
Untersuchungen des vertikalen Dichteverlaufs
im Wiener Becken aus Lotabweichungen

G. Gerstbach

TU Wien

ZUSAMMENFASSUNG

Die geophysikalische Interpretation von Lotabweichungen ist wegen ihrer Vektornatur aussagekräftiger als jene von Schwereanomalien, aber auch etwas aufwendiger. Sie eignet sich gut zur Bestimmung unterirdischer Dichtetrennflächen nach Richtung, Neigung oder Dichtesprung. Auf früheren Untersuchungen aufbauend, werden vertikale Dichtegesetze für verschiedene Teile des Wiener Beckens auf etwa $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ abgeleitet. Durch zusätzliche Tiefenmodellierungen liegen die Residuen nur wenig über der Meßgenauigkeit (0.2 - 0.3").

Den Schluß der Arbeit bilden zwei Anregungen, bei alpiner Gravimetrie den meist symmetrischen Gebirgsaufbau für Methodenvereinfachungen auszunützen.

1. EINLEITUNG

Seit langem liefern gravimetrische Verfahren wichtige Beiträge zur Erforschung der Erdkruste. Sie stützen sich fast ausschließlich auf den Betrag des Schwerevektors, während seine Richtung bzw. die Lotabweichung (Winkel zwischen Lot und Ellipsoidnormale) erst vereinzelt zur geophysikalischen Interpretation benutzt wird. Solche Untersuchungen erfordern zunächst - ebenso wie in der Gravimetrie - die topografische Reduktion der gemessenen Lotrichtungen, die 6" pro km relativer Geländehöhe erreichen kann /7/. Die Messungen erfolgen astronomisch (Genauigkeit mit automatischen Prismennivellieren etwa 0.2") bzw. in Zukunft mit Kreiselsensoren oder CCD-Kameras.

Im Gegensatz zu Schwereanomalien haben Lotabweichungen zwei interpretierbare Komponenten (ξ, η), sodaß sich Richtung und Neigung von Dichtetrennflächen im Untergrund ermitteln lassen. Sie eignen sich daher besonders für tektonische Bruch- oder Überschiebungszonen. Als Testfeld hat der Verfasser das Wiener Becken gewählt, welches wegen seiner Erdöl- und Erdgas-

vorkommen in den meisten Teilen gut erforscht ist (siehe Abbildungen 1 - 3).

Im Rahmen zweier Forschungsprojekte /2/ wurde hier im letzten Jahrzehnt ein 7 km - Quadratraster von etwa 100 Meßpunkten aufgebaut, der lokal auf 5 km verdichtet ist und auch zur präzisen Geoidbestimmung dient (s.a. Referat von T. Bašić). Das Wiener Becken ist ein mit Meeressedimenten des Neogen aufgefülltes Einbruchsbecken im Grenzbereich der Alpen und Karpaten und begann sich vor etwa 20 Millionen Jahren abzusenken. Der Beckenuntergrund hat ein starkes Relief mit mehreren Hochschollen und besteht - von Südost nach Nordwest - aus Kristallin, Grauwacke, Kalkalpendecken und Flysch (Abb. 1). Die Tiefe des Beckens erreicht bei Schwechat und bei Zistersdorf 6 km, die Dichte der Sedimente nimmt von der Oberfläche bis in diese Tiefen von rund 2.0 auf 2.6 g/cm³ zu (siehe Abb. 6).

2. PROBLEMATIK EINFACHER LOTSTÖRUNGSMODELLE

Die geophysikalische Interpretation von Lotabweichungen beruht auf sogenannten "Lotstörungen", welche vom regionalen Trend befreit sind. Der Trend (hier in beiden Komponenten ξ, η) wird, wie auch bei Schwereanomalien üblich, aus den Messungen selbst ermittelt, welche daher flächenhaft angelegt und topografisch reduziert sein müssen.

Wegen des Umkehrproblems der Potentialtheorie ist die innere Massenverteilung der Erde aus äußeren Schwerefeldmessungen allein nicht bestimmbar: entweder muß die Lage der Dichtentrennflächen unter dem Meßgebiet bekannt sein, oder die Abfolge ihrer Dichtewerte. Hinzu kommen Randwerte wie etwa der Verlauf von Brüchen am Beckenrand, der in der Natur meistens direkt erkennbar ist.

Die wenigen Lotstörungsmodelle, die bisher erfolgreich waren - vor allem /3, 5, 8 und 9/ - arbeiteten mit "Trial and Error" und näherten die geologischen Schichten durch prismatische Säulen an, deren Begrenzungsflächen bzw. Dichten planmäßig so lange variiert wurden, bis sie die gemessenen Anomalien

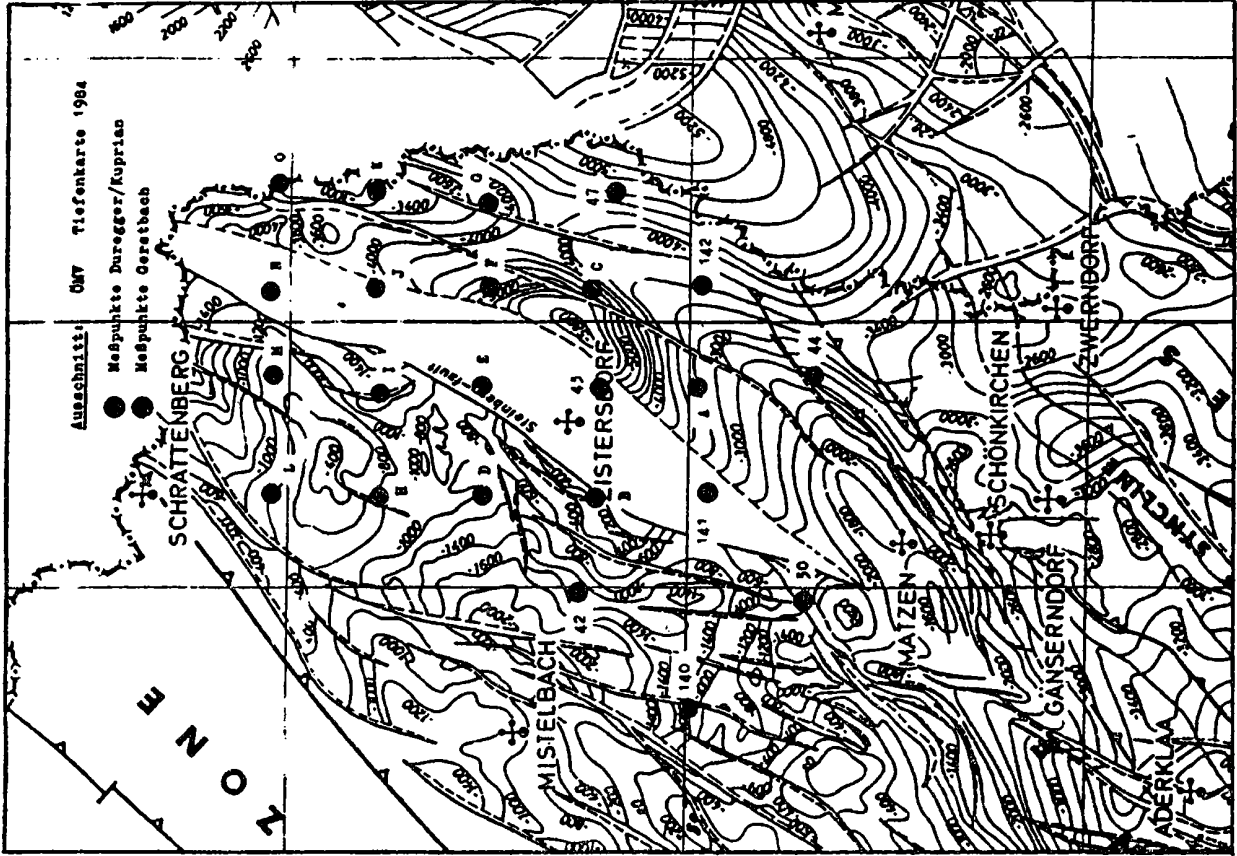


Abb. 2: Tiefenkarte und tektonische Einheiten des vortertiären Beckengrundes nach G. Wessely et al., ÖMV-AG 1984. Nordöstlicher Ausschnitt, ca. 1:300000, Äquidistanz 200 m, Koord.ergänzt.

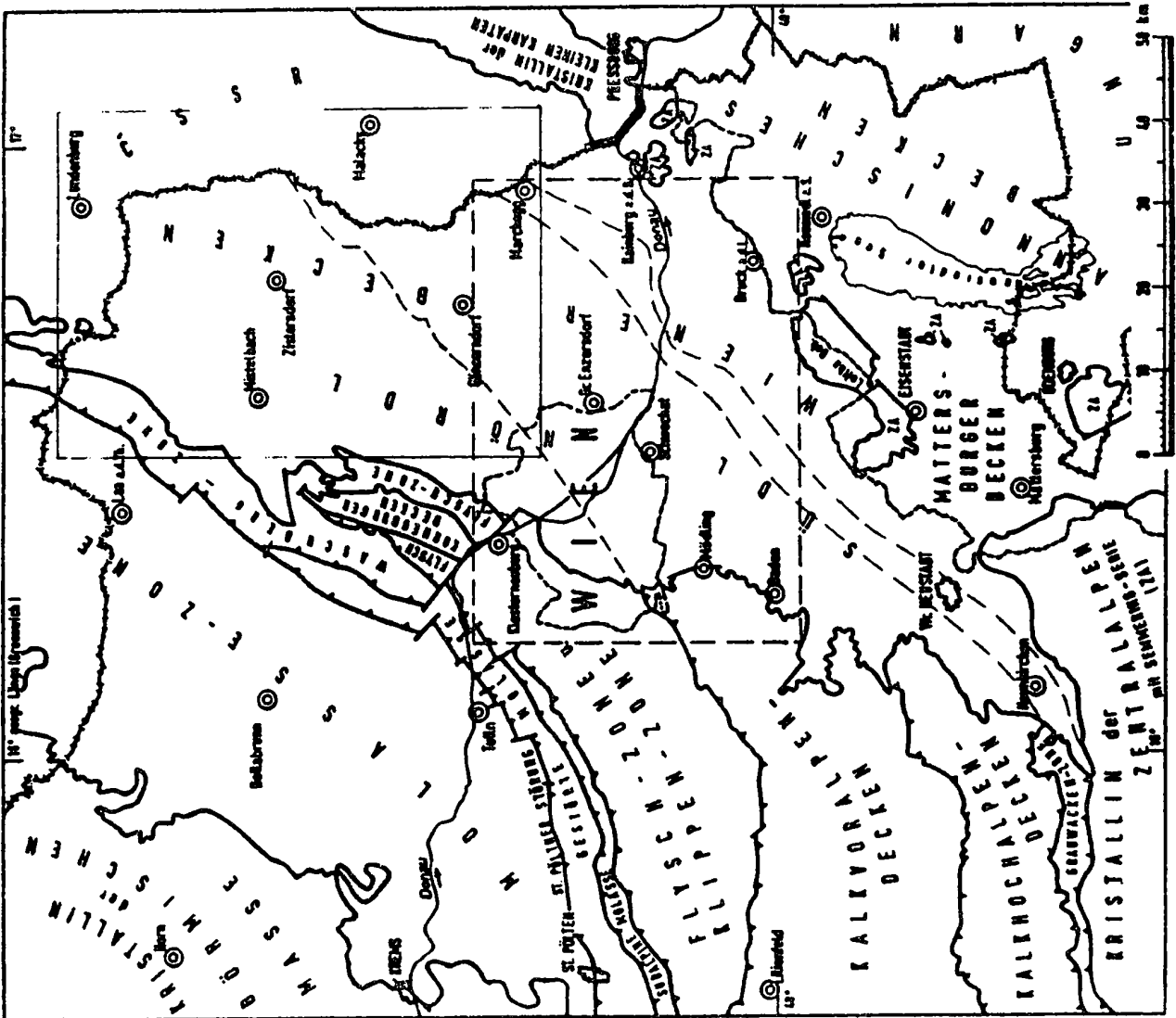


Abb. 1: Übersichtskarte des Wiener Beckens nach F. Brix 1970. Rechts oben die Grenzen der Abb. 2, strichliert jene von /6/ bzw. Gesteinsgrenzen des Beckengrundes.

hinreichend darstellten. Bei unregelmäßigen Strukturen oder bei Vorliegen von mehr als zwei Schichten stößt diese Methode aber auf Schwierigkeiten, die sich auch mit individuellen Prismenpositionen /z.B. 1/ nicht gänzlich beheben lassen. Der Verfasser hat daher flexiblere Verfahren entwickelt und hierüber bei den zwei letzten Alpengravimetrie-Kolloquien referiert:

Oft ist der Verlauf der wichtigsten Dichtentrennfläche genähert bekannt, bei erdöhlöffigen Sedimentbecken meist aus der seismischen Exploration /10/. Auf solcher Grundlage läßt sich die mittlere Dichte dazwischenliegender Schichten durch spezielle Ausgleichungsverfahren ermitteln, wenn die Schichten großteils geneigt und der Anzahl nach bekannt sind. Die Beckentiefen eines Gebiets mit 48 Lotabweichungspunkten im Osten Wiens (Abb. 1, strichliertes Rechteck) wurden im 1.5 km - Raster nach einer ÖMV-Karte von 1980 digitalisiert. Für die Säulen unter den Meßpunkten ergaben sich mittlere Sedimentdichten zwischen 1.8 und 2.6 g/cm³, je nach örtlicher Beckentiefe (Abb. 4 aus /2/). Die Regressionsgerade spiegelt die Kompaktion durch den mit der Tiefe z zunehmenden Druck wider,

$$D = 2.15 + 0.122 z_{\text{km}} \pm 0.02 \quad (\text{g/cm}^3). \quad (1)$$

Diese Dichtebestimmung ist zwar nicht überall geologisch plausibel, senkt aber die Residuen der Lotstörungen im Mittel von $\pm 0.6''$ auf $0.32''$ (Meßgenauigkeit $\pm 0.25''$) und wird im Großen durch neuere Untersuchungen (Formel 2) bestätigt.

Über den zweiten Fall - Tiefenbestimmung bei bekannten Dichtewerten - wurde 1986 referiert /6/. Durch eine Kombination von Rasterinterpolation und Ausgleichung werden die Tiefen der geologischen Schichten in Hauptrasterpunkten ermittelt, können aber dennoch dazwischenliegende Strukturen erfassen. Im oben erwähnten Gebiet (48 Meßpunkte) sanken die Residuen im Mittel auf $\pm 0.27''$ - somit fast auf die Meßgenauigkeit - jedoch waren manche Tiefenänderungen des Startmodells (Nordteil = unterer Bereich von Abb. 2) größer als 1 km, was der seismischen Genauigkeit von ca. ± 400 m widersprach. Offenbar gilt die vertikale Dichtefunktion, für welche ein aus Tiefbohrungen ermitteltes, (1) ähnliches Gesetz dreifach abgestuft wurde, nicht im gesam-

SCHNITT ZISTERSDORF

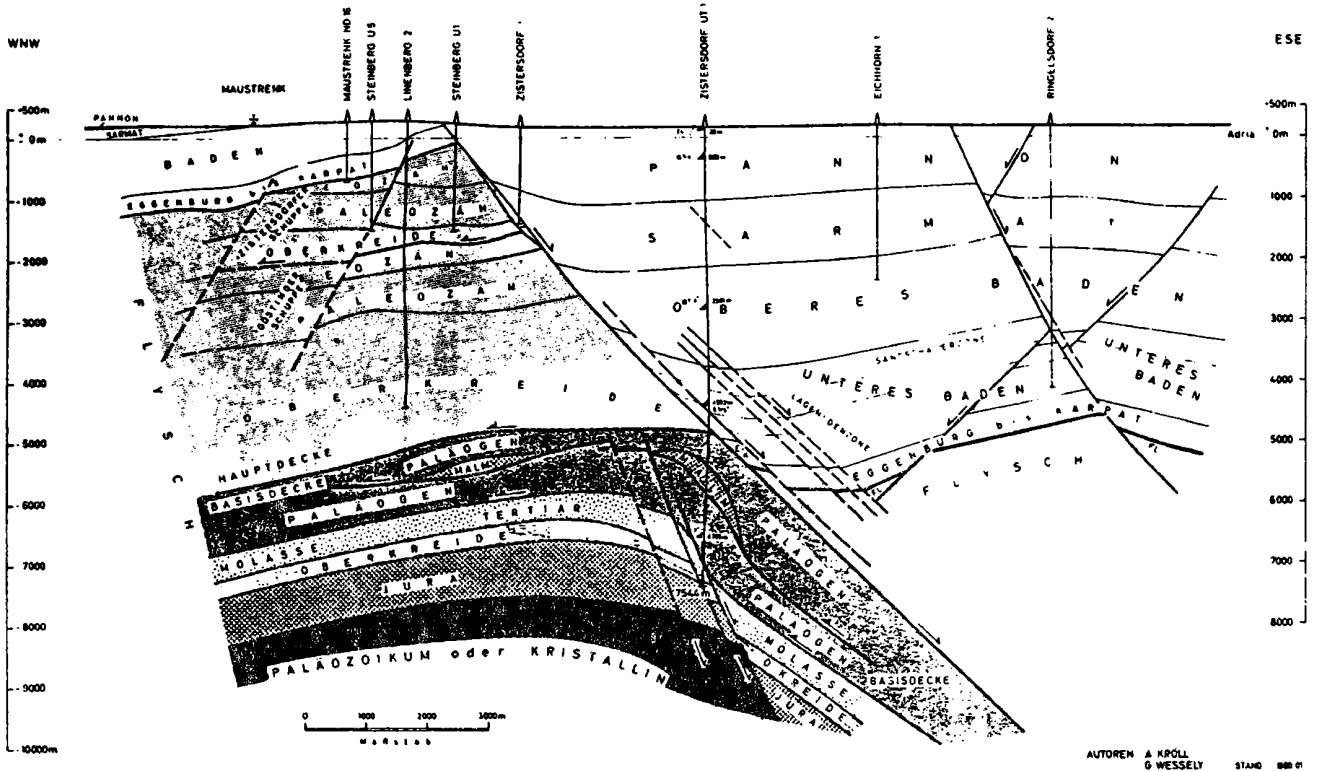


Abb. 3: geologischer Schnitt durch das Wiener Becken bei Zistersdorf u. den Steinbergbruch. Aus A. Kröll, Erdöl und Erdgas 3.1 S.169, Wien 1984.

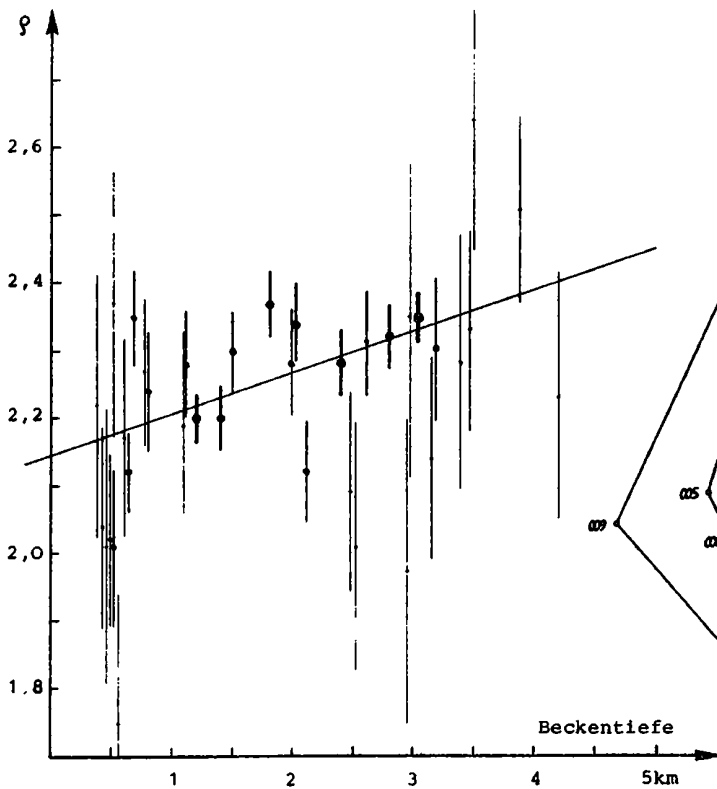


Abb. 4: Ausgeglichene Sedimentdichten unter 36 Lotabw. Punkten nach /2/, mit mittl. Fehlern und Regressionsgerade.

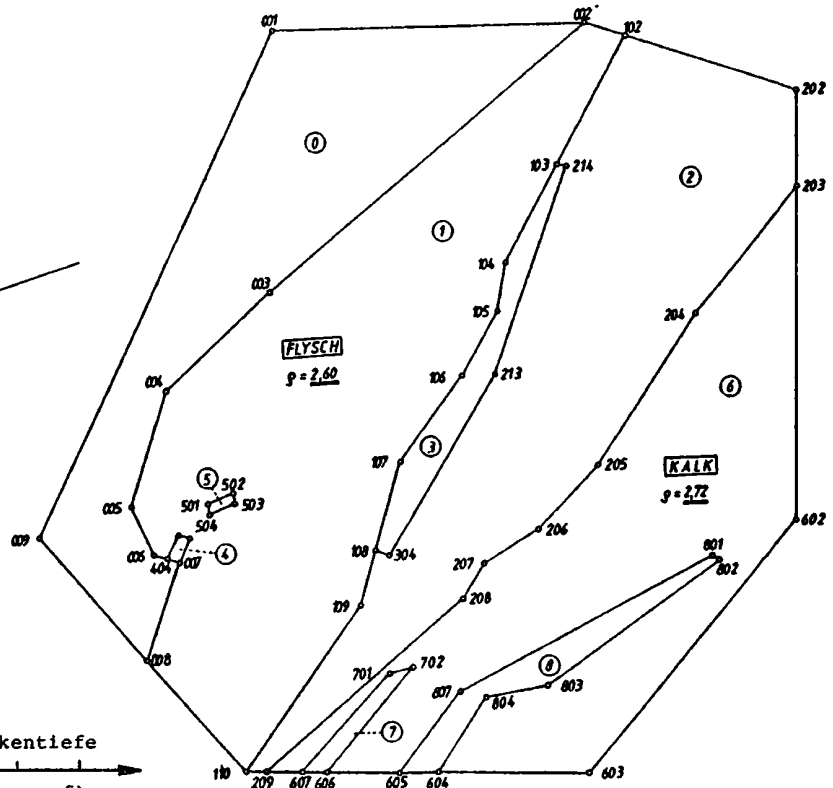


Abb. 5: Dichtebezirke beidseits des Steinbergbruches ③, nach Duregger /3/.

ten Arbeitsgebiet.

3. KOMBINIERTE DICHTE- UND TIEFENMODELLIERUNG

Um die Dichtebestimmung auf einige Bohrungen stützen und mehrere Zwischenschichten einführen zu können, wurde das Arbeitsgebiet in den letzten Jahren vom Verfasser und von Diplomanden um 23 Punkte nach Nordosten bis an die tschechische Grenze erweitert (Abb. 1 und 2). In diesem Bereich stellte uns die ÖMV Daten von 5 Tiefbohrungen zur Verfügung, die in Abb. 6 zusammengefaßt sind. Leider wurden nur wenige der Bohrkerne im "bergfeuchten" Zustand gemessen, sodaß die natürliche Dichte aus der Trockendichte, dem Porenanteil und der vermutlichen Wassersättigung geschätzt werden mußte. Die Erarbeitung eines Dichtegesetzes und die Programmierung der Dichte- und Tiefenvariation von Mehrschichtmodellen wurde einem Diplomanden übertragen /3/, siehe auch Abb. 5 und 7.

Wie Abbildung 3 zeigt, ist der Beckenuntergrund stark zerklüftet und auch die Schichtung der Neogen-Sedimente (Pannon, Sarmat, Baden, Karpat) durch Brüche gestört. Um aber zuviele Variationsparameter zu vermeiden, wurde ein lineares Dichtegesetz angenommen und alle 500 m, 1000 m bzw. 2000 m abgestuft. Westlich des Steinbergbruchs (Sprunghöhe 5000 m!) wurde das in Abb. 6 strichlierte Dichtegesetz gewählt, da hier schwerere Schichten (Sarmat, Baden) an die Oberfläche treten. Obwohl durch keine flacheren Bohrungen gestützt, bestätigte sich dieser Ansatz im nachhinein (siehe unten). Als unabhängige, nachträgliche Kontrolle diente auch der unterste Neogenwert (4.6 km) der "Zistersdorfer Übertief"-Bohrung.

Die Gesteine der Beckenbasis sind nach Abb. 1 nicht einheitlich, sondern in ihrer Dichte zwischen knapp 2.5 (Gießhübler Schichten), 2.6 (Flysch) und 2.7 - 2.75 (Kalk, Kristallin). Das Gebiet wurde daher in "Dichtebezirke" (Abb. 5) eingeteilt, wobei 0 für die westlichen Randberge (Flysch- und Waschbergzone) mit konstanter Dichte 2.5 steht. Alle diese Werte verdanken wir Dr. Zych und Dr. Wessely von der ÖMV-AG.

Es wurden nun 10 Alternativmodelle berechnet, wobei die

Abbildung 6:
lineare Dichte-
gesetze im nord-
östlichen Wiener
Becken bis 5 km
Tiefe.

- östl. Bohrung,
- westl. Bohrung,
- Zistersdorfer
Übertief (zur
Kontrolle).

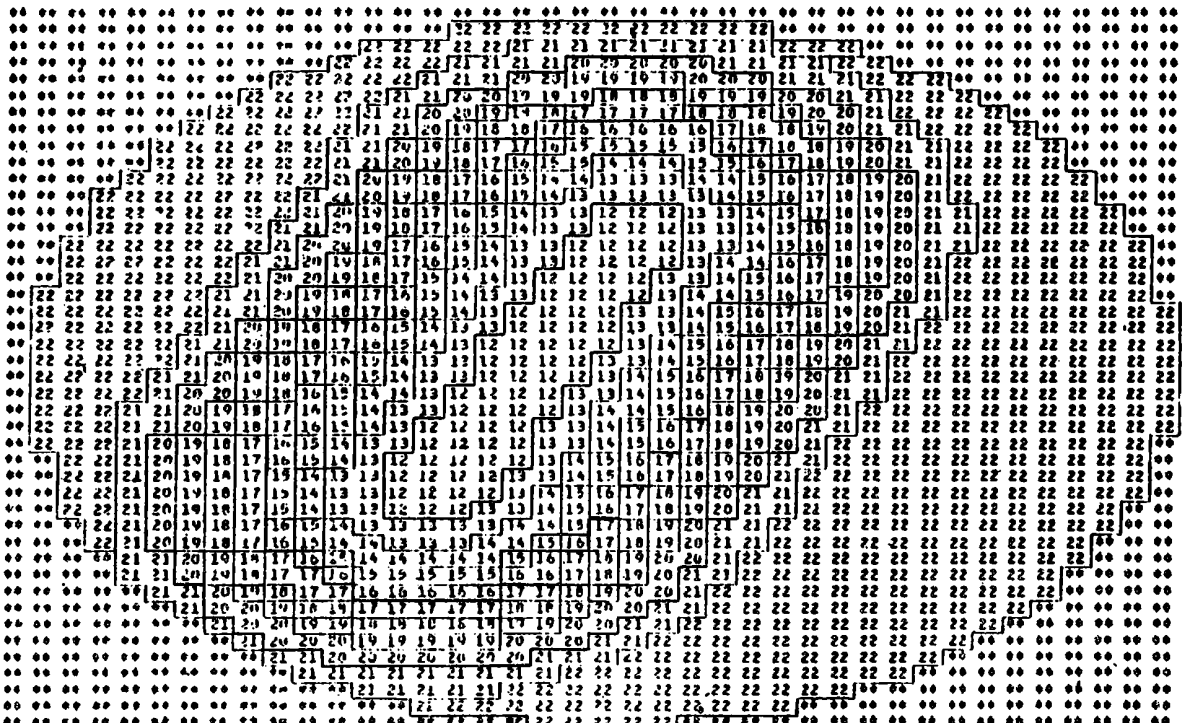
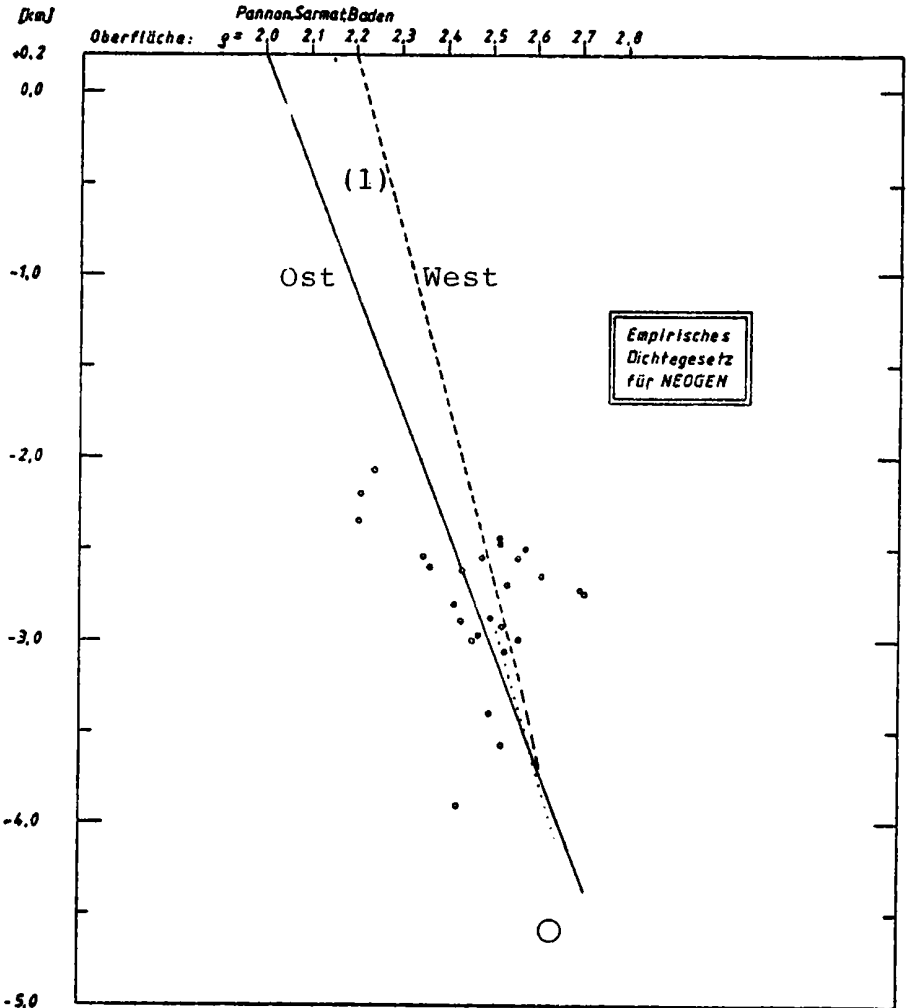


Abb. 7: Tiefenvariation im Umkreis einer Strecke. Programm GEMRED / 3/, -1 km, Variationsradius 10 km, Maßstab nur 60%!

Residuen empirisch zu minimieren waren ("trial and error"). Dabei zeigte sich, daß

- o ein lineares Dichtegesetz der Natur eher entspricht als ein parabolisches,
- o der Steinbergbruch der östlichen Zone zuzurechnen ist, also eine Oberflächendichte von 2.0 g/cm^3 hat /3/,
 $D_{\text{Ost}} = 2.0 + 0.16 z_{\text{km}}$, $D_{\text{West}} = 2.2 + 0.11 z_{\text{km}}$, (2)
- o die Waschbergzone "0" (Westrand) auf eine Tiefe von 2 km zu beschränken ist, was mit geologischen Modellen übereinstimmt,
- o eine Vertikalabstufung der Dichte in 1000m-Schritten bessere Resultate als bei 500m oder 2000m-Schichten ergibt, was aus Abb. 3 (rechter Teil) plausibel wird,
- o laterale Dichteanomalien bis etwa 0.1 g/cm^3 existieren, die allerdings durch die Meßdaten nicht genau erfaßbar sind,
- o die Beckentiefe zwischen den östlichen Punkten C und G (Abb.2) um einige hundert Meter zu vergrößern wäre oder der Dichtesprung zum Untergrund (nur mehr 0.06) dort zu klein angenommen ist.

Das letztlich gewählte Modell wies mittlere Residuen von $+0.38$ " auf, also etwas mehr als die automatisiert berechneten, aber einfacheren Modelle des Südbereichs (voriges Kapitel). Allerdings steht es mit geologischen bzw. seismischen Befunden in keinerlei Widerspruch und beinhaltet extreme Bruchzonen, über deren grenznahen Aufbau die ÖMV erst vor wenigen Jahren Kenntnisse gewinnen konnte.

Die topografisch - geologisch reduzierten Lotabweichungen (incl. Trendanteile) und die Residuen dieses Modells sind aus den Abbildungen 8 und 9 zu ersehen. Der regionale Trend beträgt

$$\begin{aligned} & - 0.194" x + 0.119" y - 0.44" \text{ in Nord-Süd-Richtung } (\xi), \\ & + 0.127" x - 0.306" y + 1.89" \text{ in Ost-West-Richtung } (\eta). \end{aligned} \quad (3)$$

Künftige Verbesserungsmöglichkeiten bestehen in Dichtebezirken unabhängig vom Beckengrund, in nichtlinearem Trendansatz (erst bei etwas größerem Gebiet sinnvoll) und in der Berücksichtigung von tieferen (mesozoischen) Schichtungen.

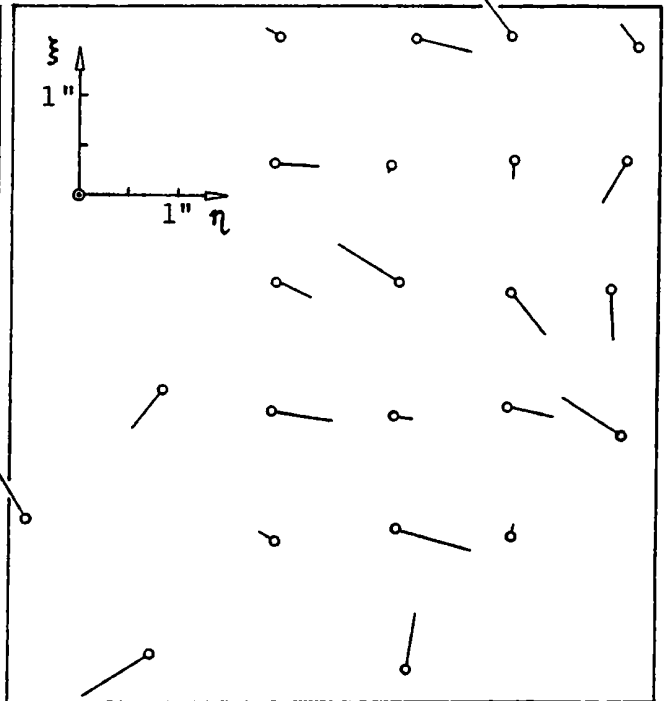
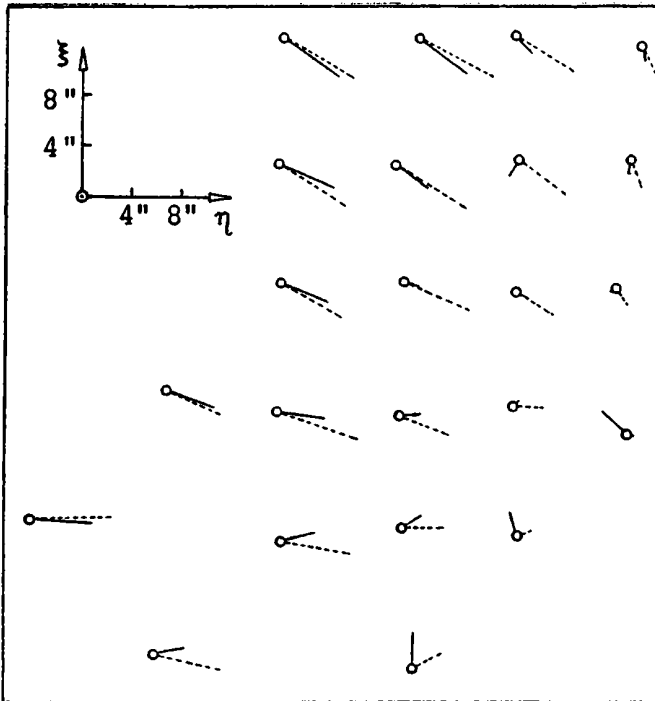


Abb. 8: topografisch-geologisch reduzierte Lotabweichungen der endgültigen Modellvariante.

Abb. 9: Residuen zu Abb.8 bei Abzug des linearen Trends (3), Punktlage siehe Abb.2.

Auf Seiten der Meßgenauigkeit wird an einem vernetzten Ausgleich der η -Lotabweichungskomponente gearbeitet, um kleinste Änderungen der Reaktionszeit des Beobachters zu erfassen /4/. Dadurch dürften die Genauigkeiten um etwa 30 % steigen und gewisse systematische Fehleranteile, die aus Abb.9 zu vermuten sind, verschwinden. Die in Entwicklung befindlichen automatisierten Meßverfahren werden zu weiterer Genauigkeitssteigerung und beschleunigter, leichterer Messung beitragen.

In naher Zukunft wird daher die geophysikalische Interpretation von Lotabweichungen gleichberechtigt neben die klassischen gravimetrischen Verfahren treten können.

4. ZWEI ANREGUNGEN ZUR GRAVIMETRIE IM GEBIRGE

Im Zuge dieser und ähnlicher Untersuchungen des Verfassers ergaben sich interessante "Nebenprodukte". Die im Gebirge so aufwendige topografische Reduktion und Lotkrümmungsberechnung kann wesentlich vereinfacht werden, weil die Gebirgsketten meist genähert symmetrisch sind und sich die Wirkung einzelner

Prismenteile aufhebt (Abb. 10). Daher ist die Lotabweichung in P und P' (Symmetrie zur Hangmitte) fast gleich und hat entlang jedes Hanges einen parabelähnlichen Verlauf. Auch in sehr asymmetrischen Gebirgen kann sie in Minutenschnelle aus einer groben Karte - ohne digitale Geländemodelle - auf $\pm 5 - 10 \%$ berechnet werden /7/.

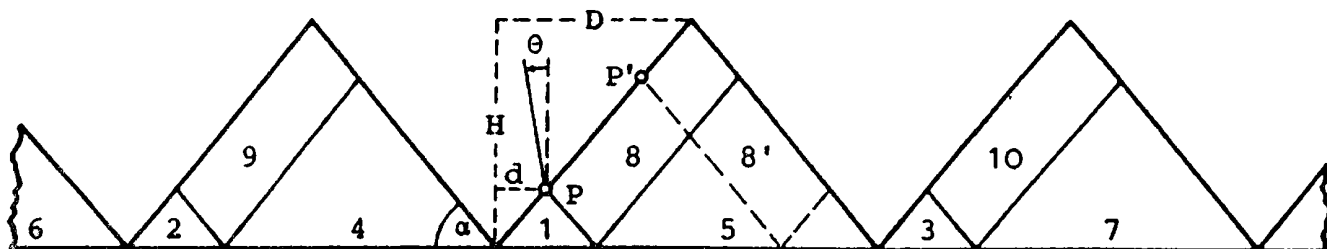


Abb. 10: Symmetrie der Lotabweichung in regelmäßigen Bergketten

Ähnliches ist für den Betrag der Schwere bzw. ihre Geländekorrektur zu vermuten und wäre diesbezügliche Untersuchungen wert. Damit wären die nächsten 10 - 20 Jahre zu überbrücken, bis weltweit genaue Geländemodelle vorliegen, und auch rasche gravimetrische Auswertungen im Felde möglich.

Eine zweite Anregung betrifft die Bouguer-Anomalie Δg_B . Sie ist bekanntlich im lokalen Bereich fast konstant, aber mit einer "mittleren Geländehöhe" \bar{h} negativ korreliert. Im Zuge der obigen Untersuchungen zeigte sich, daß \bar{h} innerhalb eines Radius \bar{r} zu mitteln wäre, der dem durchschnittlichen Horizontalabstand der Hauptkämme vom Tal (D in Abb. 10) entspricht. Für die Alpenländer ergab sich

$$\Delta g_B \approx -0.080 \bar{h}(\bar{r}) \quad (\text{in mGal und m}), \quad (4)$$

wobei \bar{r} in den Ostalpen durchschnittlich 6 km beträgt. Die "Konstante" ist selbstverständlich nur ein Mittelwert, aber (4) eignet sich gut zur lokalen Extrapolation von Δg_B . Ähnliche Schnellmethoden gibt es für die Lotkrümmungs- und orthometrische Korrektur /7/ und vermutlich auch für die Schweregradienten.

Ich hoffe, daß ein junger Kollege die Anregung aufgreift!

L I T E R A T U R

- /1/ I. BERNAUER, A. GEIGER: Lokale Schwerefeldbestimmung und gravimetrische Modellrechnungen im Satelliten - Testnetz "Turtmann", Wallis. Geod.-geophys. Arb. Schweiz, Band 38, 1986.
- /2/ K. BRETTERBAUER, G. GERSTBACH: Die astro-geodätischen Arbeiten der TU Wien. Ö.K.I.E. Band III, Das Geoid in Österreich, S. 61 - 72, Graz 1983.
- /3/ J. DUREGGER: Tiefenbestimmung im nördlichen Wiener Becken aus Lotabweichungen durch Variation von Mehrschichtmodellen. Diplomarbeit an der Abt. Theoret. Geodäsie, TU Wien 1986.
- /4/ H. FROTSCHNIG: Weiterentwicklung des Programms LAMAUS zur Ermittlung der persönlichen Gleichung aus astron. Längenbestimmungen. Diplomarbeit Abt. Theoret. Geodäsie, TU Wien 1989
- /5/ G. GERSTBACH: Bestimmung der Sedimentdicke aus Lotabweichungen im Testfeld "Wiener Becken". Zeitschr. für Vermess.Wesen 107/8, S. 346 - 357, Stuttgart 1982.
- /6/ G. GERSTBACH: Interpretation von Lot- und Schwerestörungen durch Ausgleichung flexibler Tiefenmodelle. Berichte ü. den Tiefbau der Ostalpen Band 13, S. 191 - 198, Zentralanstalt f. Met. u. Geodyn., Alpengrav.Kolloquium 1986.
- /7/ G. GERSTBACH: Precise Alpine Geoid Determination without Digital Terrain Models. Bulletin Géodésique 62, S. 541-563, Paris 1988.
- /8/ H.J. MÖNICKE: Interpretation astronomisch-geodätischer Lotabweichungen im Oberrheingraben. Deutsche Geod. Komm., Heft C 265, München 1981.
- /9/ P. SOLLEREDER: Astronomisches Flächennivellement zur Untersuchung der Beckenstruktur im Süden Wiens, Teil II. Diplomarbeit Abt. Theoret. Geodäsie, TU Wien 1981.
- /10/ G. WESSELY, G. GOHS: Vienna Basin, Floor and Subcrop of Alpine Tectonic Units. ÖMV-Tiefenkarte, Wien 1984.