SEEGRAVIMETRIE – VERFAHREN UND ERGEBNISSE

VON

H. RIES*)

Etwa um die Jahrhundertwende begannen die ersten Versuche, die Schweremessungen vom Festland auch auf das Meer auszudehnen. In erster Linie war es die *Höhere Geodäsie,* die in ihrem Bestreben nach der Bestimmung der Erdgestalt und der Geoidundulationen aus Schweremessungen sowie zur Klärung der Isostasiefrage nicht auf die rund zwei Drittel der Erdoberfläche verzichten wollte, die von Wasser bedeckt sind.

Auch die Erforschung *geologischer Großstrukturen* und die Lösung *tektonischer Probleme* riefen den Wunsch nach gravimetrischen Messungen in Meeresgebieten hervor. Später kam auch die *angewandte Geophysik* hinzu, die in den ausgedehnten Shelfgebieten nach immer neuen Lagerstätten Ausschau hielt.

Die Besonderheit der Meßbedingungen vom fahrenden Schiff (s. Abb. 1) aus rief eine eigene Entwicklung von Seegravimetern hervor. Die Instabilität des Aufstellungsortes mit Störbeschleunigungen, die um etliche Zehnerpotenzen höher liegen als die zu messenden Anomalien, machte den Konstrukteuren lange Zeit zu schaffen.

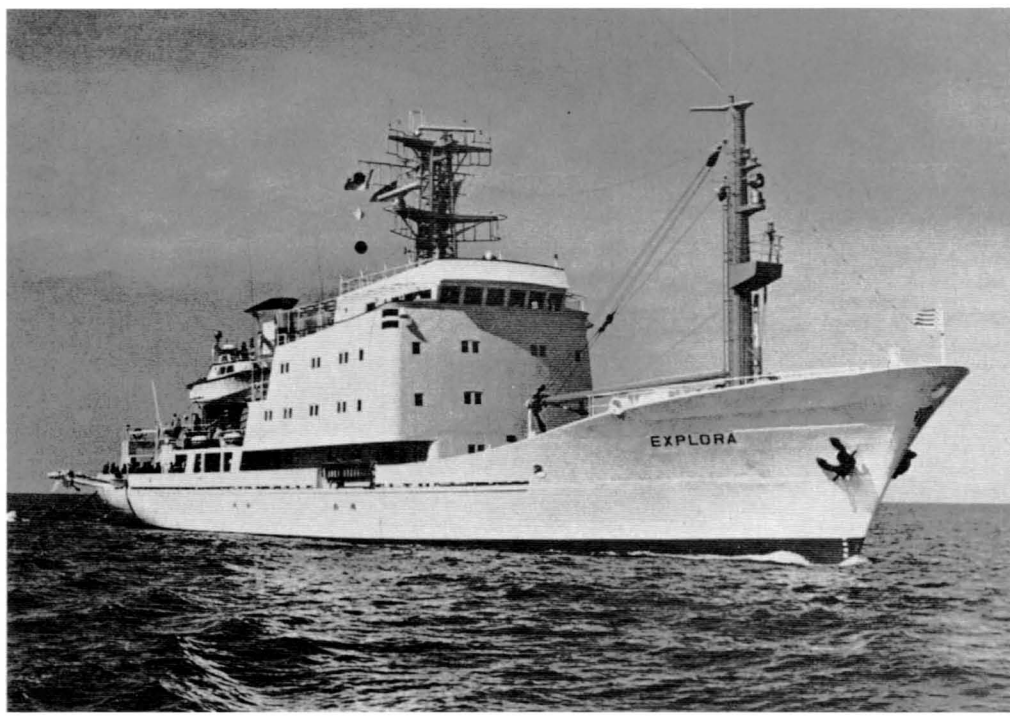

Abb. 1 VS EXPLORA auf Meßfahrt

*) PRAKLA-SEISMOS GmbH, Haannover

Von der Vielzahl der gebauten Seegravimetertypen möge aus historischen Gründen das Hecker-Gravimeter erwähnt werden. Es handelt sich dabei um ein barometrisches Verfahren. Hecker maß den Luftdruck sowohl mit einem Quecksilberbarometer als auch gleichzeitig mit dem Siedethermometer. Dabei ist nur die erste der beiden Messungen von der Schwerkraft abhängig, so daß man aus der Meßdifferenz auf die Größe der Schwerkraft schließen kann.

Das Verfahren war bei einem mittleren Fehler von ca. 50 mgal noch lange nicht genau genug. Ich möchte mich aber nicht in der Geschichte der Seegravimetrie verlieren, sondern über die Vielzahl der verschiedenen Gravimetertypen einen Sprung machen bis hin zum *Askania-Gravimeter Gss 3*.

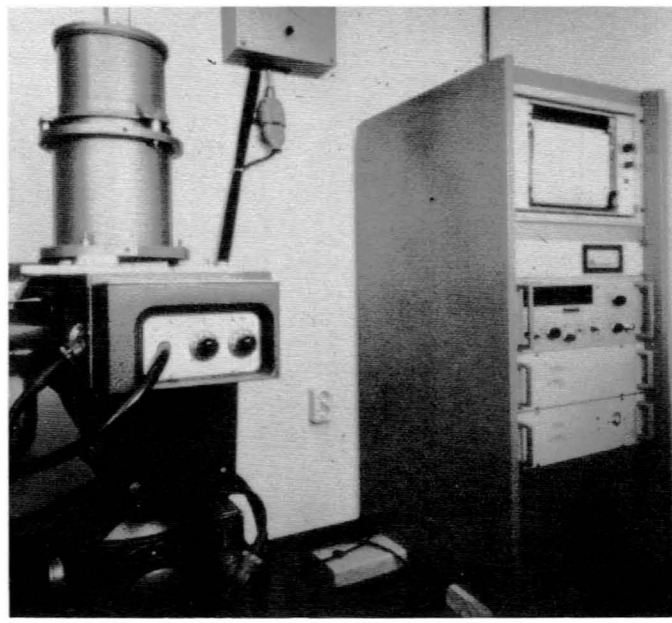

Abb. 2 ASKANIA Seegravimeter Gss 3

Abbildung 2 zeigt das Seegravimeter Gss 3, bestehend aus dem Beschleunigungsumformer auf dem Kreiseltisch im Vordergrund und dem Elektronikschrank mit den verschiedenen Einschüben.

In Abbildung 3, welche das Meßprinzip des Gss 3 zeigt, ist zu erkennen, daß bei dieser Konstruktion die Gravimetermasse in einer vertikalen Geradführung befestigt ist und an einer Feder hängt, die am oberen Ende gehäusefest montiert ist. Fünf tangentiale Fäden an der rohrartig ausgebildeten Masse, die von zwei ebenfalls tangential wirkenden Federn gespannt werden, bewirken diese Geradführung. Die Bewegung der Masse gegenüber dem Gehäuse wird mit Hilfe eines kapazitiven Wegaufnehmers gemessen. Am unteren Ende der Rohrmasse befindet sich eine Tauchspule mit drei verschiedenen Wicklungen, die in einen Permanentmagneten eintaucht. Davon dient *eine* Wicklung der Temperaturkompensation des Systems.

Über einen elektrischen Hilfskreis wird nämlich jeweils dann ein Strom in die Spulenwiclung abgegeben, wenn der Temperaturfühler eine Abweichung von der Normaltemperatur von 45° Celsius ausmißt. Das System selbst befindet sich in einem druckdichten Behälter. Außerdem ist die gesamte Anordnung mit einer thermostat-

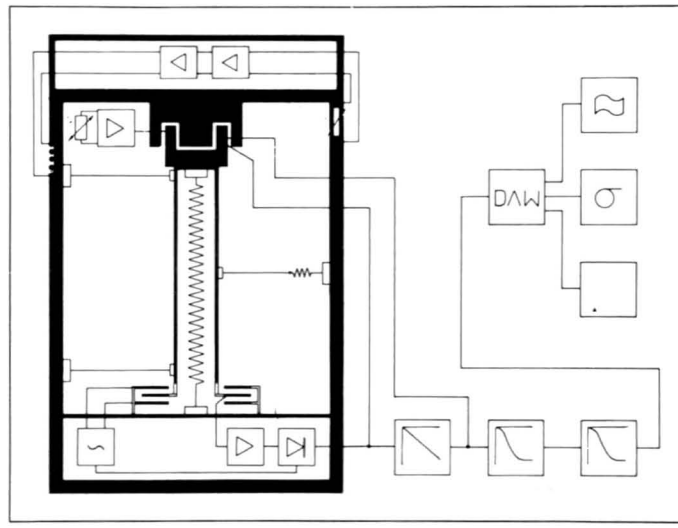

Abb. 3 System Seegravimeter Gss 3

geregelten Heizung ausgerüstet, welche die Innentemperatur auf der genannten Normaltemperatur hält. Mit diesem soweit beschriebenen Gravimeter läßt sich jedoch noch nicht messen. Daher nennt man dieses Gerät nicht Gravimeter, sondern Beschleunigungsumformer. Erst durch die Elektronik, die in einem separaten Schrank untergebracht ist, wird das System zum Gravimeter.

Die Ausgangsspannung des kapazitiven Wegaufnehmers wird verstärkt und dann der zweiten Wicklung, der Proportional- oder der P-Wicklung der Tauchspule zugeführt. Es ergibt sich somit eine proportionale Rückführung bzw. Gegenkopplung. Die an dieser P-Wicklung anliegende Spannung wird einem Integrator aufgegeben, der seinerseits die *dritte* Wicklung der Tauchspule, die Integratorwicklung oder I-Wicklung versorgt. Dieser Integrator bewirkt eine vollkommene Rückführung der Masse, bis der kapazitive Wegaufnehmer die Ausgangsspannung null Volt hat, und bis daher auch keine Spannung mehr an der P-Wicklung anliegt. Somit ist die Spannung an der I-Wicklung ein Maß für die Schwere. Diese Spannung wird über verschiedene Filter geschickt und gleichzeitig verstärkt. Sie wird zuletzt mit einem Kompensationsvoltmeter digitalisiert und kann nun registriert werden. Ein wesentlicher Faktor ist die günstige Aufstellung des Gravimeters. Die Störbeschleunigungen auf einem fahrenden Schiff hängen außer von der Größe des Schiffes selbst nicht nur von Wind und See ab, sie sind im allgemeinen in unmittelbarer Nähe des Schnittpunktes von Roll- und Stampfachse am geringsten.

Es ist selbstverständlich, daß bei der Schweremessung auf See das Gravimeter dauernd horizontiert sein muß. Dazu dient ein Kreiseltisch.

Ein Horizontkreisel dient als Meßgeber für die Lagenstabilisierung der kardanisch gelagerten Plattform über Servoantriebe an ihren beiden Kardanachsen. Der Horizontkreisel selbst enthält ein Kreiselelement, bestehend aus einem Kreiselmotor mit einem Läufer großer Schwungmasse, welches mit vertikaler Drallachse im Kreiselgehäuse kardanisch aufgehängt ist. Eine elektrische Stützeinrichtung hält die Drallachse immer sehr nahe am Lot, indem sie die kleinen Abweichungen infolge von Reibung, unvollkommener Aufhängung und Erdrotation ständig korrigiert. Der Winkel der Drallachse gegen das momentane Scheinlot wird mit einem Lotfühler – im Prinzip mit einem Pendel bzw. Beschleunigungsmesser – gemessen. Über den Stützrechner und die Servoverstärker werden dem Kreiselelement Drehmomente zugeführt, die eine Kreiselpräzession im Sinne einer Verkleinerung dieses Winkels bewirken. Das Scheinlot ist zwar beschleunigungsabhängig und schwankt mit den Schiffsbewegungen hin und her, durch große Zeitkonstanten im Regelsystem Stützeinrichtung-Kreisel kommt es jedoch zu einer Mittelwertbildung. Da aber die mittlere Lage des Scheinlots auf einem geradeaus fahrenden Schiff immer das wahre Lot ist, wird die Drallachse ständig sehr nahe dem wahren Lot gehalten; die Genauigkeit des Kreiselhorizonts hängt natürlich wie jene des Seegravimeters von einer Reihe von Bedingungen ab. Unter mittleren Seeverhältnissen liegen die Abweichungen innerhalb weniger Bogenminuten. Mit einer solchen Genauigkeit würde man durchaus zufrieden sein. Aber leider gelten die bisherigen Betrachtungen nur bei Nichtvorhandensein von Horizontalbeschleunigungen. Sobald nämlich das Gravimeter um einen kleinen Winkel aus der Lotrichtung abweicht, wirkt in Richtung des Meßsystems eine Komponente der Horizontalbeschleunigung.

Man nennt diesen Fehler auch den *Harrison-Effekt oder Off-levelling-Fehler.*

Die Frage der Genauigkeit der Schweremessung hängt somit eng mit der Güte des Kreiseltisches zusammen.

Im Juli 1978 wurde auf unserer „Explora" ein vom Bodenseewerk neu entwickelter Kreiseltisch getestet. Dieser neue Kreiseltisch hat gegenüber dem bisher verfügbaren Tisch der Firma Anschütz einige wesentliche Vorteile.

Erstens: Er ist kleiner und leichter, wodurch vielleicht schon in absehbarer Zeit ein Einsatz im Flugzeug oder Hubschrauber möglich wäre.

Zweitens: Er ist um fast eine Zehnerpotenz genauer. Das bedeutet: Der unvermeidbare Off-levelling-Fehler wird spürbar reduziert, oder die Einsatzmöglichkeiten erweitern sich auf noch schlechtere Seegangsverhältnisse.

Drittens: Der neue Tisch ist mit einem ebenfalls neuen Stützrechner versehen, der es ermöglichen soll, auch bei Kurvenfahrt zu messen, was bislang nicht möglich war. Besonders bei einem Meßprogramm mit kurzen Profilen bedeutet das zusätzliche geophysikalische Informationen auf der Fahrt zwischen dem Ende des einen und dem Start auf dem neuen Profil.

Nun interessiert aber nicht die Schwere, wie sie vom fahrenden Schiff aus gemessen wird. Wir möchten die Schwere haben, die man messen würde, wenn das Schiff absolut ruhig stünde.

Schon Hecker entdeckte bei seinen eingangs erwähnten Schweremessungen einen scheinbaren Widerspruch bei Wiederholungsbeobachtungen in verschiedenen Fahrt-

richtungen. Die auf WO-Fahrten gemessenen Werte erwiesen sich stets kleiner, als die auf OW-Fahrt ermittelten Werte. Die Klärung dieser Erscheinung verdanken wir *Eötvös,* weswegen wir heute noch vom *Eötvös-Effekt* sprechen. Dieser Effekt liegt einfach in der Newtonschen Mechanik begründet. Bewegt sich ein Schiff auf einem Kurs von W nach O, so addiert sich seine Geschwindigkeit zur Rotationsgeschwindigkeit der Erde. Dies führt zu einer Vergrößerung der Fliehkraft und damit zu einer Abnahme der zu messenden Schwere. Bei einer Fahrt in OW-Richtung tritt der umgekehrte Effekt auf. Dieser Eötvös-Effekt beträgt bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 6 bis 7 Knoten Werte, die je nach Kurs bis zu ± 30 mgal ansteigen. Gibt man einen Maximalfehler für die Eötvös-Korrektur von 0,1 mgal vor, so erhält man zwei Grenzwerte für die erforderlichen Genauigkeiten von Geschwindigkeit und Kurs. Und zwar muß bei OW-Kurs die Geschwindigkeit des Schiffes auf 0,01 Knoten und bei NS-Fahrt sein Kurs auf besser als 0,1 Grad genau bekannt sein.

Der Navigation beziehungsweise der Positionsbestimmung auf See kommt im Hinblick auf gravimetrische Messung eine ganz besondere Bedeutung zu. Während es bei seeseismischen oder seemagnetometrischen Messeungen genügen würde, den genauen Schiffsweg oder die Schußpunktlage zu kennen, kommt bei der Seegravimetrie erschwerend hinzu, daß die jeweilige Schiffsgeschwindigkeit aus den registrierten Ortungsdaten und der zugehörigen Zeit genau berechnet werden muß.

Nur wenn die Genauigkeit der Korrekturen, insbesondere die Genauigkeit der *Eötvös-Korrektur* der Meßgenauigkeit des Gravimeters entspricht, lassen sich mittlere Fehler der Schweremessung auf See von wenigen Zehntel Milligal erzielen.

Wenn hier zwischen Navigation und Ortung unterschieden wird, so hat das seinen Grund in der gestellten Aufgabe. Die Auftraggeber – im allgemeinen die Mineralölgesellschaften – legen größten Wert darauf, daß die gewünschten geophysikalischen Messungen auf den von ihnen geplanten Profilen ausgeführt werden. Ein gutes Navigationssystem muß der Schiffsführung Informationen liefern, die das Ansteuern definierter Meßpunkte oder bestimmter Profile ermöglichen.

Die andere, ebenso wichtige Aufgabe, ist die Ortung. Mit Hilfe der registrierten Ortungsdaten wird hinterher – das heißt bei der späteren Berechnung und Konstruktion der Lagepläne und Bouguerkarten in einem Datenzentrum – die tatsächliche Lage der vermessenen Punkte und die Geschwindigkeit auf den Profilen ermittelt.

Für diese Zwecke der Navigation und Ortung steht dem Meßschiff eine INDAS-Anlage zur Verfügung. Der Name INDAS steht dabei für **in**tegriertes **Da**tenerfassungs**s**ystem. Diese Anlage dient aber nicht allein der Erfassung von Ortungsdaten. Sie ist vielmehr ein recht komplexes computergesteuertes Navigationssystem, zu dessen wesentlichen Komponenten die verschiedensten Geräte der Ortsbestimmung nach Standlinienverfahren oder Integrationsmethoden gehören. Für die Positionsermittlung nach Standlinien stehen verschiedene Empfangseinrichtungen zur Verfügung.

Meist sind die gesuchten Standlinien Hyperbeln oder Kreise. Während die meisten Ortungsmethoden auf ortsfeste oder mobile Sendestationen and Land angewiesen sind und daher nur eine mehr oder weniger begrenzte Entfernung von der Küste zulassen, liefert die Satellitennavigation, die natürlich auch zu den Stand-

linienverfahren zählt, eine tageszeit- und wetterunabhängige weltweite Ortungsmöglichkeit; allerdings unter dem Vorbehalt, daß die zur Ortsbestimmung erforderlichen Satelliten nicht ständig, sondern nur sporadisch zur Verfügung stehen.

Die Zeiträume zwischen den Satellitendurchgängen überbrückt navigatorisch das Doppler-Sonar, ein Integrationsverfahren mit hoher Kurzzeitgenauigkeit.

Für die spätere Auswertung werden aber die nach einem ganz bestimmten Format auf Magnetband registrierten Meßwerte der verschiedenen Geber benötigt. Um eine schnelle Kontrollmöglichkeit zu haben, werden die Daten parallel dazu auf einem Blattschreiber ausgedruckt. Abbildung 4 zeigt ein solches Protokoll.

In der ersten Spalte steht die laufende Nummer, dann die Angabe, ob es sich um ort- oder zeitabhängige Auslösung handelt. Die dritte Spalte gibt Datum und Uhrzeit. In der nächsten Spalte findet sich die Schußpunkt- bzw. Stationsnummer.

Z	A	DU	SNR	L	B	A	B	C	K	P	E	G	M	T
001768	0	017020931	01769	658227	543104	081205	003917	066953	2889	108	1227	63718	048873	0814
001770	0	017020959	01770	658374	543139	081208	003917	066960	2871	107	1220	63720	048876	0915
001772	0	017021026	01772	658518	543176	081206	003914	066954	2874	107	1217	63725	048883	1016
001774	0	017021055	01774	658662	543213	081209	003913	066955	2875	107	1006	63720	048889	1100
001776	0	017021123	01776	658807	543251	081212	003912	066962	2873	107	1021	63719	048889	1200
001778	0	017021149	01778	658950	543285	081219	003911	066970	2843	104	1043	63717	048888	0116
001780	0	017021217	01780	659101	543317	081222	003910	066973	2859	105	0993	63717	048886	0214
001782	0	017021245	01782	659247	543349	081226	003908	066977	2830	103	0943	63716	048886	0315
001784	0	017021314	01785	659397	543381	081228	003908	066979	2818	101	0911	63723	048885	0415
001786	0	017021343	01786	659546	543411	081232	003906	066978	2800	100	0836	63721	048887	0500
001788	0	017021409	01788	659701	543427	081236	003907	066977	2801	100	0770	63725	048888	0600
001790	0	017021436	01790	659850	543453	081242	003911	066986	2800	100	0734	63727	048886	0716
001792	0	017021504	01792	660003	543480	081247	003914	066987	2790	099	0755	63725	048887	0814
001794	0	017021530	01794	660156	543504	081255	003919	066995	2790	099	0723	63735	048892	0915
001796	0	017021558	01796	660303	543533	081264	003922	067001	2784	098	0775	63739	048899	1016
001798	0	017021626	01798	660455	543557	081275	003925	067003	2785	098	0770	63738	048905	1100
001800	0	017021653	01801	660610	543580	081285	003925	067008	2783	098	0779	63749	048925	1200
001802	0	017021719	01802	660763	543603	081293	003925	067014	2785	098	0797	63751	048935	0116
001804	0	017021746	01804	660914	543630	081295	003926	067011	2808	100	0816	63756	048922	0214

Abb. 4 Datenlogger-Protokoll

In den beiden folgenden Kolonnen sind die geographischen Koordinaten in Länge und Breite ausgedruckt, wobei die letzte Stelle mit 10^{-5} Grad etwa der Metereinheit entspricht. Dann kommen drei Spalten für Kreis- oder Hyperbelkoordinaten irgendeiner Radionavigationskette. Die nächsten Werte sind der Reihe nach Kurs, Kabelablage, Wassertiefe, gemessene Schwere, magnetische Totalintensität und Kabeltiefe. Einige der Werte dienen auch der Auswertung der marinen Seismik oder stellen direkt geophysikalische Größen dar.

In der praktischen Realisierung sieht es so aus, daß wir auf unseren beiden Meßschiffen im Gravimeterraum – fast genau im Schnittpunkt von Roll- und Stampf-

achse – je ein Askania-Gravimeter vom Typ Gss 3 auf einer von Anschütz entwickelten kreiselstabilisierten Plattform installiert haben. Hier sind die vertikalen und horizontalen Störbeschleunigungen im Seegang am geringsten. Kontinuierlich wird der gemessene Schwerewert auf einem Analogstreifen aufgezeichnet und außerdem zusammen mit den anderen Ortungsdaten auf Magnetband registriert. Das Gravimeter bedarf während der Meßfahrt keiner besonderen Wartung oder Bedienung. Lediglich die Horizontierung des Kreisltisches muß in regelmäßigen Abständen mit Hilfe der Tischlibellen kontrolliert oder gegebenenfalls nachgestellt werden. Das sonstige Funktionieren von Gravimeter und Tisch wird automatisch überwacht, ein eventueller Defekt macht sich auf der Brücke über einen Leuchtmelder bemerkbar. Der späteren Auswertung, die, angefangen bei der Plausibilitätskontrolle der Ausgangsdaten bis zu einem Isolinienplan der Bouguer- oder Freiluftschwere oder gar bis zu einer tektonischen Interpretation fast ausschließlich mit Hilfe der entsprechenden Programme in einem Datenzentrum durchgeführt wird, kommt zustatten, daß sämtliche benötigte Größen, wie Uhrzeit, Koordinaten, Wassertiefe und die gemessene Schwere selbst meßpunktweise auf ein und demselben Band stehen.

Nun zur erreichten Genauigkeit noch ein paar Worte. Zahlreiche Meßaufträge in den verschiedensten Seegebieten und bei ganz unterschiedlichen Seeverhältnissen boten die Möglichkeit, über die Widersprüche einer Unzahl von Profilschnittpunkten einen repräsentativen Wert für den mittleren Fehler bei Seegravimetermessungen zu errechnen.

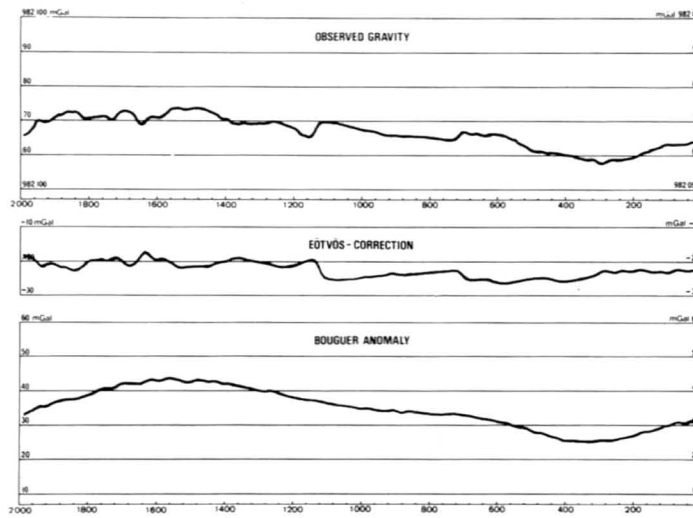

Abb. 5 Präsentation der Daten

Dieser mittlere Fehler, der von Auftrag zu Auftrag leicht variiert, liegt bei etwa einem Milligal vor dem Ausgleich und zwischen 0,2 und 0,7 mgal nach dem Ausgleich. Ich glaube nicht, daß sich diese Fehlergrenze in absehbarer Zukunft noch wesentlich unterschreiten läßt. In Abbildung 5 ist eine Profildarstellung

für beobachtete Schwere, Eötvös-Korrektur und Bouguer-Schwere wiedergegeben. Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt aus einem Profillageplan. Er basiert auf Satellitennavigation und Doppler-Sonar-Messungen. Das engere Profilnetz im zentralen Teil des Ausschnitts hat einen Rasterabstand von 2 Kilometern.

Abbildung 7 stellt vom selben Gebiet den Wassertiefenplan dar. Während man üblicherweise in Seekarten nur ausgewählte Isobathen darstellt und sich im übrigen auf diskrete Einzelwerte der Tiefen beschränkt, sind in der vorliegenden Karte alle Tiefenlinien im 5 m-Abstand dargestellt. Eine Isoliniendarstellung wirkt außerdem plastischer; in der linken Ecke erkennt man zum Beispiel sofort den dort beginnenden Kontinentalabhang.

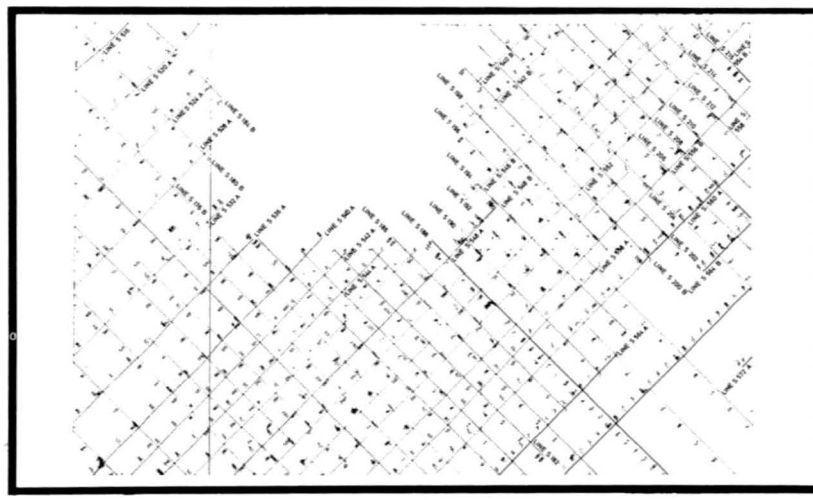

Abb. 6 Profillageplan

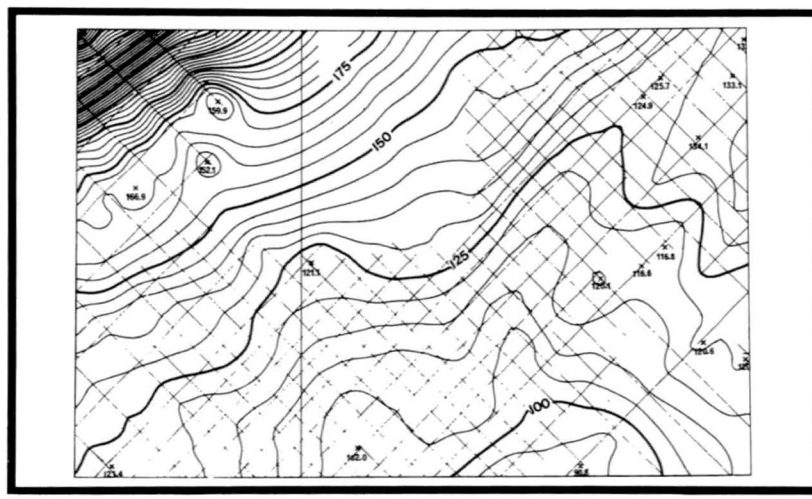

Abb. 7 Wassertiefenkarte

Abbildung 8 gibt genau denselben Ausschnitt des Lageplans aus der Karte der Bouguerschen Schwerestörung. Der Abstand der Isolinien beträgt jeweils 1 Milligal.

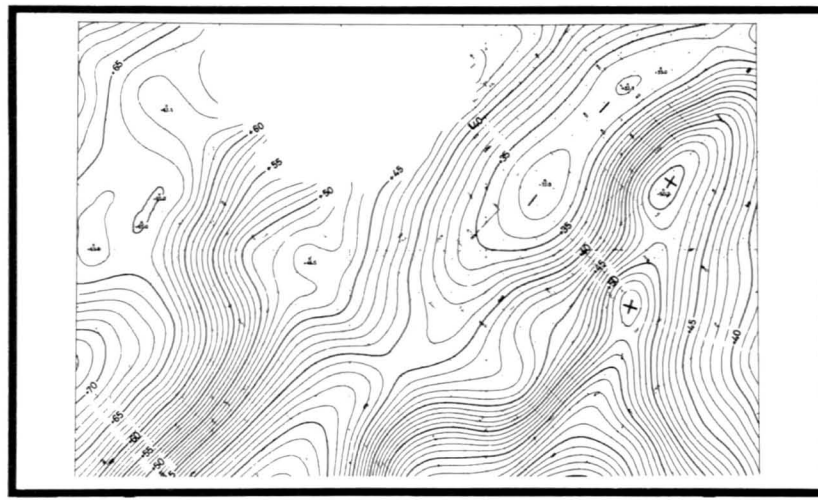

Abb. 8 Bouguerkarte

Wesentlich erscheint dabei die Tatsache des ruhigen und bei dem engen Profilnetz auch gesicherten Isogalenverlaufs. Noch vor einem Jahrzehnt hätte man so ein Ergebnis bei seegravimetrischen Messungen für unerreichbar gehalten.

Diese Ergebnisse zeigen, wie fortgeschritten der heutige Stand in der angewandten Seegravimetrie bereits ist. Und sie verdeutlichen, daß neben der Seismik, die auch in Zukunft die dominierende Rolle spielen wird, die zusätzlichen und unabhängigen jedoch simultan gewonnenen Ergebnisse, insbesondere der Gravimetrie und der Bathymetrie, verglichen mit ihrem zusätzlichen Aufwand, einen großen Gewinn für die Interpretation in geophysikalischer und geologischer Hinsicht bedeuten.