

---

BERECHNUNG VON BOUGUERANOMALIEN MIT VARIABLEM DICHTEANSATZ

B.Meurers, P.Steinhauser, D.Zych

Uni Wien

---

## 1. Einleitung

Bei gravimetrischen Untersuchungen im Hochgebirge stellen die extremen topographischen Gegebenheiten in mehrfacher Hinsicht hohe Anforderungen hinsichtlich der korrekten Reduktion der Messdaten. Dies gilt insbesondere für die adäquate Approximation sowohl der Topographie als auch der Dichteverteilung durch mathematische Modelle. Hinsichtlich der topographischen Reduktion macht das extrem variable Hochgebirgsrelief die Verwendung eines hochauflösenden Verfahrens (Steinhauser et al., 1989) erforderlich. Dabei hat es sich von vornherein als zweckmäßig erwiesen, Seen und Gletscher in der näheren Umgebung von Schwerestationen wegen ihres extrem großen Dichtekontrastes zu den anderen Gesteinskörpern gesondert im Reduktionsmodell zu berücksichtigen (Ruess, 1985). Hierbei ist die Wassertiefe einfach bestimmbar, aber auch die Eismächtigkeit der Gletscher kann mit geringem Aufwand mittels empirischer Formeln abgeschätzt werden, sofern sie nicht direkt aus seismischen Messungen resultiert (Steinhauser et al., 1984).

Im folgenden soll nun die Auswirkung der unterschiedlichen Oberflächendichte der geologischen Strukturen auf die Massenreduktion untersucht werden. Dabei ist die Dichteverteilung auch im Hinblick auf topographisch bedingte Effekte, die infolge großer Stationshöhenunterschiede das Anomalienbild systematisch verzerren, zu diskutieren.

## 2. Problemstellung

Für den Fall einer einheitlichen, von den Ortskoordinaten unabhängigen Dichteverteilung gilt für die Bougueranomalie  $\delta g''$  der bekannte Ausdruck:

$$(1) \quad \delta g''(x, y, z) = g(x, y, z) - \Gamma(x, y) + \delta g_{\text{niv}}(x, y, z) - \delta g_{\text{M}}(x, y, z)$$

mit

$$(2) \quad \delta g_{\text{M}}(x, y, z) = \delta g_{\text{BPL}}(z) - \delta g_{\text{top}}(x, y, z) \quad \text{Massenreduktion}$$

In Gl. (2) ist der sogenannte Bouguerplattenterm

$$\delta g_{\text{BPL}} = 2\pi f \sigma z (+ \dots)$$

enthalten, der im Falle einer unendlich ausgedehnten, ebenen Bouguerplatte exakt, bei der sphärische Platte in erster Näherung durch eine lineare Funktion der Stationshöhe  $z$  definiert wird. Im allgemeinen hängt aber auch die topographische Korrektur  $\delta g_{\text{top}}$  von der Höhe ab, wobei sich jedoch keine funktionalen Beziehungen angeben lassen. In jedem Fall wird durch sie der Betrag der gesamten Massenreduktion systematisch vermindert, sodaß über den Bouguerplattenterm die maximal möglichen Reduktionsanomalien abgeschätzt werden können, die bei Annahme eines konstanten Dichtefehlers entstehen. Sie erreichen bzw. überschreiten die Größenordnung lokaler Bougueranomalien, weshalb ein korrektes Modell für die Verteilung der Oberflächendichten vor allem in Gebieten mit ausgeprägtem topographischen Relief und großen Stationshöhendifferenzen notwendig ist.

Üblicherweise wird dieser Fehler in erster Näherung dadurch vermieden, daß die Massenreduktionen mit der im Untersuchungsgebiet herrschenden Durchschnittsdichte durchgeführt werden. Dabei hat sich gezeigt, daß die Krusten-Standarddichte von  $2.67 \text{ g/cm}^3$  im Be-

reich der Ostalpen für die Oberflächengesteine als repräsentativ angesehen werden kann (Steinhauser, Pustisek, 1987). Dieser Ansatz einer Durchschnitts-Reduktionsdichte hat sich bei regionalen Schwereuntersuchungen bestens bewährt. Für Fragestellungen der angewandten Gravimetrie, wo auch kleinräumige lokale Anomalien richtig erfaßt werden müssen, besitzt dieses Verfahren im Hochgebirge jedoch nicht das erforderliche Auflösungsvermögen. In diesem Fall ist es erforderlich, die Dichteverteilung der geologischen Körper oberhalb des Reduktionsniveaus im einzelnen zu berücksichtigen.

Abb. 1 zeigt schematisch die zu erwartende Auswirkung eines gegenüber der wahren Dichte um den Dichtefehler  $\pm\delta\sigma$  veränderten Dichteansatzes. Bei der Massenreduktion  $M$  und der Bougueranomalie  $BA$  werden für extreme Stationslagen (Berggipfel, Tallage) entsprechende Fehler  $\delta M$  und  $\delta BA$  hervorgerufen. Bei positiver Dichtedifferenz tendieren die Bougueranomalien der hoch gelegenen Gravimeterstationen zu negativen, die Talstationen zu positiven Fehlern und umgekehrt.

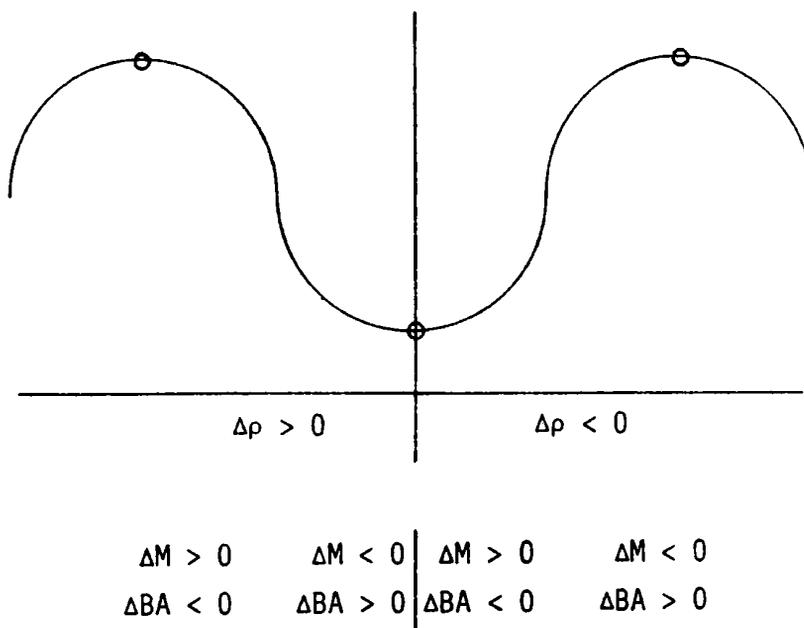


Abb. 1: Auswirkung von Dichtefehlern auf die Massenreduktion

### 3. Fallstudie

An Hand eines Beispiels soll in der Folge die Auswirkung eines der Oberflächengeologie entsprechenden variablen Dichteansatzes auf das Bougueranomalienbild diskutiert werden. Das verwendete Datenmaterial stammt aus einer gravimetrischen Detailuntersuchung im Bereich der Nördlichen Kalkalpen Österreichs (Zych, 1988), in dem auf etwa 4200 km<sup>2</sup> insgesamt 3300 Schwerestationen unter extremen Gebirgsverhältnissen flächenhaft verteilt sind. Der besseren Übersicht wegen wurde hieraus ein besonders charakteristisches Testgebiet ausgewählt, auf das ungefähr 150 Schwerestationen entfallen. Abb. 2 zeigt die aufgrund der Stationshöhen interpolierte Höhenverteilung des 210 km<sup>2</sup> großen Testgebietes. Die Schwerestationen liegen demnach in einem Höhenintervall von 700 bis 2400 m, womit die Bandbreite der Stationshöhen wohl als extrem groß klassifiziert werden kann.

Die topographische Korrektur wurde durch Quaderapproximation des Geländes mit entfernungsabhängigen Grundflächen unter Verwendung eines speziell auf die Erfordernisse in hochalpinem Gelände abgestimmten Höhenmodells (Ehrismann, Lettau, 1971; Götze et al., 1980; Ruess, 1985) berechnet. Zur Vermeidung von systematischen Approximationsfehlern bei extrem rauhem Relief in unmittelbarer Stationsumgebung wurden geeignete numerische Verfahren eingesetzt (Granser, 1987; Meurers, 1986).

### 4. Geländemodell

Die Basis für den Ansatz der Reduktionsdichte bildet ein digitales Dichtemodell für die Oberflächengesteine in Österreich (Granser et al., 1983; Steinhauser et al., 1984), dem vorwiegend direkte (ca. 6000 Gesteinsproben), aber auch indirekte Methoden (Nettletonverfahren, Seismik) zur Dichtebestimmung zugrunde liegen. Die Detailauflösung im Untersuchungsgebiet erfolgte durch zusätzliche, systematische Probenentnahme während der gravimetrischen Feld-

messungen. Abb. 3 zeigt den der Abb. 2 entsprechenden Ausschnitt des Dichtemodells . Die Rastergröße beträgt analog zum Geländehöhenmodell der Ostalpen 370 m x 390 m. Im gewählten Ausschnitt treten hauptsächlich drei Dichteprovinzen auf, die den Dolomitingesteinen ( $\sigma=2.82 \text{ g/cm}^3$ ), den Kalken ( $\sigma=2.70 \text{ g/cm}^3$ ) sowie den niedrigen Dichtewerten der Talfüllungen ( $\sigma=2.30 \text{ g/cm}^3$ ) zuzuordnen sind.

Da die Talfüllungen im allgemeinen nicht bis zum Reduktionsniveau reichen, muß zusätzlich eine Modellannahme über die Tiefenstruktur dieser Sedimente getroffen werden. Entsprechende Mächtigkeitsangaben können dabei zusätzlich mit Hilfe einzelner seismischer Profile und aus Bohrungen gewonnen werden.

Aufgrund von Überschlagsrechnungen erweist es sich als ausreichend, nur jene Talfüllungen zu erfassen, deren Sedimentmächtigkeit 25 m übersteigt. Über die Dichte der unterhalb der Talsedimente liegenden Gesteine existieren naturgemäß keine Informationen. Diese Grundgebirgsdichte muß daher aus den an den seitlich unmittelbar anschließenden Dichteprovinzen extrapoliert werden. Um diese Abschätzung zu objektivieren, erfolgt sie durch kreisförmige Mittelbildung über die von der Talfüllungsdichte abweichenden Werte, die schrittweise solange auf den jeweils nächsten Ring von Rasterelementen erweitert wird, bis mindestens 5 Elemente für die Mittelwertbildung der Grundgebirgsdichte verfügbar sind.

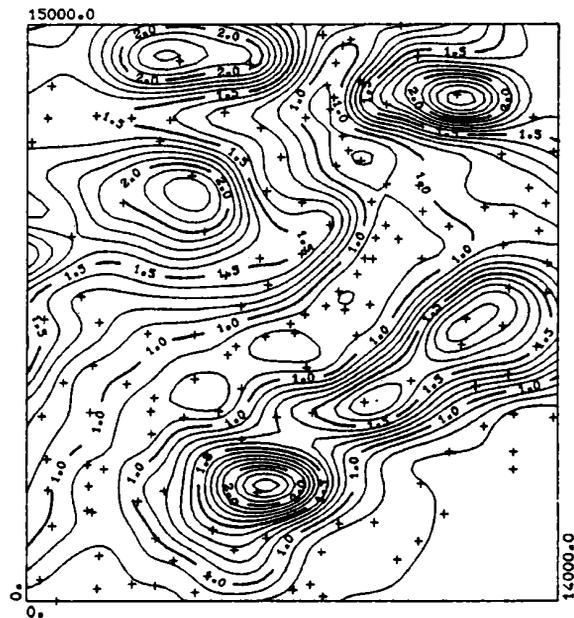


Abb. 2: Stationshöhenverteilung des Testgebietes

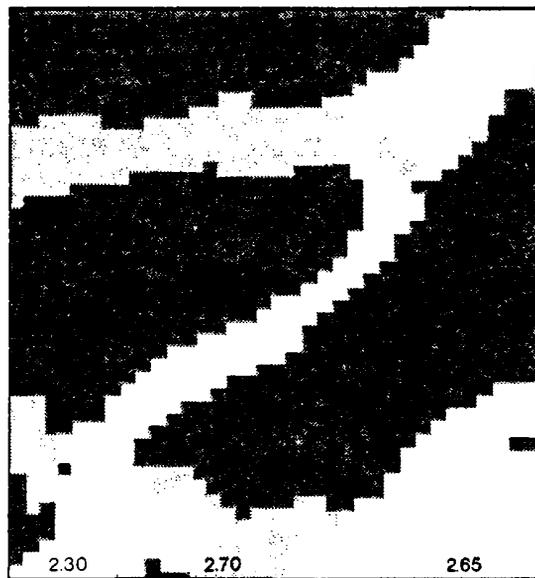


Abb. 3: Verteilung der Oberflächendichte im Testgebiet

## 5. Berechnungsverfahren

Da die Dichteverteilung digital im selben Raster wie das Höhenmodell vorliegt, kann die Berechnung der Bougueranomale mit variabler Dichte mit dem gleichen Verfahren erfolgen, das auch zur Bestimmung der topographischen Korrektur für die Standardbougueranomale herangezogen wird. Der einzige Unterschied besteht darin, daß die Massenkorrektur in einem Zug durch Abtragung aller topographischen Massen bis zum Reduktionsniveau berechnet wird, wobei jeder Reduktionssäule der zugehörige Dichtewert zugeordnet wird. In Bereichen, wo Talfüllungen oder Seen existieren, werden dreidimensionale Dichtemodelle verwendet, in dem die Rastersäulen entsprechend unterteilt werden. Im Sinne einer geologischen Korrektur werden gegebenenfalls stets auch jene Anteile der Talfüllungen berücksichtigt, die unterhalb des Reduktionsniveaus liegen.

Grundsätzlich ist zu betonen, daß die Berechnung der dichtekorrigierten Bouguerschwere bereits einen Interpretationsschritt darstellt, da über die Dichteverteilung im Untergrund bis zum Reduktionsniveau Annahmen getroffen werden müssen, die zweifellos Modellcharakter besitzen, und nur teilweise aus Oberflächenaufschlüssen abgeleitet werden können. Das hier verwendete Modell sieht mit Ausnahme der Talfüllungen und Seen vor, daß in jeder Dichteprovinz von der Oberfläche bis zum Reduktionsniveau die Dichte einen einheitlichen, konstanten Betrag aufweist und daß die seitlichen Dichtegrenzen, die durch die Massensäulen des Reduktionsrasters definiert sind, vertikal verlaufen. Dies stellt selbstverständlich nur eine erste Approximation der tatsächlichen Verhältnisse dar. Praktische Versuche haben aber mehrfach die Brauchbarkeit dieses Ansatzes bewiesen, insbesondere im nordalpinen Überschiebungsgebiet (Zych, 1969; Granser, 1982). Um entstehende Approximationsfehler möglichst klein zu halten, kann es zweckmäßig sein, das Reduktionsniveau in Hochlage zu bringen.

## 6. Diskussion der Ergebnisse

In der Bouguerschwereverteilung der nördlichen Kalkalpen ist in vielen Talbereichen eine enge Korrelation mit der Topographie zu erkennen. Dies ist einerseits durch die in diesen Tälern abgelagerten quartären, teils auch tertiären Sedimente, andererseits durch mit dem Talverlauf zumindest teilweise übereinstimmende Störungszonen interpretierbar.

Der Vergleich der mit variablem Dichteansatz berechneten Daten mit den Werten der Standardbougueranomalie zeigt, daß die durch die Talfüllungen verursachten Anomalien in ihrer Amplitude deutlich reduziert werden. Daneben ergeben sich im gesamten Untersuchungsgebiet eine beträchtliche Niveauverschiebung und Glättung des Isanomalenbildes. Die Bandbreite der in den Tiroler Kalkalpen auftretenden Bougueranomalie-Differenzen ist mit etwa 22 mGal außerordentlich hoch. Die flächenhafte Verteilung dieser Differenzen im Testgebiet stellt Abb. 4 dar. Der Vergleich mit Abb. 3 zeigt die erwartungsgemäß enge Korrelation mit den Dichteprovinzen.

Außerdem wurde die Bougueranomalie mit zwar konstanter Standarddichte von  $\sigma=2.67 \text{ g/cm}^3$ , jedoch zusätzlicher geologischer Korrektur der Talfüllungen bestimmt. Die Amplituden der mit den Tälern zusammenfallenden lokalen Anomalien sind dementsprechend deutlich reduziert, es bleiben allerdings größere Restanomalien als bei der vorher diskutierten umfassenden Dichtereduktion bestehen. Die Verbesserungen gegenüber dem Standardverfahren betragen immer noch bis zu 6 mGal und werden in Abb. 5 dargestellt. Erwartungsgemäß sind nur innerhalb der Bereiche mit großen Sedimentmächtigkeiten signifikante Differenzen vorhanden. Außerhalb der Talbereiche sind statistische Schwankungen zu beobachten, die auf Unterschiede im Berechnungsverfahren für die Massenkorrekturen bei der Bestimmung der Standardbougueranomalie zurückzuführen sind. Die Beschränkung der Talfüllungskorrekturen auf Talbereiche mit Sedimentmächtigkeiten von mehr als 25 m wird durch dieses Resultat gerechtfertigt.

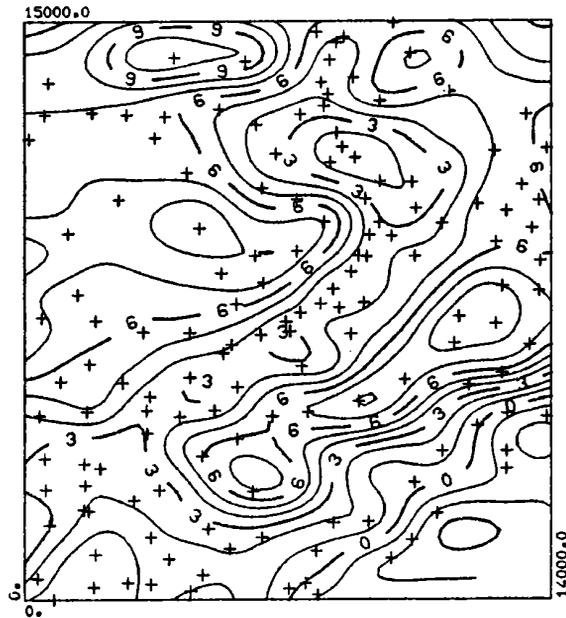


Abb. 4: Differenz zwischen der Standard- und der mit variablem Dichteansatz (Niveau: 0 m) berechneten Bougueranomalie

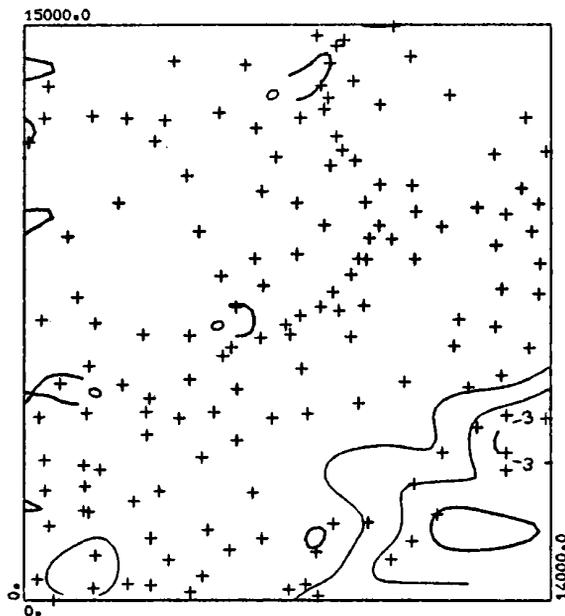


Abb. 5: Differenz zwischen der Standard- und der ausschließlich bezüglich der Talfüllungen geologisch reduzierten Bougueranomalie

Abb. 6 zeigt schließlich die Differenz zwischen der Bouguerschwere mit variablem Dichteansatz und der nur bezüglich der Talfüllungen geologisch reduzierten Standardbougueranomalie. Obwohl in beiden Berechnungen die Wirkung der Talsedimente in völlig gleicher Weise korrigiert wurde, zeichnen sich in dieser Darstellung deutlich mit der Stationshöhenverteilung gekoppelte Strukturen ab. Dieser Effekt ist daher ausschließlich auf die stark unterschiedlichen Höhen der Schwerestationen (400-2600 m) zurückzuführen und übertrifft an vielen Stellen die Gravitationswirkung der Talfüllungen bei weitem. In Abb.7 werden die Unterschiede zwischen beiden Reduktionsverfahren für das gesamte Datenmaterial dargestellt. Deutlich lassen sich hier die dominierenden Dichteprovinzen und bestehende Höhenabhängigkeiten an den linienförmigen Verdichtungen der Punktwolke entlang jener Bouguerplattenterme erkennen, die den entsprechenden Dichtewerten zuzuordnen sind.

Die Beseitigung der Reduktionsanomalien, die wegen ihrer Höhenabhängigkeit eine Verstärkung ausgeprägt hochfrequenter Anteile im Spektrum der Schwereanomalie erwarten lassen, sollte daher zu einer Glättung des Schwerebildes führen. Die Verbesserung durch das gewählte Dichtemodell kann daher durch Anwendung von Feldtransformationen überprüft werden, deren Filteroperatoren Hochpasseigenschaften aufweisen, wie dies für die Vertikalgradientenfelder gilt (Abb. 8). Lokale Vertikalgradientenanomalien werden in ihrer Amplitude wesentlich reduziert, wenn die Bougueranomalie mit einem variablen Dichteansatz berechnet wird (Abb. 8b). Insbesondere ist die räumliche Koinzidenz von lokalen Extrema des Vertikalgradienten der Standardbougueranomalie (Abb. 8a) mit topographischen Strukturen auffällig, während der regionale Trend der Isanomalien vom Dichteansatz weitgehend unabhängig ist. Dieser Vergleich kann daher als Hinweis auf die Brauchbarkeit des verwendeten Dichtemodells gesehen werden.

Zur Untersuchung langwelliger Schwerefeldkomponenten, die dem regionalen Trend zugeordnet werden können, wurden beide Bouguer-anomaliefelder einer Tiefpassfilterung (Wellenlängenfilter) mit

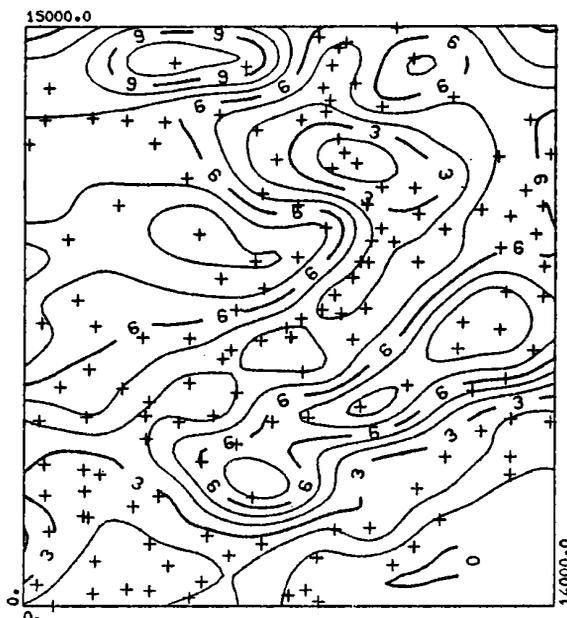


Abb. 6: Differenz zwischen Bougueranomalie mit variablem Dichteansatz und der ausschließlich bezügl. der Talfüllungen reduzierten Schwereverteilung

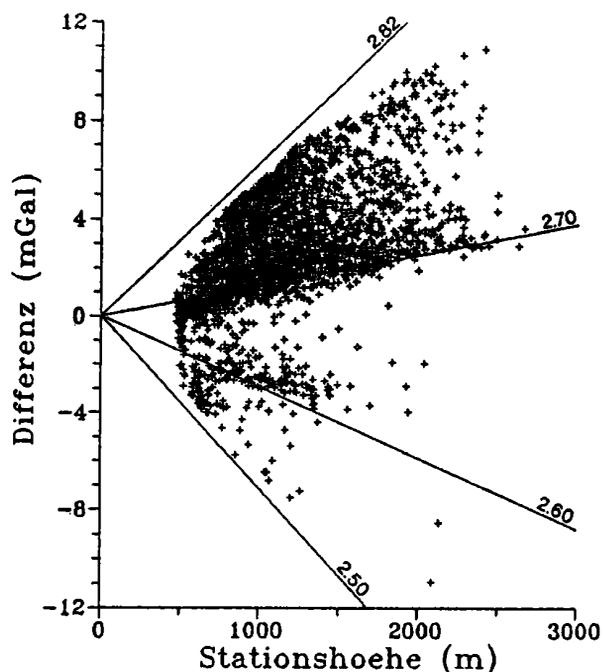


Abb. 7: Differenz zwischen Bougueranomalie mit variablem Dichteansatz und der ausschließlich bezügl. der Talfüllungen reduzierten Schwereverteilung in den Tiroler Kalkalpen

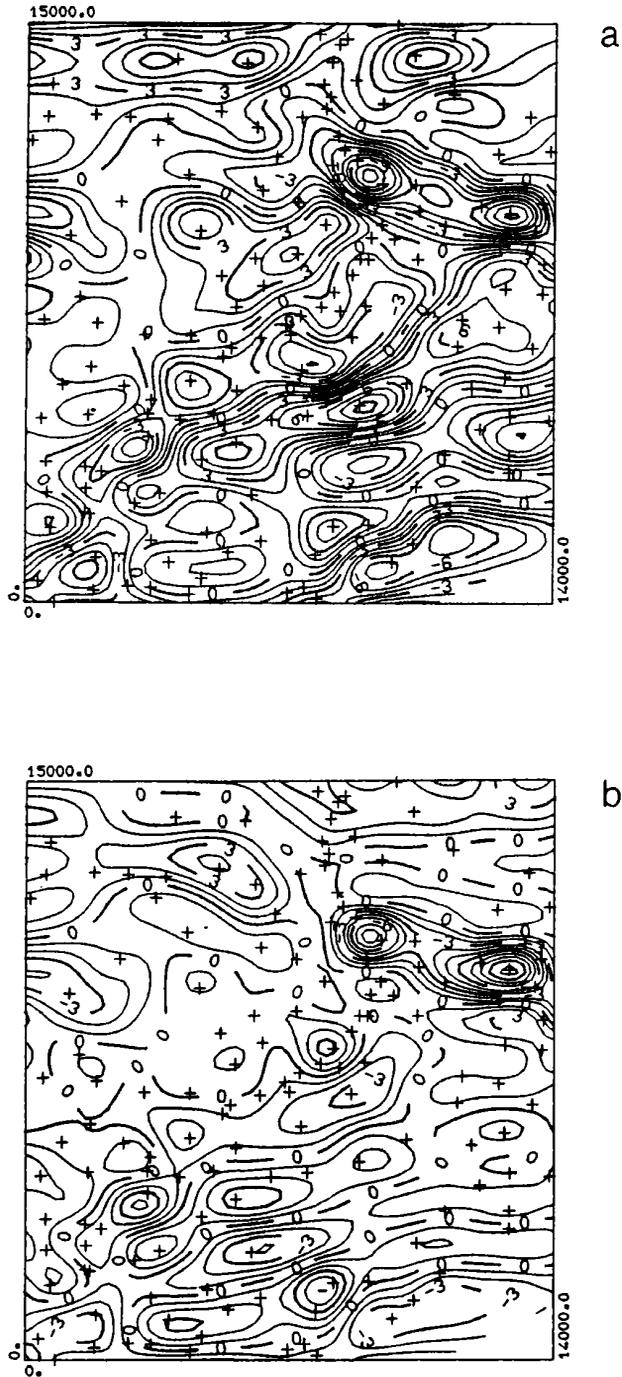


Abb. 8: Vertikalgradientenfeld  
a Standardbougueranomalie  
b Bougueranomalie mit  
variablem Dichteansatz

einer Grenzwellenlänge von 5 km unterzogen. Der Vergleich wird in Abb. 9a (Standardbougueranomalie) und Abb. 9b (Bougueranomalie mit variablem Dichteansatz) dargestellt. Im ersten Fall sind deutlich höherfrequente Anteile zu beobachten. Dies entspricht dem oben konstatierten Resultat. Darüberhinaus zeigen sich allerdings beträchtliche Unterschiede in der Amplitude des Regionalfeldes, dessen Bandbreite von 20 mGal bei der Standardbougueranomalie auf etwa 30 mGal, d.h. um 50%, anwächst. Hieraus erwachsen wesentliche Konsequenzen für die Erstellung von Modellen in tieferen Krustengebieten bei der quantitativen Interpretation des Trendfeldes.

## 7. Schlußfolgerungen

Das hier diskutierte Beispiel zeigt, daß die extremen topographischen Verhältnisse im Hochgebirge hohe Anforderungen hinsichtlich einer den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechenden Reduktion von Schweredaten stellen. Es ist daher nicht ausreichend, für die Massenreduktionen die Krusten-Standarddichte von  $2.67 \text{ g/cm}^3$  zu verwenden. Bei der topographischen Korrektur werden dadurch wegen der großen Höhenunterschiede verstärkt Reduktionsanomalien hervorgerufen, wenn die wahre Gesteinsdichte von der Standarddichte stärker abweicht.

Das an dem Testbeispiel demonstrierte Verfahren gestattet es, Talfüllungen, Seen und Gletschermassen, also unmittelbar an der Oberfläche befindliche Strukturen mit einem großen Dichtekontrast zu ihrer Umgebung, durch Quader mit einer Grundfläche von etwa  $370 \times 390 \text{ m}$  dreidimensional zu modellieren, während die seitlichen Begrenzungen der Dichteprovinzen gebirgsbildender Strukturen entlang den Massensäulen des Reduktionsrasters bis zum Bezugsniveau vertikal verlaufen. Das Testbeispiel beweist, daß es nicht ausreicht, nur die Talfüllungen mit der wahren Dichte zu korrigieren.

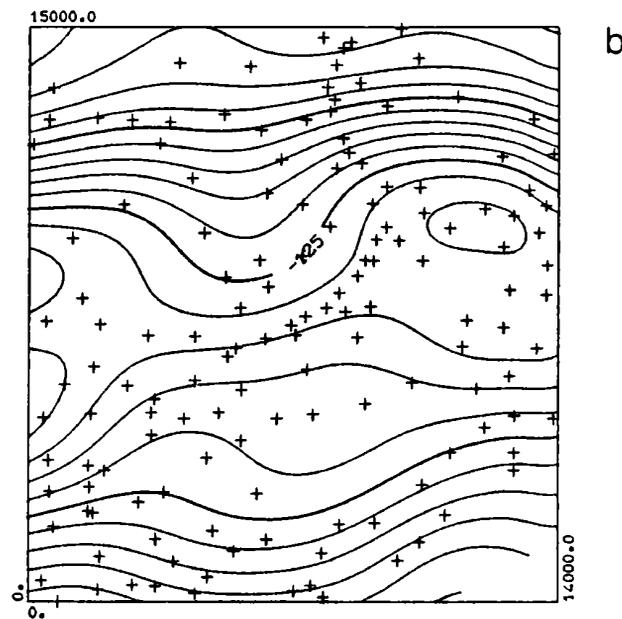
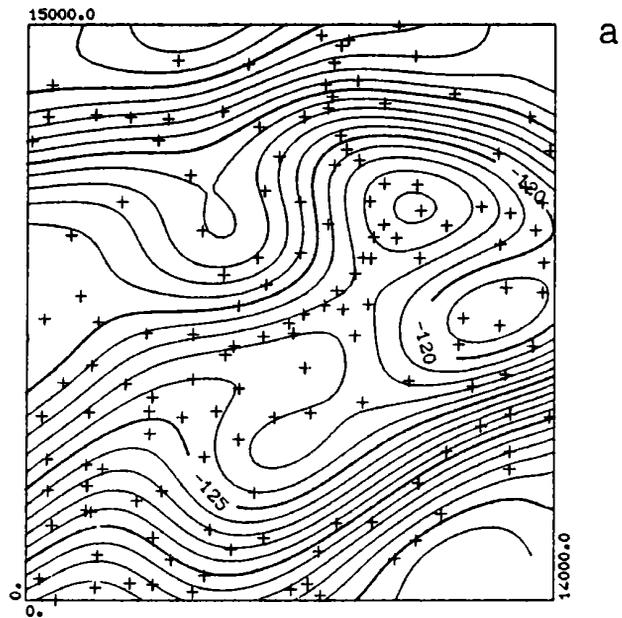


Abb. 9: Regionalfeld (Wellenlängenfilterung)  
a Standardbougueranomalie  
b Bougueranomalie mit  
variablem Dichteansatz

Wegen ihrer großen Volumina können auch die gebirgsbildenden Gesteine trotz der vergleichsweise geringen Dichtekontraste beträchtliche Reduktionsanomalien hervorrufen.

Um ein korrektes Dichtemodell zu erhalten, ist es erforderlich, sämtliche verfügbaren Informationen (Seismische Angaben, Bohrlochdaten, Inversion von Schweredaten) zu verwerten, und vor allem eine möglichst systematische und umfassende Probenentnahme unabhängig von den geologischen Verhältnissen vorzunehmen.

Die Berechnung der Massenreduktionen unter Berücksichtigung der Dichteverteilung der Oberflächengesteine verhindert die bei konventionellen Reduktionsverfahren infolge der Oberflächengeologie auftretenden Reduktionsanomalien, die von Strukturen unterhalb des Reduktionsniveaus hervorgerufene Schwerestörungen bis zur Unkenntlichkeit maskieren können.

## 8. Literatur

Ehrismann, W., Lettau, O.: Topographische Reduktion von Schwere-messungen in der näheren und weiteren Stationsumgebung. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 20, 383-396, 1971.

Götze, H.J., Steinhauser, P., Rosenbach, O.: Die Bestimmung der mittleren Geländehöhen im Hochgebirge für die topographische Reduktion von Schweremessungen. Ber. Tiefb. Ostalp., 9, 1980.

Granser, H.: Allgemeine Feldfortsetzung und Verfahren zur Dichte-bestimmung angewandt auf gravimetrische Untersuchungen im Hochgebirge. Unveröff. Dissertation, Univ. Wien, 1982.

Granser, H.: Topographic reduction of gravity measurements by numerical integration of boundary integrals. Geoph. prosp., 35, 71-82, 1987.

Granser, H., Hösch, K., Steinhauser, P., Zych, D.: Über das Dichte-modell in Österreich. in: Geod. Arb. Österreichs f. d. int. Erdmessung, III, 159-182, 1983.

Meurers, B.: Improvement of terrain corrections by applying numerical integration techniques and bicubic spline interpolation. Boll. Geof. Teor. Appl., 28, 111/112, 227-234, 1986.

- Ruess, D. : Berücksichtigung von Wasser- und Eismassen bei der topographischen Reduktion.  
Ber. Tiefb. Ostalp., 12, 175-177, 1985.
- Steinhauser, P., Meurers, B., Ruess, D.: Gravity investigations under extreme mountainous conditions. Zum Druck eingereicht, 1989.
- Steinhauser, P., Pustisek, A.: Estimation of the mass deficit of the Eastern Alps. Geod. Arb. Österreichs f. d. int. Erdmessung, Neue Folge, IV, 111-125, 1987.
- Steinhauser, P., Ruess, D., Zych, D., Haitzmann, H., Walach, G.: The geoid in Austria: Digital models of mean topographic heights and rock densities. Proc. XVIIIth Gen.Ass. IUGG, IAG, Vol. 1, 322-338, 1984.
- Zych, D.: Korrekturprobleme bei Schweremessungen im Alpenbereich. Erdöl u. Erdgas, 85, 3, 70-80, 1969.
- Zych, D.: 30 Jahre Gravimetermessungen der ÖMV Aktiengesellschaft in Österreich und ihre geologisch-geophysikalische Interpretation. Arch.f.Lagerst.forsch.Geol.B.-A., 9, 155-175, 1988.