

GEODYNAMISCHE ASPEKTE DER GEODÄSIE

Von

P. BÍRÓ

Geodätisches Institut, Lehrstuhl für Höhere Geodäsie, TU Budapest

(Eingegangen am 1. Juli 1976)

Die bekannte Aufgabe der Geodäsie (d. h. die Bestimmung der Figur, des äußeren Schwerefeldes der Erde sowie des mittleren Erdellipsoides) wird durch die Bestimmung einer Reihe von geometrischen und physikalischen Parametern gelöst. Dafür stehen der Geodäsie verschiedene geometrische bzw. physikalische Verfahren zur Verfügung. Da die Erde selbst ein physikalischer Körper und das Schwerefeld ein physikalisches Kraftfeld ist, müssen für jedes Verfahren gewisse physikalische Annahmen als Grundlage genommen (d. h. ein geeignetes physikalisches Modell aufgebaut) werden, durch welche die physikalische Realität mehr oder weniger angenähert wird.

Mit der Entwicklung der Wissenschaft und der Meßtechnik werden diese physikalischen Modelle von Zeit zu Zeit überprüft und verfeinert. In diesen Jahrzehnten haben wir wieder einmal diese Aufgabe zu lösen.

Das einfachste physikalische Modell eines starren Erdkörpers, des durch diesen erzeugten, in der Zeit konstanten Erdschwerefeldes und der an dieses gebundenen invariablen Bezugssysteme haben sich jahrhundertlang gut bewährt.

Seit der Jahrhundertwende haben die Geowissenschaften ausreichende Beweise geliefert, auf deren Grundlage die Geodäsie ihren früheren Standpunkt — das einfache statische physikalische Modell — ablehnen mußte. Es sind immer mehr physikalische Prozesse des Erdkörpers bekannt geworden und die Geodäsie mußte auch mit der Möglichkeit von horizontalen und vertikalen Verlagerungen der Oberflächenpunkte sowie mit gewissen zeitlichen Änderungen einiger Elemente von Bezugssystemen rechnen. Diese Richtung der Geodäsie, die auch zeitliche Vorgänge im Aufbau des physikalischen Modells berücksichtigte, wurde zutreffend als »vierdimensionale Geodäsie« (z. B. Torge 1975) oder im Gegensatz zu der statischen Geodäsie als »dynamische Geodäsie« bezeichnet.

Im folgenden wird eine kurze Übersicht der wichtigsten — bis heute bekannten — physikalischen Vorgänge der Erde gegeben, die die Ergebnisse der Geodäsie beeinflussen.

I

Die bekannten geologischen Erscheinungen (wie z. B. die rezenten orogenen Vorgänge, die Auffaltung der oberflächennahen Schichten in Gebirgen, das Entstehen von Spaltlinien bzw. Tiefseegräben, die ständige Wirkung des Windes und des Wassers, die Erosion, Deflation, Sedimentation usw.) zeigen eindeutig, daß die heutige Oberflächengestalt der Erde als Ergebnis von *langen physikalischen Prozessen* zustande gekommen ist. Diese Prozesse und damit auch die ständige Änderung der Oberflächengestalt der Erde sind noch bei weitem nicht zu Ende.

Es ist auch wohl bekannt, daß das Material der oberflächennahen Schichten der Erdkruste und des oberen Mantels, der Lithosphäre, fest aber nicht starr ist, d. h. die Möglichkeit des Zustandekommens von Deformationen besteht. Andererseits weiß man, daß bestimmte tiefliegende Schichten, wie z. B. der unterhalb des etwa 100 km tief liegenden Teils des Mantels, die sog. Astenosphäre, eine geringere Viskosität aufweisen und sich über längere Zeit wie eine Flüssigkeit verhalten. Demzufolge können *Material- und Energieströmungen* in diesem Bereiche zustande kommen.

Als Ergebnis der erwähnten dynamischen Vorgänge (und noch mehrerer anderer) können die Festpunkte *horizontalen Bewegungen* bis etwa einigen cm/Jahr unterliegen. Die Bewegungen größerer Teilstücke der Erdoberfläche lassen sich durch die Theorie der Plattentektonik wohl erklären. Auch die Konzeption der Kontinentalverschiebung von Wegener und des »Sea-Floor-Spreading« (der Ausbreitung der Ozeanböden) lassen sich in die Theorie gut einfügen.

Daneben können auch *vertikale Bewegungen* der Erdoberfläche in der Größenordnung von mm bis cm/Jahr zustande kommen. Ihre Ursache kann in ähnlichen dynamischen Prozessen wie im vorigen, weiters z. B. in rezenter Gebirgsbildung, postglazialen Ausgleichsvorgängen, Kompaktion von Sedimentbecken usw. gesucht werden.

Infolge der erwähnten physikalischen Prozesse der Erde muß man bei wiederholten Lage- und Höhenbestimmungen mit entsprechenden horizontalen und vertikalen Verlagerungen der Festpunkte rechnen.

Andererseits können Wiederholungsmessungen von bestimmten horizontalen und vertikalen Punktbewegungen der Geodäsie wertvolle numerische Angaben für geodynamische Forschungen, besonders für Forschungen der rezenten Erdkrustenbewegungen, liefern. (Da man aus den Oberflächendaten auf die Bewegungen von ganzen Krusten- bzw. Lithosphärenplatten — besonders im vertikalen Sinne — nur mit vielen Unsicherheiten schließen kann, werden wir im weiteren vorsichts- und eindeutigkeitshalber statt Krustenbewegungen von »Oberflächenbewegungen« sprechen.)

II

Die Endergebnisse der geodätischen Meß- und Rechenarbeiten sind großenteils Koordinaten von Oberflächenpunkten der Erde. Als Ergebnis von Wiederholungsmessungen werden Koordinatenänderungen bestimmt. Diese letzteren realisieren — abgesehen von Meßfehlern — wahre Oberflächenbewegungen, aber nur unter der Voraussetzung, daß die entsprechenden Elemente des Bezugssystems der Koordinatenbestimmungen in dem gegebenen Zeitraum unverändert geblieben sind. Die diesbezüglichen Forschungen haben aber gezeigt, daß zwei Grundelemente der geodätischen Koordinatenbestimmungen (der Rotationsvektor und das Schwerfeld der Erde) wesentlichen zeitlichen Änderungen unterliegen.

Bei dem Rotationsvektor der Erde muß man mit

- Richtungsänderungen im Weltraum (Präzession und Nutation),
- Verlagerung des Rotationsvektors (der Drehachse) in dem Erdkörper oder mit der Verlagerung der Rotationsachse und des Körpers im Verhältnis zueinander (Polbewegungen), und
- Größenänderungen (Rotationsschwankungen)

rechnen. Mit der kontinuierlichen Bestimmung dieser Änderungen beschäftigt sich die planetare Dynamik der Erde.

Durch die Präzessions- (und Nutations-)bewegung des Rotationsvektors der Erde werden die äquatorialen Koordinaten (Rektaszension und Deklination) der Himmelskörper beeinflusst. Die beobachteten Größen müssen u. a. mit der Präzession und Nutation zu dem mittleren Himmelsäquator und dem mittleren Frühlingspunkt zur Epoche des Sternkatalogs transformiert (reduziert) werden. Da bei dieser Bewegung die Rotationsachse als an die Erdmasse gebunden betrachtet werden kann, sind die astronomischen Positionen (astronomische Breite und Länge) der Oberflächenpunkte dadurch keineswegs beeinflusst.

Da die Rotation der Erde nicht um die Figurenachse (d. h. um die Hauptträgheitsachse mit maximalem Trägheitsmoment) begann, ist sie instabil, d. h. Rotationsachse und Erdkörper sind gegeneinander beweglich (Polschwankungen). Abgesehen von der geringen Bewegung der Drehachse (des Rotationsvektors) kann der ganze Vorgang als periodische Verlagerungen der Erdmasse gegen die Drehachse betrachtet werden.

Die Hauptperiode dieser Bewegung, die Chandlersche Periode ändert sich zwischen 405 und 457 Tagen. Die Chandlersche Bewegung wird noch durch Bewegungen mit jährlichen, halbjährlichen und täglichen Perioden überlagert. Es gibt auch eine säkulare Polbewegung, die sog. Polwanderung. Diese letztere hängt vermutlich mit säkularen Massenverlagerungen der Erde zusammen. Die Polbewegungen beeinflussen die globalen astronomischen oder kartesischen Raumkoordinaten der Oberflächenpunkte. Eindeutigkeithalber

müssen die Koordinatenbestimmungen immer auf eine gemeinsame mittlere Pollage (Conventional International Origin) reduziert werden.

Neben den Verlagerungen des Rotationsvektors im Weltraum bzw. im Erdkörper sind auch Schwankungen im Betrag des Rotationsvektors, d. h. *Schwankungen der Rotationsgeschwindigkeit* zu beobachten. Aufgrund des Gesagten muß man mit einer säkularen Verlangsamung, jahreszeitlichen Schwankungen mit Perioden von einem Jahr und von einem halben Jahr sowie mit unregelmäßigen und plötzlichen Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit rechnen. Auch diese sind auf Massenverlagerungen in dem Erdkörper zurückzuführen. Auch die Rotationsschwankungen beeinflussen die astronomischen und die geozentrischen kartesischen Raumkoordinaten der Erdoberflächenpunkte. Auch eine Schwankung und Säkularänderung der Erdabplattung hängt damit zusammen.

Die Schwankungen der Lage und des Betrags des Rotationsvektors können nur zum Teil mit dem verhältnismäßig einfachen Modell des Kreisels mathematisch-physikalisch erfaßt werden. Ein großer Teil bleibt übrig, was nur durch Abweichungen vom einfachen Modell, in erster Linie durch regelmäßige und unregelmäßige Massenverlagerungen, also durch physikalische Prozesse im Erdkörper erklärt werden kann. Deshalb sind diese Schwankungen des Rotationsvektors meist nur empirisch, durch regelmäßig wiederholte astronomisch-geodätische Beobachtungen zu bestimmen. Wie vorher schon erwähnt wurde, werden aber die globalen Koordinaten eines Beobachtungspunkts auch durch die Oberflächenbewegungen der unmittelbaren Umgebung beeinflußt. Es ist gar nicht so einfach, in den Ergebnissen die Wirkung der Änderungen des Koordinatensystems von den wahren absoluten Verlagerungen (Bewegungen) der Beobachtungspunkte zu trennen. In der letzten Zeit wurde die Lösung dieses Problems durch neue Möglichkeiten der kosmischen Geodäsie etwas erleichtert. Es hängt aber eben damit zusammen, daß die höhere Genauigkeit dieses Verfahrens eine weitere Präzisierung der astro-geodätischen Bezugssysteme erfordert (z. B. Groten 1975).

III

Unter den Elementen astrogeodätischer Bezugssysteme spielt neben dem Rotationsvektor auch das *Schwerefeld der Erde* eine äußerst bedeutende Rolle. Die Richtung des Schwerevektors realisiert im physikalischen Sinne die örtliche Lotrichtung, auf welche sich — fast ohne Ausnahme — die astronomischen und geodätischen Meßergebnisse beziehen. Der Betrag des Schwerevektors ist eine mit hoher Genauigkeit meßbare, bedeutende physikalische Größe. Die Niveauflächen des Potentials des Erdschwerfeldes bilden die Bezugsfläche (das Bezugssystem) der Höhenbestimmungen. Das bedeutet,

daß neben den bisher erwähnten physikalischen (dynamischen) Vorgängen des Erdkörpers und Rotationsvektors auch jeweilige zeitliche Änderungen des Erdschwerefeldes die Koordinatenbestimmungen d. h. die globalen Koordinaten der Erdoberflächenpunkte beeinflussen können.

Es soll schon jetzt darauf hingewiesen werden, daß mehrere, schon früher erwähnte Vorgänge die zeitliche Variabilität nicht nur des Rotationsvektors, sondern gleichzeitig auch des Schwerefeldes herbeiführen. Diese sind in erster Linie die äußeren (kosmischen) Kräfte (wie z. B. die Gezeitenkräfte) und jede Massenverlagerung der Erde. Die letzteren führen nämlich zur Änderung der Massenverteilung und dadurch nicht nur zur Änderung der Trägheitsmomente (und damit der Rotationsverhältnisse) der Erde, sondern gleichzeitig zur Änderung der Massenanziehung, zur Variabilität der Richtung und des Betrags des Schwerevektors. Sie werden z. T. erst während geologischer Zeiten bemerkbar. Es gibt aber welche, die auch die heutige Meßgenauigkeit überschreiten.

Die neuesten Erkenntnisse der Geophysik haben genügende Argumente geliefert, um für die Geodäsie bedeutende langperiodische bzw. Säkularvariationen des Erdschwerefeldes vorauszusetzen. In diesem Zusammenhang möchten wir nur einen Gedanken erwähnen.

Nach der Theorie des ungarischen Geophysikers, Prof. Barta können bedeutende globale zeitliche Änderungen des Erdschwerefeldes, die eine bestimmte — keinesfalls konstante — Verteilung auf der Erdoberfläche aufweisen, auch aufgrund der stetigen Verlagerung in Westrichtung des exzentrisch liegenden inneren Erdkerns mit einer Winkelgeschwindigkeit um etwa $0,2^\circ/\text{Jahr}$ hervorgerufen werden (Barta 1961—1971).

Beliebige zeitliche Änderungen des Erdschwerefeldes können numerisch am einfachsten mit der Änderung des Erdpotentials als Funktion der Zeit und des Ortes erfaßt werden. Aus den Potentialänderungen kann unter Anwendung der Potentialtheorie und der Loveschen Theorie der Elastizität der Erde auf die für die Geodäsie interessanten Effekte der zeitlichen Änderungen des Erdschwerefeldes geschlossen werden. Diese sind:

- Vertikalverschiebung der Niveauebene mit konstantem Potentialwert,
- Änderung des Betrags des Schwerkraftvektors (d. h. die Änderung der Größe der Schwerebeschleunigung) auf der Erdoberfläche,
- Deformationen der Niveauebenen der Erde,
- daraus folgende Änderungen der Richtung des Schwerkraftvektors (d. h. Änderung der Richtung der örtlichen Vertikalen),
- elastische Deformationen des Erdkörpers.

Durch die angeführten zeitlichen Änderungen des Erdschwerefeldes werden die geodätischen Ortsbestimmungen und besonders die wiederholten Koordinatenbestimmungen für geodynamische Zwecke in folgenden Beziehungen beeinflusst (Biró 1971—1975).

Da das Maß der Schwerefeldänderung ortsabhängig ist, sind die Vertikalverschiebungen der Niveaulächen örtlich im allgemeinen von verschiedener Größe. Folglich ändert sich die Höhendifferenz zweier Oberflächenpunkte der Erde infolge der Änderung des Schwerefeldes auch dann, wenn man sich die Erde *als absolut starr* vorstellt, und daher die absolute räumliche bzw. relative (aufeinander bezogene) Lage der Punkte vollkommen unverändert ist. Diese Feststellung erinnert daran, daß *eine beobachtete Änderung der Höhendifferenz zweier Punkte noch nicht unbedingt die Änderung (in vertikalem Sinne) der relativen gegenseitigen Lage der beiden Punkte bedeutet*. Die Änderung der Höhendifferenz kann einfach aus einer in der Zwischenzeit erfolgten Änderung des Schwerefeldes herrühren. Wäre die Masse der Erde eine ideale Flüssigkeit (und würde sich das Potential auf der Oberfläche nicht ändern), so würde die Gestalt der Erdoberfläche den Verschiebungen der Niveaulächen und deren stellenweise mit Verschiebungen verschiedener Größe verbundenen Formänderungen folgen. In diesem Falle würde auf Wirkung einer zeitlichen Änderung des Schwerefeldes in den Höhendifferenzen keinerlei Änderung eintreten, obwohl sich die Erdoberflächenpunkte in einem der Verschiebung der Niveaulächen entsprechenden Maße in lotrechter Richtung verlagern würden!

Die Masse der Erde oder genauer ihre oberflächennahen Schichten, die Lithosphäre sind jedoch weder vollkommen starr, noch stellen sie eine ideale Flüssigkeit dar, sondern bestehen aus elastischen Feststoffen. Folglich darf angenommen werden, daß den zeitlichen Änderungen des Schwerefeldes *elastische Formänderungen* gewisser Größe folgen. (Diese Erscheinung ist in Verbindung mit der Gezeitwirkung wohlbekannt.) Durch die mathematische Analyse des Verlaufs dieser Erscheinung wurde folgendes festgestellt.

Bei jeder Änderung (ungleich Null) des Schwerefeldes ändert sich die absolute räumliche (und im allgemeinen die aufeinander bezogene relative) Höhenlage der Erdoberflächenpunkte (auch dann, wenn in der Umgebung des Punktes gar keine Bewegung geologischen Ursprungs stattfand). Gleichzeitig verschieben sich auch die Niveaulächen des Schwerefeldes in vertikalem Sinne. Aus den zwei verschiedenen Wirkungen resultiert eine Änderung der zwischen den Oberflächenpunkten meßbaren Höhendifferenz. Das Maß dieser Änderung stimmt mit der relativen Verschiebung der Niveaulächen im Verhältnis zu der Erdoberfläche überein und läßt sich mit Hilfe von Messungen auf der Erdoberfläche, durch wiederholtes Nivellement und dazugehörige Schweremessungen oder lediglich durch wiederholte absolute oder relative Präzisionsschweremessungen zahlenmäßig bestimmen.

Auch die Meereshöhe der Punkte der Erdoberfläche ändert sich in ähnlicher Weise auf Wirkung einer zeitlichen Änderung des Schwerefeldes. Da der Meeresspiegel mit guter Näherung als ein idealer Flüssigkeitsspiegel betrachtet werden darf (und mit guter Näherung angenommen werden kann, daß auf dessen Oberfläche das Potential unverändert bleibt), die Mareograph-

stationen hingegen an die elastische Erdoberfläche gebunden sind, muß festgestellt werden, daß *die beobachteten Änderungen des mittleren Meeresspiegels in der Regel nicht die absoluten senkrechten Verlagerungen der Erdoberfläche spiegeln, sondern nur die relative Lageänderung der Niveaufläche und der elastischen Erdoberfläche bedeuten.*

Nach der Loveschen Theorie der Elastizität der Erde kann zahlenmäßig nachgewiesen werden, daß eine *Änderung der Meereshöhe oder der aufeinander bezogenen Höhendifferenz von Punkten in einem veränderlichen Schwerfeld (selbst annähernd) nicht gleich der wirklichen (vollen oder absoluten) Bewegung der Erdoberfläche in vertikalem Sinn ist.* Diese zeigt nur die gegenseitigen (relativen) Verschiebungen der Oberfläche und der Niveauflächen.

Würden neben den elastischen Deformationen der Oberfläche keine Bewegungen anderen Ursprungs vorhanden sein, könnten die absoluten Bewegungen auf elastizitätstheoretischer Basis in Abhängigkeit von den Höhen- bzw. Höhendifferenzänderungen, in Kenntnis der Elastizitätskennwerte der Erde rechnerisch bestimmt werden.

Da jedoch in der Wirklichkeit auch mit verschiedenen Oberflächenbewegungen von anderem (nicht elastischem) Ursprung zu rechnen ist, muß festgestellt werden, daß *weder aus den Änderungen der Höhen, noch der Höhendifferenzen oder der Schwerebeschleunigungswerte auf vollständige (absolute) senkrechte Verschiebungen der Oberfläche (oder der Niveauflächen) eindeutig geschlossen werden kann.*

Die bisherigen Feststellungen auf die vertikalen Erdkrustenbewegungen angewandt, muß festgestellt werden, daß nach den gegenwärtigen Untersuchungsmethoden (wiederholtes Präzisionsnivellement und dazugehörige Schweremessung) statt der wirklichen (absoluten) senkrechten Bewegung der Oberfläche lediglich die aufeinander bezogene, relative Verlagerung eines Erdoberflächenpunktes und der in der Anfangslage durch diesen durchgehenden Niveaufläche bestimmt werden kann. Werden in jedem Fall die Messungen mit der mittleren Meereshöhe eines Meeres verknüpft, erhält man auf die jeweilige Lage dieses mittleren Meeresniveaus in der Vertikalen des Prüfpunktes bezogene, relative Oberflächenbewegungen.

Bei der Untersuchung anderer Wirkungen der zeitlichen Schwerfeldänderungen kann festgestellt werden, daß sich als deren Folge *auch die Größe der Schwerebeschleunigung auf der Erdoberfläche ändert.* Es läßt sich nachweisen, daß aus den Ergebnissen von wiederholten, extrem genauen Messungen der absoluten Schwerebeschleunigung bzw. der wiederholten relativen Schweremessungen zwischen Punkten für die Bewegungen der Erdoberfläche *dieselben kennzeichnenden Größen* (namentlich die Änderung des Potentialwertes bzw. der Potentialdifferenz und aus diesen die Änderung der Höhe bzw. der Höhendifferenz) *bestimmt werden können wie durch wiederholtes Nivellement, d. h. daß auch aus Schweremessungen ausschließlich auf die relative Verschiebung*

der Erdoberfläche und der Niveaulächen geschlossen werden kann. Für die Bestimmung letzterer ergibt sich aber somit eine neue Möglichkeit und es läßt sich empfehlen, Nivellementslinien großer Länge durch die viel wirtschaftlicheren Schweremessungen zu ersetzen oder zu kontrollieren. Im Gegensatz zu den bisherigen Erwartungen *ermöglichen leider die Schweremessungen auf der Erdoberfläche keinen Nachweis der zeitlichen Änderung des Schwerefeldes bzw. der absoluten Oberflächenbewegungen*. Das hat seinen Grund einfach darin, daß die Änderung der Oberflächenschwerebeschleunigung neben zeitlicher Änderung des Schwerefeldes und den mit dieser in funktionellem Zusammenhang stehenden elastischen Formänderungen auch die Folge aller aus anderen Ursachen auftretenden vertikalen Oberflächenbewegungen ist. Für die Bestimmung letzterer steht jedoch, wie es aus dem Gesagten zu erkennen ist, einstweilen keine Methode zur Verfügung.

Eine weitere Wirkung der zeitlichen Änderung des Schwerefeldes, die auch mit der Formänderung der Niveaulächen in Zusammenhang steht, ist die *zeitliche Richtungsänderung* des Schwerevektors, d. h. *der örtlichen Vertikalen*. Infolgedessen ändern sich die astronomischen Koordinaten des Oberflächenpunktes, ohne daß sich die Lage des Punktes in horizontalem Sinne änderte (Pick 1973, Faitelson-Jurkina 1974). Daher gilt auch in diesem Sinne, daß eine *Änderung der geographischen Niveaulächenkoordinaten nicht unbedingt eine Oberflächenbewegung in horizontalem Sinne bedeutet*.

Da die örtliche Vertikale gleichzeitig auch die Oberflächennormale der durch den Punkt durchgehenden Niveauläche ist, besteht zwischen ihrer Richtungsänderung über die Neigungsänderung der Niveauläche auch ein Zusammenhang mit der Formänderung letzterer und daher auch mit der Änderung der Höhendifferenzen. Durch die Erkenntnis dieses Zusammenhangs (Vogler 1873) wird ein anderer Weg der Bestimmung der mit der zeitlichen Änderung verbundenen Höhendifferenz- bzw. Höhenänderungen (Faitelson-Jurkina 1973, 1974) ermöglicht. Für die praktische Anwendung müssen die Änderungen der Schwerebeschleunigung in der Umgebung des Punktes bekannt sein. Es ist jedoch hinzuzusetzen, daß sich im Sinne unserer früheren Feststellung der Wert der Schwerebeschleunigung auf der Oberfläche nicht nur auf Wirkung der zeitlichen Schwerefeldänderungen, sondern auch infolge vertikaler Oberflächenbewegungen anderen Ursprungs ändert.

IV

Aus dem Gesagten geht hervor, daß man bei der inhaltlichen Bewertung der Differenzen von wiederholten Koordinatenbestimmungen der Erdoberflächenpunkte mit großer Umsicht verfahren muß. Im Sinne der Betrachtungsweise der dynamischen Geodäsie muß man sich dessen bewußt sein, daß die erhaltenen horizontalen bzw. vertikalen Koordinatenänderungen neben den unvermeidlichen Meßfehlern auch zahlreiche geodynamische Wirkungen ent-

halten und nur in besonderen Ausnahmefällen eine Verlagerung gleicher Größe des Oberflächenpunktes in horizontalem bzw. vertikalem Sinne bedeuten. Jede beobachtete Koordinatenänderung *enthält also* (im weiteren von den Meßfehlern abgesehen) *neben den wirklichen Punktbewegungen auch die zeitliche Änderung der entsprechenden Elemente des Bezugssystems*. Bei der heutigen Zuverlässigkeit der Messungen darf jedoch deren Größe kaum vernachlässigt werden. Folglich kann aus den beobachteten horizontalen bzw. Höhenkoordinatenänderungen nur dann auf wirkliche Bewegungen geschlossen werden, wenn die zeitlichen Änderungen aller eine Rolle spielender Elemente des Bezugssystems wenigstens mit einer der Meßzuverlässigkeit entsprechenden Genauigkeit bekannt sind und berücksichtigt werden können. Solang das nicht der Fall ist, hat man — mathematisch gesprochen — eine einzige Gleichung mit mehreren Unbekannten!

Für eine sachliche Untersuchung der vertikalen Oberflächenbewegungen muß man neben den wiederholten Nivellements und den dazugehörigen Schwere-messungen bzw. neben den wiederholten absoluten oder relativen Präzisions-schweremessungen die zeitlichen Änderungen des das Bezugssystem bildenden Schwerfeldes in der untersuchten Umgebung kennen. Da auf diese aus den Ergebnissen der Schweremessungen auf der Erdoberfläche nicht geschlossen werden kann, darf ausgesagt werden, daß *gegenwärtig keine Methode bekannt ist, nach der diese Aufgabe mit einer mit der Zuverlässigkeit des Nivellements übereinstimmenden Genauigkeit gelöst werden könnte*.

Die Untersuchung der horizontalen Bewegungen stellt eine noch etwas komplexere Frage dar. Die heute noch meistens durch wiederholte geographische Ortsbestimmung hoher Genauigkeit erhaltenen horizontalen (geographischen) Koordinatenänderungen enthalten neben den tatsächlichen Oberflächenbewegungen auch die zeitlichen Änderungen mehrerer Elemente des Bezugssystems (z. B. zeitliche Änderungen der Lage und Größe des Rotationsgeschwindigkeitsvektors, der Richtung des Schwerfeldes, d. h. der Richtung der örtlichen Vertikalen). In der Sprache der Mathematik haben wir wieder eine einzige Gleichung mit mehreren Unbekannten. Von diesen wird die zeitliche Änderung der Richtung des Schwerfeldes in der Zukunft nach wiederholten Messungen eines Gravitationsnetzes erforderlicher Dichte — mit der durch die bereits genannten grundsätzlichen Beschränkungen bestimmten Näherung — studiert und bis zu einem gewissen Grade in Betracht gezogen werden können. Die Untersuchung der relativen Lage der Drehachse und der Masse der Erde (der Polbewegungen) ist jedoch in klassischer Weise ebenfalls aufgrund von aus wiederholten geographischen Ortsbestimmungen abgeleiteten Koordinatenänderungen möglich. Sollen aus den Koordinatenänderungen die Lagenänderungen der Drehachse abgeleitet werden, müssen die anderen Wirkungen (Oberflächenbewegung, Schwerfeldänderung usw.) — in Ermangelung von Kenntnissen — als gleich Null betrachtet werden. Durch den Zuver-

lässigkeitsgrad dieser Näherung werden der Genauigkeit der in dieser Weise durchgeführten Bestimmung der Polbewegungen Grenzen gesetzt. (Hier möchten wir bemerken, daß das in der Bestimmung der Polbewegungen vorkommende, die örtlichen Eigenschaften der Beobachtungsstation enthaltende sog. Kimura-Glied — unserer Meinung nach — u. a. auch diese Wirkungen enthält.)

Aus dem Gesagten ist zu erkennen, daß für Präzisionsbestimmung der absoluten Bewegungen der Erdoberfläche noch weitere theoretische und praktische Forschungen erforderlich sind. Neben den Meßverfahren auf der Erdoberfläche erhalten auch auf diesem Gebiet die *kosmischen Methoden* eine wachsende Bedeutung. Von deren weiterer Entwicklung ist einerseits zu erwarten, daß eine hochgenaue Bestimmung der *auf den Massenmittelpunkt der Erde bezogenen* räumlichen Lage bzw. Lagenänderungen der Oberflächenpunkte möglich sein wird. Diese Werte werden mit guter Näherung als absolute Oberflächenbewegungen betrachtet werden können. (Die Näherung besteht darin, daß sich mit den zeitlichen Änderungen der Massenverteilung der Erde auch die Lage des Massenmittelpunktes in der Zeit ändert.)

Von der Entwicklung der kosmischen Methoden läßt sich andererseits die Bestimmung der *Polbewegungen* mit der erforderlichen Genauigkeit auf einem anderen Wege erwarten, die in einer nicht allzu fernen Zukunft erreichbar zu sein scheint.

Im Bereich der theoretischen Untersuchungen spielen die *geodynamischen* Forschungen eine entscheidende Rolle, die auf die Bestimmung der zeitlichen Änderungen des Erdschwerefeldes auf theoretischem Weg abgerichtet sind. Solang es nicht gelingt, für die Bestimmung der zeitlichen Schwerefeldänderung eine geeignete praktische (Meß-) Methode auszuarbeiten, stellt — unserer Meinung nach — der theoretische Weg nahezu die einzige Möglichkeit des weiteren Fortschritts dar. Um die absoluten Bewegungen der Erdoberfläche zu bestimmen, ist im Rahmen der geodynamischen Forschungen eine noch engere Zusammenarbeit der Geodäsie und Geophysik notwendig.

Zusammenfassung

Verfasser beschreibt die geodynamischen Prozesse, durch die die geodätischen Koordinatenbestimmungen beeinflusst werden. Er behandelt die horizontalen und vertikalen Oberflächenbewegungen, die Lage und Größe des Drehgeschwindigkeitsvektors beeinflussenden dynamischen Vorgänge sowie die zeitlichen Änderungen des Erdschwerefeldes. Es wird die Bedeutung dieser dynamischen Prozesse unterstrichen, wenn die absoluten Bewegungen der Erdoberflächenpunkte durch wiederholte geodätische Koordinatenbestimmungen erfaßt werden sollen. Verfasser betont, daß diese Aufgabe ohne eine bessere Kenntnis und Berücksichtigung der zeitlichen Schwerefeldänderungen nicht gelöst werden kann. Das erfordert jedoch weitere theoretische und praktische geodynamische Forschungen.

Schrifttum

1. BAGI, R.: Gravimetermessungen für Untersuchungen der Säkularänderungen des Schwerefeldes.* Geofizikai Közlemények, Budapest, 1966.
2. BARTA, GY.: The Connection between the Eccentricity of the Geomagnetic Field and the Triaxiality of the Earth. Acta Tech. Hung. XXXVII. 1961.
3. BARTA, GY.: Some New Data Concerning the Connection between the Triaxiality of the Earth and the Eccentricity of the Magnetic Field. Geomagnetica Lisboa, 1962.
4. BARTA, GY.: The Potsdam "g"-Value and Displacement of the Earth's Core. Bulletin d'Information, Paris, 4. 1963. 121—122.
5. BARTA, GY.: The Evolution of the Idea of the Secular Variation of the Gravity. Bolletino di Geofisica teorica ed applicata, Trieste, VII. 25. 1965. 3—5.
6. BARTA, GY.: Correspondence between the Shape of the Earth and some Geophysical Phenomena. Studia geoph. et geod. 9. Prag, 1965. 214—216.
7. BARTA, GY.: The Asymmetric Structure of the Earth and its Secular Processes. Österr. Zeitschrift für Vermessungswesen. Sonderheft 25. Wien, 1967.
8. BARTA, GY.: Über die Massenverteilung der Erde auf Grund der Geoidform. Acta Geodaet., Geophys. et Montanist. Acad. Sci. Hung., Budapest, Tom. 5. No. 3—4. 1970. 355—364.
9. BARTA, GY.: On the Hypothesis of the Secular Variation of Gravity Field. Bulletin Géodésique, Paris, No. 100, 1971, 165—173.
10. BIRÓ, P.: Vertical Earth's-Crust Movements and Secular Variations of the Earth's Gravity Field. Report presented at the XVth General Assembly of IUGG, Moscow, 1971.
11. BIRÓ, P.: Die vertikalen Erdkrustenbewegungen und Säkularvariationen des Erdschwerefeldes. Per. Pol. C. E. Vol. 16. (1972) No. 1—2. 3—9.
12. BIRÓ, P.: Der Einfluß von zeitlichen Änderungen des Erdschwerefeldes auf die Höhe von Nivellements festpunkten. Wiss. Mitteilungen aus dem Inst. für theor. Geod. der Univ. Bonn, No. 12, 1973.
13. BIRÓ, P.: Der Einfluß der Säkularänderung des Erdschwerefeldes auf die nivellierten Höhenunterschiede. 2. Internationales Symposium »Geodäsie und Physik der Erde« Potsdam, 1973.
14. BIRÓ, P.: Über einige Probleme der Höhenbestimmung im zeitlich variablen Schwerefeld. Per. Pol. C. E. Vol. 19 (1975) 1—2.
15. BIRÓ, P.: Vertical Crustal Movements and Time Changes of the Gravity Field. Report presented at the Symposium on Recent Crustal Movements of the XVIth General Assembly of IUGG. Grenoble, 1975.
16. BOULANGER, Y. D.: Does Gravity Change in Time? The Earth and the Universe. Joint Publ. Research Service, U. S. Dept. of Commerce, Washington D. C. 1965.
17. BOULANGER, Y. D.—SCHEGLOW, S. N.: On Secular Changes of Gravity. Bulletin Géodésique, Paris, No. 100, 1971, 175—178.
18. FAITELSON, A. SCH.—JURKINA, M. I.: Der Einfluß der Säkularänderungen des Erdschwerefeldes auf die Ergebnisse von wiederholten Nivellemente. Doklady Akademii Nauk SSSR, Vol. 213, No. 6. Moskau, 1973.
19. FAITELSON, A. SCH.—JURKINA, M. I.: Die Säkularänderungen des Schwerefeldes und die rezenten vertikalen Erdkrustenbewegungen. Geodesia i Kartografia, Moskau, No. 7. 1974.
20. GAPOSCHKIN—LAMBECK: 1969 Smithsonian Standard Earth (II). Smithsonian Astrophys. Obs. Spec. Report 313. Cambridge, Mass. 1970.
21. GROTEN, E.: Zur Definition astrogeodätischer Koordinatensysteme (mit ausführlichen Literaturhinweisen) ZfV. 1/1976.
22. GUTENBERG, B.: Physics of the Earth's Interior. Academic Press, New York, London, 1959.
23. HÖPFNER, J.: Planetare Dynamik der Erde. Vermessungstechnik 21/6. Berlin, 1973.
24. HONKASALO, T.: On the Use of Gravity Measurements for Investigation of the Land Upheaval in Fennoscandia, Fennia, 89. No. 1.
25. JEREMEJEV, W. F.—JURKINA, M. I.: Theorie der Höhe im Schwerefeld der Erde. Moskau, 1972.
26. JURKINA, M. I.—FAITELSON, A. SCH.: Säkularvariationen des Erdschwerefeldes und die Polbewegungen. Symposium der Arbeitsgruppen 6.2 und 6.6 KAPG, Prag, 1974.
27. KIVINIEMI: High Precision Measurements for Studying the Secular Variation in Gravity in Finland. Publ. of Finnish Geod. Inst. No. 78. Helsinki, 1974.
28. MELCHIOR, P.: The Earth Tides. Pergamon Press, Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt a. m. 1966.

29. MISKOLCZI, L.: Quartäre und rezente Erdkrustenbewegungen in Ungarn.* Geodézia és Kartográfia 26/5. Budapest, 1974.
30. MUNK, W. H.—MACDONALD, G. J. F.: The Rotation of the Earth. University Press, Cambridge, 1960.
31. PÉCSI, M.: Die Größe der quartären tektonischen Bewegungen des Donautalabschnittes in Ungarn.* Geofizikai Közlemények, Budapest, 1959.
32. PICK: Recent Movements and the Variations of the Earth's Gravity Field. 2nd Int. Symp. "Geodesy and Physics of the Earth", Potsdam, 1973.
33. ROCHESTER, M. G.: The Earth's Rotation. Paper Presented at the 2nd GEOP Research Conference, Columbus, 1973.
34. SCHLEUSENER, A.—TORGE, W.: Investigations of Secular Gravity Variations in Iceland. Zeitschrift für Geophysik, Würzburg, 37. 1971.
35. TORGE, W.: Geodäsie, Sammlung Göschen, Walter de Gruyter, Berlin, 1975.
36. VOGEL, A.: The Question of Secular Variations in the Earth's Gravity Field, Bulletin Géodésique, Paris, 88. 1968.
37. VOGEL, A. CH.: Über Ziele und Hilfsmittel geometrischer Präzisions-Nivellement. München, 1873.
38. ZEMAN: Vlijenie deformazi ekvipotenzialow na ismerenie prewyseni, Symposium KAPG, Smolenzke, 1974.

Prof. Dr. sc. techn. Péter Bíró, H-1521 Budapest

* In ungarischer Sprache.