

Gravimetrie

GRAVIMETRIE IN DER KTB-PILOTBOHRUNG

U. Casten

Zusammenfassung

Vom 14. bis 15. April 1989 wurden von EDCON, Denver, im Auftrag der KTB-Projektleitung erfolgreich Schweremessungen in der KTB-Pilotbohrung durchgeführt. Auf der Grundlage des EDCON-Reports und selbst gewonnener Erfahrungen wird der Versuch unternommen, die Bohrlochgravimetrie im KTB aus methodischer Sicht darzustellen.

Nach einer kurzen Darlegung theoretischer Zusammenhänge, die die Bestimmungsgleichungen für die Blockdichte und die Bouguer-Anomalien liefern, wird das vom Kontraktor eingesetzte Bohrlochgravimeter beschrieben, die Aufteilung des Vertikalprofils der Pilotbohrung in Meßintervalle vorgestellt und die durchgeführte Datenerfassung nachvollzogen. Die Darlegung der Datenbearbeitung beinhaltet die bei Bohrlochmessungen erforderlichen Korrekturen und Reduktionen. Bei den Reduktionen wird die Bestimmung der topographischen Effekte kritisch betrachtet, da der Kontraktor eine veraltete Methode zur Erfassung der Topographie benutzt hat.

Abschließend werden die Meßergebnisse vorgestellt, ohne auf deren Interpretation einzugehen. Die scheinbaren Blockdichtewerte variieren zwischen $2,625 \text{ g/cm}^3$ und $2,825 \text{ g/cm}^3$, ihr Mittelwert beträgt $2,73 \text{ g/cm}^3$. Die höheren Werte treten in den durchbohrten Amphiboliten auf, die niedrigeren Werte sind den Gneisen zuzuordnen.

Adresse des Autors: Institut für Geophysik, Ruhr-Universität Bochum, Postfach 10 21 48, D-4630 Bochum

Abstract

On April 14 to 15, 1990, EDCON performed successful gravity measurements in the KTB pilot hole. Based on EDCON field reports and own experience an attempt is made to present the borehole gravity survey in a methodological way.

The theoretical background is briefly discussed, showing the equations for determining bulk-densities and Bouguer-anomalies, followed by a description of the borehole gravity meter used, the partition of the pilot hole's vertical profile into measuring intervals and the data acquisition. Data processing includes corrections and reduction as required by borehole gravity surveys. The determination of the topographic effect is critically elucidated due to an elder method used by the contractor. Finally results are shown without giving any interpretation. The apparent bulk density values vary between 2.625 g/cm^3 and 2.825 g/cm^3 , the average value amounts to 2.73 g/cm^3 . Higher values do correlate with the intersected amphibolites whereas lower values are attributed to gneisses.

Einführung

Die Test- und Meßphase im KTB-Programm hatte für die Pilotbohrung eine gravimetrische Bohrlochmessung vorgesehen. Da weder ein eigenes Bohrlochgravimeter noch das erforderliche "know how" zur Durchführung dieser Messungen vorhanden war, mußte dieses Experiment an die Firma EDCON, Denver, (in Deutschland vertreten durch IGM, Überlingen) vergeben werden. Die Messungen wurden an 2 Tagen (14. und 15. April 1989) von 2 Mitarbeitern der Fa. EDCON, Denver, ausgeführt. Begleitende Maßnahmen, die aus dem Einmessen eines gravimetrischen Basispunktes auf dem Bohrplatz (s. Abschnitt "Durchführung der Messungen), dem Mitwirken bei der Festlegung des Meßprogrammes und gravimetrischen Kontrollregistrierungen bestanden, wurden von U. Casten, Bochum, und J. Richter, Köln, durchgeführt.

Der Kontraktor lieferte auftragsgemäß die Meßergebnisse zusammen mit einem ausführlichen Report (EDCON 1989), der alle Schritte von der Erfassung über die Bearbeitung bis hin zur Darstellung der Daten beinhaltet. Obwohl sämtliche Einzeldaten der Messungen und Datenbearbeitung wiedergegeben worden sind, ist nur eine teilweise Beurteilung des vorgelegten Reports möglich. Gerätespezifische Meßdaten (z. B. Spannungen der verschiedenen Sensoren) entziehen sich der Kontrolle durch den Auftraggeber. Hierbei kann man sich aber auf das Equipment und die Erfahrung der Fa. EDCON verlassen, die seit einigen Jahren für die Öl- und Gasindustrie auch in der Bundesrepublik Deutschland erfolgreich bohrlochgravimetrische Messungen durchführt.

Der nachfolgende Bericht geht weniger auf Einzelheiten des EDCON-Reports ein sondern will die Bohrlochgravimetrie mehr aus methodischer Sicht darstellen. Hierzu wird zunächst ein kurzer Abriß der Theorie zur Bohrlochgravimetrie vorgestellt und anschließend der Weg von den Messungen bis hin zur Darstellung der Ergebnisse in einem Überblick nachvollzogen. Die Interpretation der Ergebnisse wird in diesem Bericht nicht behandelt.

Grundlagen

Für untertägige Situationen ist als Ausgangsbeziehung die Poisson-Gleichung anzuwenden:

$$(1) \quad \nabla^2 U = -4\pi\gamma \rho(r)$$

U ist das Gravitationspotential, γ die Gravitationskonstante und $\rho(r)$ die Dichteverteilung. In kartesischen Koordinaten

erhält man für die Dichte aus (1) die Beziehung:

$$(2) \rho(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi\gamma} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right)$$

oder als Näherung:

$$(3) \rho(z) = -\frac{1}{4\pi\gamma} \left(\frac{\Delta g}{\Delta z} \right)$$

Die Horizontalgradienten in (2) verschwinden, wenn keine lateralen Dichteänderungen vorhanden sind. Außerdem wird in (2) die 2. Ableitung des Potentials nach z durch den Vertikalgradienten $\Delta g / \Delta z$ ersetzt. Δg ist die gemessene Schweredifferenz in dem vertikalen Intervall Δz . Berücksichtigt man den stets vorhandenen Effekt der "Normalerde", muß der Gradient in (3) um den Freiluftgradienten F erweitert werden, und die Grundbeziehung für vertikale Dichteprofile erhält die Form:

$$(4) \rho(z) = \frac{1}{4\pi\gamma} \left(F - \frac{\Delta g}{\Delta z} \right)$$

Aus der Gleichung (4) erhält man die Schweredifferenz Δg zu:

$$(5) \Delta g = \left[F - 4\pi\gamma \rho(z) \right] \cdot \Delta z$$

$F \cdot \Delta z$ ist die Freiluftreduktion und $4\pi\gamma\rho(z) \cdot \Delta z$ die doppelte Bouguer-Reduktion für die untertägige Situation. Abb. 1 illustriert den Verlauf der Schwere beim Passieren der Bouguer-Platte entlang der Vertikalen (ohne Freiluftanteil). Es wird deutlich, daß der Gradient innerhalb der Platte von deren Dichte abhängt. Außerdem muß berücksichtigt werden, daß (4) nur für eine söhlige Platte gilt und eine geneigte Platte zu einem scheinbaren Dichtewert führt, da dann eine laterale Dichteänderung vorliegt.

Die Dichtebestimmung mittels Bohrlochgravimetrie hat den Vorteil, daß die Eindringtiefe wesentlich größer ist als bei anderen Verfahren wie z. B. $\gamma\gamma$ -Messungen. Obwohl die Variationen des Schwerfelds entlang der Vertikalen gemessen werden, können die Quellen eine beträchtliche laterale Verteilung haben. Dies führt zur Definition der lateralen Eindringtiefe. Sie besagt, daß 90% der gemessenen Effekte ihre Quellen in einem Bereich haben, dessen Radius das 5-fache der vertikalen Intervalllänge Δz beträgt. Zur Illustration dient Abb. 2. Es wurde die Gravitationswirkung einer Kreisscheibe mit Mächtigkeit Δz für eine Station auf der Achse direkt an der Oberfläche berechnet. Der Radius r der Scheibe wurde variiert von 0 bis unendlich. Im Diagramm wurde der Radius mit Δz und die Gravitationswirkung g mit dem Effekt g_B der Scheibe mit

unendlichem Radius (Bouguer-Platte) dividiert. Die laterale Eindringtiefe ist markiert worden, ebenso der Effekt, wenn der Radius gleich der Intervalllänge wird. Im letzteren Fall sind noch 60% der Gesamtwirkung vorhanden.

Das Bohrlochgravimeter von EDCON

Die Fa. EDCON (Exploration Data Consultants, Inc. 171 South van Gordon Ave., Denver, Colorado, USA 80228) ist weltweit der einzige kommerzielle Anbieter für bohrlochgravimetrische Messungen. Die eingesetzte Bohrlochsonde selbst ist eine Gemeinschaftsentwicklung der Firmen EDCON, AMOCO und LaCoste-Romberg. Der Vollständigkeit halber ist anzumerken, daß eine weitere Bohrlochsonde vom U. S. Geological Survey eingesetzt wird (Beyer 1987).

Die Bohrlochmessungen werden mit einem standardmäßigen 7-adrigen Schlumberger-Loggingkabel mit 10-poligem Anschluß durchgeführt. Die Gravimetersonde wird mit einer Gammasonde für die Teufenkontrolle gekoppelt. Das Gravimeter selbst (Sensor mit elektronischem Feedback von LaCoste-Romberg, verkleinerte Version des bekannten Landgravimeters) befindet sich innerhalb des druckfesten Sondenkörpers. Beim KTB-Experiment kam eine Sondenversion zum Einsatz, die hohe Bohrlochtemperaturen kompensieren kann. Zu diesem Zweck ist der Gravimetersensor in ein Dewar-Gefäß eingebaut worden, das zusätzlich noch gekühlt werden kann. Die konstantzuhaltende Arbeitstemperatur des Sensors beträgt etwa 120 °C. Bis 115 °C Bohrlochtemperatur wird das Dewar-Gefäß geheizt, bei höheren Temperaturen (bis maximal 260 °C) gekühlt. Die äußeren Abmessungen des Sondenkörpers betragen: 123,2 inches für die Länge und 5,25 inches für den Durchmesser. Die druckmäßige Begrenzung liegt bei 20.000 psi. Es kann eine maximale Bohrlochneigung von 14° zugelassen werden. Stellmotoren im Innern der Sonde halten das Dewar-Gefäß mit Sensor in der Meßlage. Neben dem Gravimetermodul enthält die Sonde ein weiteres Modul, das die Elektronik für die Kontrolle des Gravimetermoduls, die digitale Datenerfassung und die Telemetrie nach über Tage beinhaltet.

Das Übertagesystem besteht aus Elektronikmodul, Teufendekodierer und Computer (PC unter MS-DOS). Der gesamte Ablauf einer Schweremessung im Bohrloch erfolgt rechnergesteuert mittels firmeneigener Software. Auf einem Bildschirm werden die Signale der beiden Gravimeterlibellen und der Feedbackspannung vom Sensor überwacht. Die Meßdaten werden ebenfalls am Bildschirm kontrolliert, einer vorläufigen Bearbeitung unterworfen und anschließend auf Diskette überspielt.

Das Meßprogramm für die Pilotbohrung

Das gesamte zur Verfügung stehende Vertikalprofil wurde an Hand des vorhandenen Dichtelogs sowie des Gammaloges und Kaliberlogs in Meßintervalle gegliedert. Dichtelog und Gammalog gaben die Formationsgrenzen wieder und das Kaliberlog zeigte die Bohrlochauskesselungen in gestörten Bereichen an. Diese Informationen dienten der exakten Festlegung der Meßteufen. Das Profil wurde zunächst kontinuierlich in 50 m-Intervalle aufgeteilt (von 3975 bis 25 m), um eine regelmäßige Überdeckung zu erhalten. Damit beträgt die kleinste laterale Eindringtiefe 250 m ($\Delta z = 50$ m) und die größte knapp 20 km (Δz ca. 4000 m). Hiermit sollten Strukturen in der Umgebung der Bohrung erfaßt werden. Für die Bereiche bekannter Dichteänderung (Übergänge Gneis-Amphibolit) wurde zwecks besserer Auflösung der Formationsgrenzen die Intervalle auf 25 m verkleinert. Von 3585 m bis 3555 m wurden sogar Intervalle von nur 5 m gewählt. Diese sollten 3 mal vermessen werden, um eine Aussage über Meßgenauigkeiten machen zu können.

Die beiden tiefsten Meßpunkte fielen aus, weil die Gravimeter-sonde beim Absinken auf das Bohrlochtiefste in der Bohrlochspülung stecken blieb. Als neuer tiefster Punkt wurde statt 3975 m dann 3880 m festgelegt. Insgesamt wurden 101 Meßteufen festgehalten und auch vermessen. Zusätzlich wurden für die Teufen 2325 m und 375 m Rotationsversuche des Gravimetersensors vorgesehen, um eventuelle Magnetisierungseinflüsse zu testen. In den Teufenbereich 275 bis 375 fällt die Unterkante eines magnetischen Störkörpers. Abb. 3 gibt das Meßprogramm zusammen mit einem Dichteverlauf für das Vertikalprofil wieder.

Durchführung der Messungen

Zum Einhängen des vertikalen Schwereprofils in die Oberflächengravimetrie wurde zusätzlich zum Basispunkt BP1 auf dem KTB-Bohrplatz (dicht am Bohrturm) ein Anschlußpunkt BP2 gravimetrisch eingemessen (980957.15 mgal, DSGN 62). Die Lage der beiden Punkte ist aus Abb. 4 ersichtlich. An diesem Punkt begann und endete die Bohrlochgravimetrie. Die Schweremessungen im Bohrloch erfolgten von unten nach oben, um den Gravimetersensor gleichgerichteten Schwereänderungen auszusetzen. Dies vereinfachte die Kontrolle des ferngesteuerten Meßablaufs an einem Meßpunkt. Die Teufenkontrolle erfolgte mit der Gamma-sonde und einem Referenzzlog. Der Teufenwert wurde mit dem Odometer bestimmt. Für die Wiederholungsmessungen in 5 m-Intervallen wurde zusätzlich ein Kabel markiert.

Der relative Teufenfehler zwischen zwei Meßniveaus beträgt 5 bis 10 cm.

Pro Meßstation wurden in einem Zeitfenster von 30 s die kontinuierlich (Abtastrate: 8 pro s) gemessenen Schwerewerte mit dem Computer gemittelt und auf dem Bildschirm zeitabhängig als "gravity reading diagram" dargestellt (Abb. 5). Die Messung wurde beendet, wenn sie vom Operateur als noisefrei erachtet wurde (Meßdauer ca. 10 Minuten). Dabei wurden die meist zu Beginn der Messung durch Einschwingeffekte des Sensors auftretenden Werte eliminiert. Aus den verbleibenden Werten wurde der endgültige Schwerewert durch Mittelung erhalten und für die Genauigkeit der Messung die Standardabweichung bestimmt. Für das Beispiel in Abb. 5 wurde der Mittelwert zu 443,1828 mgal und die Standardabweichung zu 3,8 μ gal berechnet.

Unter Laborbedingungen wird eine Meßgenauigkeit von 3 μ gal erreicht. Für Feldmessungen kann von 7 μ gal ausgegangen werden.

Datenbearbeitung

Für die Korrekturen, die an die Meßergebnisse anzubringen sind, müssen bei bohrlochgravimetrischen Messungen folgende Effekte berücksichtigt werden:

- Gezeiten
- Gerätedrift
- Bohrlochneigung

Die Gezeiteneffekte lassen sich mit geeigneter Software berechnen. EDCON verwendet in seinem Softwarepaket einen Algorithmus von Longman (1959) und führt die Gezeitenkorrektur unmittelbar nach der Meßwerterfassung "online" durch.

Die beim KTB-Experiment berechneten Effekte wurden kontrolliert und bedürfen keiner Verbesserung.

Die Gerätedrift tritt während der Messungen auf und muß durch diese selbst bestimmt werden. Die Driftrate wird durch zeitliche Wiederholungsmessungen an einem festen Meßpunkt bestimmt und/oder wird aus den kontinuierlich anfallenden Meßdaten an einer beliebigen Station berechnet, wobei die Meßdauer dann auf mindestens 20 Minuten verlängert wird. Die einzelnen Driftraten werden parallel zur laufenden Zeit mitregistriert. Die resultierende Driftfunktion wird über die Zeit integriert und so die Driftkorrektur für jeden einzelnen Meßpunkt berechnet.

Die beim KTB-Experiment bestimmten Driftraten variierten von 0,1 bis 0,6 μ gal/Min.

Bohrlochneigungen führen dazu, daß die Bohrlochteufe von der lotrechten Teufe abweicht. Somit müssen die sog. "slant depth" -Werte mittels Neigungsdaten, die unabhängig von den Schweremessungen ermittelt werden müssen, korrigiert werden.

Entsprechende KTB-Daten liegen vor und die Teufenkorrekturen konnten nachträglich vom Kontraktor angebracht werden.

Für die Reduktionen müssen weitere Auswirkungen auf die Schweremessungen berücksichtigt werden:

- Topographie
- Niveauwirkung
- Wirkung der Bouguer-Platte

Während für die unterschiedlichen Meßteufen die Freiluftreduktion und Bouguer-Reduktion gemäß Beziehung (5) leicht durchzuführen sind (vorher ist die Dichte nach (4) bestimmt worden) bedarf die Berücksichtigung topographischer Effekte eine genaue Geländeerfassung.

Im vorliegenden Fall wurde vom Kontraktor zur Bestimmung der Reduktionsbeträge (Abb. 6) ein Verfahren nach Hammer (1939) benutzt. Bis zu einem Radius von 12,2 km wurden topographische Karten 1:25.000 und weiter bis 39,2 km Karten 1:100.000 ausgewertet. Als Reduktionsdichte wurde $2,67 \text{ g/cm}^3$ gewählt. Sowohl die Ergebnisse des verwendeten Kreisringsektoren-Verfahrens als auch die konstante Reduktionsdichte bedürfen einer kritischen Überprüfung. Möglicherweise läßt sich die topographische Reduktion durch Anwendung moderner Verfahren verbessern.

Ergebnisse

Aus den korrigierten und reduzierten Schweredaten wurde ein Vertikalprofil der scheinbaren Blockdichte und ein Vertikalprofil der Bouguer-Anomalien abgeleitet. Abb. 7 zeigt den jeweiligen Verlauf mit der Teufe. Die Dichtewerte variieren zwischen $2,625 \text{ g/cm}^3$ (Intervall 24,4 bis 74,4 m) und $2,825 \text{ g/cm}^3$ (Intervall 3724,2 bis 3774,3 m). Der Mittelwert beträgt $2,73 \text{ g/cm}^3$. Die höheren Werte treten in den durchteuften Amphiboliten auf, die niedrigeren Werte sind den Gneisen zuzuordnen. Mit dem Verlauf der Dichte nicht vergleichbar ist der Verlauf der Bouguer-Anomalien, die zwischen 2,843 mgal (Teufe 2568,7) und 5,602 mgal (Teufe 3565,0) schwanken, doch korrelieren die Richtungsänderungen im Verlauf der Anomalien gut mit den Dichteänderungen an Formationsgrenzen.

Das Ergebnis der Wiederholungsmessungen ist bezüglich Blockdichte in Tab. 1 wiedergegeben. Obwohl die Teufenintervalle nur 5 m betragen, wurde eine teilweise hohe Genauigkeit erzielt (besser als $0,01 \text{ g/cm}^3$). Die relativ großen Fehler im

oberen und unteren Intervall sind vermutlich auf die Umkehrung der Meßrichtung zurückzuführen, die sich sowohl im Verhalten des Gravimetersensors als auch bei den Teufenmessungen bemerkbar gemacht hat.

Die Rotation der Gravimetersonde innerhalb des Sondenkörpers mit dem Ziel, Magnetisierungseffekte festzustellen, hat keine auffälligen Anomalien gezeigt.

Abschließende Bemerkungen

Die bohrlochgravimetrischen Messungen in der KTB-Pilotbohrung konnten planmäßig und ohne Störungen durchgeführt werden. Die erzielten Meßergebnisse zeigen deutliche Dichtevariationen und auffällige Änderungen im Verlauf der Bouguer-Anomalien, die mit den durchteuften Formationsgrenzen übereinstimmen. Damit sind auf jeden Fall Strukturen in der Umgebung der Bohrung erfaßt worden. Da Richtungen im Streichen mit einem Vertikalprofil alleine nicht bestimmt werden können, sollte versucht werden, mit Hilfe eines weiteren Vertikalprofils in der Hauptbohrung zu dreidimensionalen Modellvorstellungen der umliegenden Strukturen zu gelangen.

Die Messungen in der Pilotbohrung und die vom Kontraktor durchgeführte Datenbearbeitung haben gezeigt, daß noch mehrere Punkte zu beachten sind:

- Bohrlochneigungen führen nicht nur zu Teufenfehlern sondern auch zu Bohrlochabweichungen von der Vertikalen. Damit wird das Gravimeter auch horizontal verschoben, was zu lateralen Abstandsfehlern führen kann.
- Es ist unbedingt zu empfehlen - auch mit Hinblick auf neue Messungen in der Hauptbohrung, die Bestimmung der topographischen Effekte mit modernen Verfahren durchzuführen (z. B. digitalisierte Topographie) und nicht eine konstante Reduktionsdichte zu verwenden.
- Die Genauigkeitsuntersuchungen haben gezeigt, daß eine bessere Auflösung der Dichteänderungen bei Punktabständen kleiner 50 m (auch kleiner 25 m) möglich ist. Dies sollte bei neuen Messungen berücksichtigt werden.
- Mit einer Teufe von 4000 m ist die Grenze der Einsetzbarkeit eines Bohrlochgravimeters noch nicht erreicht. In der Hauptbohrung besteht die Möglichkeit, je nach Druck- und Temperaturbedingung längere Vertikalprofile vermessen zu können. Damit würde sich die laterale Eindringtiefe wesentlich vergrößern lassen.

LITERATURVERZEICHNIS

- BEYER, L. A., 1987: Porosity of unconsolidated sand, diatomite and fractured shale reservoirs, South Belridge and West Cat Canyon oil fields, California. In: Exploration for Heavy Crude Oil and Natural Bitumen (R.F. Meyer, ed. al). AAPG Studies in Geology, Tulsa. 395-413.
- EDCON, Inc., 1989: Report on a borehole gravity survey in the KTB well in Bavaria, FRG. Denver.
- HAMMER, S., 1939: Terrain corrections for gravimeter stations. Geophysics 4, 184-193.
- LONGMAN, J. M., 1959: Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun. J. Geophys. Res. 64, 2351-2355.

Blockdichte in g/cm³

Teufe in Meter	1. Messung	2. Messung	3. Messung	Mittelwert	Fehler
3554,3	2,674	2,722	2,662	2,686	0,032
3559,3	2,662	2,662	2,660	2,661	0,001
3564,3	2,679	2,665	2,665	2,670	0,007
3569,3	2,712	2,724	2,715	2,717	0,005
3574,3	2,829	2,834	2,817	2,827	0,007
3579,3	2,882	-	2,813	2,848	0,035

Tab. 1: Werte der Blockdichte für Wiederholungsmessungen im Teufenintervall 3554,3 bis 3584,3 m.

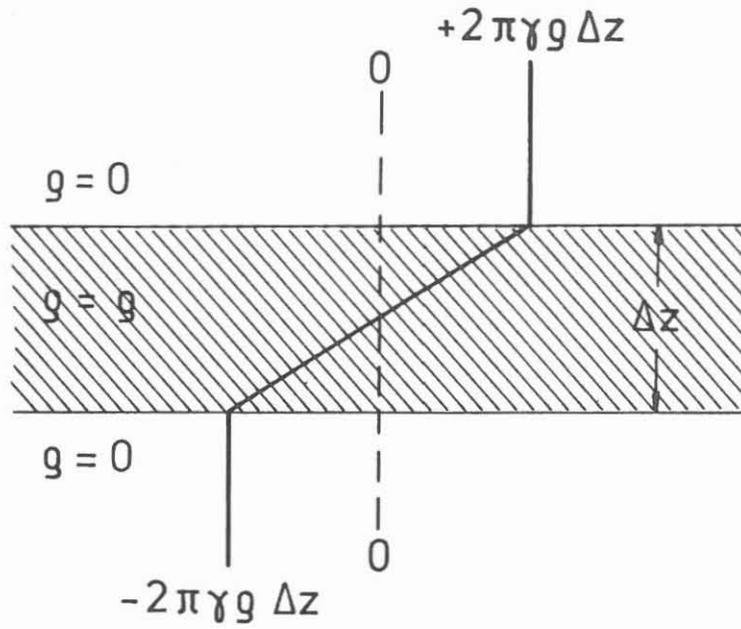


Abb. 1: Verlauf der Gravitationswirkung einer Bouguer-Platte oberhalb, in und unterhalb der Platte.

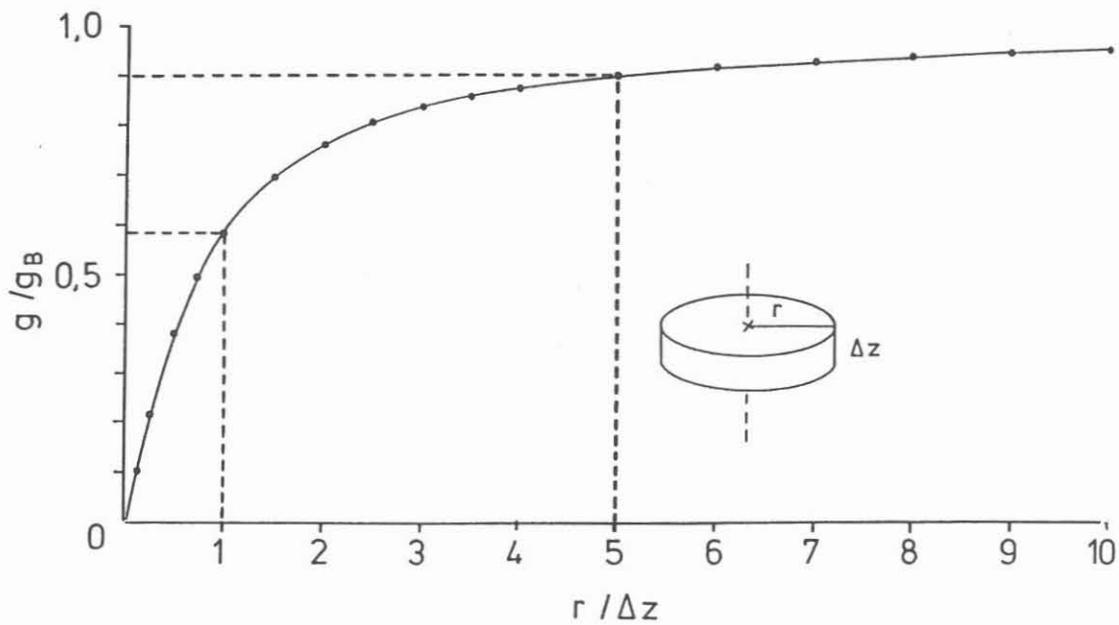
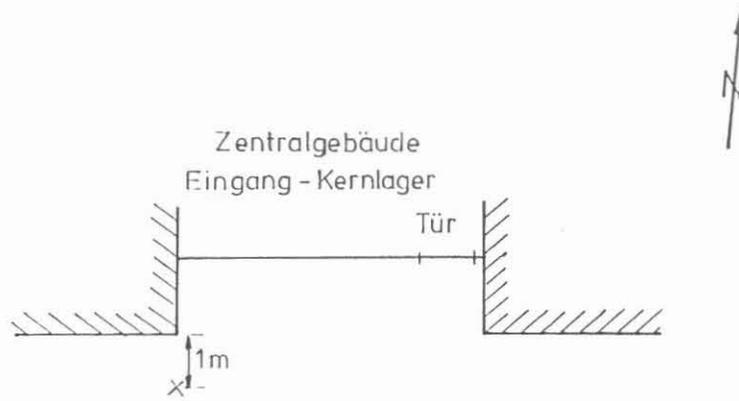
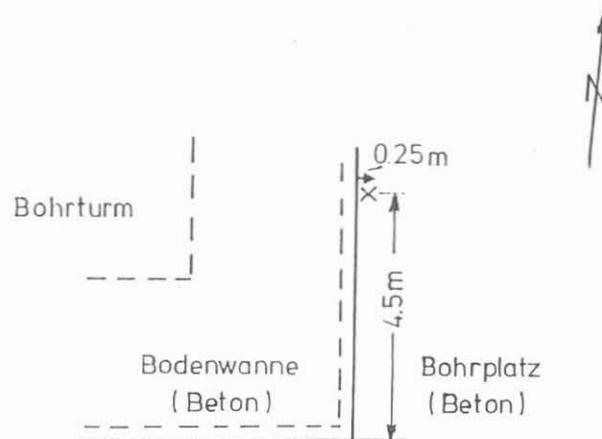


Abb. 2: Gravitationswirkung einer Kreisscheibe zur Bestimmung der lateralen Eindringtiefe.



Lageskizze BP1



Lageskizze BP 2

Abb. 4: Lageskizze der gravimetrischen Basispunkte BP1 und BP2 auf dem Bohrplatz KTB-Oberpfalz.

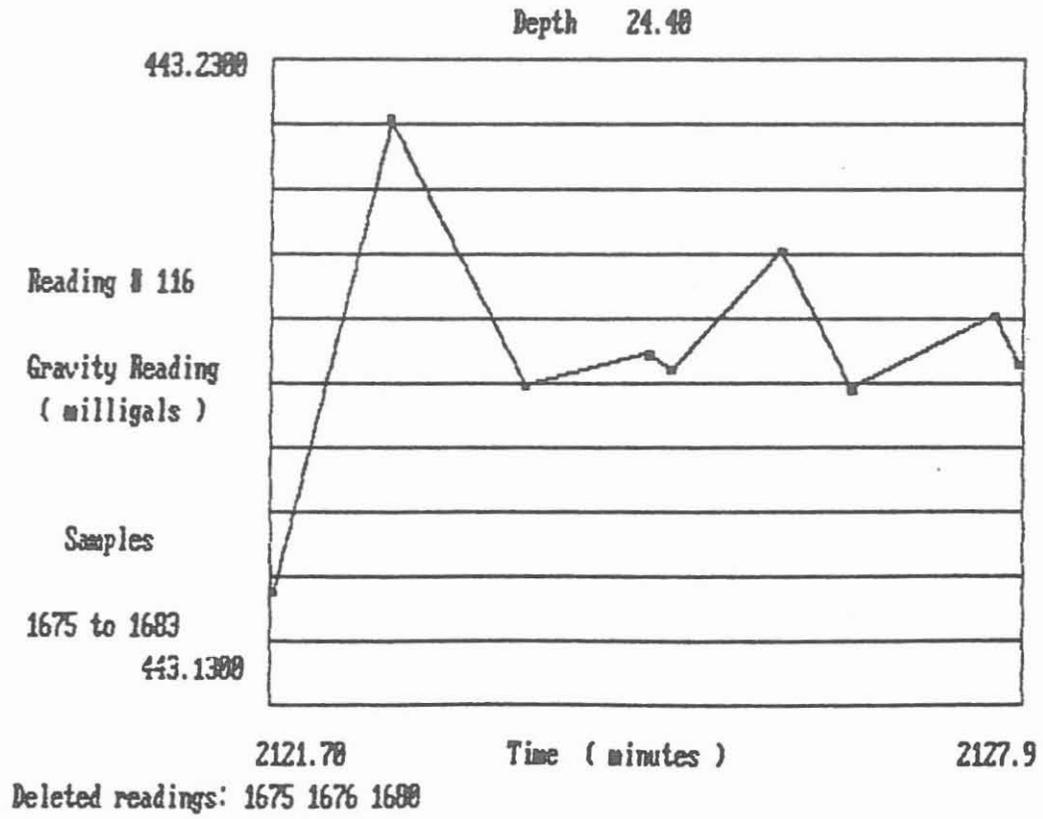


Abb. 5: Beispiel für ein "gravity reading diagram" aus dem EDCON-Bericht.

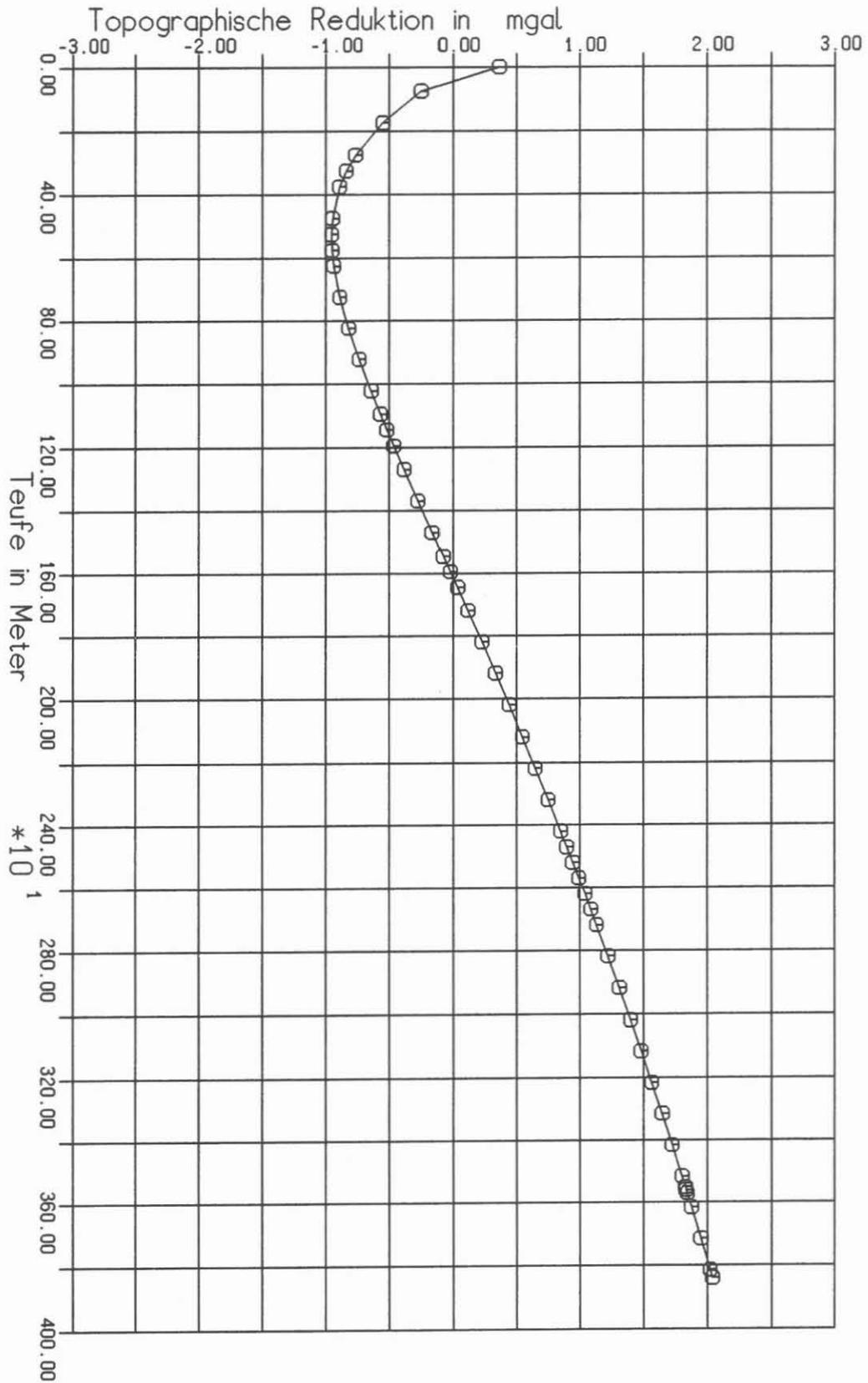


Abb. 6: Verlauf der topographischen Reduktion für das Vertikalprofil der Pilotbohrung.

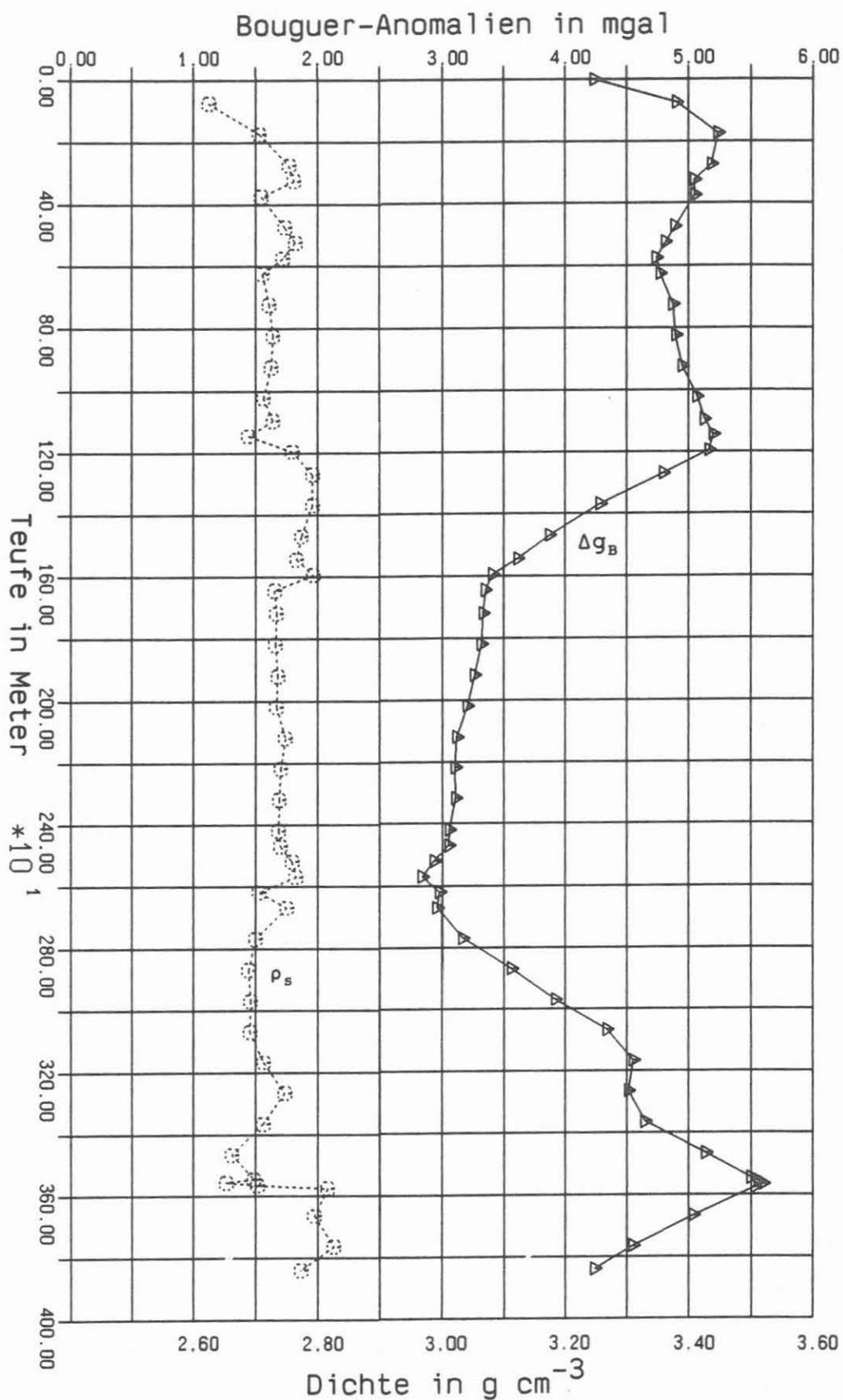


Abb. 7: Vertikalprofil der scheinbaren Blockdichte ρ_s und der Bouguer-Anomalien Δg_B (Reduktionsdichte $\rho = 2,726 \text{ g cm}^{-3}$).