
DIGITALE DICHEMODELLE IN DER GEOPHYSIK -
AUFBAU UND ERFAHRUNGEN

G. WALACH, E. POSCH, Montanuniv. Leoben

Zusammenfassung

Für die Auswertung von Schwerefeldgrößen nach geodätischen und /oder geophysikalischen Aufgabenstellungen ist die Dichte der Erdkrustengesteine ein wesentlicher Parameter. In Ergänzung zu dem in der österreichischen Gravimetrie schon länger eingeführten "Digitalen Modell mittlerer Geländehöhen (DTM)", wird ein Dichtemodell (DDM) vorgestellt, das in guter Näherung die massenkonforme Reduktion von Schwerefeldmeßwerten zu Bouguer-anomalien oder anderen abgeleiteten Schwerefelddarstellungen gestattet. Das Bundesgebiet überdeckend existiert ein Dichtemodell im Raster 1,5 x 2,5', für den gesamten Alpenraum im Raster von 3 x 5'. Für einige Regionen liegen auch schon Modelle mit kleineren Rasterdimensionen - 0,1875 x 0,3125' - vor. Das Modell gilt grundsätzlich für das Erdkrustenintervall zwischen Geoid und Erdoberfläche. Nach ersten Erfahrungen führt die Anwendung des Dichtemodells in der Berechnung von Bouguer-anomalien zu einer weitgehenden Unterdrückung der bei Annahme konstanter Reduktionsdichte (2670 kg/m³) auftretenden, störenden Scheinanomalien und prinzipiell zu einem objektiveren Kartenbild.

1. EINLEITUNG

In der angewandten Geophysik ist für die Auswertung und geologische Interpretation von Schweremessungen die Kenntnis von bestimmten Gesteinsdichtewerten erforderlich. So muß für die Reduktion von Schwerewerten zu Bouguer-anomalien die regionale Verteilung der Gebirgs-Raumdichte (Blockdichte) für das Intervall bis zum Bezugsniveau als Reduktionsparameter und in weiterer Folge für Störkörperberechnungen der Dichtekontrast zwischen Modell und Umgebung (Anomaliedichte) gegeben sein. Die erstgenannte Forderung kann dabei am besten über ein digitales Modell mittlerer Gesteinsdichten, mit Gültigkeit für das gewählte Reduktionsintervall, näherungsweise erfüllt werden.

Für Gravimetermessungen sind in Österreich wegen der großteils alpin geprägten, sehr inhomogenen Topographie- und Dichteverhältnisse, häufig schwierige Reduktionsbedingungen gege-

ben. Reliefunterschiede von mehr als 1000 m auf kurzen Entfernungen und laterale Änderungen der Oberflächendichte bis über $\pm 300 \text{ kg/m}^3$ sind keine Seltenheit. Insbesondere für die Lösung von Prospektionsproblemen der angewandten Geophysik war es notwendig, mit Hilfe von hochauflösenden Topographie- und Dichtemodellen die große Unsicherheitsspanne zwischen den gemessenen Schwerewerten und der die Grundlage jeder geologischen Aussage bildenden Bougueranomalie auf ein akzeptables Maß zu bringen.

2. MODELLAUFBAU

Der prinzipielle Aufbau und die Datenorganisation der für die Auswertung von Schweremessungen in Österreich verwendeten digitalen Topographie- und Dichtemodelle wurde bereits mehrfach u.a. von RUESS (1983,1985) bzw. WALACH (1985,1986,1987) vorgestellt. Das nach einem geographischen Rastersystem organisierte Modell hat die Dimension

$$\frac{2^{n-1}}{5120} \text{ geogr. Breite} \times \frac{2^{n-1}}{3072} \text{ geogr. Länge} \quad \begin{array}{l} n = \text{Raster-Nummer} \\ 1 \leq n \leq 11 \end{array}$$

Für die Reduktion von Schwerewerten und astronomisch bestimmten Lotabweichungen werden nur die Raster 5 - 11 verwendet, wobei die Raster-Nummern 6 und 7 aus lokalen Digitalisierungen im Raster 5 sowie die Raster-Nummern 10 und 11 aus den regionalen Digitalisierungen im Raster 9 rechnerisch gewonnen werden. Zur numerischen Unterscheidung vom Topographiemodell ist das Dichtemodell durch ein in jeder Datenzeile dem Rasterindex vorangestelltes negatives Vorzeichen gekennzeichnet.

3. GEOLOGISCHES KONZEPT

Ein dreidimensionales Modell der Erdkruste $\rho = \rho(r, \phi, \lambda)$ hätte einen relativ komplexen Aufbau, da man es nur mittels einer Verknüpfung von Struktur (Tiefen)- und Dichteinformationen definieren kann. Das setzt aber neben der Kenntnis von ortsbezogenen Dichtewerten auch die dreidimensionale Festlegung von geologischen Grenzen, zumindest aber der Krusteuntergrenze (Moho), voraus. Wegen des komplizierten Baues der Erdkruste im Bereich

des alpinen Orogens reichen dafür die heute verfügbaren Daten noch nicht aus. Man muß sich daher zunächst auf ein zweidimensionales Modell der Form $\rho = \rho(\phi, \lambda)$ beschränken.

Für die Bestimmung der in das Modell einfließenden Dichteinformation sind einerseits Abgrenzungen von geologischen Dichte-Provinzen nach entsprechenden Kartenwerken und andererseits Bestimmungen der repräsentativen Blockdichtewerte für die einzelnen Dichteprovinzen erforderlich. Dafür kommen von den zahlreichen Bestimmungsmethoden (MILITZER & WEBER, 1984) vorzugsweise hydrostatische Wägungen an aufgesammelten Handstückkollektiven im Labor und spezielle gravimetrische Profilmessungen sowie Bohrlochmessungen ("Dichtelog") in situ zur Anwendung.

Nach STEINHAUSER et al. (1983a,b) bzw. WALACH (1986, 1987) ist die Dichte der Oberflächengesteine in Österreich so ausreichend erforscht, daß zumindest im regionalen Maßstab die Erstellung einer vorläufigen Dichteprovinzkarte, gegliedert in ca. 40 geologisch/tektonische Einheiten und 12 Dichtestufen im Intervall von 50 kg/m³ (2000 - 2850 kg/m³), auf Grundlage der "Geologischen Karte von Österreich, 1:500.000" (VETTERS, 1933) möglich ist. Aufgrund dieser flächendeckenden Dichtedarstellung wurde das Modell im Raster 1,5 x 2,5' (ca. 2,8 x 3,1 km) erstellt.

Da die Reduktion von großräumig verteilten Schweremessungen üblicher Weise bis zu einem Außenradius von 167 km erfolgt, ist für die Gebiete außerhalb von Österreich ein weitmaschiges Modell (3 x 5') erforderlich. Für diese Außenzonen sind nur mehr allgemeine Dichteinformationen nach geologischen Alterseinstufungen, Metamorphosegrad, lithologischem Bestand etc. ableitbar, die jedoch eine fünfstufige Dichtegliederung (WALACH, 1987) zulassen. Für die Abgrenzung der Dichteprovinzen müssen offizielle ausländische geologische Kartenwerke im Maßstab 1 : 500.000 bis 1 : 2.000.000 herangezogen werden.

Der derzeitige Stand des digitalen Dichtemodells in allen verfügbaren Rasterdimensionen ist in Abb. 1 zusammengestellt.

4. GENAUIGKEIT DER DICHTEWERTE

Für den Anwender eines digitalen Dichtemodells sind Angaben über die Genauigkeit der Dichteinformation wichtig. Da durch ein regionales Modell petrographisch, genetisch und altersmäßig unterschiedliche Gesteine erfaßt werden, deren räumliche Verteilung außerdem nur ungenügend bekannt ist, sind generelle Genauigkeitsangaben schwierig zu ermitteln. Sieht man von den Fehlern der Bestimmungsmethoden ab, so bleiben als Unsicherheitsquellen die natürliche Streuung der Substanzdichte, systematische laterale Dichteänderungen, die Tiefenabhängigkeit und unvermeidbare Toleranzen in der kartenmäßigen Abgrenzung der einzelnen Dichteprovinzen. Mit Hilfe von ausgewählten Fallstudien kann man aber zumindest die Größenordnung des auftretenden Fehlers abschätzen.

Nach detaillierten Untersuchungen im Steirischen Tertiärbecken (WEBER & WALACH, 1987 und WALACH, 1986) nimmt die Raumdichte der bis zu 500 m mächtigen klastischen Lockersedimente des Pannons mit wachsender Entfernung vom Ostalpenrand von etwa 2100 auf 1950 kg/m³ ab. Diese aus Schweremessungen ("Nettletonprofile") stammenden Angaben werden durch seismische Untersuchungen gestützt, da zum Beispiel auch die refraktionsseismisch ermittelte P-Wellengeschwindigkeit von etwa 2100 auf unter 1800 m/s abnimmt. Da eine kartenmäßige Abgrenzung dieser lateralen Dichteänderung ohne sehr umfangreiche Untersuchungen im Gelände nicht möglich ist, muß man im Modell für das gesamte Pannon einen Mittelwert von 2000 kg/m³ annehmen.

In metamorphen und magmatischen Gesteinsserien stellt sich das Problem, daß in der Regel von Dichtewerten an der Oberfläche gesammelter Gesteinsproben auf die Raumdichte in Gebirgsdimension geschlossen werden muß. Die wahre volumetrische Verteilung unterschiedlichster Gesteinsarten und die Auswirkungen der Tektonik treten als unbekannte Einflußfaktoren auf. In diesem Fall bilden vertikale Schwereprofile in Bergbauschächten oder Bohrlöchern die bestgeeignete Überprüfungsmöglichkeit für die Genauigkeit der Dichteannahmen.

Nach Untersuchungen in mehreren alpinen und außeralpinen Bergbauen (WALACH, 1983, 1987 cum.lit.) kommen die aus vertikalen Schwereprofilen bestimmten Blockdichten den natürlichen Gegebenheiten am nächsten. Die Abb. 2 zeigt beispielsweise einen Vergleich zwischen hydrostatisch ermittelten Handstückdichten und einer Blockdichtebestimmung aus einem 144 m langen Schachtintervall im Bereich des Talkumbergbaues Lassing (Stmk.).

Von der Geologie her gesehen steht der Schacht in einem einige 100 m ausgedehnten Karbonatgesteinskörper der Raumdichte $2740 \pm 60 \text{ kg/m}^3$, der in einer die weitere Umgebung aufbauenden Phyllit-Kalkschiefer-Serie mit $2690 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ schwimmt. Der infolge des großen Meßintervalles für ein sehr großes Gesteinsvolumen gültige Blockdichtewert fällt etwa in das Mittel der beiden geologisch begründeten, hydrostatisch bestimmten Hauptdichtewerte. Damit wird die regionale Gültigkeit des schließlich angenommenen Wertes von 2725 kg/m^3 voll bestätigt. In der Abb. 2 kommt aber auch zum Ausdruck, welchen großen Einfluß die topographische Reduktion auf das Ergebnis von gravimetrischen Dichtebestimmungen hat.

Ganz allgemein zeigen Dichtebestimmungs-Vergleiche der vorgestellten Art, daß die Dichteannahmen nach Laborbestimmungen eher nach zu hohen Werten hin tendieren, was wahrscheinlich mit einer Unterschätzung des tektonischen Einflusses zusammenhängt. Grundsätzlich führt eine Zusammenfassung mehrerer Fallstudien zu dem Schluß, daß für das Dichtemodell insgesamt ein mittlerer Fehler von $\pm 100 \text{ kg/m}^3$ oder rund 4 % angenommen werden kann.

5. ANWENDUNGEN IN DER ANGEWANDTEN GEOPHYSIK

Für Prospektionsprobleme der angewandten Geophysik bedeutet die Anwendung eines variablen Dichteansatzes mit Hilfe eines digitalen Modells einen wesentlichen Schritt zur Verminderung der Interpretationsunsicherheit bei der Umsetzung von Meßergebnissen in geologische Modellvorstellungen. Beispielsweise führt ein relativ geringer Dichtefehler von 100 kg/m^3 in der ebenen Plattenreduktion über ein Höhenintervall von nur 50 m schon zu

einer Schein- oder Reduktionsanomalie von ca. 0,2 mgal. Nun sind aber häufig Restschwereanomalien mit Maximalamplituden deutlich unter 0,5 mgal zu interpretieren, was bei einer lateral stärker wechselnden Reduktionsdichte ohne Verwendung eines variablen Dichteansatzes häufig zu Fehlinterpretationen oder doch zumindest zu starken Verzerrungen der aus dem Anomaliebild abgeleiteten Modellkörpergeometrie führen kann.

Beispiele findet man insbesondere im Bereich der inneralpinen Beckenlandschaften (WALACH, 1982; POSCH & WALACH, 1989), entlang der Grundgebirgsränder (KRÖLL et al, 1988) und in hochalpinen Prospektionsgebieten (MEURERS et al., 1989) Österreichs, aber auch bei hydrogeologischen und ingenieurgeophysikalischen Problemstellungen - etwa in der Erkundung unbekannter Gebirgshohlräume. Zur Verdeutlichung ist in Abb. 3 ein Fallbeispiel für die Kartendarstellung der Bougueranomalie ohne und mit Verwendung des digitalen Dichtemodells dargestellt.

Im Gebiet des rund 250 m tiefen Walgaubeckens besteht zwischen dem Grundgebirge (größtenteils Flysch und ostalpine Kalke) und den überwiegend grobklastischen, grundwasserführenden Quartärsedimenten ein Dichtekontrast von ca. $- 500 \text{ kg/m}^3$. Wird die Bougueranomalie durch Reduktion auf Normal-Null mit konstanter Dichte 2670 kg/m^3 bestimmt (Abb. 3, oberes Bild), so tritt wegen des Dichtefehlers über das Reduktionsintervall von ca. 500 m ein Fehler (Scheinanomalie) in der Größenordnung von +10 mgal auf, was im Schwerebild zu einer extremen Verzerrung der Anomaliesituation führt. Wird hingegen unter Verwendung des Dichtemodells bei gleichzeitiger Anhebung des Bezugsniveaus auf 390 m Seehöhe (Spiegel Bodensee) gearbeitet, so reduziert sich der mittlere Reduktionsfehler auf theoretisch $\pm 0,5 \text{ mgal}$ (Abb. 3, unten). Das Isanomalienbild zeichnet nun präzise die Konturen des Beckenrandes nach, wodurch die Präzisierung der Aussage gegenüber Abb. 3 (oberes Bild) auch optisch eindeutig hervortritt.

Aber auch für geodätische Problemstellungen (Prädiktion von Schwereanomalien, Geoidbestimmung u.a.) bedeutet die Anwendung des digitalen Dichtemodells eine wichtige Ursacheninformation.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- KRÖLL, A., H.W. FLÜGEL, W. SEIBERL, F. WEBER, G. WALACH & D. ZYCH (1988): Erläuterungen zu den Karten über den prätertiären Untergrund des Steirischen Beckens und der Südburgenländischen Schwelle - Geologische Themenkarten 1:200.000, Geol. B.-A., Wien
- MEURERS, B., P. STEINHAUSER & D. ZYCH (1989): Berechnung von Bouguer-anomalien im Hochgebirge mit variablem Dichteansatz. - 5. Alpengravimetrie-Kolloquium (Tagungsband), Graz (im Druck)
- MILITZER, H. & F. WEBER (1984): Angewandte Geophysik, Bd. 1, Gravimetrie und Magnetik. - Springer-Verlag, Wien - New York
- POSCH, E. & G. WALACH (1989): Das Bouguerschwerefeld in Vorarlberg und im Bereich der Übergangszone zwischen West- und Ostalpen. - 5. Alpengravimetrie-Kolloquium (Tagungsband), Graz (im Druck)
- RUESS, D. (1983): Über das digitale Geländemodell in Österreich. Geodätische Arbeiten Österreichs für die Intern. Erdmessung, Neue Folge, 3, 153 - 158, Wien
- RUESS, D. (1985): Digitales Geländemodell Österreichs. - 3. Intern. Alpengrav.-Kolloquium, Leoben 1983, 163-167, Leoben - Wien
- STEINHAUSER, P., H. GRANSER, K. HÖSCH & D. ZYCH (1983): Das Dichtemodell in Österreich. - Geodätische Arbeiten Österreichs für die Intern. Erdmessung, Neue Folge 3, 159 - 182, Wien
- STEINHAUSER, P., H. HEITZMANN, D. RUESS, G. WALACH & D. ZYCH (1983): The Geoid in Austria: Digital Models of Topographic Heights and Rock Densities. - Proceedings XVIII. Gen. Assembly IUGG, IAG, 1, 322 - 338
- WALACH, G. (1982): Bedeutung gravimetrischer Untersuchungen für die Kohleprospektion im Fohnsdorf-Knittelfelder Tertiärbekken (Stmk.). - Freiburger FH, C 378, 29 - 41, Leipzig
- (1983): Theoretische und praktische Untersuchungen über gravimetrische Untertagemessungen. - Unveröff. Habilitationsschrift, 153 S., Leoben
 - (1985): Ein Programmsystem für die automatische Bearbeitung von Schweredaten unter Verwendung von digitalen Gelände- und Dichtemodellen. - Freiburger FH, C 408, 59-70, Leipzig
 - (1986): Digitale Dichtemodelle und andere gesteinsphysikalische Daten in Österreich. - Geowiss. Mitt. TU Wien, H. 27
 - (1987): A Digital Model of Surface Rock Densities of Austria and the Alpine Realm. - Geodät. Arb. Österreichs für die Intern. Erdmessung, Neue Folge, 4, "The Gravity Field in Austria (Hrsg.: H. Sünkel)", 3 - 9, Graz
- WEBER, F. & G. WALACH (1987): Contributions to the Relations between the Eastern Alps and the Pannonian Basin in the Light of Gravimetric and Magnetic Investigations. - Abschlußband Schwerpunktsprojekt S15 "Geodynamics of the Eastern Alps", 345 - 360, F. Deuticke-Verlag, Wien

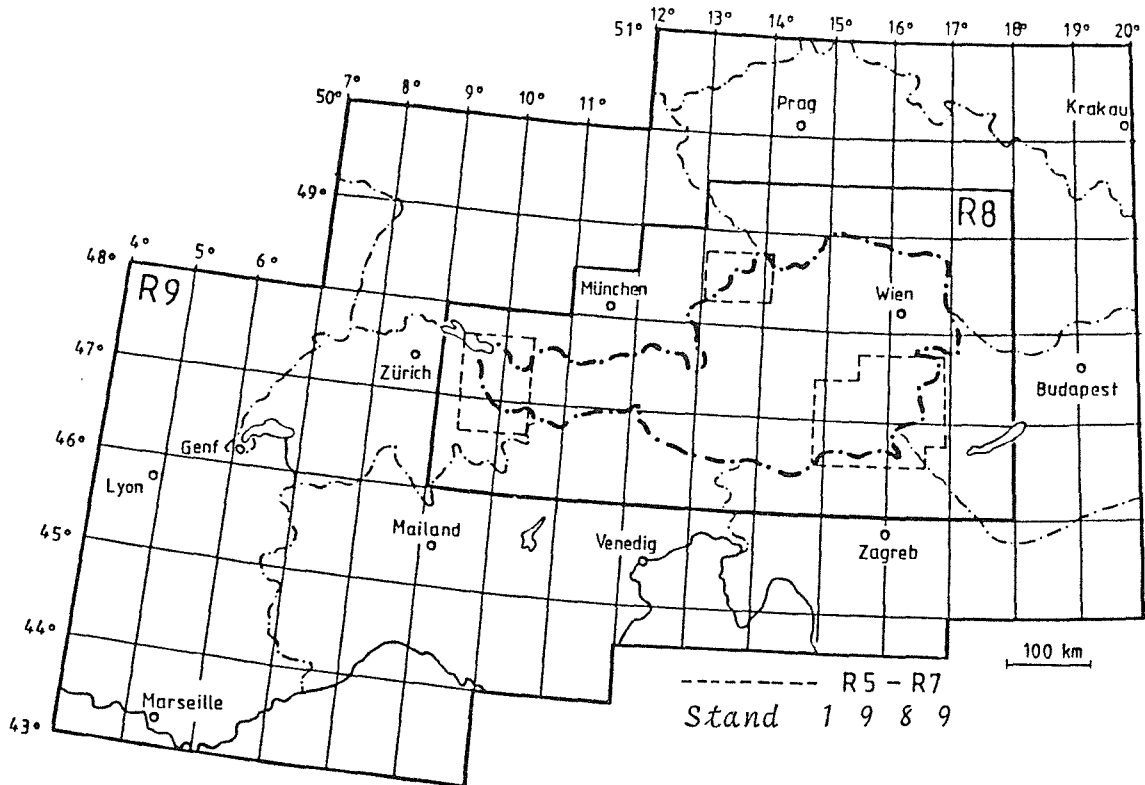


Abb. 1: Gebietsüberdeckung des digitalen Dichtemodells

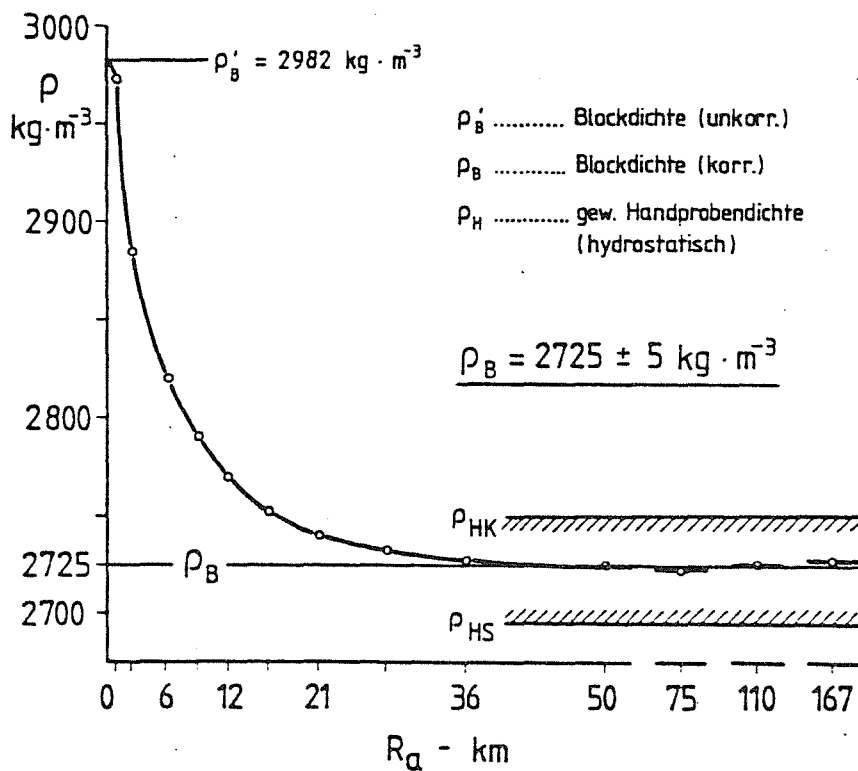


Abb. 2: Beispiel einer hydrostatischen und gravimetrischen Dichtebestimmung (Talkumbergbau Lassing, Steiermark)

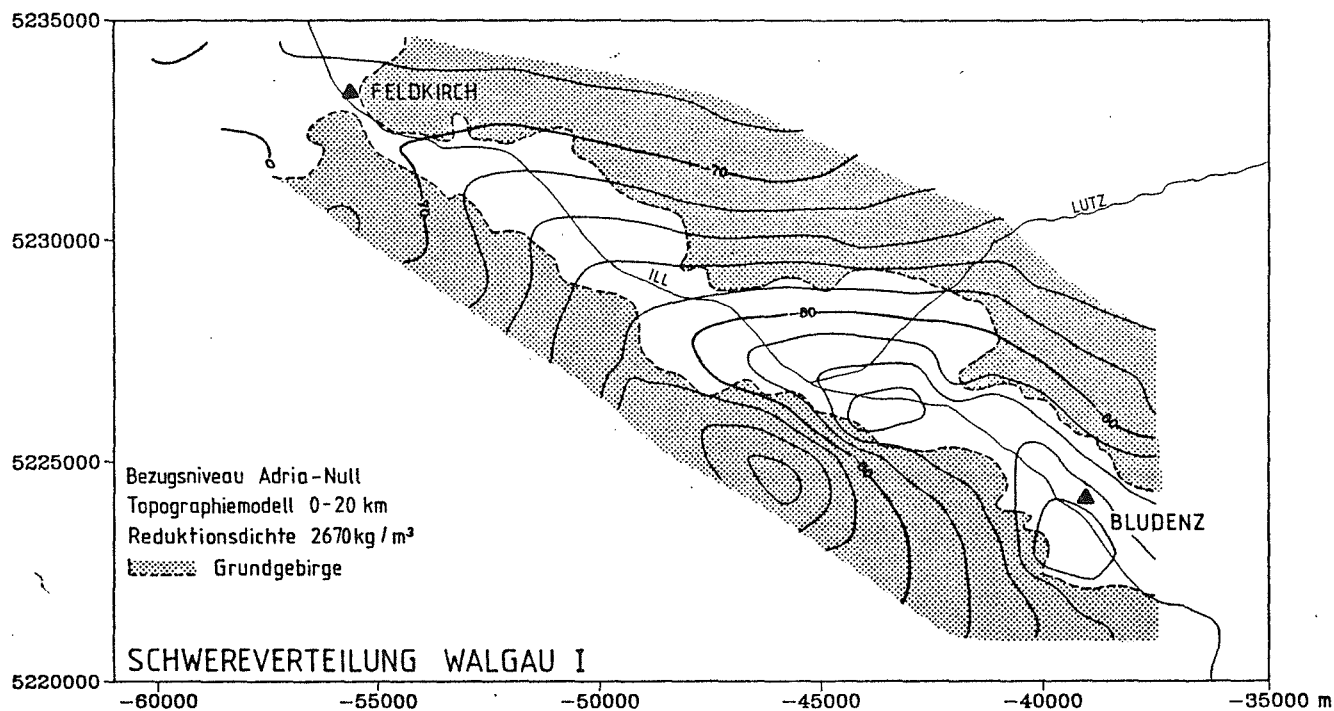


Abb. 3: Gegenüberstellung einer Karte der Bougueranomalien für das Gebiet des quartären Walgaubeckens (Vorarlberg), - ohne (oben) und mit (unten) Anwendung des digitalen Dichtemodells. Anhebung des Bezugshorizontes sowie die genähert massenkongforme Reduktion führen zu einer deutlich verbesserten Anpassung des Isolinienbildes an die in beiden Bildern dargestellte Grundgebirgsumrahmung.

