

Zur Bedeutung von Absolutschweremessungen für Geowissenschaften und Rohstoffforschung

Von PETER STEINHAUSER & WOLFGANG SEIBERL*)

Mit 1 Tabelle

*Geophysik
Gravimetrie
Absolutschweremessungen
Säkuläre Schwerevariationen
Gravimetrische Prospektion*

Zusammenfassung

Die Genauigkeit gravimetrischer Präzisionsvermessungen wie sie für die Zwecke der Rohstoffforschung durchgeführt werden, beruht einerseits auf verzerrungsfreien Basisnetzen und andererseits auf langfristig stabilen Schwerewerten. Rezente Krustenbewegungen, Grundwasserspiegelschwankungen und dergleichen, sind daher im Bedarfsfall durch entsprechende Korrekturen zu kompensieren. Es wird gezeigt, daß nur Absolutschweremessungen geeignet sind, sowohl nicht deformierte Basisnetze zu gewährleisten, als auch zeitliche Schwerevariationen unter Kontrolle zu halten. Gleichzeitig bilden Absolutschweremessungen auch ein neues Verfahren zur Untersuchung geodynamischer Vorgänge.

Summary

The accuracy of precise gravity measurements as they are performed for exploration purposes depends upon the linearity of the gravity base net and the long term stability of the gravity values. Therefore it is necessary to compensate gravity measurements of highest precision for recent crustal movements, variations of the ground water table etc. It is shown that only absolute gravity measurements meet all the requirements for these corrections. In addition absolute gravity measurements are also a new tool for geodynamic investigations.

1. Einleitung

Wie bei vielen anderen physikalischen Meßmethoden ist es auch bei der Schwerkraftmessung wesentlich einfacher, die Schweredifferenz zwischen zwei Meßpunkten durch eine sogenannte Relativmessung zu bestimmen, als den absoluten Schwerebetrag an einem Meßpunkt direkt zu ermitteln. Für eine Reihe von Fragestellungen kann jedoch erst durch absolute Schweremessungen eine Antwort erwartet werden, wie im folgenden diskutiert werden soll.

2. Möglichkeiten und Grenzen relativer Schweremessungen

Gegen Ende der 60er Jahre wurde von der Firma La Coste & Romberg das Mikrogalgravimeter Modell D ent-

wickelt, dessen Auflösungsvermögen im Bereich von 2–3 μgal liegt und damit um etwa eine Größenordnung besser als die eines normalen Feldgravimeters ist, ohne dadurch das Arbeitstempo wesentlich zu vermindern. Da diese Gravimetertypen sich durch einen besonders geringen zeitlichen Gang auszeichnet und auch überraschend unempfindlich auf die unvermeidlichen Transportstöße reagiert, ist auch die Reproduzierbarkeit von Schwerewerten im Vergleich zu Standardgravimetern im gleichen Ausmaß verbessert worden.

Etwa zur gleichen Zeit konnte die zuvor nicht nur sehr langwierige sondern auch recht ungenaue Korrekturrechnung durch Automatisierung wesentlich beschleunigt und verbessert werden, da der Computereinsatz die Entwicklung merklich leistungsfähigerer Korrekturmethode gestattete (GÖTZE, ROSENBACH & STEINHAUSER, 1980). In ähnlicher Weise ermöglichten es die elektro-optischen Distanzmesser die Höhen- und Lagebestimmung der Schwerestationen selbst unter Hochgebirgsbedingungen wesentlich zu vereinfachen. Daher war es anfangs der Siebzigerjahre möglich, gravimetrische Untersuchung auf Fragestellungen auszudehnen, deren Lösung kurz zuvor für die Gravimetrie noch undenkbar gewesen wäre. Dies betrifft alle jene Fragen, bei denen die genaue Erfassung kleiner und kleinster Schweredifferenzen erforderlich ist. Insbesondere handelt es sich hierbei um die Untersuchung von Erzlagerstätten, die einen geringen Massenüberschuß besitzen, oder um geologische Strukturelemente, wie Störungen in Einheiten mit geringem Dichtekontrast. Die für ein Gebirgsland wie Österreich vielleicht wichtigste Veränderung bildet aber zweifellos die Möglichkeit, auch unter Hochgebirgsbedingungen flächenhafte regionale gravimetrische Vermessungen durchführen zu können, da nunmehr die großen Höhendifferenzen meßtechnisch und die lokal extrem schwankenden Korrekturen auswertetechnisch beherrschbar geworden sind.

Daß es aber nicht möglich ist, die Anforderungen an gravimetrische Untersuchungen beliebig zu steigern, zeigte sich bei zahlreichen Schweremessungen, wo in sich geschlossene Meßschleifen beim Anschluß an ältere Schwerestationen Differenzen aufweisen, die die jeweiligen internen Meßfehler einer Meßkampagne übersteigen. Ein Beispiel hierfür bildet die gravimetrische Vermessung von Zillingdorf im Rahmen der Braunkohlenprospektion, wo in den Sommermonaten der Jahre

*) Anschrift der Verfasser: Univ.-Prof. Dr. PETER STEINHAUSER, Univ.-Prof. Dr. WOLFGANG SEIBERL, Institut für Meteorologie und Geophysik, Abt. Angewandte Geophysik, Universität Wien, Hohe Warte 38, A-1190 Wien.

1980, 1981 und 1982 in drei Meßkampagnen auf einer Fläche von rund 60 km² insgesamt knapp 3600 Schwerestationen eingemessen worden sind (STEINHAUSER & SEIBERL, 1980 und 1982; STEINHAUSER & MEURERS, 1983). Nach unabhängiger Auswertung aller drei Meßperioden ergaben sich an den Verbindungspunkten der drei Meßnetze folgende durchschnittliche Schleifen-schlußfehler

1980–81: + 65 µgal

1982–83: + 40 µgal

Wenn man von dem unvermeidlichen Meßfehler, der wie erwähnt nur einen Teil dieser Schweredifferenzen ausmachen sollte, absieht, dann besteht nur die Möglichkeit, nicht periodische oder säkulare Schwerevariationen als Ursache anzusehen, deren systematische Untersuchung notwendig ist, wenn man das Leistungsvermögen der modernen Gravimeter in vollem Umfang nützen will.

3. Ursachen und Nachweis säkularer Schwerevariationen

Verschiedene physikalische Vorgänge können in unterschiedlichem Ausmaß zu zeitlichen Schwereänderungen beitragen und müssen deshalb in diesem Zusammenhang überprüft werden:

- rezente Krustenbewegungen;
- Massenveränderungen im oberflächennahen Bereich;
- Schwankungen der Erdrotation.

Rezente Krustenbewegungen in vertikaler Richtung sind in vielen Regionen der Erde durch Wiederholungsnivellements nachgewiesen worden, wobei die Nivellements mit ähnlichen Schwierigkeiten wie die relativen Schweremessungen zu kämpfen haben, was aufgrund des analogen Meßvorganges nicht überraschen kann.

Rezente Krustenbewegungen werden in den verschiedensten Dimensionen von lokaler bis überregionaler Größenordnung beobachtet, und es kommen dementsprechend unterschiedliche physikalische Vorgänge als Ursache dieser Bewegungen in Betracht, wobei das Spektrum von Setzungen über subkrustale Massenverlagerungen und geodynamische Kräfte bis zu isostatischen Ausgleichsvorgängen reichen kann. Um diesen Fragenkreis studieren zu können, ist es erforderlich, gleichzeitig die Krustenbewegungen und das langzeitliche Verhalten der Schwerkraft zu beobachten.

Andere Ursachen für zeitliche Schwereänderungen können Massenveränderungen im oberflächennahen Bereich sein, wozu Grundwasserspiegelschwankungen und meteorologisch bedingte Luftmassenverlagerungen gehören, aber auch, wie bereits VIKTOR CONRAD erstmals vermutete, der Einfluß von winterlichen Schneelasten oder Seespiegelschwankungen (1934).

Schwankungen der Erdrotation können über Lageveränderungen der Rotationsachse (Polbewegungen) und damit verbundenen Breitenänderungen bzw. über Schwankungen der Rotationsgeschwindigkeit und die dadurch bedingten Fliehkraftänderungen zu Schwereänderungen führen.

Derartige zeitliche Schwereänderungen konnten in extremen, lokal begrenzten Fällen durch relative Schweremessungen bereits nachgewiesen werden, wie etwa die durch eine Grundwasserspiegelabsenkung um

12 m in Tokio bewirkte Schwereabnahme um ca. 140 µgal innerhalb des Zeitraumes von 1962–71 (TSUBOI, 1983). Im allgemeinen ist aber bei den säkularen Schwerevariationen eine Größenordnung von 10¹ µgal zu erwarten, wie dies das vohin angeführte Beispiel aus Österreich zeigt und wie dies auch größenordnungsmäßige Abschätzungen der verschiedenen Effekte ergeben. Im allgemeinen wird daher die Methode der relativen Schweremessungen nicht geeignet sein, zeitliche Schwereänderungen sicher nachzuweisen, da es methodisch bedingt ziemlich lange dauert, bis größere Netze geschlossen werden können und mit steigender Meßpunktdistanz auch der Meßfehler deutlich ansteigt (MORELLI, 1974): die Trennung von regional veränderlichen und ortsunabhängigen säkularen Variationen wird praktisch unmöglich, da die zu verschiedenen Zeiten über verschiedene Meßstrecken gemessenen Schwere-differenzen die verschiedenen Effekte verwischen. Außerdem ist es bei Relativmessungen nicht möglich, die Richtung der Schwereänderung eindeutig festzulegen; hierzu ist es erforderlich, beispielsweise geologische Überlegung mitzubedenken.

Für die Untersuchung säkularer Schwerevariationen bietet sich die Methode der Absolutmessung an, weil an jedem Meßpunkt unabhängig von anderen Schwerestationen der Betrag des Schwerevektors mit hoher Genauigkeit erfaßt werden kann, während bei den Relativmessungen durch die Methode der Differenzmessung immer eine raum-zeitliche Verkettung mit anderen Meßpunkten gegeben ist, die die erwähnte Unschärfe der Aussage bewirkt.

4. Gravimetrische Basisnetze

Eines der Hauptanwendungsgebiete der Gravimetrie besteht in der regionalen Schwerevermessung, die auf die Erkundung der großräumigen geologischen Strukturen zielt. Häufig dient die Gravimetrie dabei als geophysikalische Erkundungsmethode für Rohstoff-Prospektionsvorhaben, wie z. B. die Kohlenwasserstoffprospektion.

Eine notwendige Voraussetzung für dieses Ziel der regionalen Strukturerkundung bildet die Linearität des gravimetrischen Basisnetzes, das hierzu – soweit vorhanden – in das jeweilige staatliche Schweregrundnetz eingebunden wird. Deformationen der Schweregrundnetze können durch unerkannte Nichtlinearitäten der Gravimeterskalenfaktoren und durch Fehlerfortpflanzung hervorgerufen werden, da alle Schwerewerte im Potsdamer Schweresystem nur durch einen einzigen absoluteingemessenen Punkt und auch im moderneren International Gravity Standardization Net IGSN 1971 noch immer durch nicht mehr als 10 Absolutschwerestationen weltweit abgesichert waren. Überdies haben Feinkalibrierungsuntersuchungen gezeigt, daß Nichtlinearitäten des Skalenfaktors in vielen Fällen nachgewiesen werden können (STEINHAUSER, 1978; MEURERS, RUESS & STEINHAUSER, 1983).

Derartige Deformationen der Basisnetze können entsprechende Pseudoschwereanomalien hervorrufen, die dann eine realitätsbezogene Interpretation des Schwerefeldes erschweren.

Dieser Effekt kann nur vermieden werden, wenn in die gravimetrischen Basisnetze systematisch Absolut-schweremessungen mit eingebunden werden.

5. Stand der Absolutschweremess-technik

Im Bereich der Absolutschweremess-technik wurde 1967 ein großer Fortschritt erzielt. Am Bureau International des Poids et Mesures in Sèvres wurde von SAKUMA ein auf der Freiwurf- und Fallmethode beruhender Absolutschweremesser hoher Präzision konstruiert, der heute als stationäres Laborgerät Absolutschweremessungen mit einer Reproduzierbarkeit von $\pm 1 \mu\text{gal}$ ausführen kann (WILCOX & MORELLI, 1982). FALLER konstruierte das erste transportable Absolutgravimeter, dessen Meßfehler heute im Bereich von lediglich 3–4 μgal liegt (FALLER, 1982). Ähnliche Instrumente wurden in Italien und der Sowjetunion entwickelt, so daß seit 1976 drei transportable (soweit diese Bezeichnung bei einem Instrumentengewicht zwischen 150 und 800 kg zulässig ist) Absolutschweremessgeräte verfügbar sind, die bei 1981 in Sèvres durchgeführten Vergleichsmessungen mit einem mittleren Fehler von 8 μgal übereinstimmende Ergebnisse erzielten.

Absolutmessungen entlang der Europäischen Gravimetereichstrecke mit dem italienischen Instrument bestätigen die Realität der vermuteten Deformationen des europäischen Schweresystems.

In Österreich wurden 1980 Absolutschweremessungen mit dem italienischen Instrument an den vier Meßpunkten Kremsmünster, Altenburg, Graz und Penk durchgeführt (MARSON & STEINHAUSER, 1981). Die Stationen wurden unter Bedachtnahme auf eine gleichmäßige Verteilung primär nach geologisch-dynamischen Gesichtspunkten ausgewählt. Altenburg liegt in der Böhmisches Masse und somit in der wahrscheinlich stabilsten geologischen Einheit Österreichs und Kremsmünster in der ebenfalls relativ stabilen Molasse des nördlichen Alpenvorlandes. Penk/Tauernbahn liegt im Bereich der maximalen in Österreich beobachteten Krustenhebungen (STEINHAUSER & GUTDEUTSCH, 1976) und Graz am Alpenrand im Bereich des Grazer Paläozoikums.

Derzeit werden die Basispunkte des österreichischen Schweregrundnetzes ÖSGN relativ an die Absolutmeßpunkte angeschlossen. Dabei zeigen sich neben der beträchtlichen Niveaueverschiebung auch kräftige Deformationen des alten, noch auf dem Potsdamer Schwere-system beruhenden Grundnetzes (RUESS, 1983). Dies ist aus den Unterschieden der für verschiedene Regionen bestimmten mittleren Differenzen ersichtlich, die eine regionale Deformation bis zu 176 μgal ergeben.

Im Vergleich einzelner Basispunktdifferenzen steigt die Deformationsgröße nach den bisherigen Ergebnissen bis auf 320 μgal an.

Tabelle 1: Regionale mittlere Abweichung des alten Basis-schwerenetzes von den Absolutschwerpunkten 1980.

Region	Zahl der Basispunkte	mittlere Abweichung $g_{\text{alt}} - g_{\text{neu}}$
Nordtirol	13	14,938 \pm 0,081 mgal
Kärnten, Osttirol	6	14,945 \pm 0,048 mgal
Salzburg, OÖ	3	15,057 \pm 0,115 mgal
NÖ, Wien	9	15,090 \pm 0,058 mgal
Burgenland	5	15,110 \pm 0,066 mgal
Ost-Steiermark	9	15,114 \pm 0,042 mgal

6. Ausblick

Aus den hier diskutierten Gründen ist es sehr zu begrüßen, daß eine Arbeitsgemeinschaft von sechs Instituten, der unter wesentlicher Beteiligung der Geologischen Bundesanstalt noch das Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien, das Institut für Geophysik der Montanuniversität Leoben, das Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie sowie die Abteilung für Physikalische Geodäsie der TU Graz und die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik angehören, ein transportables Absolutschweremessgerät anschaffen wird. Es handelt sich hierbei um das von FALLER entworfene Instrument, das mit einem mittleren Meßfehler von ca. 4 μgal das genaueste und mit ca. 150 kg Nettogewicht das leichteste derzeit verfügbare Gerät darstellt; es wird derzeit am Joint Institute for Laboratory Astrophysics in Boulder zusammengebaut.

Mit diesem Instrument soll die Zahl der Absolutmeßpunkte des ÖSGN im erforderlichen Ausmaß erhöht werden, um eine sichere Basis für gravimetrische Feldmeßprogramme aller Art zu schaffen. Außerdem sollen rezente Krustenbewegungen in lokalem und regionalem Maßstab untersucht werden.

Als lokale Untersuchung wäre beispielsweise ein Doppelprofil durch das südliche Wr. Becken geeignet, wobei der nördliche Profilverlauf vom Kahlenberg über die Schwechater Senke bis zu den Hainburger Bergen (Tatriden) verlaufen könnte. Der südliche Profilverlauf wäre von der Hohen Wand über die Wr. Neustädter Pforte zum Neusiedler See zu führen. Damit kreuzen beide Profilverläufe das Störungssystem des Alpenostrandes, das seismisch aktiv ist (das Schwadorfer Beben vom 8. Oktober 1927 war das letzte größere Ereignis dieser Region), weshalb diese Untersuchung auch für die Frage der Erdbebenvorhersage von Bedeutung wäre. Die geodynamische Aktivität dieses Gebietes wird auch durch die Wiederholungsnivellements des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (Hohe Wand – Wr. Neustadt – Zemendorf) belegt. Daß diese Krustenbewegungen bereits seit längerer Zeit andauern, beweist das „Schwechater Loch“, wo im Rahmen der Ölprospektion die größten Tertiär-Sedimentmächtigkeiten des Wr. Beckens (ca. 5800 m) nachgewiesen worden sind.

In regionalem Maßstab wäre die systematische Übermessung des österreichischen Bundesgebietes vorgeschlagen, die von den vier bereits 1980 eingemessenen Stationen Altenburg, Kremsmünster, Penk und Graz ausgehen sollte. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der bisherigen Wiederholungsnivellements sollen die neuen Stationen so ausgewählt werden, daß Regionen gleichartiger Bewegungen abgegrenzt werden können. Aus Vergleichsgründen wird es hierbei zweckmäßig sein, einzelne ausgewählte Kontrollpunkte im benachbarten Bayern, in der Schweiz und in Südtirol sowie in Norditalien mit einzumessen. Unter ständiger Erweiterung des Netzes wären hierbei laufend Wiederholungsmessungen an bereits bestehenden Stationen durchzuführen.

Ob im Alpenraum infolge der jahreszeitlich wechselnden Schneelast Krustendeformationen und entsprechend zyklische Schwerevariationen ausgelöst werden, wäre an einer geeigneten, im Zentralteil der Ostalpen (z. B. inneres Ötztal) gelegenen Station durch Wiederholungsmessungen in mehrwöchigen Abständen zu überprüfen.

Literatur

- FALLER, J. E., GUO, Y. G., RINKER, R. L. & ZUMBERGE, M. A.: Advanced Absolute Gravity Determination. – Proceed. IAG, Gen. Meeting, Tokyo 1982.
- GÖTZE, H. J., ROSENBAACH, O. & STEINHAUSER, P.: Die Bestimmung der mittleren Geländehöhen im Hochgebirge für die topographische Reduktion von Schweremessungen. – Ber. Tiefbau Ostalp., 9, Wien 1980.
- IMGC: Measurements of Gravity Accelerations in Europe, America, Asia. – Turin 1981.
- MARSON, I. & STEINHAUSER, P.: Absolute Gravity Measurements in Austria. – EOS, Trans. Am. Geoph. Un., 62, Washington 1981.
- MEURERS, B., RUESS, D. & STEINHAUSER, P.: Zur Kalibrierung von LCR-Gravimetern, Modell D. – Ber. Tiefbau Ostalp., 11, Wien 1983.
- MORELLI, C.: The International Gravity Standardization Net 1971. – IAG, Publ. Spec. 4, Paris 1974.
- RUESS, D.: Aufbau des österreichischen Schweregrundnetzes ÖSGN. – 3. Int. Alpengravimetrie Kolloquium, Leoben 1983.
- STEINHAUSER, F.: Über die elastische Deformation der Erdkruste durch lokale Belastung mit besonderer Berücksichtigung der Schneebelastung der Alpen. – Gerlands Beiträge, 41, 4, Leipzig 1934.
- STEINHAUSER, P. & GUTDEUTSCH, R.: Rezente Krustenbewegungen und Isostasie in den Hohen Tauern. – Arch. Met. Geoph. Biok., Ser. A., 25, Wien 1976.
- STEINHAUSER, P.: Scale Factor Determinations of a La Coste & Romberg Gravimeter Modell D. – J. Geoph. 44, 4, Heidelberg 1978.
- STEINHAUSER, P., SEIBERL, W., MEURERS, B. & RUESS, D.: Montangeophysikalische Untersuchung im Raum Zillingdorf-Nord. – IMG, Geophy. Forschungsbericht, 1, Wien 1980.
- STEINHAUSER, P., SEIBERL, W., MEURERS, B., BIEDERMANN, A., HEINZ, H. & ARIC, K.: Montangeophysikalische Untersuchung der Untergrundstrukturen im Raum Zillingdorf-Süd. – IMG, Geoph. Forschungsbericht, 5, Wien 1982.
- STEINHAUSER, P. & MEURERS, B.: Gravimetrische Untersuchung der Untergrundstrukturen im Raum Zillingdorf-West. – IMG, Geoph. Forschungsbericht, 9, Wien 1983.
- TSUBOI, Ch.: Gravity. – London (G. Allen & Unwin) 1983.
- WILCOX, L. E. & MORELLI, C.: Informal Absolute Gravity Meeting. – BGI-Bulletin, 51, Toulouse 1982.

Manuskript bei der Schriftleitung eingelangt am 14. Februar 1984.