

Stand und Entwicklungsziele der gravimetrischen Landesaufnahme Österreichs

Peter Steinhauser

ZAMG / Universität Wien

1. Einleitung

Vor rund 25 Jahren veröffentlichte E. Senftl /1965/ seine Schwerekarte von Österreich, die damals nach modernsten Erkenntnissen erarbeitet worden ist. Daß Senftl es mangels Mitarbeitern dennoch zuwege brachte, die für diese Karte erforderlichen Arbeiten weitestgehend im Alleingang durchzuführen, unterstreicht diese Leistung ganz besonders.

In dem seither vergangenen Vierteljahrhundert haben sich die wissenschaftlichen und technischen Möglichkeiten sprunghaft entwickelt. Computer-orientierte Auswerteverfahren, elektro-optische Distanzmesser und transportable Absolutgravimeter sind nur einige Beispiele hiefür. In Österreich kommt zusätzlich hinzu, daß die Zugänglichkeit des Hochalpenraumes durch Güterwege, Kleinseilbahnen und Hubschrauber in einem nahezu unvorstellbaren Ausmaß zugenommen hat, was nicht nur für die Gravimetrie neue Möglichkeiten erschließt.

Welche Konsequenzen sich aus dieser Entwicklung für die gravimetrische Landesaufnahme ergeben, kann am besten von den an sie gestellten Anforderungen aus, diskutiert werden.

2. Aufgaben der gravimetrischen Landesaufnahme

Unter den verschiedenen geowissenschaftlichen Basisaufnahmen des Bundesgebietes zählt die gravimetrische zu den anspruchsvollsten, da sie eine Fülle verschiedenartigster Aufgaben, wie sie in anderen Bereichen der Geophysik nicht vorkommen, gleichzeitig zu erfüllen hat. Ihre Ergebnisse sind für Geodäsie, Geophysik und Geologie gleichermaßen von Bedeutung. Insbesondere betrifft dies:

- Geoid: Der Beitrag der Gravimetrie zur Bestimmung der Figur der Erde bildet eine klassische Aufgabe /Rinner und Moritz, 1977/, wobei die Schwerkraft- und Geoidbestimmung über die Fragen der Höheren Geodäsie hinaus auch für ingenieurgeodätische Fragen Bedeutung erlangt /Rapatz, 1989/.

- Krustengleichgewicht: Die Genauigkeit mit der der isostatische Zustand der Kruste und das Massendefizit der Alpenwurzel ermittelt werden kann, ist für die quantitative Beurteilung der wirkenden plattentektonischen Kräfte wichtig und ermöglicht Aussagen über die Strukturen und das dynamische Verhalten der Erdkruste.
- Strukturerkundung: Großräumige Krustenstrukturen von regionaler (z.B. Alpen) bis subregionaler Dimension (z.B. Wiener Becken) sind sowohl für die Grundlagenforschung zu erfassen, wo sie beispielsweise für die Entwicklung tektonischer Theorien benötigt werden, als auch als Basisdaten für die Rohstofferkundung von Bedeutung.
- Regionalfeldbestimmung: Lokale gravimetrische Untersuchungen benötigen Schwereinformationen aus ausgedehnten Randbereichen, deren Fläche im Extremfall ein Mehrfaches des eigentlichen Untersuchungsgebietes ausmachen muß, um den störenden Regionalfeldanteil (Alpenwurzel, benachbarte geologische Großstrukturen etc.) sicher erfassen zu können.
- Komplexinterpretation: Die gemeinsame Interpretation der Ergebnisse verschiedener geophysikalischer Methoden steigert die Sicherheit und Aussagekraft der Ergebnisse beträchtlich. Bei den potentialtheoretischen Verfahren besteht teilweise sogar die direkte theoretische Verknüpfung durch das Poisson'sche Theorem.
- Extrapolation: Da die Gravimetrie nach der Magnetik jene geophysikalische Meßmethode darstellt, die am einfachsten auch im extremen Hochgebirge eingesetzt werden kann, können mit ihrer Hilfe die Ergebnisse anderer Verfahren, die entweder gar nicht oder nur unter größtem Aufwand im Hochgebirge eingesetzt werden können, in schwer zugängliche Gebirgsregionen hin extrapoliert werden.

3. Stand der gravimetrischen Landesaufnahme

Da die allgemeine Zugriffsmöglichkeit neben einer in sich geschlossenen Bearbeitung als Kennzeichen einer Landesaufnahme anzusehen ist, repräsentiert die Bouguer - Schwerekarte von Österreich /Senftl, 1965/ den Stand der Landesaufnahme (Abb. 1). Die dieser Karte zugrunde liegende Vermessung ist allerdings in Hinblick auf die geodätischen Erfordernisse ausgerichtet. So sind die Schwerestationen zum weitaus Überwiegenden Teil entlang der Nivellementlinien angeordnet und, obwohl insgesamt etwa 2000 Schwerestationen verwendet worden sind, ist die Punktdichte in vielen Bereichen sehr gering. Dies trifft insbesondere auf die Hochgebirgsregionen zu, wo ganze Gebirgsstöcke gravimetrisch nicht erfaßt werden konnten. Aber auch im Mühlviertel (OÖ) wird nur eine Meßpunktdichte von einer Schwerestation je 390 km² erreicht. Trotzdem konnte im Rahmen mehrerer gravimetrischer Untersuchungen bestätigt werden, daß die wesentlichen Züge der Schwereverteilung im österreichischen Bundesgebiet durch die Senftl - Karte relativ gut erfaßt werden.

Lokal können aber, wie verschiedene Detailvermessungen gezeigt haben, beträchtliche Abweichungen der tatsächlichen Anomalienverteilung vom Isolinienbild der Senftl - Karte auftreten. Beispiele hierfür sind das Fohndorfer Becken, dessen in Abb. 2 wiedergegebenes lokale Schwereminimum /Walach, 1980/ in das regionale Schwereminimum der Niederen Tauern miteinbezogen worden ist, da die Abgrenzung beider Strukturen mangels Schwerestationen nicht erfaßt werden konnte. Ähnliches trifft auf die Schwereverteilung im Bereich des Inntals zu. Die dort entlang einer Nivellementlinie angeordneten Schwerestationen der Landesaufnahme wurden auch dazu verwendet, das Schwereniveau im benachbarten Karwendelgebirge und in den Hohen Tauern festzulegen, wo keine Schweremessungen verfügbar waren. Wie das Querprofil des Inntals östlich von Innsbruck /Steinhauser, 1980/ in Abb. 3 zeigt, bewirkt die Talfüllung des Inntals aber einen Schweretrog mit einer Tiefe der Größenordnung von -10 mgal. Infolge der fehlenden Schwerestationen an den Talflanken wird in der Senftl - Karte das lokale Inntal - Trogminimum auf die benachbarten Gebirgsstöcke hin ausgedehnt.

Aus diesen Beispielen ergibt sich zusammenfassend der Schluß, daß die bestehende Landesaufnahme erweitert werden muß, um den vorhin genannten Anforderungen gerecht werden zu können.

4. Kriterien der Neuaufnahme

Um die vorhin genannten Ziele erfüllen zu können, sind nach den bisher gemachten Erfahrungen folgende technische Kriterien bei der Neuaufnahme einzuhalten:

4.1 Gleichverteilung der Stationen in flächen- und höhenmäßiger Hinsicht.

Durch dieses Meßprinzip sollen Verzerrungen des Isolinenbildes in meßtechnisch nicht erfaßten Gebieten, wie sie im vorhergehenden Abschnitt beispielhaft angeführt wurden, verhindert werden. Neben einer gleichmäßig flächenhaften Stationsverteilung ist dabei aber auch eine möglichst gleichmäßige Verteilung in höhenmäßiger Hinsicht anzustreben. Dies ist deshalb notwendig, weil Talböden zum Teil mit mächtigen Schichten von Flußsedimenten geringer Dichte aufgefüllt sind, was selbst in hochgelegenen Seitentälern möglich ist. Außerdem folgen verschiedene Täler dem Verlauf von Störungen, die mit tiefreichenden Auflockerungszonen verbunden sein können.

Insgesamt kann daher eine Punkteverteilung erst dann als repräsentativ angesehen werden, wenn auch eine ausreichende Anzahl von Schwerestationen in Hanglage bzw. in den Gipfelregionen vorhanden ist.

4.2 Stationsdichte

Obwohl das Auflösungsvermögen einer Schwerevermessung unmittelbar von der Stationsdichte abhängt, kann ein direkter formelmäßiger Zusammenhang nur dann hergestellt werden, wenn Annahmen über Masse, Lage und Geometrie der Störkörper getroffen werden. Andererseits können aus einer gegebenen Schwereverteilung statistische Aussagen darüber abgeleitet werden, wieweit die Bouguerschwerewerte von verschiedenen Schwerestationen miteinander korrelieren. Hohe Korrelation kann dabei als Hinweis auf den gleichen Störkörper als physikalische Ursache der Schwereanomalie interpretiert werden.

Als derartiger statistischer Parameter kann die Kovarianzfunktion $C(s)$ der Schwerewerte Δg verwendet werden, die durch Mittelbildung über die Produkte der Schwereanomalien aller Punktepaare mit dem Abstand s erhalten wird /Torge, 1975/. Da Richtungsunabhängigkeit vorausgesetzt wird, müssen Regionalfeldeffekte vor der Berechnung der Kovarianzfunktion mit Hilfe einer Trendfunktion

(Polynom höherer Ordnung) aus dem Datenmaterial entfernt werden. Die Halbwertsbreite dieser Kovarianzfunktion, für die in Abb. 4 ein Beispiel wiedergegeben ist, stellt ein Maß für die Korrelation der Schwerewerte benachbarter Meßpunkte dar. Im Sinne der vorhin angestellten Überlegungen kann sie auch als Maß für das Auflösungsvermögen einer Vermessung gedeutet werden. Für die gravimetrische Alpen traverse /Meurers, Ruess und Steinhauser, 1987/ ergibt die Kovarianzberechnung beispielsweise eine Halbwertsbreite $\beta = 3,6$ km. Dies kann daher so gedeutet werden, daß im Untersuchungsgebiet Untergrundstrukturen vorherrschen, deren Anomalienbild diese charakteristische Halbwertsbreite besitzen, bzw. daß kleinere Strukturen nicht mehr aufgelöst werden konnten.

Im Sinne dieser statistischen Analyse ist ein Meßpunktabstand von 3 km bzw. eine Meßpunktdichte von 1 Station je 9 km² für die Landesaufnahme anzustreben. Im Rastermodell des Höhensystems entspricht dies einer Rastergröße von 2,5 x 1,5 Minuten Länge mal Breite. In Bereichen, wo Horizontalgradienten auftreten, die 4 mgal/km übersteigen und somit lokal sehr schlechte Kovarianzbedingungen vorherrschen, sind zusätzliche Verdichtungspunkte erforderlich.

4.3 Genauigkeitsanforderungen

Mit modernen Gravimetern vom Typ LCR oder Worden ist es dank kleiner Driftraten und hoher Instrumentenstabilität möglich, den meßtechnischen Schwerefehler auf 0,02 mgal zu beschränken. Es ist daher auch erforderlich, diese Messungen in ein Basisnetz hoher Qualität einzubinden, das auf absoluten Schwerebestimmungen aufbaut und somit gegen Niveaufehler und Deformationen gesichert ist.

Für die Größe des Gesamtfehlers einer Schwere messung ist im Hochgebirge hingegen die geodätische Stationseinmessung ausschlaggebend. Da Höhen- und Lagefehler im Geographischen Raster über die Geländereduktion entsprechende Schwerefehler hervorrufen können, kommt den Lokalisierungsverfahren besondere Bedeutung zu. Wenn man sich hierbei auf die klassischen Verfahren beschränkt - da GPS derzeit wegen der zu geringen zeitlichen Überdeckung im Alpenraum noch nicht voll einsetzbar ist - ergeben sich folgende Abschätzungen der Fehlerkomponenten und des gesamten Schwerefehlers.

Tab. 1 Abschätzung des durch Fehler der Lage- und Höhenbestimmung sowie der Schweremessung hervorgerufenen Gesamtfehlers der Bougueranomalie

| Höhenbest. | Höhenfehler | Lagebest. | Koord. Fehler | Fehlerkomponente | | | | Gesamtfehler |
|------------|-------------|-----------|---------------|------------------|--------|-----------|------|--------------|
| | | | | h | ϕ | λ | g | |
| Triang. | 0,1 m | Triang. | 1 m | 0,02 | 0,003 | 0,003 | 0,02 | 0,03 mgal |
| Niv. | <0,01 | Karthogr. | 25 | 0,002 | 0,075 | 0,075 | 0,02 | 0,11 |
| Aerophot. | 1 | Karthogr. | 25 | 0,2 | 0,075 | 0,075 | 0,02 | 0,23 |
| Barom. | 6 | Karthogr. | 25 | 1,2 | 0,075 | 0,075 | 0,02 | 1,20 |

Daraus folgt unmittelbar, daß im Hochgebirge die Höhen- und Lagebestimmung der Schwerestationen mittels Triangulierung und elektrooptischer Distanz erfolgen muß.

4.4 Reduktionsverfahren

Hinsichtlich des Reduktionsverfahrens ergibt sich die Notwendigkeit, eine mehrstufige Methode zu fordern. Als Grundstufe ist die Geländereduktion bis 167 km Punktdistanz und disziplinäre Plattenreduktion mit der Standortdichte 2,67 g/m² anzusehen. In weiterer Folge sind schrittweise die verschiedenen Untergrundstrukturen entsprechend der Größe des Dichtekontrasts zur Standarddichte bei der Reduktion zu berücksichtigen. Dies betrifft der Reihe nach Seen und Gletscher, junge Talfüllungen und letztlich die unterschiedliche Dichte der gebirgsbildenden Gesteinskörper bis zum Reduktionsniveau hinunter.

Daraus ergibt sich die Forderung nach folgenden digitalen Modellen für das Bundesgebiet:

- digitales Höhenmodell
- digitales Seetiefen- und Gletschermächtigkeitsmodell
- digitales Talfüllungsmodell
- digitales Dichtemodell der Oberflächengesteine

5. Stand der Neuaufnahme

Wenn man das mit Stand 1988 in Österreich verfügbare Datenmaterial nach den vorhin diskutierten Kriterien prüft, dann ergibt sich folgendes Zustandsbild:

5.1 Schweregrundnetz

Das Schweregrundnetz ÖSGN baut auf 14 Absolutschwerepunkten auf:

| | |
|------------------------|-------------------|
| TU Graz, Stmk. | Obergurgl, Tirol |
| Stift Altenburg, NÖ | Tisis, VlbG. |
| Stift Kremsmünster, OÖ | Bregenz, VlbG. |
| Penk, Kntn. | Koblach, VlbG. |
| Wien - Hohe Warte | Göstling, NÖ |
| Mannswörth, NÖ | Hochkar, NÖ |
| Schloß Ambras, Tirol | Klagenfurt, Kntn. |

Dazu kommen noch etwa 200 Punkte 1. und 2. Ordnung, sodaß im Durchschnitt ein Basispunkt je 400 km² vorhanden ist /Ruess, 1985/. Das ÖSGN und die darin integrierte, durch Absolutschwerepunkte gesicherte Hochkar-Eichstrecke sind somit als die erforderliche Basis der Landesaufnahme vorhanden.

5.2 Schwerestationen

Was die flächendeckende Vermessung der Landesaufnahme betrifft, existiert bereits eine große Anzahl an Meßpunkten. In der nachfolgenden Statistik wird davon ausgegangen, daß neben den Daten des BEV und der Universitätsinstitute auch die erforderliche Anzahl an Schwerestationen von der Erdölindustrie zur Verfügung gestellt werden. Dies ist deshalb wahrscheinlich, weil das für die Prospektion erforderliche hohe Auflösungsvermögen hierbei nicht erreicht wird. Weiters berücksichtigt die Statistik in Abb. 5, daß die Geophysik-Institute der Universität Wien und der Montanuniversität Leoben derzeit die gesamte Böhmisches Masse im Rahmen des FWF-Schwerpunktprogrammes flächendeckend vermessen. Da der Arbeitsaufwand für eine Schwerestation sehr stark von der Zugänglichkeit einer Region abhängt, was in den Alpen wiederum in erster Linie von der Höhenlage abhängig ist, erfolgt die Darstellung des Vermessungsstandes der Landesaufnahme in Abb. 5 in Form einer höhenabhängigen Häufigkeitsverteilung der Rasterelemente, für die Schweremessungen entsprechend dem Anforderungsprofil der Landesaufnahme vorliegen, bzw. noch ausstehen. Wie die Abbildung zeigt, ist der weitaus überwiegende Teil des Bundesgebietes bereits vermessen (71 %) bzw. in Arbeit (5,2 %). Die noch ausstehenden Vermessungen verteilen sich ziemlich gleichmäßig auf die verschiedenen Höhenintervalle, wie die folgende Tabelle zeigt:

Tab. 2 Bearbeitungszustand der gravimetrischen Landesaufnahme

| Höhen- intervall | Z a h l der R a s t e r e l e m e n t e | | | Summe |
|---------------------|---|-----------|-------|-------|
| | Schwere vorhanden | in Arbeit | offen | |
| <500 m | 3394 | 186 | 234 | 3814 |
| 500 - 1000 | 2179 | 317 | 390 | 2886 |
| 1000 - 1500 | 890 | 3 | 557 | 1450 |
| 1500 - 2000 | 407 | | 535 | 942 |
| 2000 - 2500 | 87 | | 419 | 506 |
| 2500 - 3000 | 5 | | 190 | 195 |
| 3000 | - | | 13 | 13 |
| Summe | 6962 | 506 | 2338 | 9806 |

Im Verhältnis zu den in den einzelnen Höhenintervallen vorhandenen Flächenanteilen nimmt selbstverständlich der Bearbeitungsgrad mit der Höhe rasch ab, sodaß in Höhenbereichen oberhalb von 1500 m die noch nicht erfaßten Flächen größer sind, als die Flächen, für die Schwerewerte vorhanden sind. Dies ist ein deutlicher Hinweis, daß ab diesen Höhen die Zugänglichkeit der Ostalpen stark abnimmt. Als Transportmittel kommen für diesen Bereich nur noch geländegängige Fahrzeuge und Hubschrauber in Betracht. Bei koordiniertem Einsatz aller daran interessierten Institute sollte die Landesaufnahme innerhalb weniger Jahre abschließbar sein, soferne das erforderliche personelle und finanzielle Potential mobilisiert werden kann.

Literatur:

- Senftl, E.: Schwerekarte von Österreich. Bouguer - Isanomalen 1 : 1 Mill., BEV, Wien 1965.
- Rinner, K.u.H. Moritz: Zur Geoidbestimmung in Österreich
Sitz.Ber. ÖAW, math.nat. Kl. II, 171 - 177, 1977.
- Rapatz, E.: Ein Softwarepaket zur ingenieurtechnischen Verwendung von Erdschwerefelddaten, 5. Int. Alp. Grav. Koll, Graz, 1989.
- Walach, G.: Der derzeitige Stand der gravimetrischen Messungen im Fohnsdorfer Tertiärbecken. Ber. Tiefbau Ostalp., 8, 27 - 32, 1980.
- Steinhauser, P.: Gravimetrische Untersuchung eines Inntal-Querschnittes bei Innsbruck, Ber. Tiefbau Ostalp., 8, 37 - 43, 1980.
- Torge, W.: Geodäsie, de Gruyter, Berlin, 268 pp., 1975.
- Meurers, B., D. Ruess u. P. Steinhauser: The Gravimetric Alpine Traverse. Geodynamics of the Eastern Alps (H.W. Flügel, P. Faupl, Editors), 334 - 344, 1987.
- Ruess, D.: Aufbau des österreichischen Schweregrundnetzes. Ber. Tiefbau Ostalp., 12, 17 - 20, 1985.

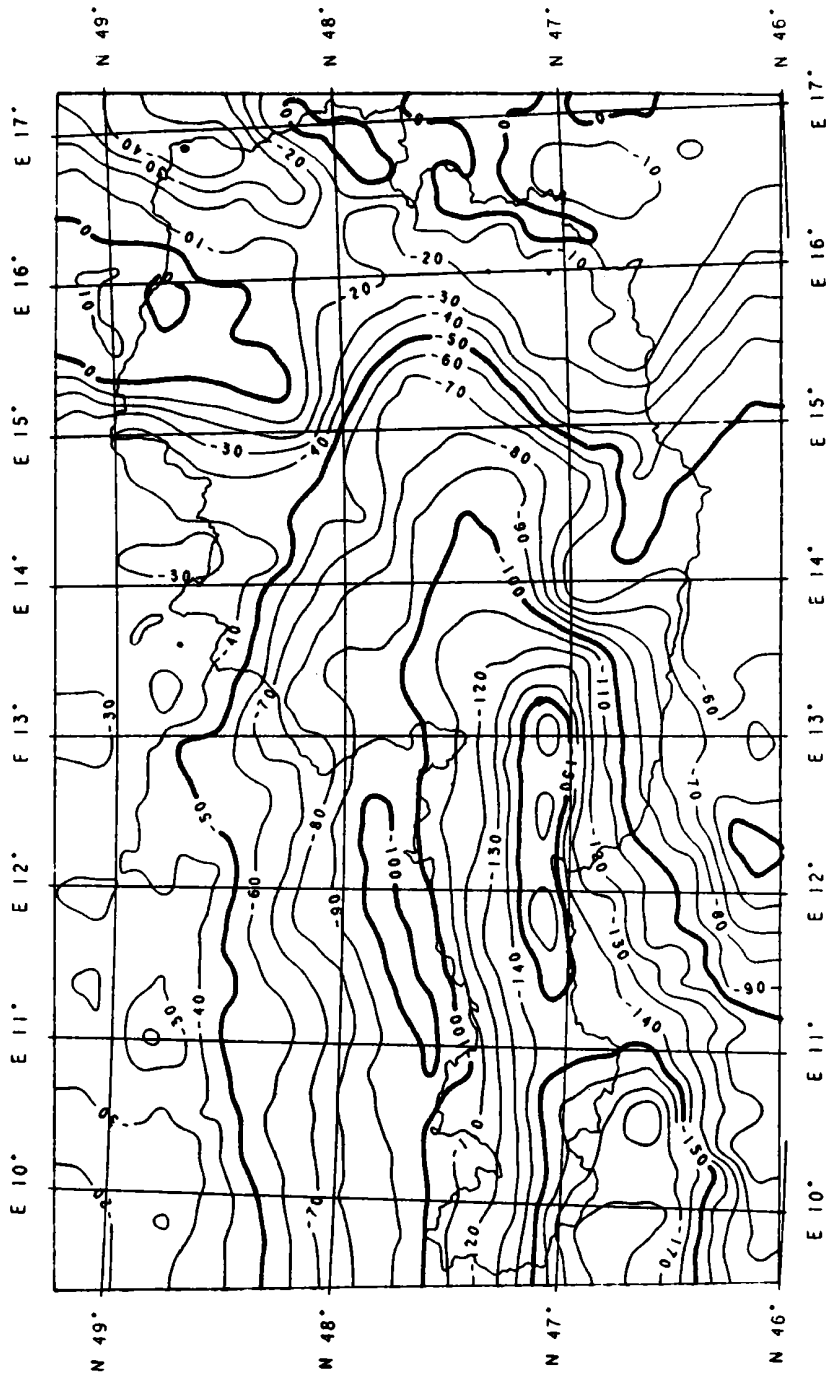


Abb. 1

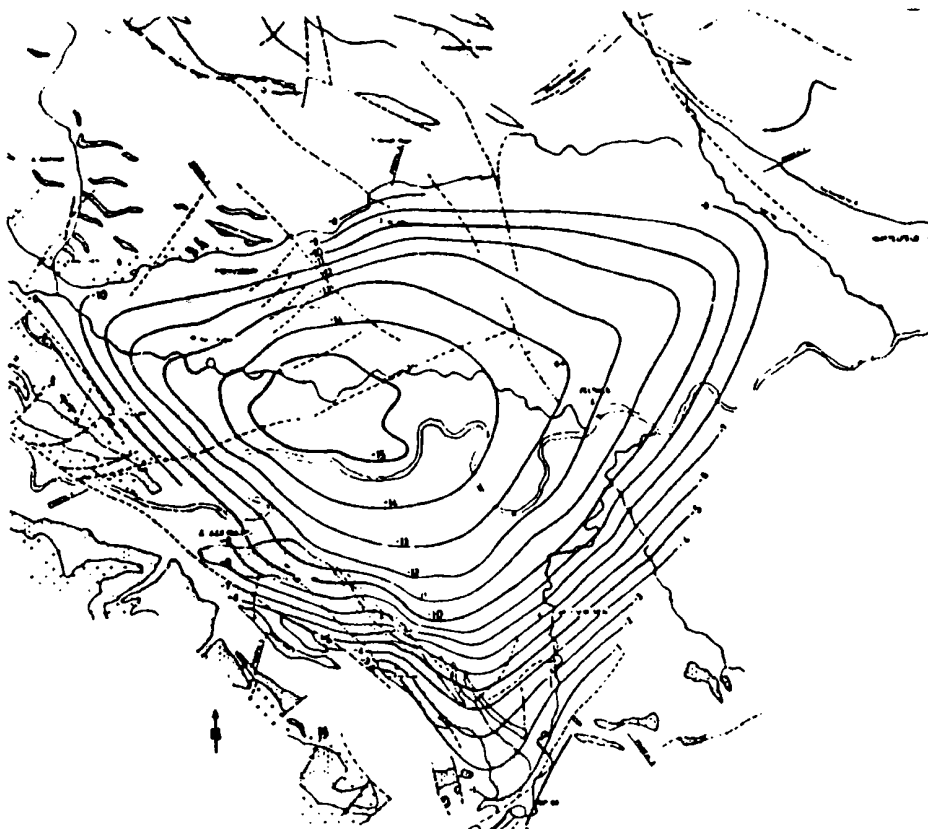


Abb. 2

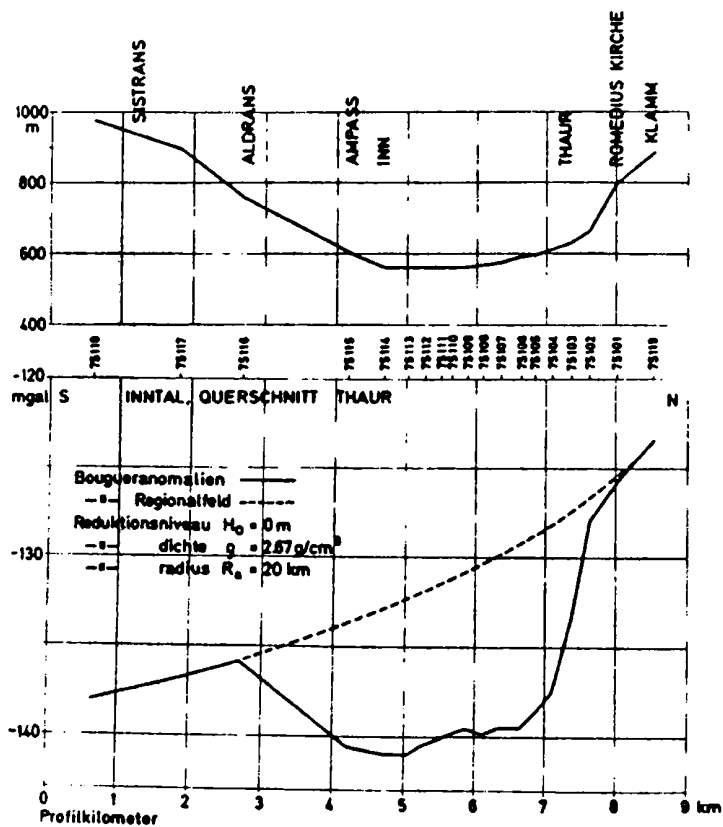


Abb. 3

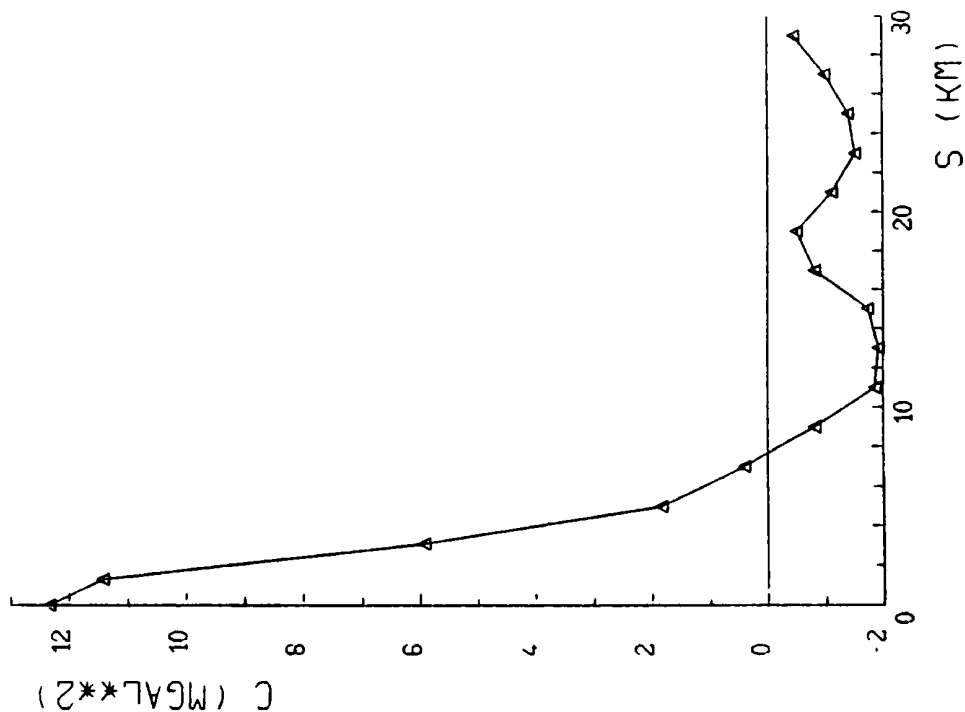


Abb. 4

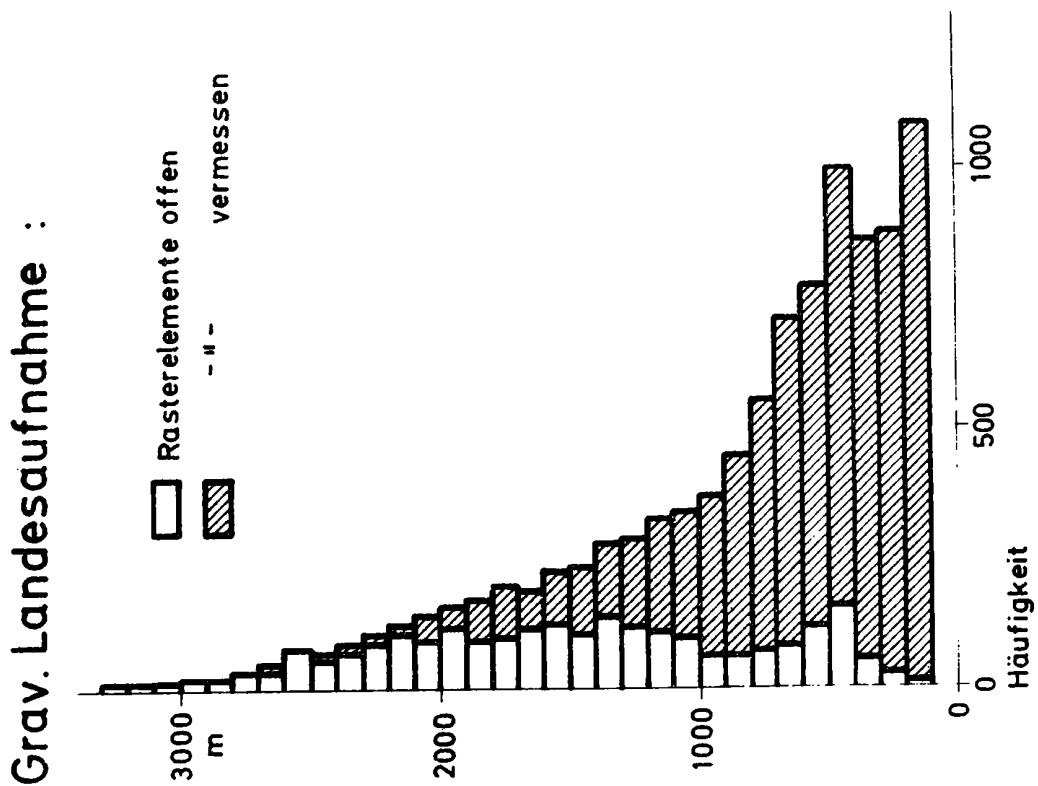


Abb. 5