

Berechnung der Bougueranomalie im Hochgebirge unter Anwendung eines geologischen Dichtemodells

Von BRUNO MEURERS, PETER STEINHAUSER & DIETHARD ZYCH*)

Mit 14 Abbildungen und 1 Tabelle

*Bougueranomalie
Reduktionsanomalie
Massenkorrektur
Topographische Korrektur
Dichteverteilung
Geologisches Dichtemodell*

Inhalt

Zusammenfassung	99
Abstract	99
1. Einleitung	99
2. Problemstellung	100
3. Fallstudie	101
4. Geländemodell	102
5. Berechnungsverfahren	102
6. Diskussion der Ergebnisse	103
7. Verbesserung durch variablen Dichteansatz	105
8. Schlußfolgerungen	106
Dank	109
Literatur	109

Zusammenfassung

Bei Schwerfelduntersuchungen in Gebieten mit ausgeprägtem topographischen Relief müssen zur Vermeidung von Reduktionsanomalien sowohl hinsichtlich der numerischen Approximation der Massengeometrie als auch in bezug auf die Dichteverteilung der Oberflächengesteine sehr präzise Reduktionsmethoden angewendet werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Gravimeterstationen ein breites Höhenintervall überdecken. Die folgende Arbeit gibt quantitative Abschätzungen für die Reduktionsfehler bei Berechnung der Massenkorrekturen mit konstanter und einheitlicher Dichte. Deutliche Verbesserungen werden bei Verwendung detaillierter Dichtemodelle erzielt, wie an Hand einer Fallstudie aus dem Bereich der Nördlichen Kalkalpen Österreichs gezeigt wird. Das dazu erstellte Dichtemodell für die Oberflächengesteine ist zwei-dimensional mit Ausnahme von Gebieten mit extrem großen Dichtekontrasten (alpine Täler und Becken, Seen, Gletscher), wo durch die Angabe der entsprechenden Mächtigkeiten dreidimensionale Strukturen entstehen. Die Vorteile dieser Methode werden durch Vergleich von Feldtransformationen der mit konstanter bzw. variabler Dichte berechneten Schwereverteilungen nachgewiesen.

Abstract

The investigation of the gravity field in areas with rugged topography requires very accurate topographic reduction methods concerning both the numerical approximation of the mass geometry and the density distribution in order to avoid reduction anomalies. This is especially true if the gravity sta-

tions are located within a wide elevation range. The following paper shows quantitative estimations of reduction errors due to calculating the mass correction with a constant density. Improvements are obtained by the use of detailed density models for computing the Bouguer gravity field as shown by a case history from the Northern Calcareous Alps of Austria. A two-dimensional density model is used except of areas with extremely complex density contrasts where three-dimensional modeling is performed (Alpine valleys, basins, lakes and glaciers). The advantages of this procedure are proved by comparing some field transformations of the Bouguer anomalies calculated with constant and variable density respectively.

1. Einleitung

Bei gravimetrischen Untersuchungen im Hochgebirge stellen die extremen topographischen Gegebenheiten in mehrfacher Hinsicht hohe Anforderungen bezüglich der korrekten Reduktion der Messdaten. Dies gilt 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 erforderlich (STEINHAUSER et al., 1989). 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 kann die Wassertiefe einfach bestimmt werden, aber auch die

*) Anschrift der Autoren: Dr. BRUNO MEURERS, Univ.-Prof. Dr. PETER STEINHAUSER, Univ.-Prof. Dr. DIETHARD ZYCH, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien, Hohe Warte 38, A-1190 Wien.

Eismächtigkeit der Gletscher ist mittels empirischer Formeln mit geringem Aufwand abschätzbar, sofern sie nicht direkt aus seismischen Messungen abgeleitet werden kann (STEINHAUSER et al., 1984). Üblicherweise wird aber im ersten Schritt das Problem der Dichteverteilung bei der Reduktionsrechnung ausgeklammert, was zu der hier diskutierten Problematik führt.

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

2. Problemstellung

Für den Fall einer einheitlichen, von den Ortskoordinaten unabhängigen Dichteverteilung gilt für die Bougueranomalie BA der bekannte Ausdruck:

$$(1) BA(x,y,z) = g(x,y,z) - \gamma_0(x,y) + \delta_{gniv}(x,y,z) - \delta g_M(x,y,z)$$

mit

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

In Gl. (2) ist der sogenannte Bouguerplattenterm

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

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 δg_{top} von der Höhe ab, wobei sich jedoch keine funktionalen Beziehungen angeben lassen. Die Maximalwerte der topographischen Korrektur werden, wie das Beispiel von Abb. 1 zeigt, meistens bei sehr großen Stationshöhen erreicht, während im mittleren und unteren Höhenbereich eher niedrige Korrekturwerte auftreten. In den Tallagen steigen die Reduktionsbeträge wieder geringfügig an, so daß sich in vielen Fällen eine asymmetrische, u-förmige Verteilung ergibt. Diese Verteilungsform ist offensichtlich als eine Folge davon anzusehen, daß die Geländereduktionsbeträge jener Schwerestationen tendenziell am kleinsten sind, die in dem dominierenden Höhenintervallbereich des durch die Reduktion erfaßten Gebietes liegen. Jede Abweichung von diesem vorherrschenden Geländeniveau bewirkt ein Ansteigen des Reduktionsbetrages. Da aber der Betrag der topographischen Korrektur überwiegend von der Reliefform in unmittelbarer Stationsnähe beeinflusst wird, ergibt sich eine relativ breit streuende Punktwolke. Dadurch können bei extrem unruhigem Gebirgsrelief völlig unterschiedliche

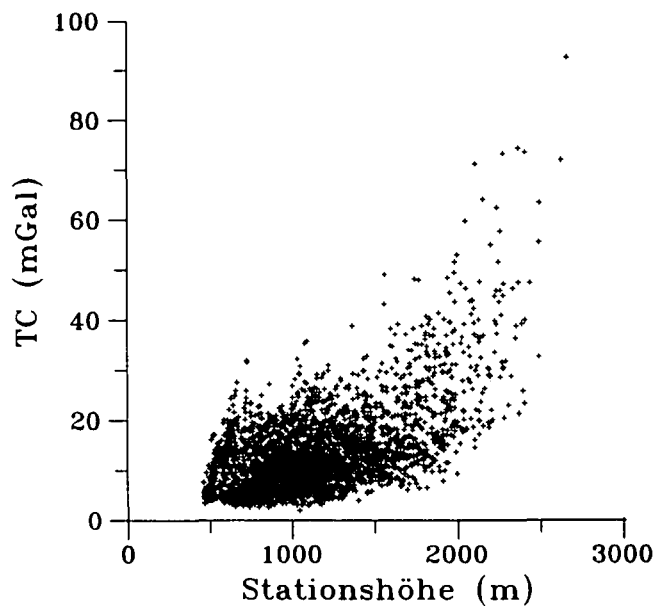


Abb. 1. Topographische Reduktion als Funktion der Stationshöhe in den Tiroler Kalkalpen.

Höhenbeziehungen der topographischen Korrektur auftreten.

Da letztere in jedem Fall den Betrag der gesamten Massenreduktion systematisch vermindert, kann der Bouguerplattenterm zur Abschätzung der bei Annahme eines konstanten Dichtefehlers maximal möglichen Reduktionsanomalien herangezogen werden.

Tab. 1 zeigt deutlich, daß durch Fehler im Ansatz für die Reduktionsdichte die Größenordnung lokaler Bougueranomalien erreicht bzw. sogar überschritten wird, und unterstreicht die Notwendigkeit eines korrekten Modells für die Oberflächendichten bei gravimetrischen Untersuchungen vor allem in Gebieten mit ausgeprägtem topographischen Relief und großen Stationshöhenunterschieden.

Dieser Fehler wird in erster Näherung dadurch vermieden, daß die Massenreduktionen mit der für das Untersuchungsgebiet gültigen Durchschnittsdichte durchgeführt werden. Dabei hat sich gezeigt, daß die Krusten-Standarddichte von $2,67 \text{ g/cm}^3$ im Bereich der Ostalpen für die Oberflächengesteine als repräsentativ angesehen werden kann (STEINHAUSER & PUSTISEK, 1987). Dieser Ansatz einer mittleren Reduktionsdichte hat sich bei regionalen Schwereuntersuchungen sehr gut bewährt. Für Fragestellungen der angewandten Gravimetrie, wo auch kleinräumige, lokale Anomalien korrekt erfaßt werden müssen, besitzt dieses Verfahren im Hochgebirge jedoch nicht das erforderliche Auflösungsvermögen. In diesem Fall ist es erforderlich, die Dichteverteilung der geologischen Strukturen oberhalb

Tabelle 1. Maximale Reduktionsanomalie in Abhängigkeit von Dichtefehler und Stationshöhe.

Dichtefehler [g/cm ³]	Stationshöhe [m]				
	500	1000	1500	2000	2500
	[mGal]				
0,1	2,09	4,19	6,29	8,38	10,48
0,2	4,19	8,38	12,57	16,76	20,95
0,3	6,29	12,57	18,86	25,15	31,43

des Reduktionsniveaus im einzelnen zu berücksichtigen:

Abb. 2 zeigt schematisch die zu erwartende Auswirkung eines gegenüber der wahren Dichte um den Fehler $\pm \delta\rho$ veränderten Dichteansatzes. Bei der Massenreduktion M und der Bougueranomalie BA werden für extreme Stationslagen (Berggipfel, Tallage) entsprechende Fehler δM und δBA hervorgerufen. Bei positiver Dichtedifferenz tendieren die Bougueranomalien der hoch gelegenen Gravimeterstationen zu negativen, die Talstationen zu positiven Fehlern und umgekehrt.

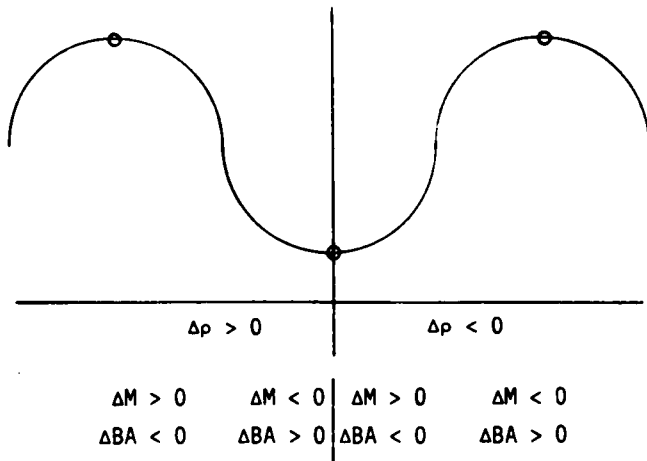


Abb. 2.
Auswirkung von Dichtefehlern auf die Massenreduktion.

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 km² insgesamt 3300 Schwerestationen unter extremen Gebirgsverhältnissen flächenhaft verteilt sind. Der besseren Übersicht wegen wurde hieraus ein besonders charakteristisches Testgebiet ausgewählt, auf das ungefähr 150 Schwerstationen entfallen. Abb. 3 zeigt die aufgrund der Stationshöhen interpolierte Höhenverteilung des 210 km² großen Testgebietes. Die Schwerstationen 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. Extrem rauhes Relief in unmittelbarer Stationsumgebung wurde durch geeignete numerische Verfahren berücksichtigt (GRANSENER, 1987; MEURERS, 1986). Der Maximalbetrag der topographischen Korrektur beträgt etwa 92 mGal (Abb. 1) und weist damit die gleiche Größenordnung auf wie die regionalen Anomalien im Alpenbereich.

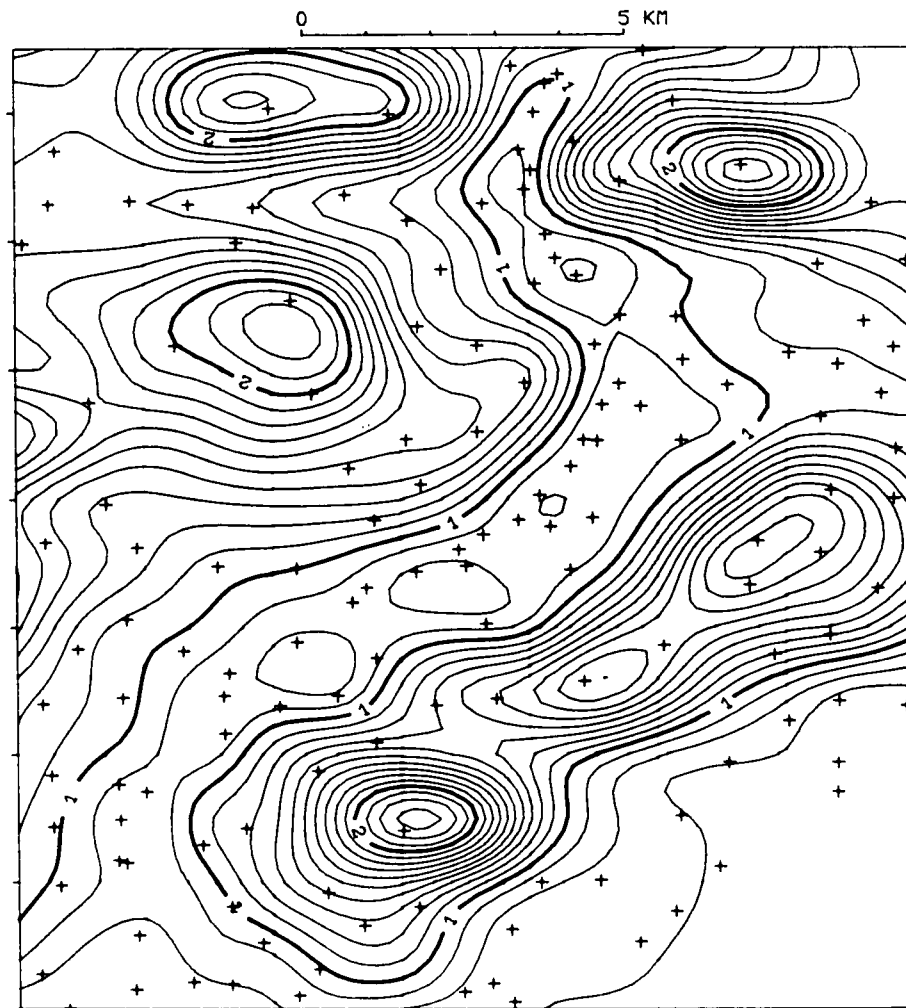


Abb. 3.
Stationshöhenverteilung des Testgebietes.
Isolinienintervall : 0,1 km.

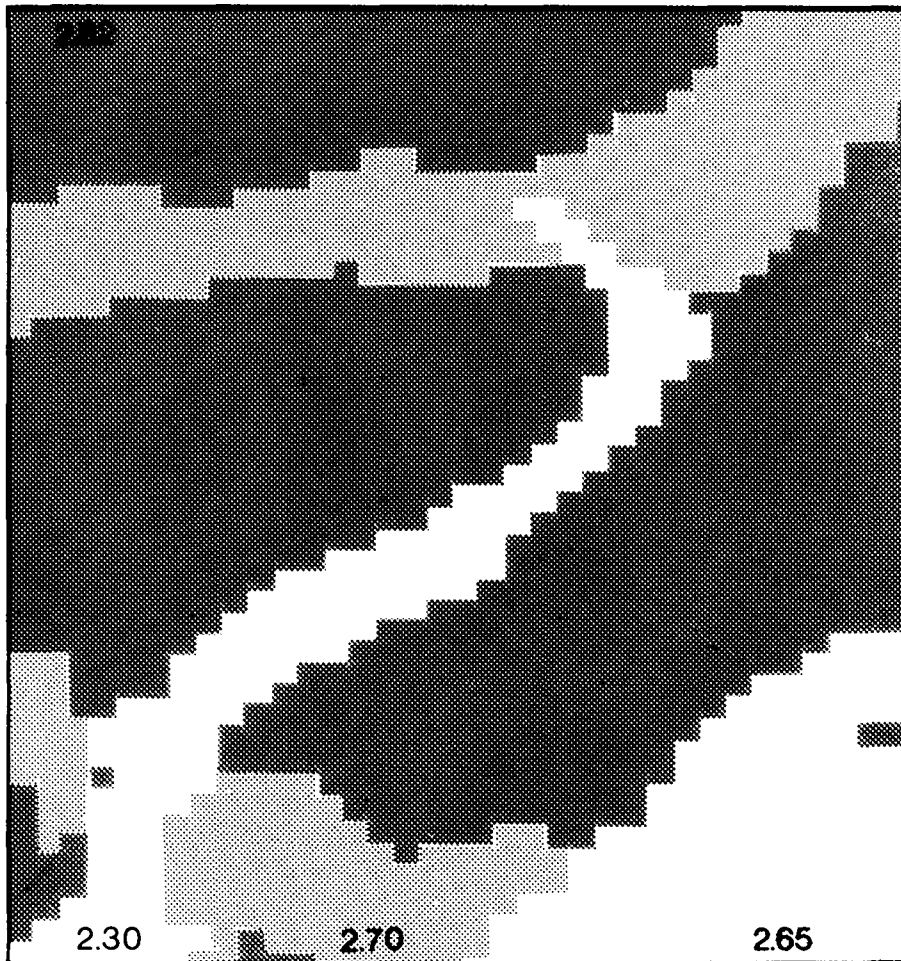


Abb. 4.
Verteilung der Oberflächendichte im Testgebiet.

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 Feldmessungen. Trotzdem muß wegen der Probenverteilung eine Zuordnung der mittleren Dichte auf die regional geologisch erfaßten Einheiten beschränkt bleiben. Dies stellt insofern eine Vereinfachung dar, als die geologischen Einheiten auf Grund von Lithologie und Verwitterung heterogen sind und somit lokale Abweichungen von ihrer mittleren Dichte auftreten können. Abb. 4 zeigt den dem Testgebiet entsprechenden Ausschnitt des Dichtemodells. Die Rastergröße beträgt analog zum Geländehöhenmodell der Ostalpen 370 m × 390 m. Im gewählten Ausschnitt treten hauptsächlich drei Dichteprovinzen auf, die den Dolomitgesteinen ($\rho = 2,82 \text{ g/cm}^3$), den Kalken ($\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3$) sowie den niedrigen Dichtewerten der Talfüllungen ($\rho = 2,30 \text{ g/cm}^3$) 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. Bei einer angenommenen Dichtedifferenz von $\delta\rho = 0,3 \text{ g/cm}^3$ entspricht dies einem maximalen gravimetrischen Effekt von 0,3 mGal. Über die Dichte der unterhalb der Talsedimente liegenden Gesteine existieren naturgemäß keine Informationen. Diese Grundgebirgsdichte muß daher aus den seitlich unmittelbar anschließenden Dichteprovinzen extrapoliert werden. Um diese Abschätzung zu objektivieren, erfolgt sie durch kreisförmige Mittelbildung. Dazu werden bei jedem Rasterelement des Dichtemodells, dem die Talfüllungsdichte zugeordnet ist, zunächst die ringförmig anschließenden Elemente geprüft, ob sich ihre Dichte von der Talfüllungsdichte unterscheidet. Dieses Verfahren wird schrittweise solange auf den jeweils nächsten Ring von Rasterelementen erweitert, bis mindestens 5 Elemente für die Mittelwertbildung der Grundgebirgsdichte verfügbar sind.

5. Berechnungsverfahren

Die Dichteverteilung liegt digital im selben Raster wie das Höhenmodell vor. Daher kann die Berechnung der Bougueranomalie mit variabler Dichte mit dem gleichen Verfahren erfolgen, das auch zur Bestimmung der topographischen Korrektur für die Standard-Bougueranomalie herangezogen wird. Der einzige Unterschied be-

steht darin, daß die Massenkorrektur in einem Zug durch Abtragung aller topographischen Massen bis zum Reduktionsniveau berechnet wird, wobei für jede Reduktionssäule der zugehörige Dichtewert eingesetzt wird. In Bereichen mit Talfüllungen, Seen oder Gletschermassen werden dreidimensionale Dichtemodelle verwendet, die durch entsprechende vertikale Unterteilung der Rastersäulen entstehen. Wenn dabei zwischen See und Grundgebirge noch zusätzlich Sedimente gelagert sind, dann ergibt sich somit ein Dreischichtfall für die gravimetrische Reduktion. Im Sinne einer geologischen Korrektur wird gegebenenfalls stets auch die Gravitationswirkung jener Anteile von Talfüllungen und Seen 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

Die maximal möglichen Reduktionsanomalien können bei gegebenen Stationslagen wieder durch Berechnung der Bougueranomalie mit konstanten Dichten abgeschätzt werden. Abb. 5 zeigt dafür zwei Beispiele mit den im gesamten Untersuchungsgebiet dominanten Dichtewerten $2,82 \text{ g/cm}^3$ sowie $2,70 \text{ g/cm}^3$. Dargestellt wird die Differenz der Massenkorrekturen in Abhängigkeit von der Stationshöhe. Deutlich ist erkennbar, daß der Bouguerplattenterm die maximalen Effekte charakterisiert. Die Abweichung von den die Punktwolken nach oben hin begrenzenden Geraden wird gemäß Gl. (2) durch den Betrag der topographischen Korrektur bestimmt. In Bereichen größerer Stationshöhen entfernt sich die Punktverteilung merklich von den Geraden. Dies deutet auf die hohen topographischen Korrekturwerte in diesen Stationslagen hin. Die Änderung der Bougueranomalie gegenüber dem Standardansatz $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$ liegt in der Größenordnung von $2\text{--}14 \text{ mGal}$ (für $\rho = 2,82 \text{ g/cm}^3$) bzw. $0,5\text{--}3 \text{ mGal}$ (für $\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3$) und unterscheidet sich nur wenig von den entsprechenden maximalen Reduktionsanomalien. Im folgenden soll die Bougueranomalie mit variabler Dichte dem Standardverfahren (konstante Dichte $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$) gegenübergestellt werden.

In der Bouguerschwereverteilung der nördlichen Kalkalpen ist in vielen Talbereichen eine enge Korrela-

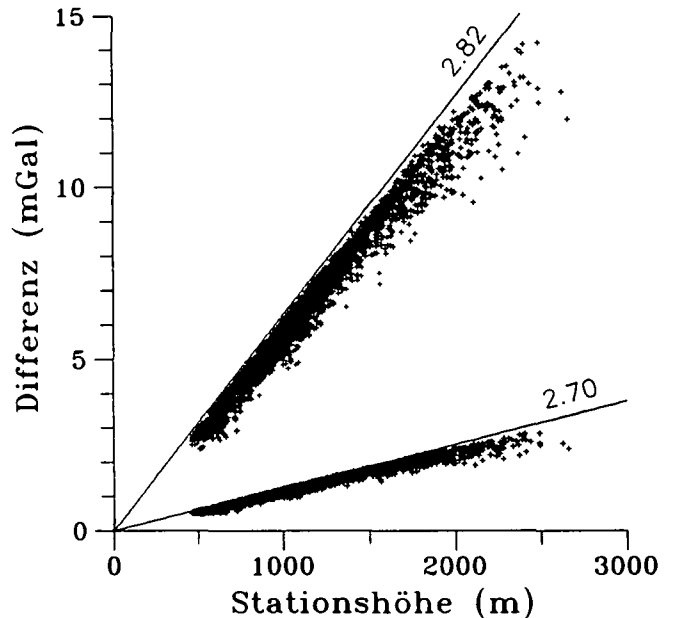


Abb. 5. Differenz der Massenreduktionen bei Verwendung der Dichtewerte $2,82 \text{ g/cm}^3$ bzw. $2,70 \text{ g/cm}^3$ an Stelle der Standarddichte $2,67 \text{ g/cm}^3$ in den Tiroler Kalkalpen.

tion 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 Ver-

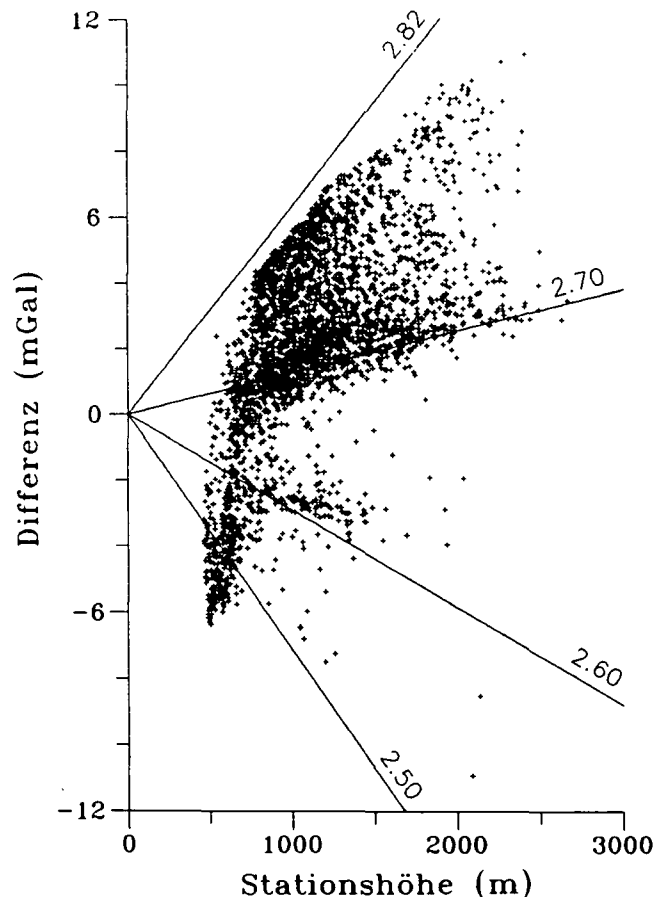


Abb. 6. Differenz zwischen Standard- und der mit variablem Dichteansatz (Niveau: 0 m NN) berechneten Bougueranomalie in den Tiroler Kalkalpen.

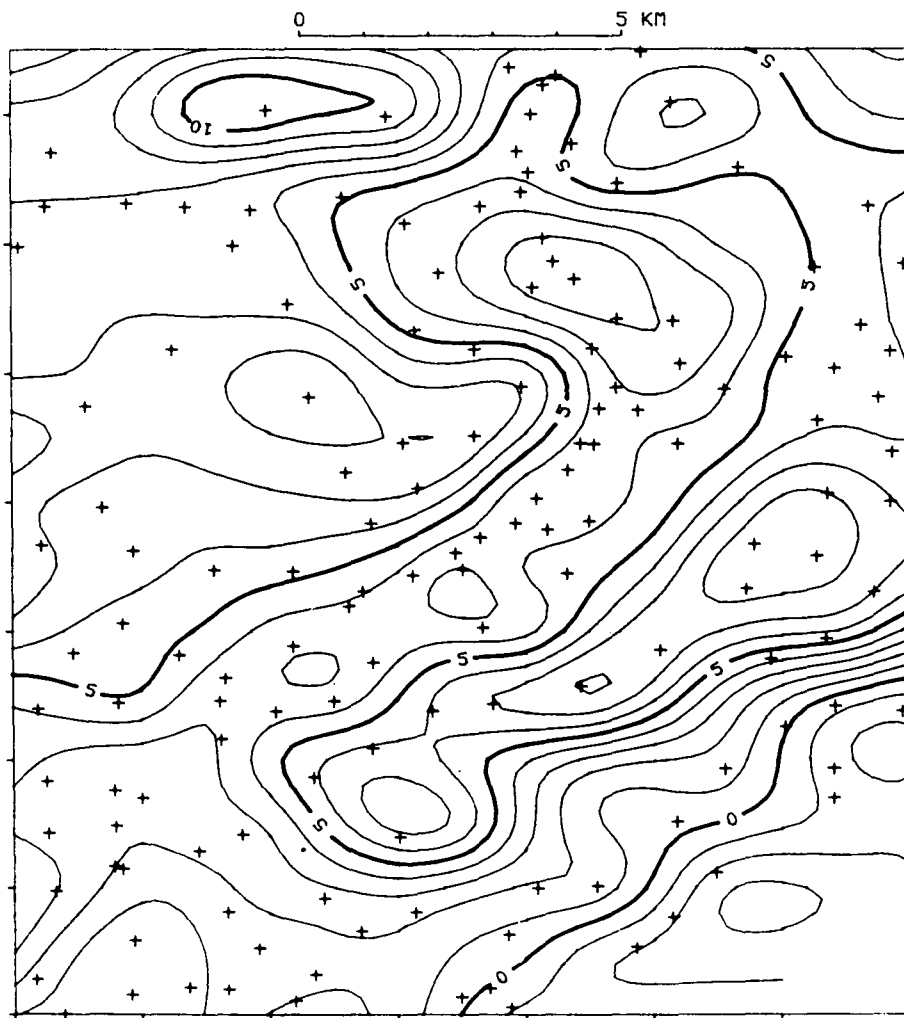


Abb. 7.
Differenz zwischen der Standard- und der mit variablem Dichteansatz (Niveau: 0 m NN) berechneten Bougueranomalie im Testgebiet.
Isolinienintervall : 1 mGal.

gleich 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. Darüberhinaus ergibt sich im gesamten Untersuchungsgebiet neben einer beträchtlichen Niveaushiftung eine starke Glättung des Isanomalienbildes. Die Differenzen zwischen den Resultaten beider Verfahren werden für die Gravimeterstationen (gesamtes Datenmaterial) in Abb. 6 als Funktion der Stationshöhe gezeigt. Zusätzlich sind darin die den wichtigsten Dichteprovinzen entsprechenden Bouguerplattensterne durch Geraden mit Dichte-abhängigen Steigungen markiert. An der Konzentration der Punktwolke in deren Umgebung ist die Dominanz der entsprechenden Dichtebereiche erkennbar. Die Bandbreite der im gesamten Untersuchungsgebiet auftretenden Bougueranomalie-Differenzen ist mit etwa 22 mGal außerordentlich hoch. Die flächenhafte Verteilung dieser Reduktionsanomalien im Testgebiet stellt Abb. 7 dar. Der Vergleich mit Abb. 4 zeigt die erwartungsgemäß enge Korrelation mit den Dichteprovinzen.

Im nächsten Schritt wurde die Bougueranomalie mit variabler Dichte für das höchste von den Stationshöhen her mögliche Bezugsniveau (400 m ü. NN) berechnet. Wie oben erwähnt, erfolgte auch hier die Korrektur der Talfüllungen und Seen unabhängig vom Erreichen bzw. Überschreiten dieses Referenzniveaus. Größere Unterschiede zur Bougueranomalie mit variablem Dichte-

ansatz und Reduktionsniveau von $h = 0$ m ü. NN treten erst am nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes auf, wo die Dichtedifferenz zu den Gesteinen der Kalkalpen im Bereich der Flysch- und Molassezone relativ groß wird. Hier läßt sich eine Korrelation mit den Dichteprovinzen erkennen. Im zentralen Teil des Meßgebietes spielt allerdings die Wahl des Reduktionsniveaus eine eher geringe Rolle; die Differenzen liegen etwa zwischen -1 und -2 mGal. Dies wird auch in Abb. 8 deutlich, in der die Differenzen in Intervallen von $0,2$ mGal dargestellt werden.

Im dritten Schritt wurde die Bougueranomalie mit konstanter Standarddichte von $\rho = 2,67$ g/cm³, 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 Verwendung des vorher diskutierten umfassenden Dichtemodells bestehen. Die Verbesserungen gegenüber dem Standardverfahren betragen bis zu 6 mGal. Die Wirkung dieser geologischen Korrektur der Talfüllungen wird in Abb. 9 dargestellt. Erwartungsgemäß sind nur innerhalb der Bereiche mit großen Sedimentmächtigkeiten signifikante Unterschiede vorhanden, außerhalb der Talbereiche sind nur statistische Schwankungen zu beobachten. Sie sind auf Unterschiede im Berechnungsverfahren für die Massenkorrekturen bei der Bestimmung der Standardbougueranomalie zurückzuführen. Die Beschränkung der

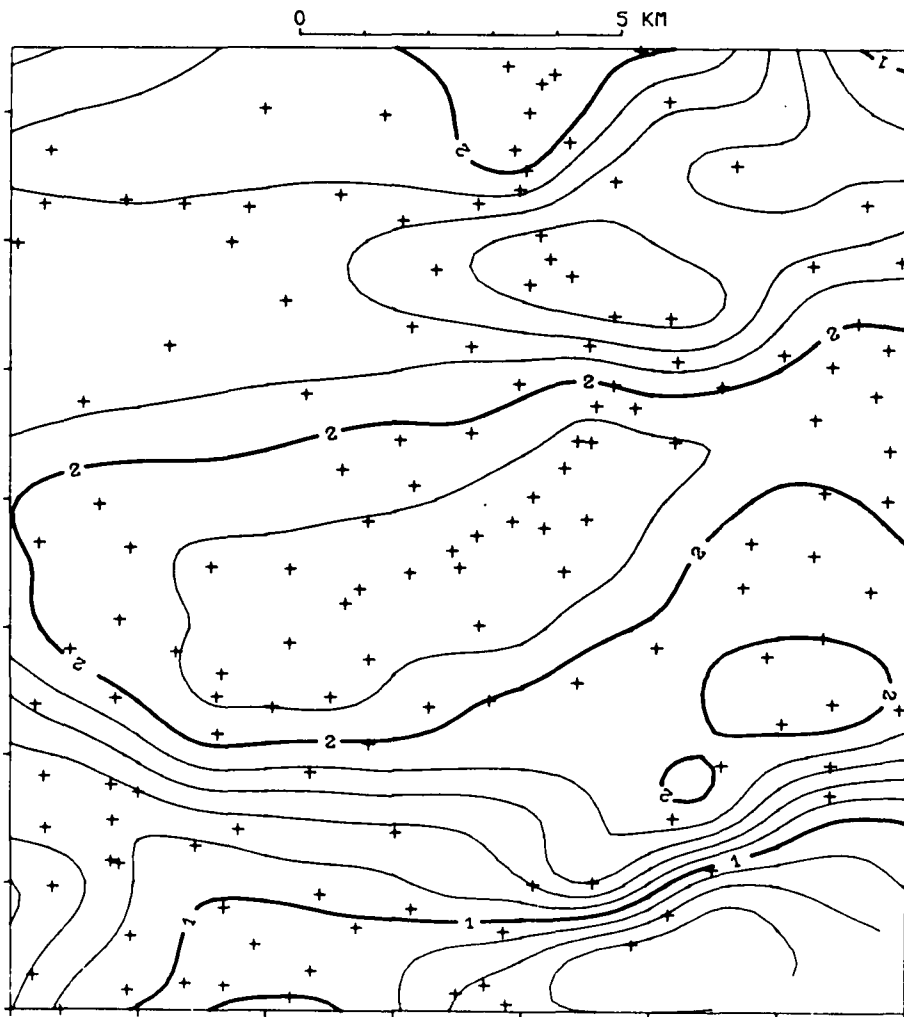


Abb. 8.
Differenz zwischen den mit variablem Dichteansatz im Niveau 400 m NN bzw. 0 m NN berechneten Bougueranomalien im Testgebiet.
Isolinienintervall : 0,2 mGal.

Talfüllungskorrekturen auf Talbereiche mit Sedimentmächtigkeiten von mehr als 25 m erweist sich durch dieses Resultat als gerechtfertigt. Eine Korrelation der Differenzen mit der Stationshöhe ist nicht zu erwarten. Dies wird durch Abb. 10 bestätigt, in der die entsprechende Höhenverteilung für die Tiroler Kalkalpen dargestellt wird.

Abb. 11 zeigt schließlich die Differenz zwischen der Bouguerschwere mit variablem Dichteansatz (Reduktionsniveau 0 m ü. NN) und der nur bezüglich der Talfüllungen geologisch reduzierten Standard-Bougueranomalie. 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, wie der Vergleich mit Abb. 10 zeigt. In Abb. 12 werden die Unterschiede zwischen beiden Reduktionsverfahren wieder für das gesamte Datenmaterial dargestellt. Noch deutlicher als in Abb. 6 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.

7. Verbesserung durch variablen Dichteansatz

Wegen der vorhin gezeigten Höhenabhängigkeit der Reduktionsanomalien führt die Verwendung eines inkorrektierten Dichteansatzes im allgemeinen zu einer Verstärkung hochfrequenter Anteile im Amplitudenspektrum der Schwereanomalie, da sich die sie hervorrufenden Quellen unmittelbar unterhalb der Gravimeterstationen befinden. Die Verbesserung durch das gewählte geologische Modell kann daher durch Anwendung von Feldtransformationen überprüft werden, deren Filteroperatoren Hochpasseigenschaften aufweisen. In der vorliegenden Fallstudie wird dies durch den Vergleich der entsprechenden Vertikalgradientenfelder untersucht (Abb. 13). Dabei fällt insbesondere die räumliche Koizidenz von lokalen Extrema des Vertikalgradientenfeldes der Standardbougueranomalie (Abb. 13a) mit topographischen Strukturen auf. Der regionale Trend der Isanomalien ist dagegen vom Dichteansatz weitgehend unabhängig. Amplituden lokaler Vertikalgradientenanomalien werden bei Berechnung der Bougueranomalie mit variablem Dichteansatz wesentlich reduziert (Abb. 13b). Dieser Vergleich kann daher als Hinweis für die Brauchbarkeit des verwendeten Dichtemodells gesehen werden. Zur Untersuchungen langwelliger Schwerefeldkomponenten, die dem regionalen Trend zugeordnet werden können, wurden beide Bouguer-anomaliefelder einer Tiefpassfilterung (Wellenlängenfil-



Abb. 9.
Differenz zwischen der Standard- und der ausschließlich bezüglich der Talfüllungen geologisch reduzierten Bougueranomalie im Testgebiet.
Isolinienintervall : 1 mGal.

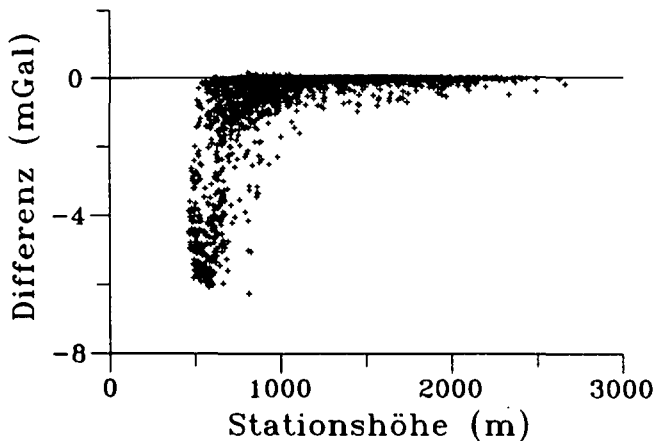


Abb. 10.
Differenz zwischen der Standard- und der ausschließlich bezüglich der Talfüllungen geologisch reduzierten Bougueranomalie in den Tiroler Kalkalpen.

ter) mit einer Grenzwellenlänge von 5 km unterzogen. Der Vergleich wird in Abb. 14a (Standardbougueranomalie) und Abb. 14b (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 bei der Standardbougueranomalie von 20 mGal auf etwa 30

mGal, d.h. um 50 %, anwächst. Hieraus erwachsen bei der quantitativen Interpretation des Trendfeldes wesentliche Konsequenzen für die Modellgeometrie der tieferen Krustenbereiche.

8. 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. Zur Erfassung lokaler Strukturen ist es nicht ausreichend, die Krusten-Standarddichte von $2,67 \text{ g/cm}^3$ für die Massenreduktionen zu verwenden. Bei der topographischen Korrektur werden 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 $370 \text{ m} \times 390 \text{ m}$ 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 aus-

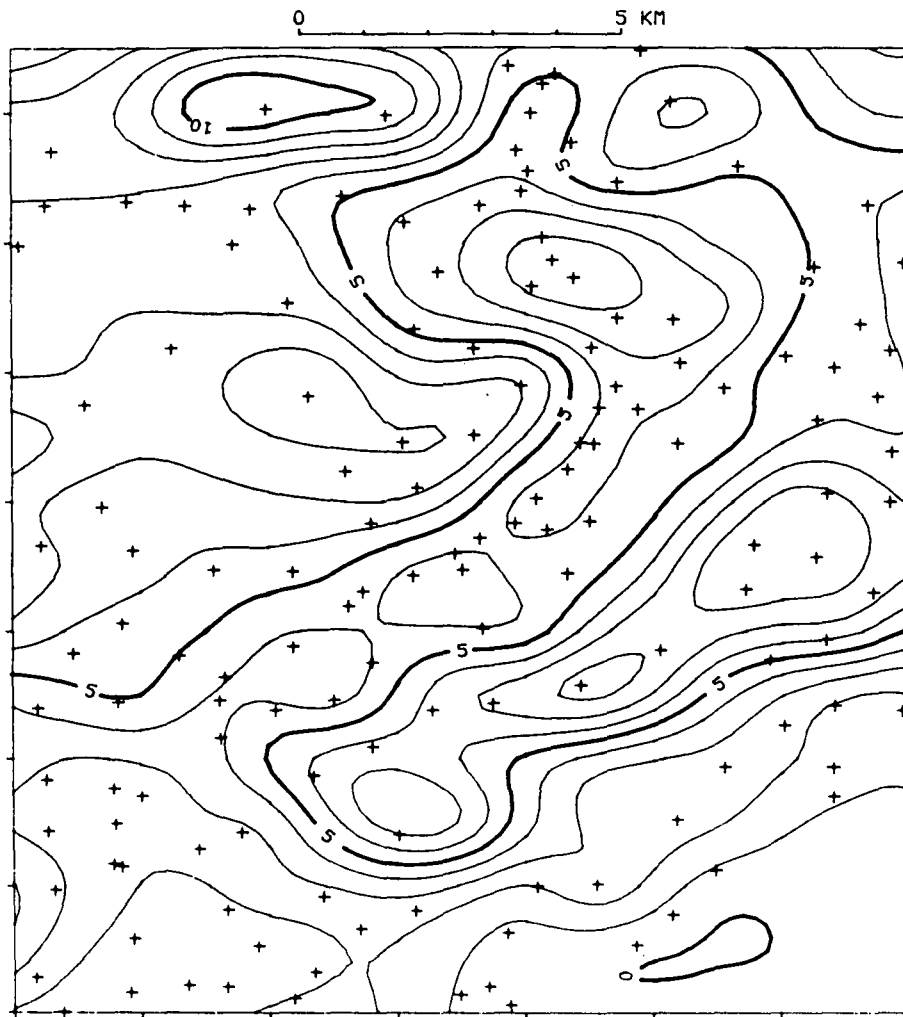
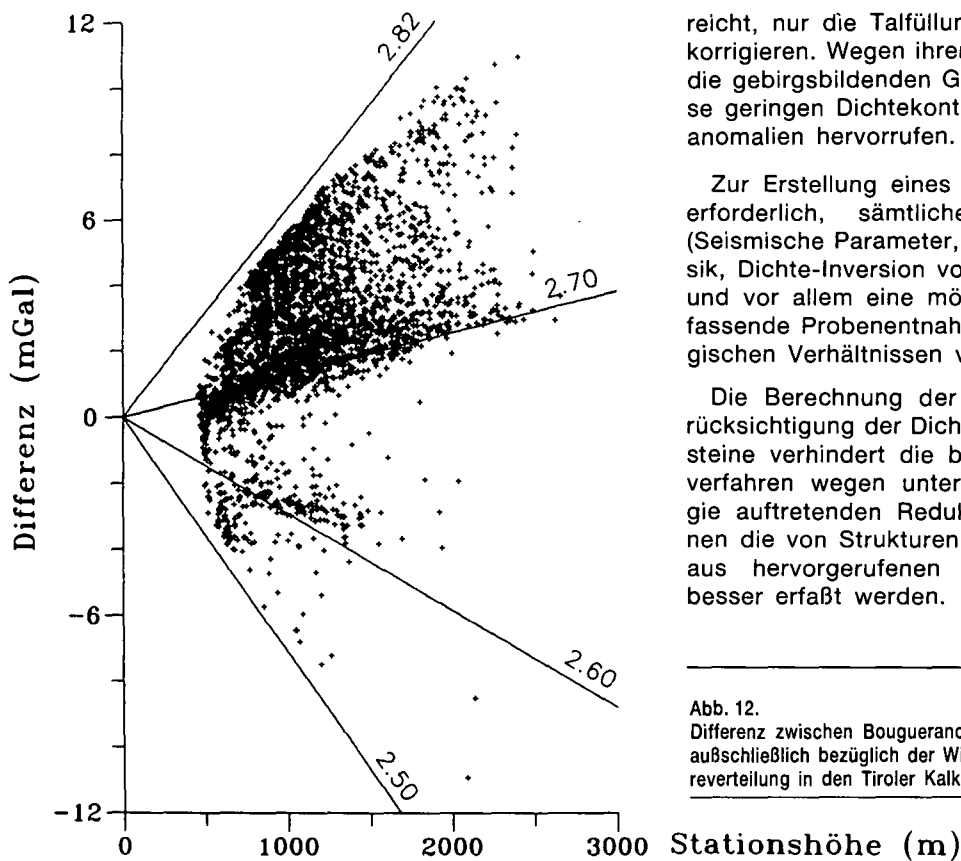


Abb. 11.
Differenz zwischen der ausschließlich bezüglich der Wirkung der Talfüllungen korrigierten Schwereverteilung und der Bouguer-anomalie mit variablem Dichteansatz im Testgebiet.
Isolinienintervall : 1 mGal.



reicht, nur die Talfüllungen mit der wahren Dichte zu korrigieren. Wegen ihrer großen Volumina können auch die gebirgsbildenden Gesteine trotz der vergleichsweise geringen Dichtekontraste beträchtliche Reduktionsanomalien hervorrufen.

Zur Erstellung eines korrekten Dichtemodells ist es erforderlich, sämtliche verfügbaren Informationen (Seismische Parameter, Resultate der Bohrlochgeophysik, Dichte-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 wegen unterschiedlicher Oberflächengeologie auftretenden Reduktionsanomalien. Dadurch können die von Strukturen unterhalb des Reduktionsniveaus hervorgerufenen Schwereanomalien wesentlich besser erfaßt werden.

Abb. 12.
Differenz zwischen Bouguer-anomalie mit variablem Dichteansatz und der ausschließlich bezüglich der Wirkung der Talfüllungen korrigierten Schwereverteilung in den Tiroler Kalkalpen.

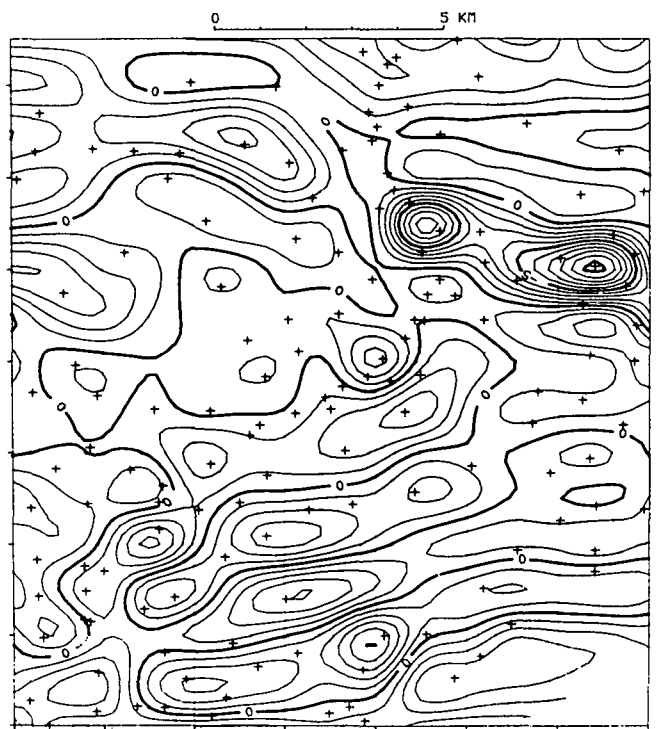
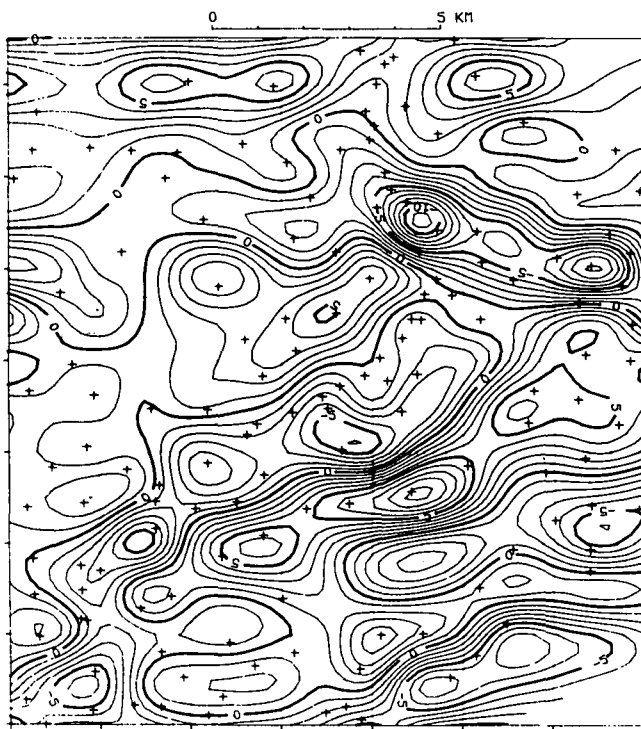


Abb. 13.
 Vertikalgradientenfeld des Testgebietes.
 a) Standardbougueranomalie.
 b) Bougueranomalie mit variablem Dichteansatz.
 Isolinienintervall : 1 mGal/km.

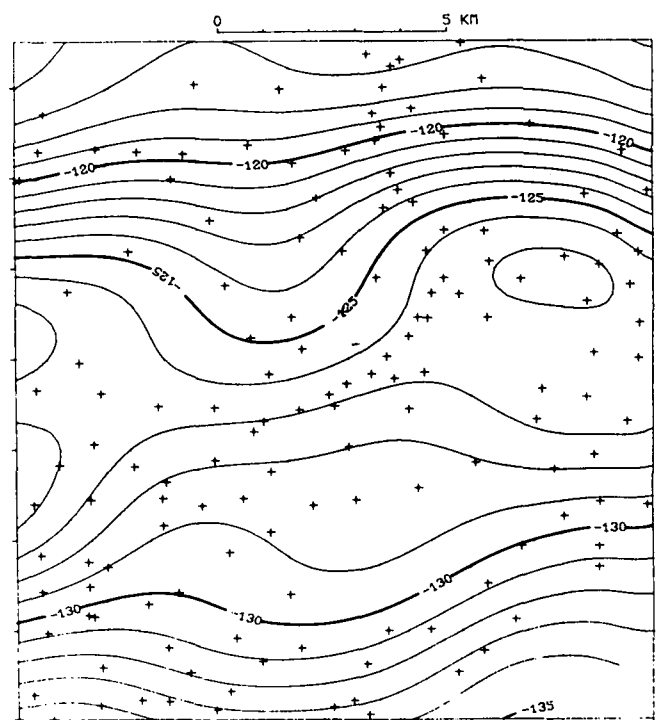
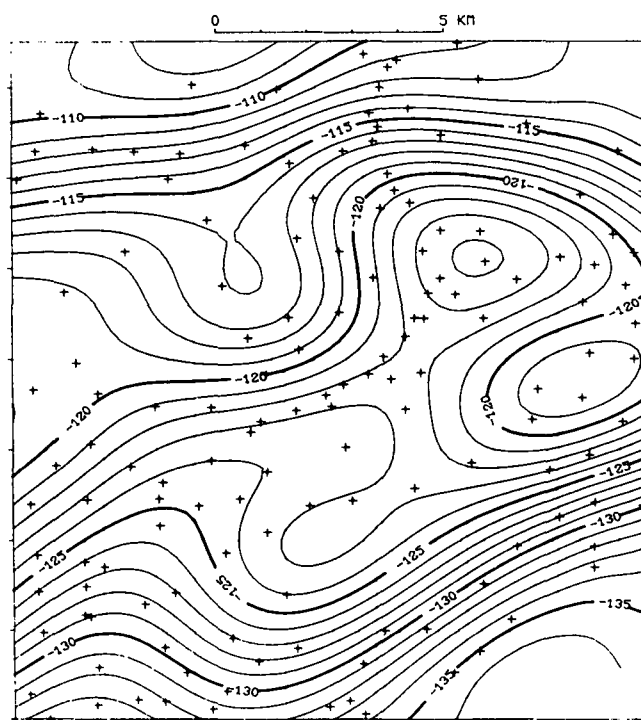


Abb. 14.
 Regionalfeld des Testgebietes (Wellenlängenfilterung).
 a) Standardbougueranomalie.
 b) Bougueranomalie mit variablem Dichteansatz.
 Isolinienintervall : 1 mGal.

Dank

Diese Arbeit wurde finanziell durch die Österreichische Akademie der Wissenschaften, Programm „Geophysik der Erdkruste“, unterstützt, wofür an dieser Stelle der Dank ausgesprochen wird.

Literatur

- EHRISMANN, W. & LETTAU, O.: Topographische Reduktion von Schweremessungen in der näheren und weiteren Stationsumgebung. – Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, **20**, 383–396, 1971.
- GÖTZE, H.J., STEINHAUSER, P. & ROSENBAACH, O.: Die Bestimmung der mittleren Geländehöhen im Hochgebirge für die topographische Reduktion von Schweremessungen. – Ber. Tiefb. Ostalp., **9**, 1980.
- GRANSE, H.: Allgemeine Feldfortsetzung und Verfahren zur Dichtebestimmung angewandt auf gravimetrische Untersuchungen im Hochgebirge. – Unveröff. Dissertation, Univ. Wien, 1982.
- GRANSE, H.: Topographic reduction of gravity measurements by numerical integration of boundary integrals. – Geoph. prosp., **35**, 71–82, 1987.
- GRANSE, H., HÖSCH, K., STEINHAUSER, P. & ZYCH, D.: Über das Dichtemodell 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.
- RUSS, D.: Berücksichtigung von Wasser- und Eismassen bei der topographischen Reduktion. – Ber. Tiefb. Ostalp., **12**, 175–177, 1985.
- STEINHAUSER, P., MEURERS, B. & RUSS, D.: Gravity investigations under extreme mountainous conditions. – Exploration Geophysics, 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., RUSS, 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.

Manuskript bei der Schriftleitung eingelangt am 2. Jänner 1990.