären (gehobener Teil im Süden).

Transport eines Drehwaagezeltes in Texas.

Beispiel der Auffindung einer Struktur mit antiklinalem Charakter.

Alle Gradienten weisen übereinstimmend nach einem Gebiet größerer Schwerkraft, das im Bereich der ±0 Isogamme liegt. Es handelt sich hier um eine geologische Struktur mit antiklinalem Charakter. Infolge der stärkeren Schwerkraftszunahme an der West-

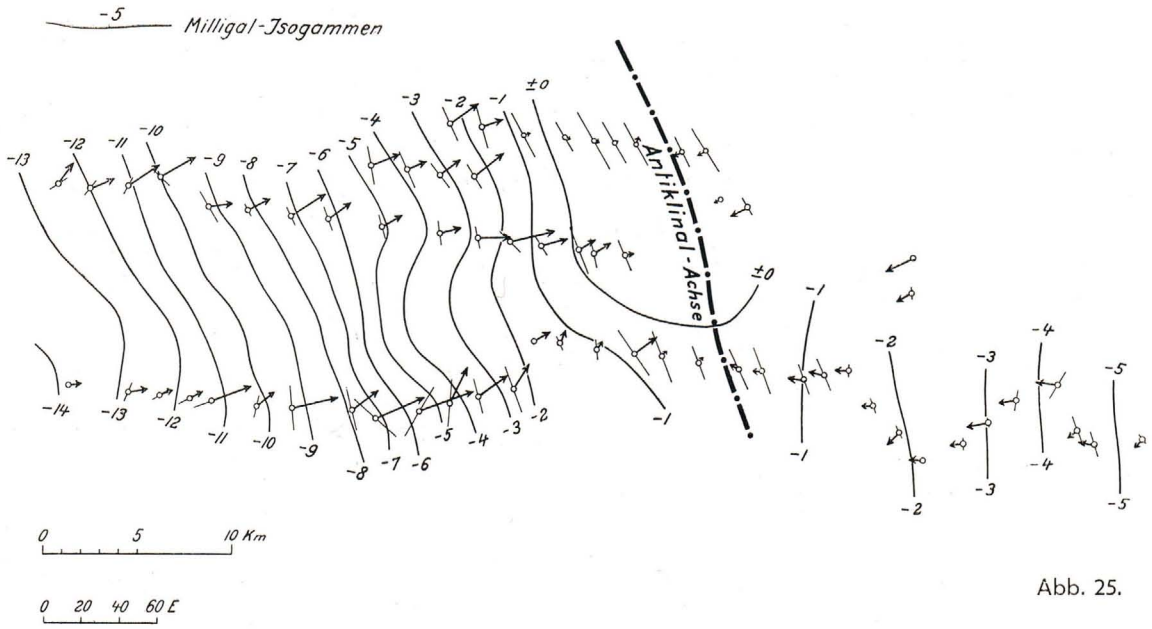


Abb. 25.

flanke, die sich auch deutlich in dem dichteren Abstand der Isogammen ausprägt, wird auf einen asymmetrischen Bau dieser Struktur geschlossen. Der sehr weitreichende Einfluß läßt auf eine sehr große Tiefenlage schließen.

Meßgebiet in den Waldsümpfen von Louisiana.

Das Drehwaagebild des Blue-Ridge-Salzdomes.

Als 1924 die Drehwaagemessungen in den Vereinigten Staaten von der Ölindustrie eingeführt wurden, ergab sich bald, daß die Salzdome der Golfküste von Texas und Louisiana z. T. andere Schwerewirkungen hervorriefen als die deutschen Salzstöcke. Um nun die Wirkungen eines typischen Golfküstendomes als Standardbild festzulegen, entschloß sich die North American Exploration Co., die amerikanische Tochtergesellschaft der Seismos, einen durch zahlreiche Bohrungen genau bekannten Salzdom, den Blue-Ridge-Salzdom, mittels der Drehwaage eingehend zu vermessen.

Der geologische Aufbau des Blue-Ridge-Domes ist typisch und der gleiche wie der aller flachliegenden Golfküstensalzdome. An der aus pleistozänen Schichten zusammengesetzten Oberfläche ist eine sanfte Erhebung zu erkennen. Ca. 40 m unter der Erdoberfläche beginnt bereits der höchste Teil des Salzdommaterials. Nahezu alle Golfküstensalzdome tragen auf ihrer Salzoberfläche eine in wechselnder Mächtigkeit ausgebildete Hutbildung, eine Kappe (Caprock), die aus Gips, Anhydrit und oft auch reinem Kalkstein besteht. Diese Kappe ist in extremen Fällen bis zu 350 m mächtig. Am Blue Ridge beträgt ihre Mächtigkeit zwischen 30 und ca. 120 m. Erst unterhalb dieser Kappe folgt reines Steinsalz. Der gravimetrische Einfluß dieser aus spezif. schweren Schichten aufgebauten Kappe ist natürlich besonders stark. An den Flanken der Salzdome sind die umgebenden tertiären Schichten beträchtlich hochgeschleppt. In diesen hochgeschleppten Schichten finden sich an besonders bevorzugten Stellen die so überaus ergiebigen Öllagerstätten der Golfküste.

Zum erfolgreichen Ansetzen von Erdölbohrungen ist es deshalb sehr wichtig, die Domumrisse und die Lage der Salzdomflanken zu kennen, die man aus oberflächlichen Aufschlüssen nicht feststellen kann. Die Bestimmung der Gestalt und der Grenzen dieser Salzdome ist eine der Hauptaufgaben der Drehwaage.

Das in Abb. 26 dargestellte Gradientenbild ist typisch für die Schwerewirkung eines Golfküstensalzdomes. Es gliedert sich in drei verschiedene Zonen:

1. Eine gut ausgeprägte Zone der Caprockwirkung. Die schweren nahe der Oberfläche liegenden Kappenschichten des Domes bedingen eine nach der schwereren Masse hinweisende Gradientenrichtung, die da am größten ist, wo der Caprock am Rande des Domes aufsetzt oder einen Abfall bildet. Die obere Grenze des Domes liegt dort, wo maximale Gradienten auftreten und die Krümmungswerte sich tangential an die Domumgrenzung anlegen.

2. Die Zone der unregelmäßigen Gradienten auf dem Scheitel des Domes. Hier werden die Gradienten nur durch ungleiche Massenverteilungen im Caprock beeinflußt und zeigen unter Umständen die höchsten Stellen der Caprockdecke an.

3. Die Zone der sogenannten „Salzfluchtgradienten". Entfernt man sich vom Scheitelgebiet des Domes nach außen, so wird die nach dem Dominnern zu weisende Wirkung der Caprockdecke immer geringer, bis schließlich ca. 300—400 m außerhalb der Caprockgrenze eine Umkehr in der Gradientenrichtung eintritt und die Gradienten noch weiter außerhalb vom Salzdom fortweisen. Hier ist die Wirkung der schweren Caprockmassen kompensiert, und die gegenüber dem umgebenden tertiären Sediment leichtere Salzmasse bewirkt ein „Fliehen" der Gradienten von dem leichten Kern.

Dem Gradientenbild beigefügt ist ein profilmäßiger Schnitt durch den Salzdom, der aus dem Bohrprofil rekonstruiert ist. Über dem Profil ist die gemessene Gradientenkurve eingetragen. Es zeigt sich auch bei dieser Darstellung, daß die Gradienten am Rande des Domes überall dort Höchstwerte erreichen, wo der Caprock auf das Salz aufsetzt.

BLUE-RIDGE-SALZDOM, TEXAS

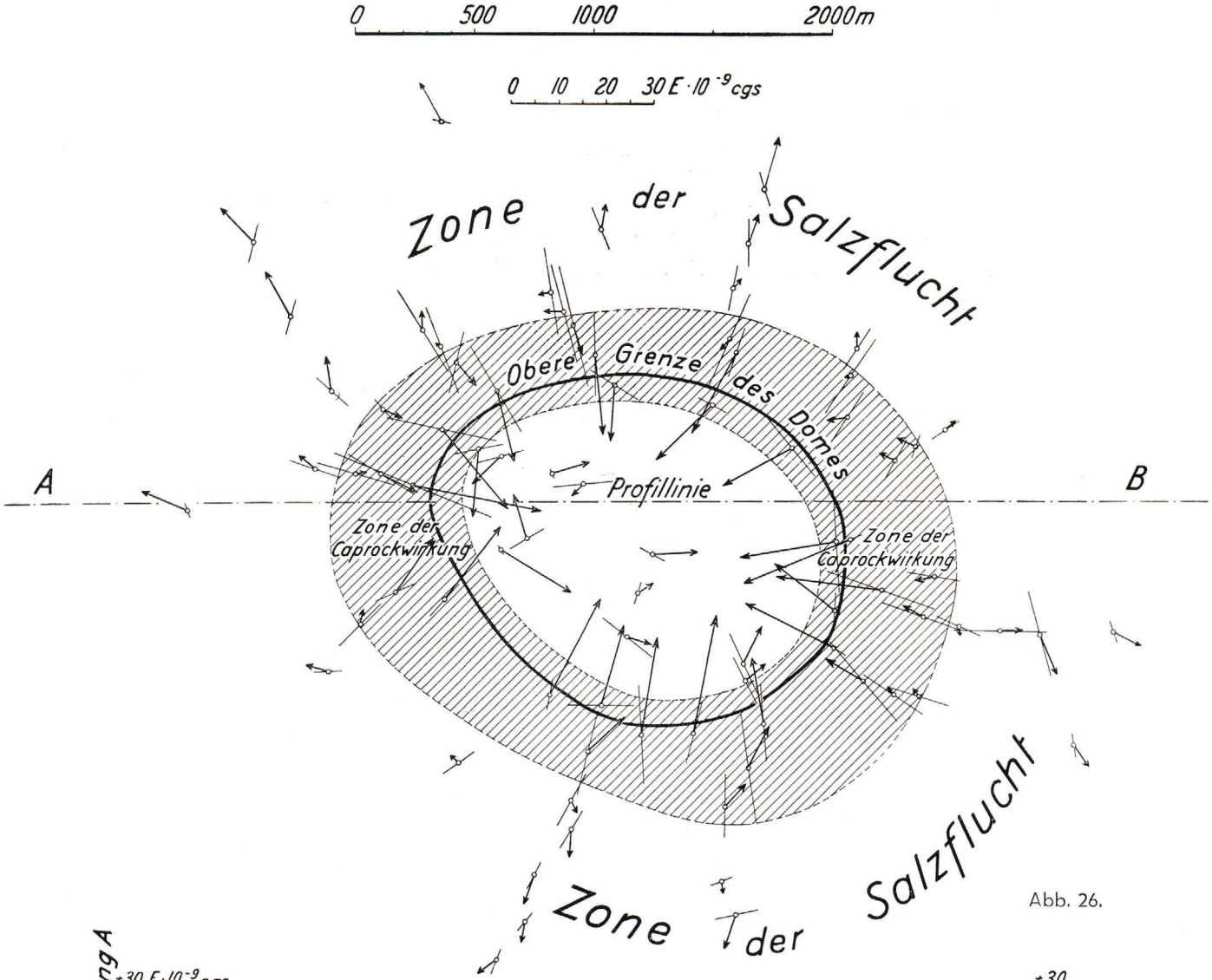
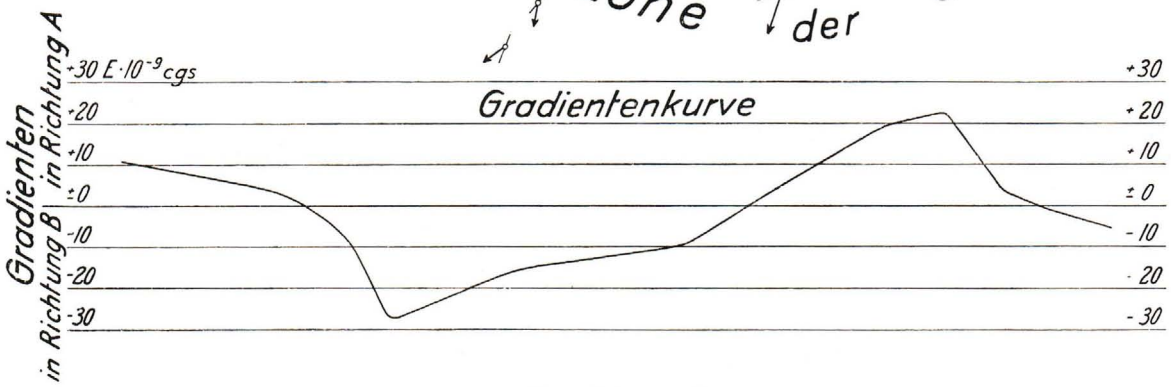
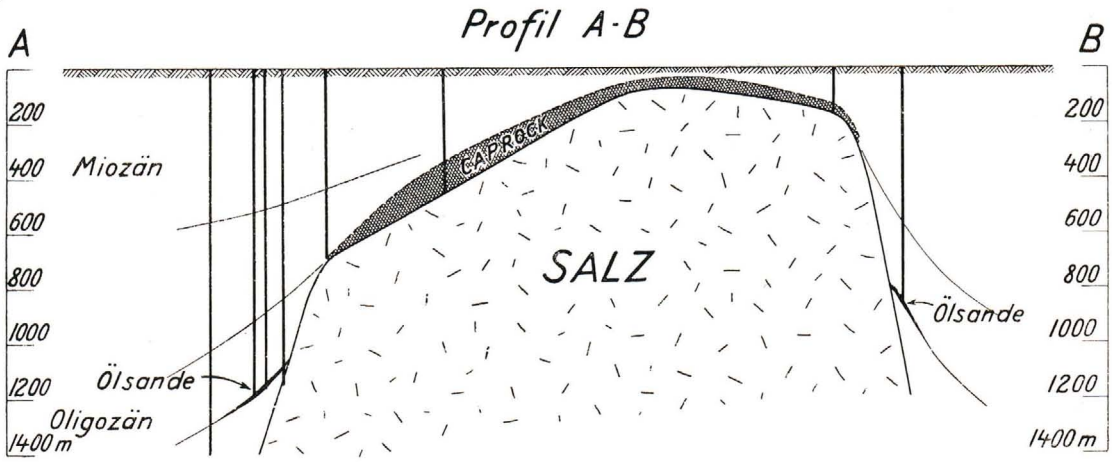


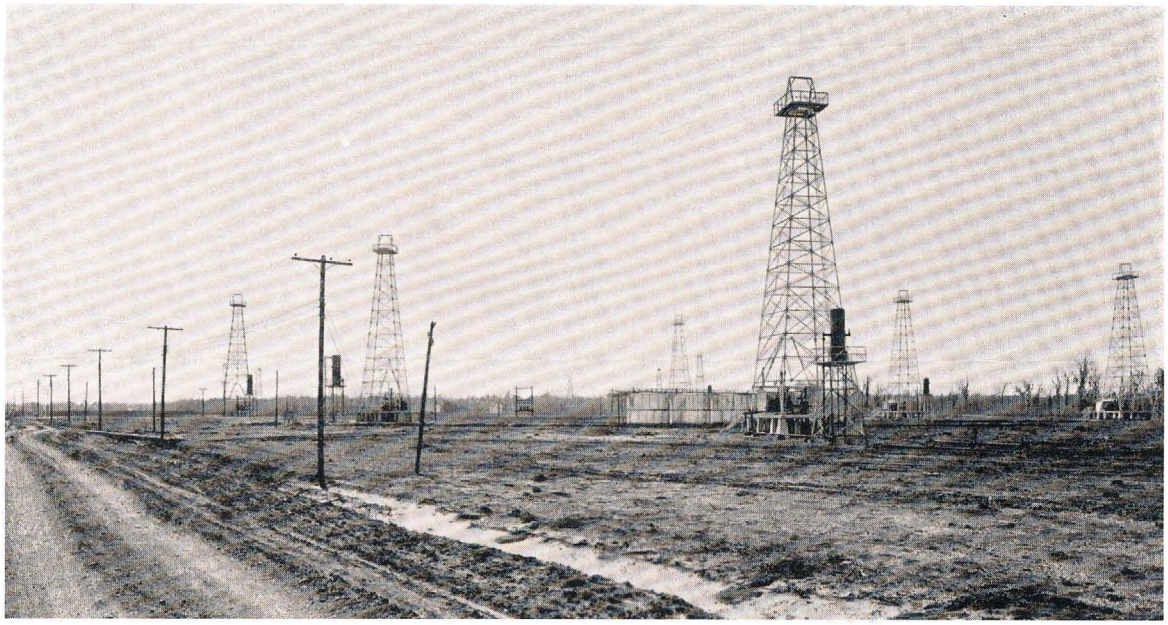
Abb. 26.





Eine der bedeutungsvollsten geophysikalischen Entdeckungen, das Sugarland - Ölfeld, Ft. Bend County, Texas, U. S. A.

Der Sugarland-Salzdom, den die North American Exploration Co., die amerikanische Tochtergesellschaft der Seismos, im Jahre 1927 mittels Drehwaagemessungen in der Golfküste von Texas entdeckte, ist in geophysikalischer und ölgeologischer Beziehung von außerordentlicher Bedeutung. Diese Entdeckung stellt einen Wendepunkt in der Anwendung der geophysikalischen Methoden dar. Bis zur Entdeckung von Sugarland konzentrierte man in der Golfküste von Texas und Louisiana alle geophysikalischen



Teilansicht des von Seismos entdeckten Sugarland-Ölfeldes, Texas.
Die Entwicklung wird sehr systematisch betrieben.

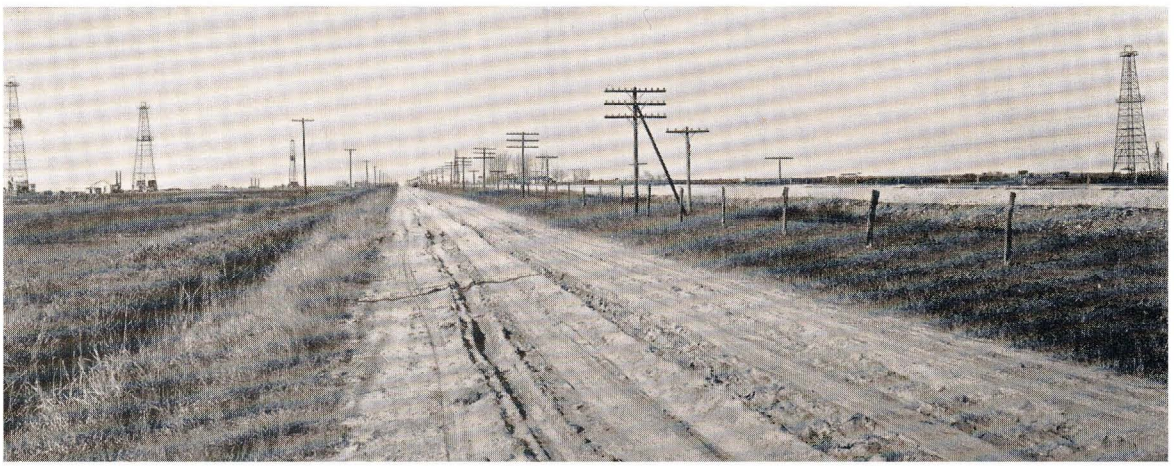
Sucharbeiten auf das Auffinden von sogenannten „flachen" Salzdomen, die sowohl im Drehwaagemeßbild als auch in den seismischen Laufzeitkurven charakteristische Eigenschaften zeigten. Die seismischen Schußlinien wurden z. B. so angesetzt, daß man den Untergrund nur bis ca. 500 m Tiefe auf das Vorhandensein von Salzdomen untersuchte. Man glaubte damals nicht daran, daß es auch Salzdome geben könnte, deren höchste Stelle tiefer als 500 m liegt. Ölgeologisch untersuchte man mit Bohrungen überwiegend die Flankenzonen dieser flachen Dome. Das von der North American Exploration Co. bei Sugarland gemessene Gradientenbild (vergl. Abb. 27) unterscheidet sich grundsätzlich von dem vorher behandelten Bild des Blue-Ridge-Domes. Die nach einem Zentrum zeigenden Gradienten der Zone der Caprock-Wirkung sind hier nicht festzustellen. Vielmehr zeigen im Sugarlandgebiet die Gradienten von einem kreisförmigen Kerngebiet, in dem nur ganz kleine Gradienten auftreten, fort. Es ist also nur die „Salzfluchtwirkung" entwickelt und sie charakterisiert dieses Gebiet als ein geschlossenes kreisförmiges Schwereminimum. Nach der Art und Größe der Schwerewirkung wurde diese Schwereanomalie als „tiefer" Salzdom gedeutet und es wurde eine Bohrung auf dem Scheitel des Salzdomes und nicht an seiner Flanke empfohlen.

Vor Beginn dieser Bohrung schrieb J. F. Weinzierl, Geologe und Geophysiker, am 2. 9. 27 in der Oil Weekly (Houston, Tex.):

„Auf Grund ihrer Meßerfahrungen stellen geophysikalische Gesellschaften, wie die North American Exploration Co., die Behauptung auf, daß tiefe Salzdome und Strukturen in der Golfküste mit der Drehwaage in größeren Tiefen festgestellt werden können, als es dem Seismographen oder dem Geophon möglich ist. Es sind mehrere tiefe Domprospekte (Sugarland, Mykawa usw.) angegeben, die im Begriff stehen, abgebohrt zu werden. Bis diese berichteten Dome abgebohrt und wirklich bestätigt sind, wäre es unsinnig, den Behauptungen, solche tiefe Strukturen finden zu können, größere Bedeutung zuzumessen."

Die Bedeutung des Sugarland-Prospektes wurde jedoch unter Beweis gestellt, als 1928 die erste hier angesetzte Bohrung (Humble Oil & Refining Co.'s: Sugarland Industr. 1) in 1077 m Teufe einen ausgezeichneten Ölsand erschloß und 800 Faß Tagesproduktion lieferte.

Im Verlauf der nächsten Monate erkannte man erst die Größe und hohe Bedeutung des neu entdeckten Sugarland-Ölfeldes. 70 Bohrungen wurden im Scheitel des Domes heruntergebracht, von denen nur zwei Fehlbohrungen waren. Direkt unter dem Ölsand stellte man dann auch das Vorhandensein des Salzes selbst fest. Die Bedeutung der neuen Entdeckung lag vor allem in dem Nachweis, daß über dem Scheitelgebiet eines



Das von Seismos mittels Drehwaagemessungen entdeckte Mykawa-Ölfeld, Texas, in der ersten Entwicklung.

tiefen Domes die tieferen Schichten domartig aufgewölbt sind und Anlaß zur Ansammlung einer geschlossenen Ölkappe bilden. Eine nahezu kreisrunde, 2 km im Durchmesser messende Fläche wird über dem Dom von dem Ölfeld eingenommen. Mit der geophysikalischen Festlegung des Scheitels des tiefen Salzdomes war deshalb die Lage der Untersuchungsbohrungen zwangsläufig gegeben, und zahlreiche Fehlbohrungen, die bei flachen Domen in der Mehrzahl der Fälle auftraten, bevor es gelang, die meist beschränkte Lage eines Ölträgers an der Flanke zu bestimmen, konnten bei tiefen Domen vermieden werden. Der bekannte amerikanische Geologe und Geophysiker D. C. Barton schrieb 1930 im Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists (Nr. 9):

„Die «tiefe Domperiode» begann mit der Entdeckung des Sugarland-Ölfeldes. Die Bedeutung dieser Entdeckung wurde zunächst nicht allgemein gewürdigt. Erst einige Gesellschaften begannen daraufhin die Suche nach tiefen Domen. Ein Jahr später waren jedoch nahezu 80 Drehwaagen in der Golfküste auf der Suche nach neuen tiefen Salzdomen tätig. Eine besondere Vertiefung unserer Erkenntnisse bezüglich der geophysikalischen und geologischen Eigenarten der gravimetrischen Anomalien ist durch die tiefe Domperiode eingeleitet worden."

Die große wirtschaftliche Bedeutung des Sugarland-Feldes geht aus den Produktionszahlen hervor. Bis Ende des Jahres 1934 hat Sugarland 21 000 000 Faß Öl geliefert. Es produzierte Anfang 1935 täglich 6000 Faß. (Die Produktion ist von staatswegen gedrosselt und festgesetzt.)

Sugarland-Salzdom, Ft. Bend County, Texas.

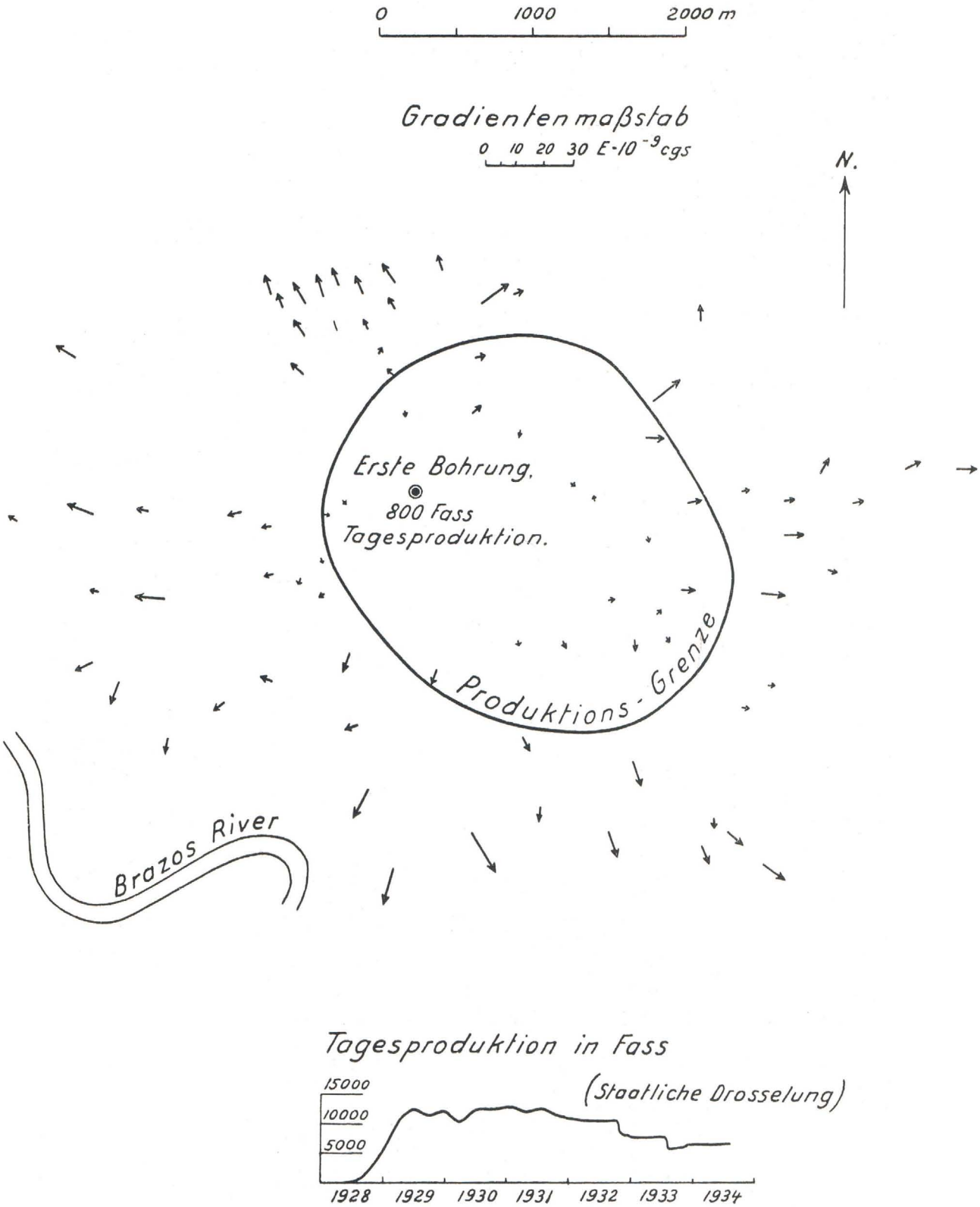


Abb. 27.

Relative Schweremessungen.

Die Aufsuchung von Salzdomen ist nur ein Teilgebiet, das den Erdölexperten interessiert. Von mindestens der gleichen Bedeutung ist für ihn die Kenntnis der unterirdischen Großtektonik, um daraus Schlüsse auf die mögliche Verteilung von Erdölvorkommen ziehen zu können. Dafür kommen die behandelten Methoden für wirtschaftliche Untersuchung nicht in Betracht. Die seismischen nicht, weil die seismischen Wellen in ihrer Tiefenwirkung begrenzt sind, die Drehwaage nicht, weil die Wirkungen der obersten Schichten und der Kleintektonik die Einflüsse der Tiefentektonik überdecken. Die Methode, welche, ohne wesentlich von der Topographie und den obersten Deckschichten beeinflußt zu werden, Daten für die unterirdische Großtektonik gibt, ist die Methode der Messung der Unterschiede der Schwerkraftswerte (relative Schweremessung). Dazu stand bis vor kurzem ausschließlich der Sterneck'sche Pendelapparat zur Verfügung. Dieser Apparat mißt bekanntlich die Schwereunterschiede mit Hilfe der Schwingungszeiten der gleichen Pendel zwischen verschiedenen Orten.

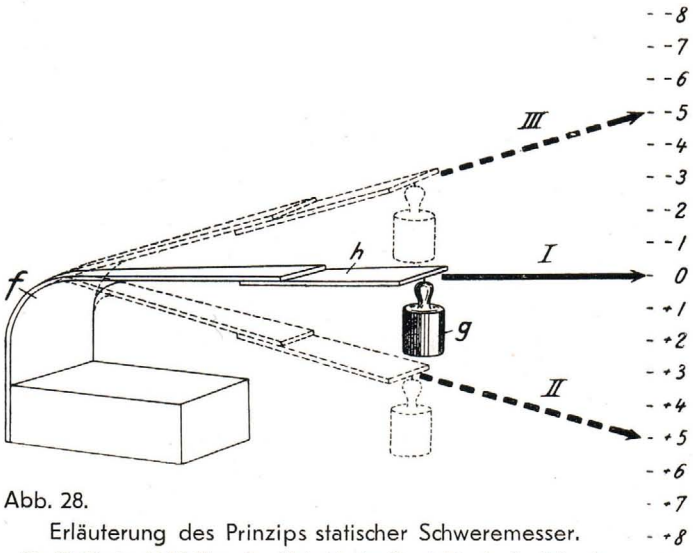


Abb. 28.

Erläuterung des Prinzips statischer Schweremesser.

Die Blattfeder f hält über den Hebel h das Gewicht g in der Schwebe. Die Normalstellung ist die Stellung I. Wird das Gerät an einen Ort transportiert, an dem die Anziehungskraft der Erde (Schwerkraft) größer ist, so stellt sich das Gerät in Stellung II ein. An der Skala s kann der Unterschied der Einstellung und damit der Schwerkraftsunterschied abgelesen werden. Ist an einem dritten Ort, z B. über einer Synklinale mit leichten Muldengesteinen, die Schwerkraft kleiner als normal, so stellt sich das Gerät in Stellung III ein.

Mit dem Sterneck'schen Pendelapparat haben wir sowohl in Deutschland als auch in den Vereinigten Staaten und Ägypten im ganzen 599 Stationen vermessen; die Unkosten dieser Vermessungen waren jedoch so hoch, daß sich kaum ein Anreiz bietet, sich solcher Messungen in größerem Ausmaß zu bedienen. Es war daher ein Problem, für diese Methode ein Gerät zu finden, mit dem es möglich ist, die Schwerkraftsdifferenz sehr viel schneller und billiger zu ermitteln. Nach langen Versuchen ist es gelungen, in unserem Thyssen-Gravimeter ein solches Instrument zu entwickeln, das die erwähnten Mängel des Pendelapparates nicht aufweist und auch noch den Vorzug hat, wesentlich genauer zu arbeiten.

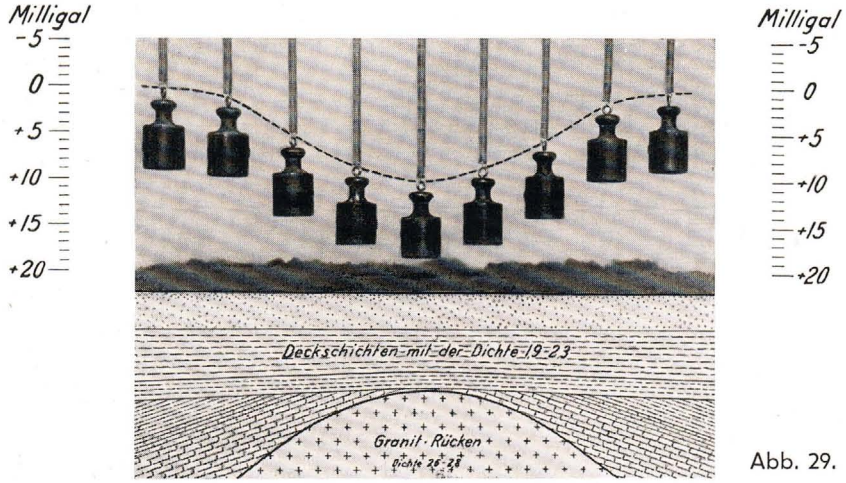


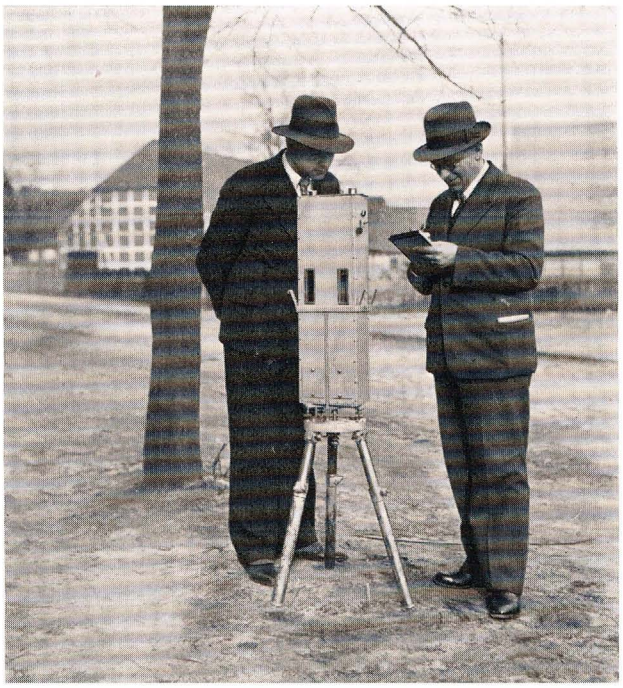
Abb. 29.

Nimmt man statt der Blattfeder (siehe Abb. 28) Schraubenfedern und hängt an dieselben Gewichte, so werden die Federn über einem Granitrücken stärker ausgezogen als über dem Nebengestein. Die Abb. 29 zeigt die verschiedene Einstellung der Gewichte. Die durch die Gewichte gegebene Linie (gestrichelt) ist eine Schwerkraftskurve in der üblichen Darstellung. In Wirklichkeit sind die Längenänderungen der Federn winzig klein. Um Längenänderungen in der photographierten Größenordnung zu erhalten, müßten die Federn über 10 km lang sein.

Beschreibung des Gravimeterprinzips.

Die Grundlagen der Messungen mit einem statischen Schweremesser (Gravimeter) sind besonders einfach und leicht verständlich.

Bei der Drehwaage erschweren die vielen möglichen Kraftkomponenten und deren Gradienten das Verständnis. Selbst bei der als einfach geltenden magnetischen Methode (Schmidtsche Feldwaage) ist noch zwischen Vertikalintensität, Horizontalintensität und Totalintensität zu unterscheiden, Deklination und Inklination sind zu berücksichtigen.



Beim Ablesen des Thyssen-Gravimeters.

Für das Verständnis der Messungen mit dem Thyssen-Gravimeter genügt es zu wissen, daß über schweren Gesteinen die Schwerkraft größer und über leichten Gesteinen kleiner ist. Also wird irgend eine beliebige Masse, z. B. ein 1-kg-Gewichtstück, über einem Granitrücken auch etwas schwerer[1] sein, als über einem leichten Salzstock.

Befestigt man nun eine Masse an einer Feder, so wird die Feder durch das Gewicht der Masse gespannt. Die Feder wird um so stärker durchgebogen, je größer am Aufstellungsort die Schwerkraft (Anziehungskraft der Erde) ist (Abb. 28).

Über den leichten Massen eines Salzstockes ist z. B. die Schwerkraft um 0,001 % kleiner als über dem Nebengestein und die Feder wird dann entsprechend weniger durchgezogen. Zeichnet man die verschiedenen Einstellungen der Masse eines Gravimeters über einem Granitrücken in geeigneter Überhöhung auf, so erhält man ein anschauliches Bild einer Schwerkraftskurve über einem Granitrücken (Abb. 29).

Transport des Thyssen-Gravimeters im Auto.

Während nun, wie gezeigt, die Grundlagen der Messungen mit statischen Schweremessern sehr einfach sind, ist der Bau derselben außerordentlich schwierig.

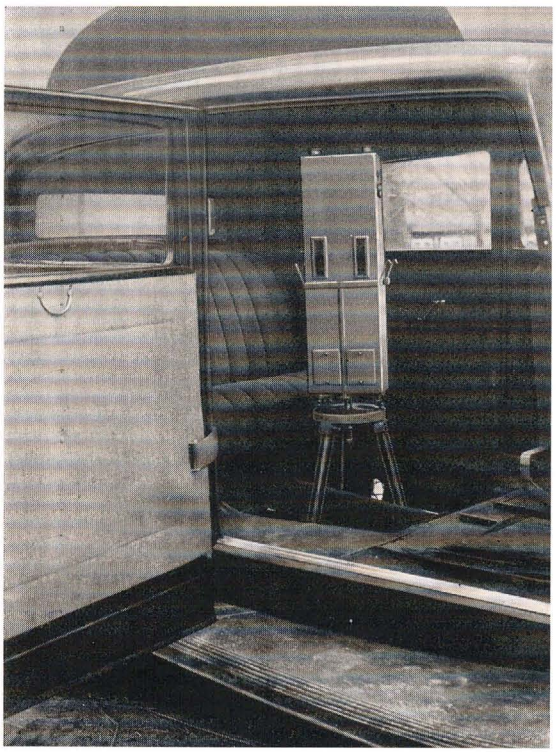
Der Bau statischer Schweremesser wird zwar schon seit 100 Jahren versucht, aber wenn man bedenkt, daß eine Temperaturänderung um nur 1° C bei üblichem Federstahl einen Fehler von 200 — 300 Milligal[2] erzeugt und daß bei Verwendung von Gasen als elastischer

[1]) Das Gewicht einer Masse ist bekanntlich Masse mal Anziehungskraft der Erde. Die Masse ändert sich nicht, nur die Anziehungskraft der Erde. Gewicht auch = Druck auf eine Unterlage.

[2]) Ein Milligal ist der 981 000 ste Teil der Schwerkraft. Ein Milligal ist etwa die Grenzgenauigkeit der Pendelmessungen. Meist erreichen Pendelmessungen jedoch nur einen mittleren Fehler von ± 2 bis 3 Milligal.

Körper der Fehler sogar über 3000 Milligal je Grad Celsius beträgt, so ist es verständlich, daß der statische Schweremesser früher die Pendelmessungen nicht verdrängen konnte.

Erst die Anwendung neuer Ideen für die Konstruktion ermöglichte es uns bei unserem Thyssen-Gravimeter, die Fehlerquellen, die jedem statischen Schweremesser unvermeidlich anzuhaften schienen, gründlich zu beseitigen.



Ein Personenwagen dient als Beobachtungszelt.

Die Temperatur unseres Gerätes braucht nicht künstlich konstant gehalten zu werden, also weder elektrisch noch durch Eis. Selbstverständlich ist das Gerät gut isoliert.

Die Abb. 30 gibt eine Messung zwischen zwei Punkten in 30 km Entfernung wieder. Der Punkt A dient als Bezugspunkt. Die in Schaubild I eingetragenen Skalenteile des Geräts haben keinerlei Verbesserungen für Temperatur oder elastische Nachwirkungen erhalten. Die Ergebnisse sind also weder durch den Transport auf schlechten Straßen noch durch die sieben Stunden betragende Meßdauer beeinflußt worden.

Die hohe Stabilität des Meßsystems ermöglicht den Verzicht auf den bei Pendelapparaten erforderlichen schweren Sockel und auch auf die Grundpfähle der Drehwaage. Das Gerät wird ähnlich wie eine magnetische Feldwaage oder wie ein Theodolit auf einen Dreifuß gestellt, horizontiert, abgelesen und in wenigen Minuten ist die Arbeit auf einem Meßpunkt beendet.

Da jeder Punkt eine erhebliche Bedeutung hat, wird stets die Messung wiederholt und so eine bei Pendelmessungen nicht erreichbare Zuverlässigkeit der Resultate

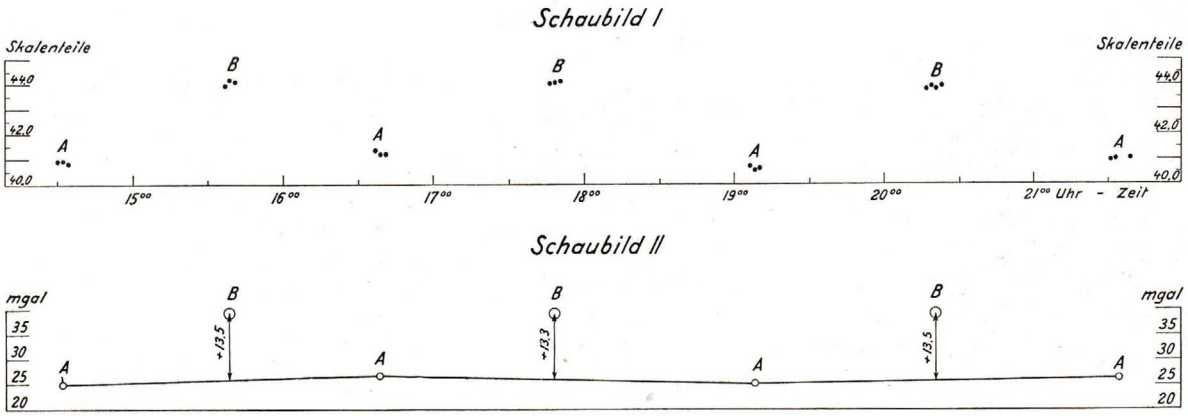


Abb. 30.

erzielt. Erklärlicherweise ist bei einem derart gesicherten Meßverfahren, bei dem alle Messungen voneinander unabhängig sind, die Leistung stark abhängig von dem mittleren Abstand der Stationen von den Bezugspunkten, denn für die Leistung ist die Transportzeit (Zustand der Wege) entscheidend.

Ergebnisse der Gravimetermessungen.

Das Thyssen-Gravimeter ist entsprechend seiner hohen Genauigkeit für die verschiedensten Aufgaben zu verwenden, wobei Arbeitsweise und Leistung der Aufgabe angepaßt werden können.

Bei regionalen Vermessungen zur Aufsuchung der durch Großstrukturen erzeugten Schwerestörungen ist eine große Flächenleistung mit erheblichem Stationsabstand erforderlich. Die Kosten belasten das Untersuchungsgebiet durch diese Vorarbeiten nur wenig, und man erhält bei der großen Arbeitsgeschwindigkeit der Gravimetermessungen in kurzer Zeit einen Überblick über die Schwerkraftsverhältnisse im Meßgebiet und kann die spätere Feinvermessung den Vorarbeiten anpassen. Insbesondere ist auch die Kenntnis der regionalen Gradienten des Meßgebietes von Vorteil, z. B. können dann die späteren Drehwaagemessungen sofort um den Betrag der regionalen Gradienten reduziert werden. Die Unkenntnis des regionalen Gradienten hat sich z. B. bei den Messungen in Texas als sehr nachteilig erwiesen, und eine Reihe von Fehlbohrungen auf tiefe Salzdome wäre vermieden worden, wäre der regionale Gradient bekannt gewesen. Später hat man den regionalen Gradienten aus kostspieligen großräumigen Drehwaagemessungen und teilweise auch aus teuren und langsamen Pendelmessungen abgeleitet. Beide Methoden erreichen für regionale Messungen nicht die Genauigkeit, Geschwindigkeit und Preiswürdigkeit der Gravimetermessungen.

Transport des Gravimeters im Flugzeug.

Als maximaler Stationsabstand für regionale Gravimetermessungen kann 3—5 km angesehen werden. Wenn man bei Pendelmessungen früher auf 10 und 15 km herauf gegangen ist, so geschah es nur wegen der hohen Kosten und der für viele Gebiete bei geringerem Stationsabstand doch nicht ausreichenden Genauigkeit der Pendelmessungen. Dabei ist zu beachten, daß eine Gravimeterstation z. B. nur einen Bruchteil von dem kostet, was 1929 bis 1931 für eine Pendelstation in Texas erforderlich war.

Bei den bisherigen regionalen Gravimetermessungen erreichte die Monatsleistung eines Doppeltrupps 4000 qkm. Eine Erhöhung dieser Leistung auf Kosten der Stationsdichte ist nicht zu empfehlen, in den meisten Gebieten ist sogar eine Verengung des Stationsabstandes vorteilhafter.

Auf Grund der bisher vorliegenden Erfahrungen und Ergebnisse besteht die begründete Hoffnung, daß sich der Anwendungsbereich für das Gravimeter noch wesentlich erweitern wird und daß es auch zur Aufsuchung von Salzdomen und Antiklinalen vor allen Dingen dort mit Vorteil angewandt werden kann, wo die Drehwaage wegen starker Störung der Gradienten und Krümmungswerte durch oberflächennahe Massen keine befriedigenden Ergebnisse liefert.

Geophysikalische Reichsaufnahme von Deutschland.

Kettenverbindung der Punkte I. und II. Ordnung.

Messungen mit dem Thyssen-Gravimeter der Seismos G. m. b. H.

Für die Messungen mit dem Thyssen-Gravimeter für die „Geophysikalische Reichsaufnahme Deutschland" werden im Meßgebiet Punkte I. Ordnung in 30 bis 50 km Abstand festgelegt. An diese Punkte werden dann die Feldstationen direkt oder über Punkte II. Ordnung angeschlossen.

Die Schweredifferenzen zwischen den Punkten I. Ordnung werden in gleicher Weise gemessen wie zwischen einer Feldstation und einem Punkt I. Ordnung. Da die Punkte I. Ordnung zu Ketten zusammengefaßt werden, bieten die Schlußfehler dieser Ketten ein zuverlässiges Kriterium für die Meßgenauigkeit der Gravimetermessungen. Dabei ist besonders wichtig, daß die Unterteilung der Hauptschleife (205 km) Gewähr dafür bietet, daß es sich nicht um ein zufälliges Fehlerminimum handelt.

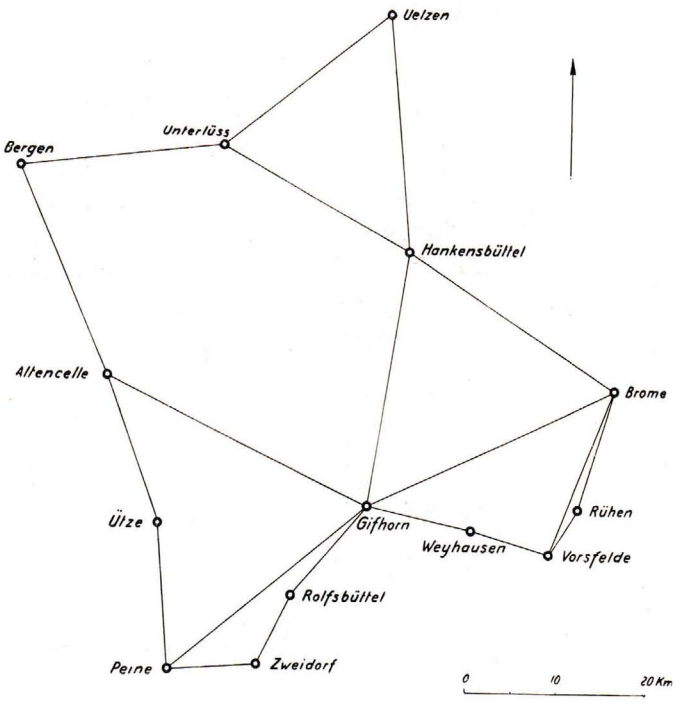


Abb. 31.

Das auf Abb. 31 angegebene Meßgebiet umfaßt mit 6000 qkm den ersten Abschnitt der Messungen für die geophysikalische Reichsaufnahme. Es enthält sämtliche Punkte I. Ordnung und diejenigen II. Ordnung, die durch Ketten verbunden sind. Für alle Punkte wurden unausgeglichene Werte benutzt. Alle Punkte wurden berücksichtigt.

Schlußfehler der Kettenverbindungen der Punkte I. und II. Ordnung vor dem Ausgleich.

	Länge der Schleife km	Anzahl der Messungen	Schluß-fehler Milligal	Mittlere Fehler Milligal
1. Hauptschleife: Gifhorn - Weyhausen - Vorsfelde-Brome-Hankensbüttel-Uelzen-Unterlüß-Bergen-Altencelle-Uetze-Peine-Gifhorn	205	11	+ 2,0	± 0,6
2. Hauptschleife: aber mit Einschluß der Nebenschleifen über Rühen und Zweidorf-Rolfsbüttel	215	14	+ 0,35	± 0,09
3. Gifhorn-Hankensbüttel-Unterl' Bergen-Altencelle-Gifhorn	130	5	— 0,2	± 0,09
4. Peine-Gifhorn-Altencelle-Uetze-Peine	95	4	+ 0,75	± 0,4
5. Peine-Gifhorn-Rolfsbüttel-Zweidorf-Peine	80	3	+ 0,45	± 0,3
6. Hankensbüttel-Gifhorn-Brome-Hankensbüttel	85	3	+ 0,65	± 0,35
7. Gifhorn - Brome - Vorsfelde - Weyhausen - Gifhorn	70	4	— 1,35	± 0,65
8. wie 7, aber über Rühen	70	5	— 0,15	± 0,07
9. Brome-Vorsfelde-Rühen-Brome	40	3	— 1,2	± 0,7
10. Uelzen-Hankensbüttel-Unterlüß-Uelzen	75	3	— 1,25	± 0,7

Der mittlere Fehler einer Gravimetermessung ergibt sich aus diesen unausgeglichenen Schleifen zu ± 0,5 Milligal.

Die Verbindung zweier Punkte I. Ordnung ist je nach der Zahl der Schleifen noch genauer.

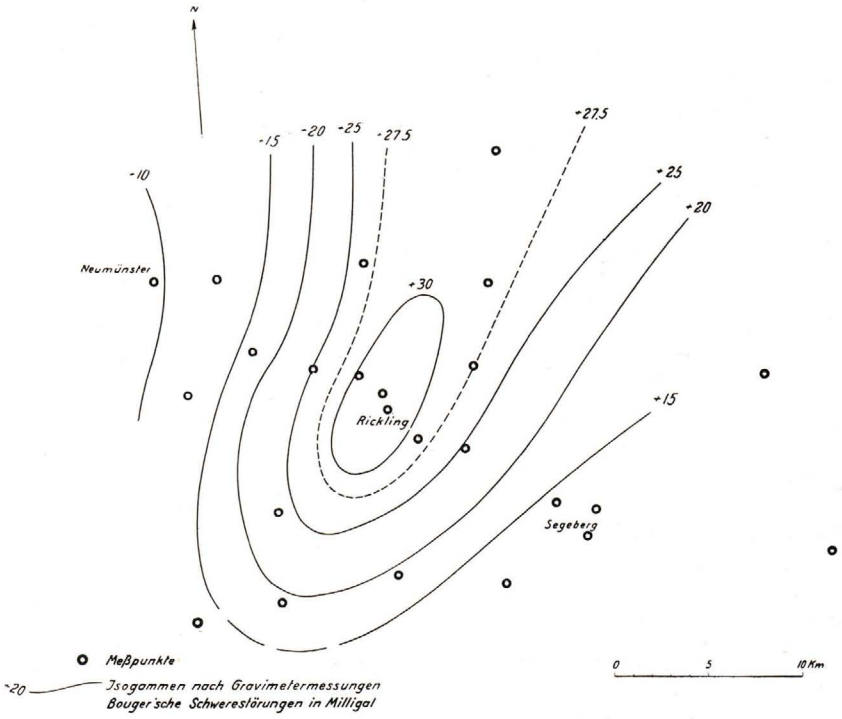
Aufbruch eines seismischen Truppes in Persien.

Gravimeter- und Pendelmessungen an dem Ricklinger Schwerehoch.

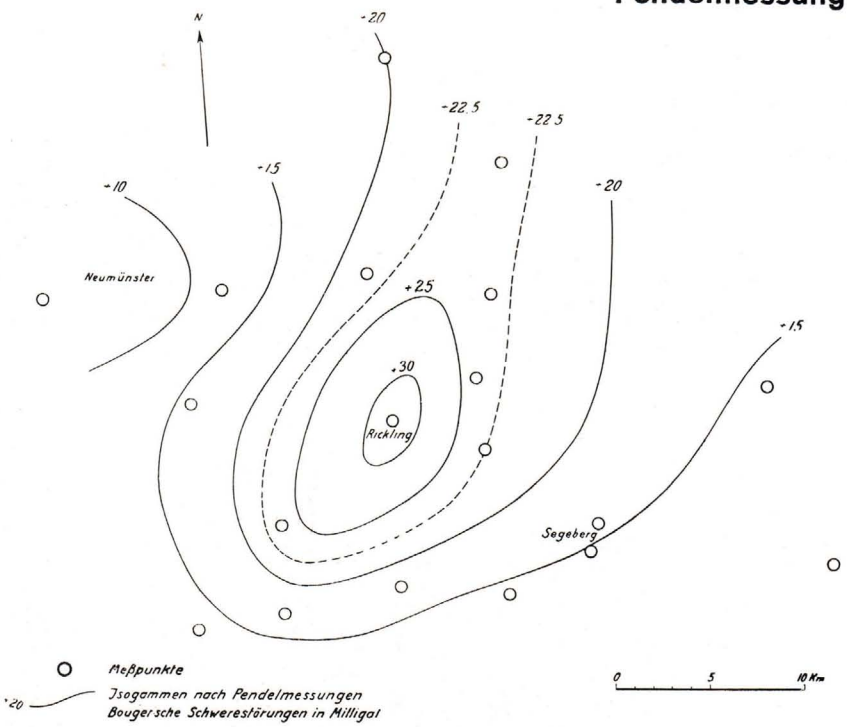
Die Übereinstimmung der Isogammen nach Pendelmessungen mit denen nach Gravimetermessungen ist außer im Norden sehr gut. Entsprechend der höheren Stationszahl der Gravimetermessungen ist die Lage der Gravimeter-Isogammen zuverlässiger als die der Pendelmessungen. Bei letzteren mußten mehr Isogammen durch Interpolation festgelegt werden.

Bei den Pendelstationen im Norden konnte ein systematischer Schleifenfehler der Pendelmessungen nachgewiesen werden. Das NNO-SSW-Streichen der tiefen Störmasse kommt nach der Richtigstellung durch das Gravimeter noch besser heraus.

Gravimetermessung:



Pendelmessung:



Gravimeter- und Drehwaagemessungen an zwei tiefen Salzstöcken.

Durch Drehwaagemessungen waren bei Volkensen und Kalbe im Jahre 1933 zwei tiefe Salzstockprospekte festgestellt worden (Abb. 33). Die auf Grund dieser Messungen angesetzte Bohrung am Prospekt Volkensen erreichte bei 1478 m das Salz. Im Prospekt Kalbe muß das Salz tiefer als 1200 m liegen. Um nun den Minimumcharakter der

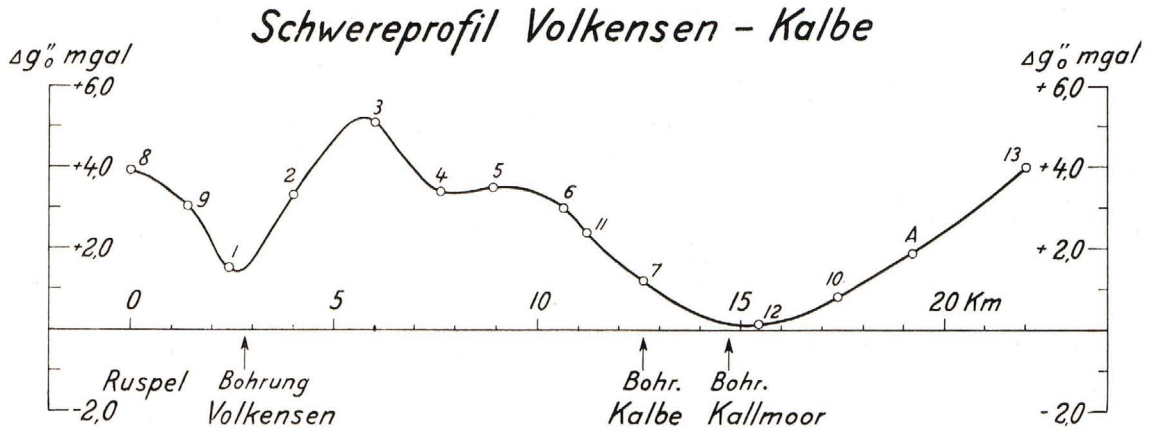


Abb. 32.

Drehwaageergebnisse sicherzustellen, war ein Gravimeterprofil über die beiden Domprospekte hinweggelegt worden (siehe Abb. 32). Das Gravimeterprofil bestätigt die Drehwaageergebnisse. Es läßt deutlich erkennen, daß es sich bei Volkensen um ein kleines aber ausgeprägtes Minimum handelt und daß das Minimum bei Kalbe wesentlich ausgedehnter ist. Über Avensen (A) und Station 13 hinweg steigt die Schwerkraft weiter zu einer östlich gelegenen Schwelle an.

Transport einer seismischen Truppausrüstung im Boot (Mexiko).

Gradientenkarte Kalbe-Volkensen mit Gravimeterstationen.

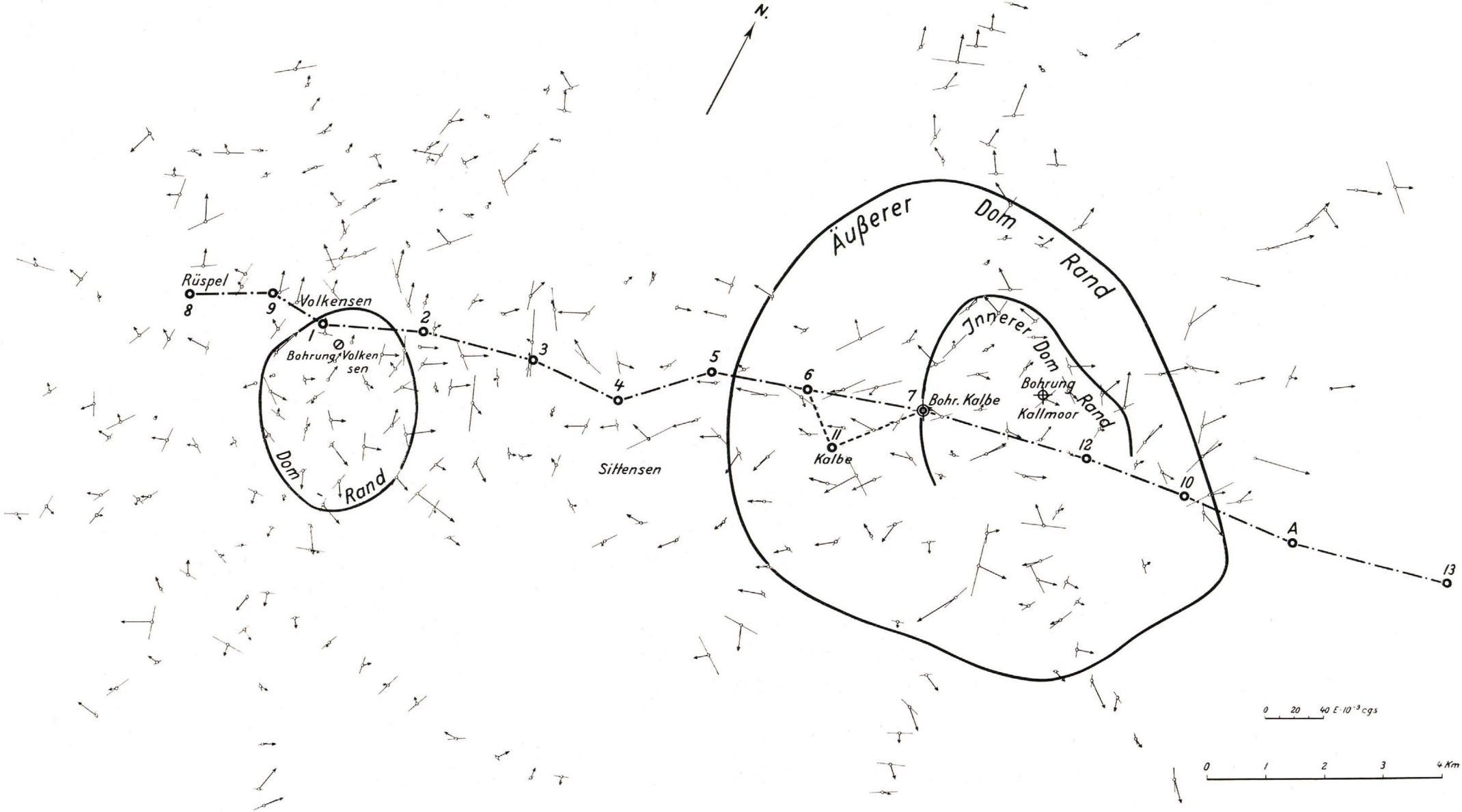
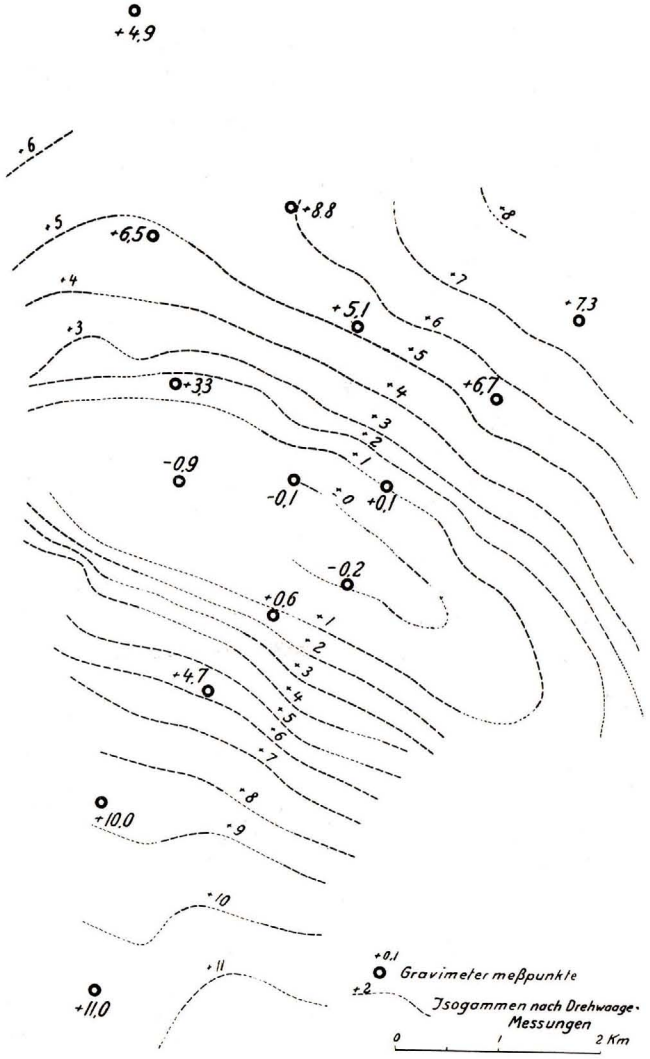
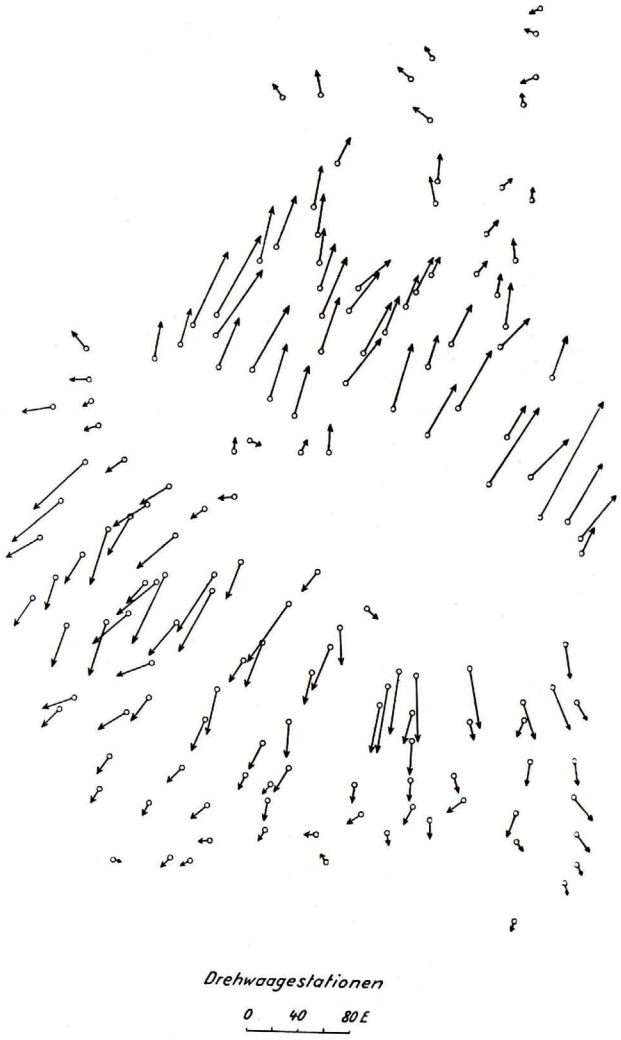


Abb. 33.

Gravimetermessungen an einem norddeutschen Salzstock.



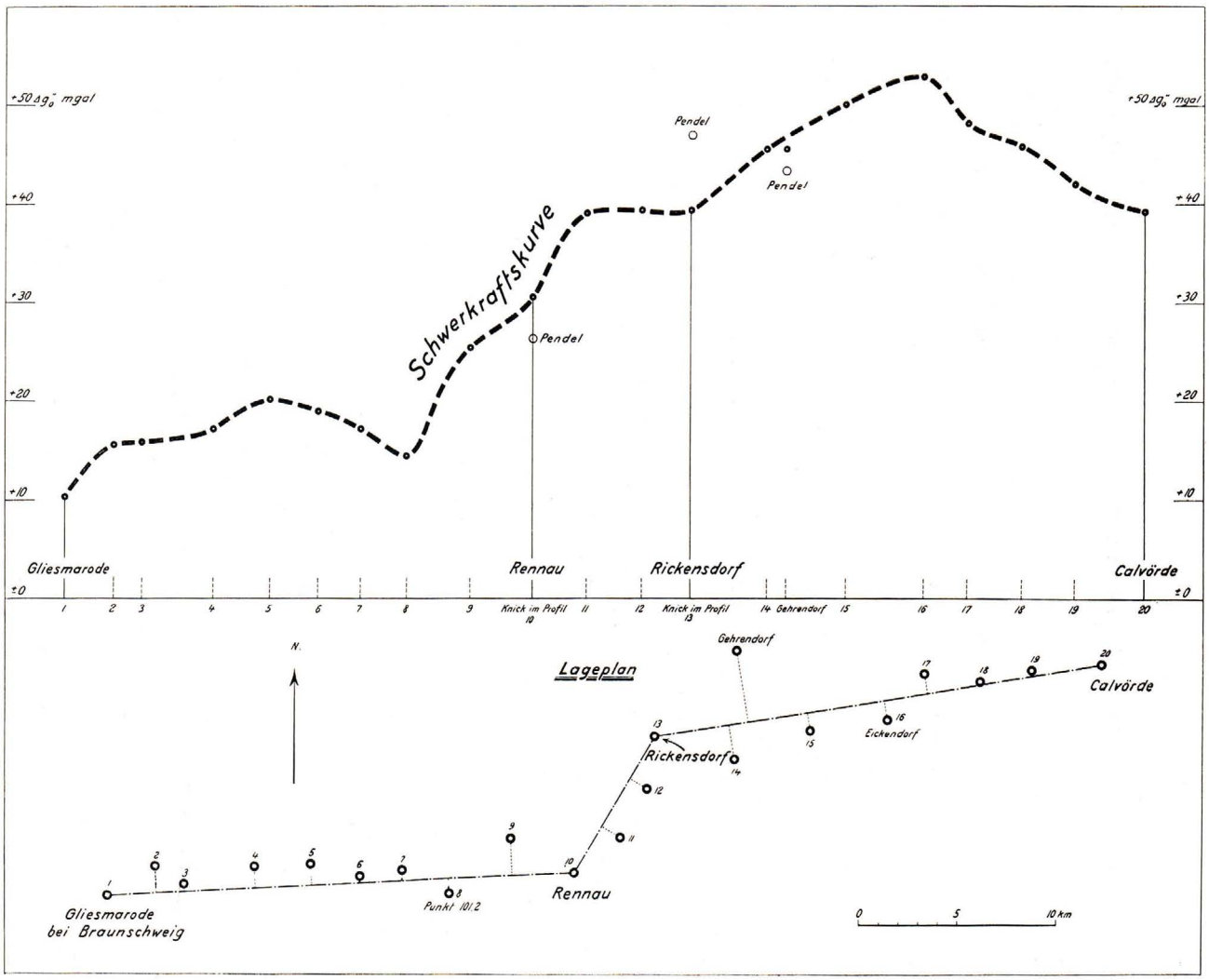
Diese erste Geländemessung mit einem Thyssen-Gravimeter brachte einen vollen Erfolg. Das Minimum über dem Salzhorst deckt sich mit dem Drehwaage-Minimum. Der Anstieg an beiden Flanken ergibt ebenfalls Übereinstimmung.



Vergleichsmessung für die staatliche geophysikalische Reichsaufnahme von Deutschland.

Das nachstehende Gravimeter-Profil überschneidet einen Teil der unterirdischen Fortsetzung des Flechtinger Höhenzuges. Die Schwerestörungen erreichen + 50 Milligal. Der Anstieg der Schwerkraft ist außerordentlich stark zwischen Punkt 101.2 und Rickensdorf (25 Milligal auf 9 km). Es ist dies die geologische Südgrenze des Flechtinger Hochs. Der niedrige Wert des Punktes 8 ist durch den Beienroder Salzstock bedingt.

Im Meßprofil liegen die Pendelstationen Rennau, Rickensdorf und Gehrendorf. Es wurde durch das Gravimeter festgestellt, daß die aus Pendelmessungen erhaltene Schweredifferenz um 11.0 Milligal falsch ist. Das Ergebnis wurde inzwischen durch Pendelmessungen bestätigt.



Spezialvermessung eines gravimetrisch gestörten Salzstockes.

Die Abb. 34 und 35 zeigen die Überlegenheit des Thyssen-Gravimeters über die Drehwaage in Gebieten mit einer starken Störung der Gradienten und Krümmungswerte durch oberflächennahe Horizonte.

In dem vermessenen Gebiet zeigten die 230 Drehwaagemessungen (Abb. 35) nur in einigen Profilen die bekannte Salzdomflankenwirkung, im übrigen aber ein sehr unregelmäßiges Meßbild. Auf Grund unserer Messungen war an der in der Abb. 34 und 35 bezeichneten Stelle eine Bohrung angesetzt worden, die in rund 2200 m Teufe das Salz erbohrte. Es erschien nun wünschenswert festzustellen, ob die nördlich und südlich der Bohrung vermuteten Minima reell sind und ferner, wie weit die recht unsichere Isogammenführung brauchbar ist.

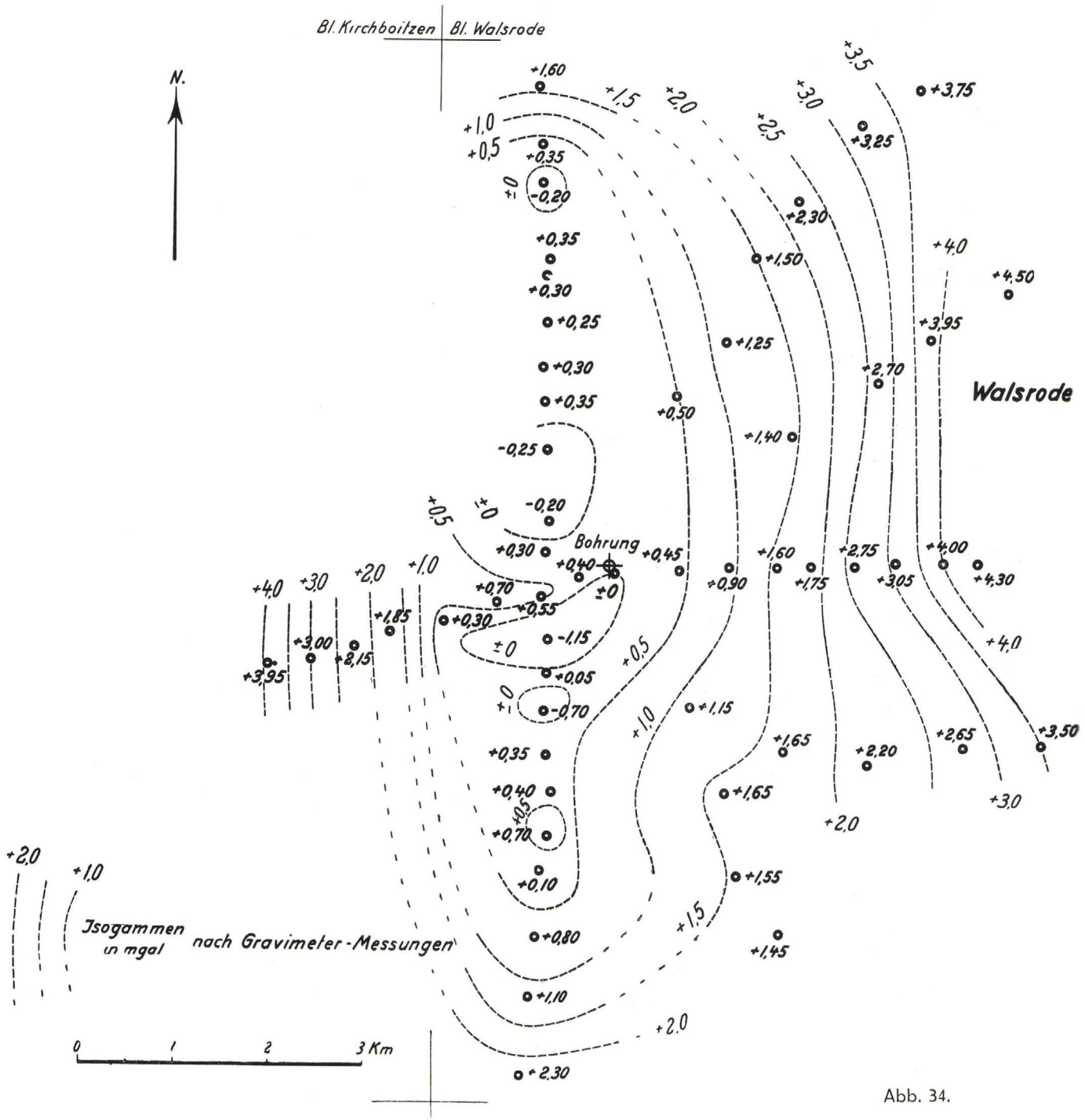


Abb. 34.

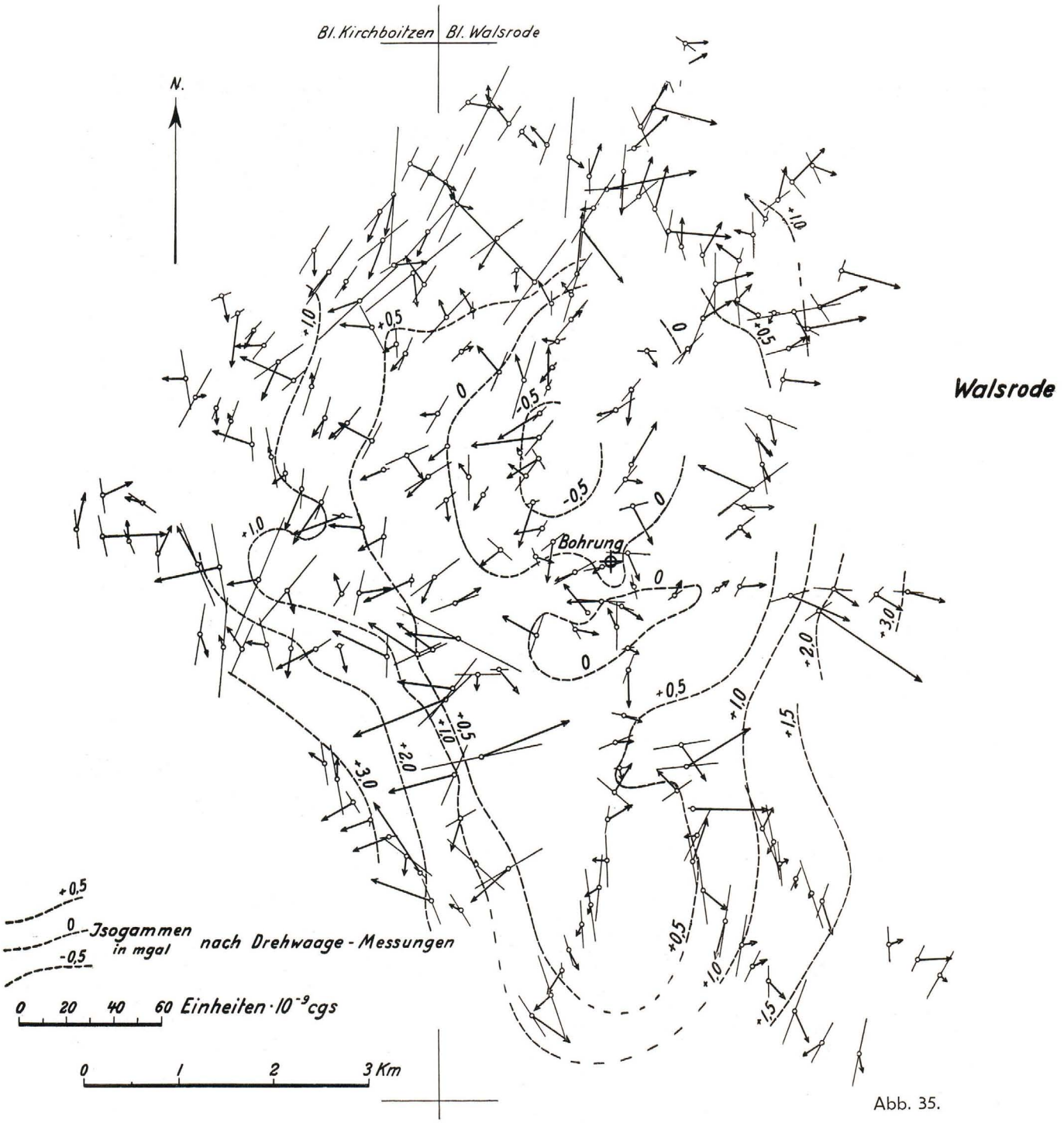


Abb. 35.

38 Gravimeterstationen (Abb. 34) wurden in ein Ost-West- und in ein Nord-Süd-Profil gelegt. Nachdem diese beiden Profile den Salzdomcharakter sicher bewiesen hatten, wurden in dem östlichen Meßgebiet weitere 18 Stationen angesetzt und dadurch die Isogammenführung sichergestellt. Die nach dem Drehwaagebild noch nicht sicheren Minima beiderseits der Bohrung sind reell. Der Flankenabfall im Norden und Süden wird ebenfalls nachgewiesen. Im Nordostteil des Gebietes läßt sich nunmehr ein sicheres Isogammenbild zeichnen.

Besonders wichtig an diesem Bild ist die Tatsache, daß schon ein kleiner Teil der Stationen einen guten Aufschluß über die ungefähre Lage des Salzdomes gibt. Bei der Stationsleistung von 4 Stationen täglich ist es in mutungspolitisch wichtigen, aber schwierigen Gebieten möglich, in weniger als einer Woche ausreichende Daten zu erhalten. In diesem Meßgebiet (bei Walsrode) und in ähnlich schwierigen Gebieten wäre eine gleiche Leistung mit der Drehwaage nicht möglich.

EDLER & KRISCHE, HANNOVER